

01168
7



Universidad Nacional Autónoma de México
División de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería

Precios de transferencia en una refinería

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestro en Ingeniería
Investigación de Operaciones

Presenta:

Rafael García Jolly

Asesor:

Dr. Sergio Fuentes Maya

294738

Ciudad de México, julio 2001



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



Miembros del jurado

Presidente: Dr. Marco Antonio Murray Lasso

Vocal: Dr. Sergio Fuentes Maya

Secretario: Dra. Idalia Flores de la Mota

1er. Suplente: M. en I. Javier Suárez Rocha

2º. Suplente: Dr. Ricardo Aceves García



Agradecimientos y algo más

¡Qué triste es
no tener palabras que decir
qué escribir, qué sentir!
Se vuelve uno
más seco que las paredes,
más frío que el suelo
más bajo que el techo.

Me atrevo a asegurar que esta sección será la única que leerá todo aquel que tenga esta tesis en sus manos, de modo que quiero escribir algo más que una lista de personas a las cuales quiero, y debo, agradecer su participación para haber terminado, después de 7 años, este trabajo. No quiero poner nombres porque cualquier exclusión, e incluso el orden de aparición en la lista, puede interpretarse como favoritismo. Cada uno de ustedes conoce perfectamente el lugar que ocupa en mí, el apoyo y sacrificio que me ha brindado, el efecto que en mí ha producido y qué tanto de lo que soy es obra suya.

Existen personas que cruzan por nuestro camino por un motivo, cumplen su misión y simplemente desaparecen. A cada una de ellas les agradezco ese cruce incidental y las enseñanzas, buenas y malas, que su efímero paso ha dejado en mí.

Otras personas aparecen en nuestra vida y permanecen junto a nosotros por un período, corto o largo, pero finalmente y sin saber por qué, desaparecen. Durante la estación en que compartimos con ellas parte de nosotros, adquieren una importancia tal que llegamos a girar en torno a un eje común. A estas personas tengo más que agradecerles, pues ellas han escrito en las páginas de mi espíritu muchos de los capítulos que hoy forman el libro que soy.

Finalmente, hay personas que llegan a nuestra vida y se crea un lazo afectivo que las mantiene en ella. Esta estancia prolongada dentro de nosotros y con nosotros, les da el privilegio de diseñar la portada del libro. A estas personas, más que agradecerles su colaboración para la realización de este trabajo, se los dedico.

Rafael García Jolly



Resumen del trabajo

En este trabajo se propone la utilización de los precios sombra asociados a un problema de optimización para determinar precios de transferencia en una refinería. Se utiliza una técnica de aproximaciones sucesivas para la solución del problema matemático y se trata de comprobar la consistencia del método con los resultados obtenidos mediante otras técnicas.

Los precios obtenidos son utilizados en diferentes casos de aplicación, en los cuales se demuestra la validez de los resultados en la toma de decisiones, así como en el análisis económico de situaciones particulares.

El primer paso en la estrategia utilizada es construir un modelo matemático representativo de la industria de refinación en México, en el que se incluye la estructura necesaria para disponer de las ecuaciones que representen a las restricciones que se desean evaluar. Para tal fin se utiliza PIMS (Process Industries Modeling System), de Aspen Technology, Inc., software especializado en este tipo de industria y que es utilizado en Petróleos Mexicanos desde 1987.

Una vez desarrollado el modelo de optimización, se hace una sensibilidad a los resultados dependiendo de diferentes políticas de operación en la refinería, con el fin de determinar cómo estas variables exógenas al modelo intervienen en los resultados económicos del refinador, así como en la evaluación de los precios de transferencia.

Se presentan cuatro casos de aplicación, en los cuales se ejemplifica la problemática que puede surgir en la evaluación de insumos, productos, especificaciones y productos intermedios. También se presentan las diferencias entre la aplicación dual y otros métodos de evaluación y la sensibilidad a los resultados cambiando políticas operativas en la refinería.

Los resultados obtenidos mediante la metodología propuesta son adecuados. Sin embargo, la complejidad del modelo matemático conlleva la desventaja de que no será fácilmente aplicable y transparente por cualquier usuario, además de que la sensibilidad a los diferentes escenarios tiene un impacto importante en los precios sombra y permite inducir los resultados a favor de alguna de las áreas involucradas.



Abstract

This work's proposal is to use shadow prices from an optimization problem to determine transfer prices in a refinery. The solution method is Successive Linear Programming and the results were compared with those from traditional techniques.

The obtained prices are applied in different application cases, validating their application in economic analysis.

The first step is to build a representative mathematical model for Mexican refining industry, including the needed structure to model required constraints. PIMS (Process Industries Modeling System), by Aspen Technology, Inc., was selected due to its direct application in the refining industry. This software has been used at Petroleos Mexicanos since 1997.

Once the model was ready, some sensitivity to operational politics and external variables were made to determine their influence in transfer pricing and refinery economics.

Four application cases are shown to summarize transactions for feed stocks, finished products, intermediate streams and qualities as well as the impact in transfer prices due to operational constraints.

This methodology allows to obtain right transfer prices. Therefore, the model complexity has a disadvantage in order to apply and reply by any user. On the other hand, the results can be induced by changing some constraints in order to benefit the interest from one of the evaluated areas.



Precios de transferencia en una refinería

Índice

Objetivo	8
Introducción	9
1. Marco de referencia	11
1.1. Trabajos anteriores	11
1.2. La industria petrolera nacional	13
1.3. El mercado petrolero internacional	16
1.4. Precios	18
2. Construcción del modelo de refinación	36
2.1. Infraestructura	36
2.2. Insumos y productos	39
2.3. Escenarios económicos y políticos	45
3. PIMS: La herramienta	51
3.1. Utilización de PIMS	51
3.2. Notación de PIMS	53
3.3. Definición de propiedades	56
3.4. Generación de ecuaciones y recursión distributiva	59
3.5. Limitaciones de PIMS	73
4. Metodología propuesta	75
4.1. Métodos tradicionales de evaluación	75
4.2. Análisis dual (precios sombra)	80
4.3. Selección e interpretación de ecuaciones	85



5. Casos de aplicación	91
5.1. Consumo adicional de crudo Maya	92
5.2. Exportación de productos a Guatemala	95
5.3. Cambio de especificación en el diesel	99
5.4. Competencia con productos petroquímicos	102
5.5. Comparación entre métodos	105
5.6. Escenarios de análisis	108
Conclusiones	112
Bibliografía	115
<u>Apéndices</u>	
A. Herramientas de la Investigación de Operaciones	116
A.1. Modelación, Optimización y Simulación	116
A.2. Optimización de funciones de una variable	120
A.3. Optimización de funciones multivariantes	123
A.4. Métodos Numéricos	128
A.5. Dualidad y Sensibilidad	137
B. Modelo del mezclado de naftas	141
B.1. Modelo en tablas de PIMS	141
B.2. Solución numérica	146
B.3. Solución truncando distribuciones	152



Objetivo

El objetivo de este trabajo es proponer una metodología para el cálculo de precios de transferencia en una refinería, y su relación con los costos de insumos y productos.

La estrategia es: Primero la construcción de un modelo matemático para optimizar la operación de una refinería típica, el cual deberá ser representativo y confiable. Se construirá un modelo de una refinería típica de la Costa Norte del Golfo de México, y que represente la estructura del Sistema Nacional de Refinación, (SNR).

El algoritmo para la solución del problema de optimización no es el objetivo de este trabajo, sino la interpretación de los resultados.

Existe una gran variedad de software especializado en la solución de problemas de programación matemática que se podrán utilizar, una vez planteado el modelo. El software seleccionado para este trabajo es PIMS (Process Industries Modeling System), de Aspen Technology, Inc. que tiene una aplicación directa en la optimización de operaciones relacionadas con la industria del Petróleo, y que se emplea fuertemente en Petróleos Mexicanos.

El segundo paso será la definición del entorno económico y político que determine las restricciones que se impondrán al sistema. En este caso se tomarán diferentes escenarios para evaluar su efecto directo en los precios internos de transferencia y su utilización para la toma de decisiones, así como la consistencia de los resultados obtenidos.

El análisis se basará en la determinación de precios sombra derivados de un problema de programación matemática aplicando la teoría de dualidad.

Se muestra la ventaja de contar con precios internos de transferencia, utilizándolos para determinar el efecto económico derivado de cambios estructurales y de operación en la refinería, confrontando los resultados con los que se obtengan al aplicar una metodología tradicional de evaluación.

Se muestra la aplicación del análisis dual, que conduce a los mismos resultados que una evaluación tradicional, con la ventaja de que se obtienen todos los resultados en una misma corrida.



Introducción

La ventaja de contar con un sistema de evaluación de precios de transferencias externas resulta obvia, ya que de éstos emanan los costos en el mercado de los productos que se venden, así como de los insumos al proceso. Al evaluar los precios de transferencias externas sabremos el costo máximo al cual podemos comprar un cierto insumo, o bien el precio mínimo de venta de nuestros productos terminados.

Los precios de transferencias internas, sin embargo, no tienen una utilidad aparente, ya que las corrientes de proceso intermedias no son vendidas al mercado ni pueden comprarse en la mayoría de los casos.

Cuando se tiene un proceso cualquiera conformado por varios bloques independientes, es posible conocer los resultados financieros de cada uno de los bloques por separado, de modo que sepamos cuál de ellos es más rentable que el otro. En este caso se podrán tomar decisiones aisladas y optimizar cada uno de los bloques por sí mismo.

En los procesos reales se tiene, sin embargo, una interdependencia entre los diferentes bloques, los cuales intercambian materiales y energía para el buen funcionamiento global del sistema. En este caso es deseable conocer los resultados independientes de cada uno de los bloques, de modo que se conozca si existe un subsidio de una parte que no sea rentable por el resto del proceso. Los precios de transferencia internos serán, en este caso, el eje de la evaluación de cada uno de los subsistemas que se analizan.

En la industria petrolera esta situación es permanente. La torre de destilación procesa petróleo crudo, el cual se compra del exterior, pero ninguno de sus productos son comercializados, sino que se transfieren a los otros equipos para su procesamiento. Los precios de estas transferencias determinarán el grado de rentabilidad de la torre de destilación, de modo que sí es útil contar con una evaluación de los mismos.

A lo largo de todo proceso los materiales van acumulando valor. El cálculo del valor agregado en un proceso determinado se podrá obtener fácilmente si se conocen los precios de transferencia internos del sistema, que además nos permitirán conocer de manera directa la rentabilidad del proceso y una mejor asignación de recursos.

Otra aplicación práctica de los precios de transferencia internos es la evaluación económica. Mediante un análisis de los precios de transferencia internos podremos calcular el beneficio bruto debido a la ejecución de un proyecto determinado y posteriormente evaluar sus índices financieros.



Este trabajo puede dividirse en tres bloques principales, que son la descripción del marco de referencia, metodología propuesta y casos de aplicación.

En el capítulo 1 se hace un resumen bibliográfico, una breve historia de la industria petrolera nacional, los mercados internacionales y los precios de petróleo crudo y productos petrolíferos.

En el capítulo 2 se establecen las bases para la construcción del modelo de refinación, disponibilidad de materias primas, demanda y calidad de productos y escenarios sobre las políticas de operación de la refinería.

El capítulo 3 describe el funcionamiento de PIMS, su nomenclatura, la estructura matemática y construcción de ecuaciones, basándose en un ejemplo simple de mezclado que se resuelve en el apéndice B.

El capítulo 4 plantea la estrategia que se propone aplicar para la determinación de precios de transferencia, una comparación con los métodos tradicionales y la interpretación de diferentes situaciones de precios sombra en el modelo matemático.

El capítulo 5 presenta resultados para casos seleccionados relativos a materias primas, productos, especificaciones, corrientes intermedias y el impacto que tienen los diferentes escenarios sobre los valores de los precios sombra.



1. Marco de referencia

En este capítulo se hace una breve descripción de trabajos relacionados, la historia de la industria petrolera en México, los mercados internacionales y la determinación de precios.

En la sección 1.1, trabajos anteriores, se hace un resumen de trabajos similares, en los cuales se aplican técnicas de programación matemática en la industria de refinación y otros que proponen la determinación y aplicación de precios de transferencia.

En la sección 1.2, la industria petrolera nacional, se presenta una breve historia de la industria petrolera en México, a modo de situar la posición actual de Petróleos Mexicanos.

En la sección 1.3, el mercado petrolero internacional, se hace una referencia a los mercados internacionales de petróleo crudo y de productos petrolíferos.

En la sección 1.4, precios, se habla sobre los mecanismos de precios en los mercados petroleros internacionales y sobre la influencia de éstos en el mercado nacional.

1.1. Trabajos anteriores

En 1953, Alan S. Mane publica un artículo titulado "*A Linear Programming Model of the U.S. Refining Industry*". En este artículo explica el primero de una serie de modelos construidos para el análisis de la economía norteamericana. Presenta el proceso de refinación como tres bloques de procesos: destilación, transformación y mezclado. La función objetivo que maneja es la maximización de la producción de la refinería, sujeto a restricciones de capacidad y disponibilidad de crudos, producción fija de turbosina y composición fija de la mezcla de los productos restantes. El aspecto de la calidad de la producción lo maneja segregando los cortes de cada crudo con nombres diferentes, y define en qué productos pueden mezclarse. El modelo consiste en un problema de programación lineal.

Los resultados presentados en este artículo muestran que no es equivalente un barril de turbosina que uno de la mezcla de productos, sino que se deben dejar de producir 1.82



barriles de la mezcla de productos para producir un barril extra de turbosina, con un límite tecnológico de 3500 barriles de turbosina.

En 1958, E. M. Ventura, del Ministerio Francés de Industria y Comercio, presenta "*Etude de la Structure Optimale de l'Industrie de Raffinage et des Transports de Produits Pétroliers*". Dentro del estudio incluye la optimización del sistema de distribución de petróleo crudo a las refinerías y el suministro de productos. Analiza la mejor opción para la localización de una nueva refinería y la rentabilidad de nuevos ductos para productos petrolíferos y para petróleo crudo.

El análisis se basa en la minimización del costo de suministro de la demanda de petrolíferos en el punto de consumo, manteniendo fija la demanda y determinando la mejor alternativa de transporte, proceso y producción.

En 1965 Emanuel Singer publica "*Simulation and Optimization of Oil Refinery Design*". La principal aportación de este trabajo es la utilización de programación no lineal para el diseño de una refinería mediante simulaciones rigurosas y mezclado de productos de acuerdo a especificaciones de calidad. La función objetivo que maneja consiste en la maximización de la utilidad después de la amortización.

En su análisis combina la utilización del método simplex y una ponderación de los gradientes para obtener la dirección hacia el punto óptimo. Posteriormente se afinan los datos mediante ejercicios de simulación.

En 1971 B. S. Jung, W. Mirosh y W. H. Ray publican "*Large Scale Optimization Techniques Applied to Chemical and Petroleum Process*". Los autores prueban y comparan la utilización de diferentes algoritmos de programación no lineal para la optimización de una refinería. Además utilizan la descomposición del problema y el concepto de caja negra.

En este estudio comparan la precisión de los métodos contra la utilización de tiempo y memoria en la resolución del sistema, recomendando métodos simplificados para la obtención rápida de resultados. Las desventajas que en aquel tiempo existían para el



método de descomposición de problemas grandes carecen de gran importancia hoy en día, ya que los recursos de cómputo disponibles son mayores y más rápidos.

En 1974 A. Rashad Abdel-khalik y Edward J. Lusk publican "*Transfer Pricing - A Synthesis*". En este artículo plantean la necesidad de evaluación de precios internos de transferencia y comparan la utilización de varios métodos para su evaluación.

Primeramente calculan estos precios mediante un modelo económico, considerando esquemas de competencia perfecta e imperfecta y monopólicas dentro de un esquema de mercado para el producto intermedio. Después utilizan la programación matemática y los valores marginales; encontrando a este último análisis como el más poderoso para la determinación conjunta de varios precios y bienes transferidos.

1.2. La industria petrolera nacional

En los últimos años el mundo ha experimentado grandes cambios. Han desaparecido referencias centrales que manifestaron la realidad del mundo durante la primera mitad del siglo pasado y han sido reemplazadas por nuevos esquemas y perspectivas internacionales. El mundo de hoy ya no está dividido en grandes bloques antagónicos ni entidades independientes, sino que se basa en el fortalecimiento y expansión de las relaciones internacionales. México no se ha quedado al margen de estos cambios y debe buscar nuevos esquemas para sobrevivir y crecer dentro de este mundo globalizado, como lo son el Tratado de Libre Comercio de América del Norte, firmado con Estados Unidos y Canadá, y el reciente Acuerdo Comercial y Político firmado con la Unión Europea.

La industria del petróleo está estrechamente vinculada con el desarrollo del País, por lo que su carácter prioritario llevó a Petróleos Mexicanos (Pemex) a buscar nuevos esquemas para un mejor funcionamiento, lo cual redundará directamente en el aprovechamiento de los recursos petroleros nacionales.

La industria del petróleo en México tiene sus orígenes en 1890 cuando el presidente Porfirio Díaz promueve la inversión extranjera y se inicia la exploración por compañías de Estados Unidos y Gran Bretaña. En mayo de ese mismo año comienzan las actividades



del pozo Cerro de la Paz, perforado por Standard Oil de Nueva Jersey. En 1905 esta empresa es prácticamente un monopolio, el gobierno mexicano fomenta la competencia otorgando concesiones a compañías británicas.

En 1917 se promulga la Constitución y se concede el derecho de propiedad de todos los recursos de hidrocarburos a la nación mexicana en el artículo 27. Sin embargo, aumenta la participación de empresas extranjeras y se incrementa la producción de crudo, de tal modo que México alcanza, en 1927, el segundo lugar en producción a nivel mundial. Este incremento de actividades promueve la demanda de mano de obra y la formación de sindicatos.

Este panorama se mantiene hasta el 18 de marzo de 1938, fecha en la cual el Presidente Lázaro Cárdenas expropia todos los intereses extranjeros relacionados con el petróleo y nacionaliza la industria petrolera, se crea Petróleos Mexicanos.

Las reservas de México disminuyen al grado de que en 1970 somos importadores netos de productos petrolíferos. En 1972 se descubren nuevas reservas en Chiapas, Tabasco y Campeche, de modo que en 1974 México reanuda sus exportaciones de crudo. En 1977 Pemex expande sus actividades en petroquímica, desplazando importaciones.

En 1980 y 1981 caen los precios internacionales del petróleo, afectando fuertemente la economía nacional. Pemex participa con el 37% de la deuda externa de México.

En 1989 es encarcelado Joaquín Hernández Galicia, líder sindical petrolero, y en 1990 Pemex despide a 40000 trabajadores. El Presidente Carlos Salinas de Gortari anuncia el cierre de la refinería de Azcapotzalco por cuestiones ecológicas y en 1993 se anuncia la Reestructuración de Pemex en 4 organismos subsidiarios: Pemex Exploración y Producción, Pemex Refinación, Pemex Gas y Petroquímica Básica y Pemex Petroquímica; con un corporativo como órgano rector. En 1995 se anuncia la privatización de la Petroquímica Secundaria, sin gran éxito hasta la fecha.

Antes de esta reestructuración, Petróleos Mexicanos era una empresa que englobaba desde la exploración y explotación de los campos petroleros, hasta la venta de productos petrolíferos y petroquímicos. Con este esquema Pemex era el proveedor y consumidor de los diferentes insumos a las plantas de proceso, por lo que el costo que tuvieran dentro del sistema no tenía influencia en los resultados finales de la paraestatal, teniendo como resultado final el subsidio de las áreas ineficientes por parte de aquéllas que aisladas representan un atractivo económico alto.



Con esta nueva estructura se requiere una evaluación justa y equilibrada de los precios de transferencia de productos entre las diferentes dependencias, de modo que los estados de resultados individuales de cada una de ellas reflejen su nivel de rentabilidad real. También se abandonan los objetivos volumétricos y de autosuficiencia por políticas de maximización del valor económico a largo plazo, otorgando una autonomía de gestión a cada una de las empresas subsidiarias.

En 1995 se elabora un ambicioso plan de negocios que persigue el fortalecimiento de Pemex Refinación como una empresa rentable, estableciendo proyectos de reconfiguración y modernización en las diferentes refinerías, comenzando por la refinería de Cadereyta, Nuevo León, en donde se incluyen equipos de alta tecnología para incrementar los volúmenes de productos de alto valor y elevar los márgenes operativos por barril de crudo procesado.

El principal insumo en la industria de refinación es el petróleo crudo, para el cual existen generalmente cotizaciones en el mercado internacional, de modo que pueden tomarse como referencia estos precios en el crudo que consume Pemex Refinación. Existen otros insumos que son necesarios para poder alcanzar la calidad de los diferentes productos terminados para los cuales no siempre existe un mercado establecido y, por lo tanto, no se cuenta con alguna referencia comercial en su transacción, de modo que será necesario establecer un precio adecuado para tales insumos.

Uno de los objetivos de Pemex Refinación, como monopolio, es satisfacer la demanda nacional, al mínimo costo, con los niveles de calidad requeridos por los mercados y en un entorno que garantice el cumplimiento de los estándares de protección ambiental y seguridad industrial.

Para el cumplimiento de tales objetivos es necesario, frecuentemente, el intercambio de corrientes intermedias entre refinerías y con otros organismos subsidiarios de Pemex, para los cuales tampoco existe un precio de referencia, pero que sí afectan los márgenes de cada una de las refinerías.

La determinación de precios que actualmente se utiliza para estas transacciones que no cuentan con una referencia internacional se basa en mecanismos que consideran un producto de referencia con un ajuste por calidad, que no siempre es congruente con los objetivos de Pemex Refinación. Por ejemplo, el exceso de diluyente para combustóleo en una refinería se evalúa tomando como referencia el diesel y ajustando de acuerdo al



contenido de azufre, pero su calidad es inferior de modo que puede interpretarse, de manera errónea, un beneficio en la producción de un volumen que no tiene mercado.

La asignación de precios para estas corrientes intermedias debe considerar todas las restricciones existentes en el proceso de producción, distribución y comercialización, así como las políticas de operación de la empresa. El método que se propone en este trabajo se basa en utilizar el precio sombra del problema de optimización de la refinería y considerando las diferentes restricciones del sistema.

1.3. El mercado petrolero internacional

Alrededor del mundo existen varios mercados en los cuales se llevan a cabo transacciones de petróleo crudo y sus derivados. Estas transacciones se realizan mediante diferentes mecanismos de precios dependiendo de la naturaleza de la operación y de la negociación de las partes interesadas. Este tipo de mercados en los cuales se realiza una transacción física se denomina "spot" y será el que nos interese por representar actividades de comercio reales. Existe además de este tipo de mercado el de futuros o derivados, en donde las transacciones acordadas no se realizan físicamente y sólo representan movimientos en papel.

Si bien la mayor parte de los volúmenes de comercio petrolero internacional se realizan bajo el amparo de contratos de suministro, no es despreciable el nivel de transacciones que se realizan directamente en un mercado abierto, sujeto a fluctuaciones naturales de oferta y demanda.

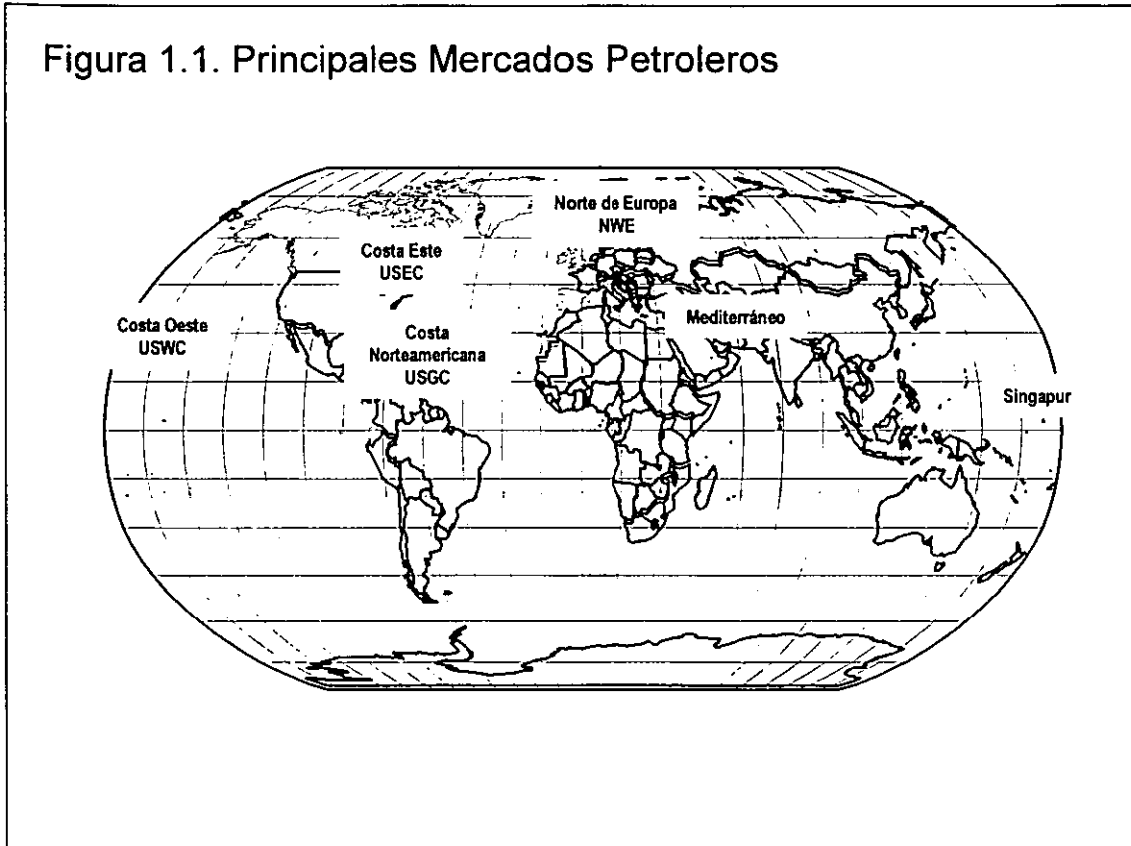
En la figura 1.1 se muestran los principales mercados petroleros "spot" a nivel mundial. Existen publicaciones que registran en cada momento los montos de cada una de las transacciones que se realizan en los mercados "spot", tanto en volumen como en precio, y que servirán como referencia para los comercializadores.

La principal diferencia que encontraremos en los mercados de petróleo crudo y de productos es el número de oferentes. La oferta de crudo corresponde a una cantidad relativamente pequeña de países productores de crudo, los cuales determinan los niveles de cada mercado y ejercen cierta influencia en los precios, que derivan de alianzas entre



los diferentes países productores de petróleo como la OPEP; los acuerdos entre Arabia Saudita, México y Venezuela; etc.

Figura 1.1. Principales Mercados Petroleros



Para los productos petrolíferos también se observa un gran volumen de transacciones en mercados "spot". El nivel tecnológico del refinador, como se verá más adelante, juega un papel fundamental en la determinación de los niveles de oferta de productos y, por ende, en sus precios.

La oferta de productos petrolíferos corresponde más bien a compañías que a países, de modo que la libre competencia entre los diferentes productores es más agresiva y las variaciones en el mercado no se verán influenciadas por alianzas comerciales o grupos de refinadores.

El sector energético es de vital importancia en la economía mundial y la estabilidad en los mercados petroleros conlleva un impacto positivo en el entorno internacional. Si por



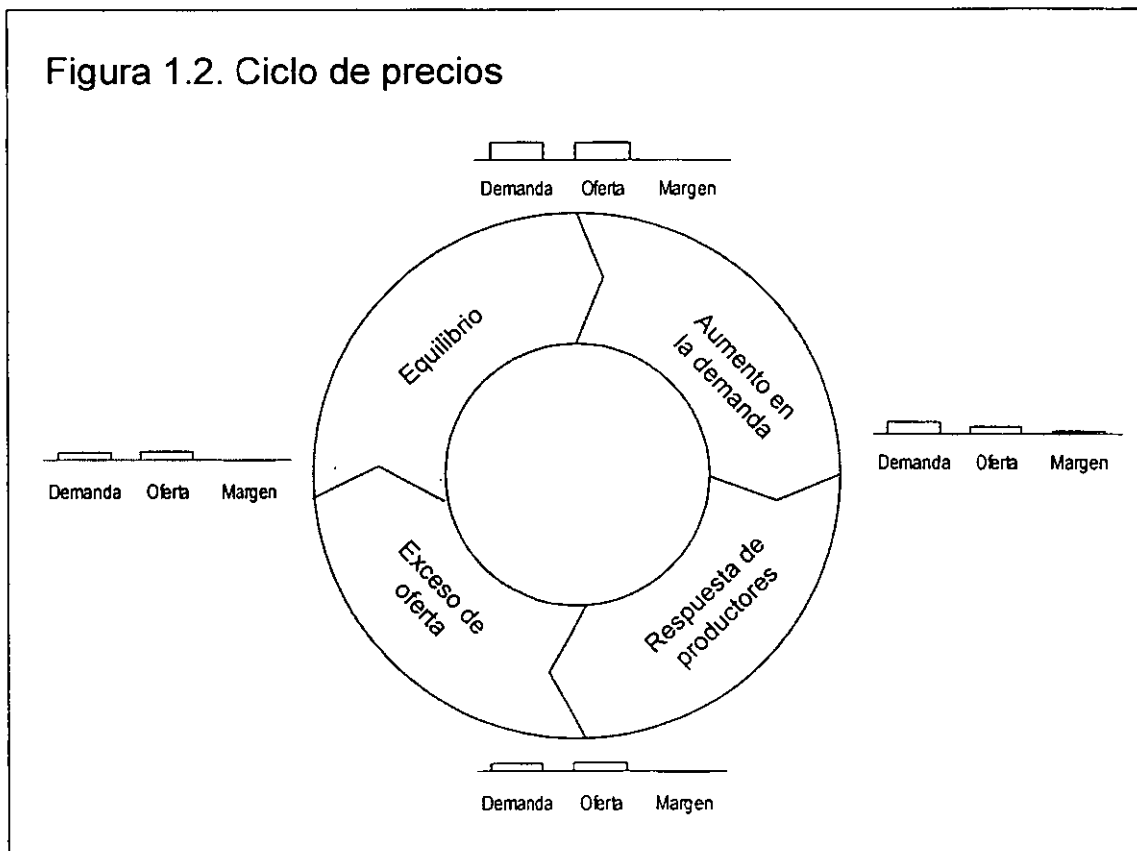
el contrario, el sector petrolero se encuentra con dificultades, ésto acarreará trastornos económicos a nivel mundial.

Existen factores adicionales que mueven fuertemente a la economía del petróleo, como los políticos. Basta con recordar que los precios del petróleo crudo llegaron a los 50 dólares por barril durante la guerra del Golfo Pérsico en 1991.

1.4. Precios

Ciclos de precios

La búsqueda del equilibrio entre la oferta y la demanda genera un ciclo de precios, como puede observarse en la figura 1.2.





El crecimiento económico deriva en un incremento de la demanda, de modo que los precios se elevan y los productores más ineficientes, o marginales, son capaces de cubrir sus altos costos de producción para satisfacer la creciente demanda. En este momento los márgenes para los productores son tan atractivos que se justifica la inversión en incremento de capacidad, de tal suerte que la oferta crecerá hasta cubrir la nueva demanda, pero no se detendrá allí, sino que buscará nuevamente desplazar a los productores marginales.

El mayor incremento de producción derivará en un exceso de oferta con respecto de la demanda, generando una baja en los precios. Estos precios bajos no serán suficientes para cubrir los costos de algunos productores, que tendrán que parar su producción hasta llegar al equilibrio.

El productor marginal de petróleo crudo será aquel que únicamente recupere los costos de extracción, pero sin reportar utilidad en sus operaciones. Estos costos están directamente asociados con la geología de sus yacimientos petrolíferos como lo es la profundidad del pozo, dureza de la tierra y calidad del mismo crudo.

La relación entre el precio y la calidad de los crudos no es una constante, de modo que podremos tener diferenciales de precios entre crudos ligeros y pesados con grandes variaciones. De igual manera podremos observar cambios significativos entre los precios relativos de los diferentes productos.

La dinámica de los precios arrojará temporadas de márgenes amplios y otras de márgenes estrechos, que serán determinantes más para la industria de refinación que para los productores de crudo.

El volumen y calidad de los productos que se pueden obtener del petróleo crudo dependerá tanto del tipo de crudo que se insume a la refinería como del nivel tecnológico de ésta. En la tabla 1.1 se muestra el efecto que la configuración de la refinería tiene en el perfil de productos obtenidos. El margen de la refinería se verá afectado al obtener productos de mayor valor, pero también por procesar un crudo más barato.

En la figura 1.3 se ilustran los márgenes obtenidos en las diferentes configuraciones de refinerías, así como el impacto que sobre éstos tienen los diferenciales de precios entre productos ligeros y pesados. Obsérvese que los márgenes de la refinería compleja son más sensibles a éstos dado su alto nivel de conversión.



Unidades de proceso	Compleja con Hydrocracking	Coquización	FCC/Alquilación	FCC	Hydroskimming (HSK)
Destilación primaria	X	X	X	X	X
Destilación al vacío	X	X	X	X	X
Reformación catalítica	X	X	X	X	X
FCC	X	X	X	X	
Alquilación	X	X	X		
Coquizadora	X	X			
Hydrocracker	X				
Rendimientos (% vol)					
Gas L.P.	3	2.8	0.5	3	3
Gasolina	62	57	38.5	36	31
Destilados	29	34	26	26	24
Residuales	7	7	34	34	41
Valor relativo de productos	1.00	0.97	0.89	0.84	0.82

Debido a los ciclos presentados anteriormente, el refinador marginal para el mercado de Estados Unidos se encontrará en una configuración HSK, FCC y FCC-Alquilación en períodos que oscilan entre 10 y 15 años.

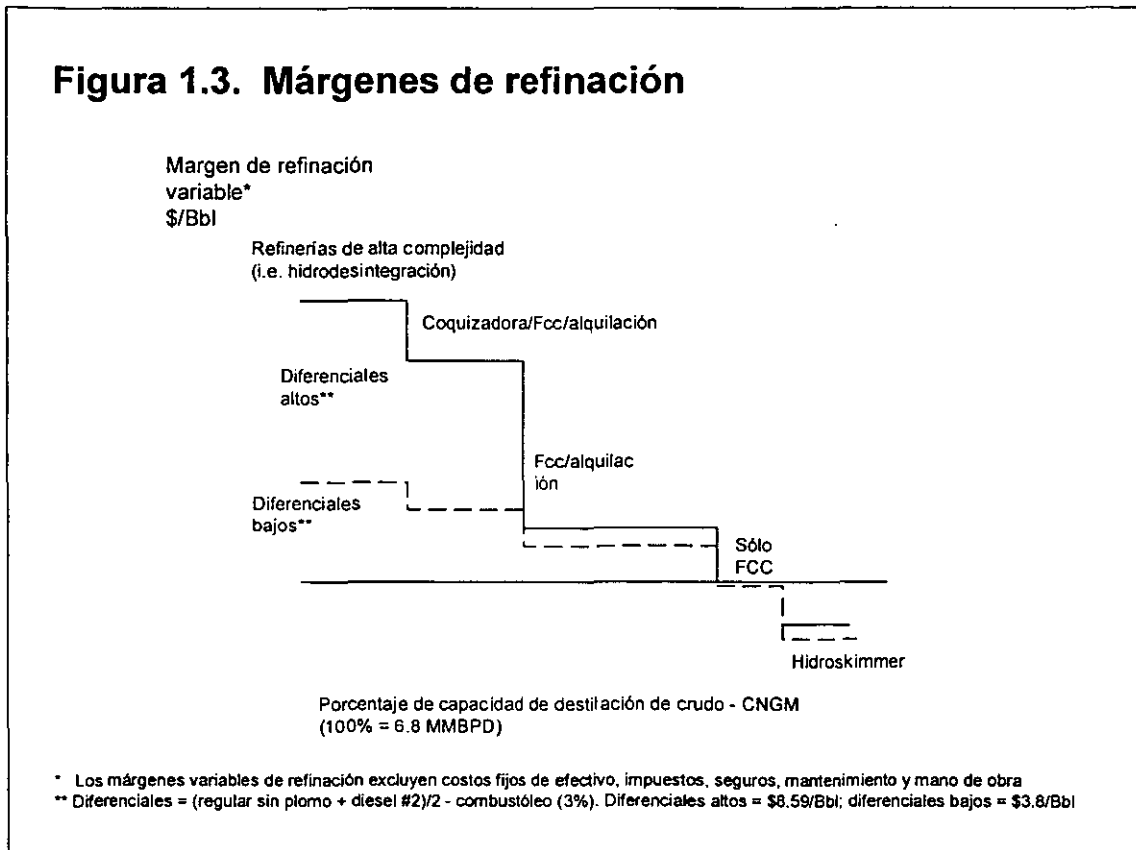
Precios de referencia

En las diferentes publicaciones en donde se registran los movimientos de los mercados "spot" podremos encontrar los valores mínimo y máximo de las transacciones de un día para cada producto y medio de transporte. Generalmente se consideran estas cotizaciones como referencia para las operaciones realizadas bajo contrato o bien para preciar productos no registrados en dichos mercados, con su respectivo ajuste por calidad.



Por ejemplo, el precio para los crudos mexicanos se calcula en función de las cotizaciones "spot" de los diferentes mercados a los cuales se destina. De esta manera se trata de emular la competencia del crudo con los diferentes crudos disponibles en la zona.

Figura 1.3. Márgenes de refinación



Debido a que los precios de referencia están dados en un mercado determinado, será necesario también considerar los costos de transporte en el caso que el producto de interés se encuentre en alguna región geográfica diferente a la del mercado "spot" referenciado. Al considerar el medio de transporte se podrá determinar el costo total de la posible operación desde diferentes mercados de referencia.

Supongamos que se necesita saber el precio al cual vender una gasolina regular sin plomo en la costa del Pacífico en Guatemala. De acuerdo a su cercanía, el mercado "spot" de referencia natural sería el de California, pero las alternativas de suministro pueden ser varias:



- a. Desde California con transporte marítimo.
- b. Desde Houston con transporte marítimo a Guatemala y transporte terrestre del Atlántico al Pacífico.
- c. Desde Houston con transporte marítimo hasta el Pacífico en Guatemala atravesando el canal de Panamá.

El precio que nos interesa será el menor entre las tres alternativas, que corresponde a la opción más barata de suministro en este lugar, que no necesariamente será el mercado de California a pesar de su cercanía geográfica, sino que puede darse el caso que el producto en Houston aún considerando el transporte vía canal de Panamá sea más barato que el de California. Esta situación se dio en los primeros meses de 1998.

En el ejemplo anterior se ve claro que el diferencial entre las cotizaciones de un mismo producto en diferentes mercados resulta de vital importancia para determinar cuál debe ser el precio de referencia más adecuado a las operaciones comerciales de la refinería. Por tal motivo no debemos perder de vista las diferentes alternativas de suministro.

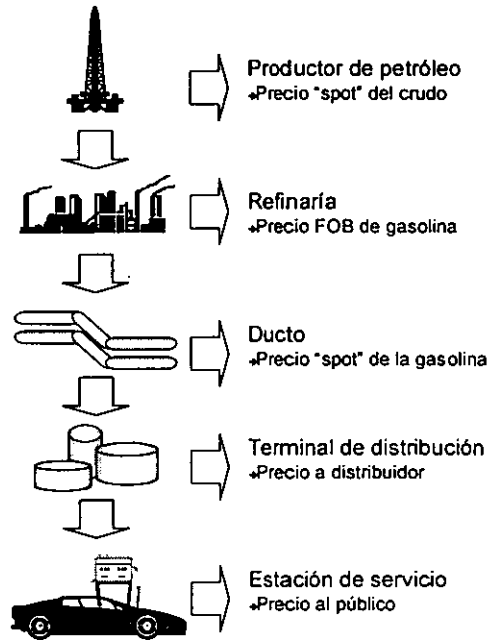
Debe tenerse cierta precaución al tomar los precios de referencia de un mercado determinado, pues puede incurrirse en errores tanto de disponibilidad de productos como de calidad requerida en dicho mercado, sobre todo al tratarse de productos ajustados por calidad. Si los volúmenes de la transacción a evaluar son muy grandes, éstos pueden sobrepasar la elasticidad de la oferta y la demanda, provocando un movimiento en los precios.

De acuerdo a la naturaleza de las operaciones encontraremos diferentes niveles de precios. En la figura 1.4 se observan estos niveles de precios para la producción y distribución de la gasolina.

La refinería deberá comprar el crudo referenciado a un mercado "spot" para ese crudo o mediante una fórmula que considere un crudo marcador y su respectivo ajuste por calidad. La gasolina que entrega la refinería a través de un ducto hacia el centro de distribución será el precio "spot" para esa gasolina, considerando que se entrega por tubería. En la terminal se tendrá un precio de distribuidor y, finalmente, el consumidor final encontrará el precio al público en la estación de servicio.



Figura 1.4. Aplicación de los diferentes niveles de precios.



Ajustes por calidad

Hasta este momento se ha hablado de los diferentes mercados y la disponibilidad de información sobre los precios de cada transacción realizada, de los diferenciales y su efecto en los márgenes de refinación. Sin embargo, no siempre podremos encontrar un mercado en el cual se haya realizado una venta del producto específico que nos interesa. Por ejemplo, México es el único productor de crudo Maya en el mundo, de modo que no se tiene registro de transacciones de este crudo en ningún mercado.

De igual manera los crudos que se extraen de cada yacimiento son únicos por sus características.

Para resolver este problema se han adoptado una serie de crudos marcadores cuyas transacciones en mercados "spot" son frecuentes. Varios países, incluyendo México, publican sus precios en función de estos crudos, ya sea mediante la aplicación de



descuentos o incentivos; aplicando fórmulas que involucran varias cotizaciones de referencia o "ajustes" por calidad.

La determinación del precio para estos crudos que no cuentan con una cotización "spot" será fundamental en la decisión del refinador para evaluar la conveniencia o no de comprarlos, así como el nivel más adecuado a procesar para su refinería.

Para los productos terminados existen cotizaciones "spot" para los más utilizados en el mercado internacional. Podremos encontrar publicados los precios de las diferentes transacciones clasificadas de acuerdo al tipo de operación, ya sea suministrando el producto por ducto desde la refinería hasta el centro de distribución, o bien entregado en muelle para su transportación por buque tanque. En la mayoría de los casos, estas cotizaciones de referencia podrán ser aplicadas de manera directa, si es que el producto de interés cumple con las especificaciones de calidad del mercado del cual se trate y de acuerdo al modo de transporte que se utilice.

En muchas ocasiones, sin embargo, el producto que nos interesa comercializar tiene características de calidad diferentes a las que se encuentran en las publicaciones. En este caso deberá buscarse la manera de corregir la cotización de acuerdo a un "ajuste" por calidad. En la mayoría de los casos se buscará una mezcla de productos de referencia tal que iguale las características buscadas, en otros casos se agregarán o restarán los costos de algún proceso que contribuya a mejorar la calidad como por ejemplo la remoción de azufre.

Las principales propiedades que se toman en cuenta para los ajustes de calidad dependen del tipo de producto y se muestran en la tabla 1.2.

Supongamos, por ejemplo, que deseamos conocer el precio de un combustóleo con un contenido de azufre de 2.5%, pero en el mercado únicamente se registran transacciones de combustóleos del 1% y del 3% de azufre. No será posible vender nuestro producto al precio del que contiene 1% de azufre, pero tampoco nos conviene entregarlo como si se tratara del de 3%. Si mezclamos ambos productos en las proporciones adecuadas, obtendremos un producto con el contenido de azufre deseado, de modo que no es descabellado pensar que el precio que nos interesa sea una ponderación del precio de los dos combustóleos de 1% y 3% de azufre en las mismas proporciones que la mezcla teórica.

**Tabla 1.2. Ajustes de calidad/especificaciones**

Producto	Calidad típica
Gas L.P:	60% C ₃ , 40% C ₄
Gasolina regular sin plomo	(RON+MON)/2=87 0.0 g/l TEP PVR= 6.5 a 8.5 lb/in ²
Gasolina premium	(RON+MON)/2=93 0.0 g/l TEP PVR= 6.5 a 8.5 lb/in ²
Turbosina	Azufre<0.125% T _{CONGELAMIENTO} >-25°F
Diesel	Azufre<0.05% I _{CETANO} >48
Combustóleo pesado	Azufre<3.0% Viscosidad<550 SSF@50°C

El mercado petrolero en México.

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos otorga al Estado, a través de Pemex, la facultad de ser el único ente que podrá producir, procesar y comercializar petróleo crudo y productos refinados dentro del territorio nacional.

A partir de la reestructuración de Pemex en sus organismos subsidiarios en 1993, se comenzó a buscar la rentabilidad de las operaciones de cada una de las empresas, dejando atrás la mentalidad de autosuficiencia y adoptando una política tendiente a mejorar la eficiencia y los márgenes en los centros productores.

Al no existir un libre mercado en México debe entonces determinarse un mecanismo de precios para evaluar las transacciones de los diferentes organismos de Petróleos Mexicanos. La determinación de precios puede realizarse de diferentes maneras, desde



la fijación arbitraria de precios hasta la aplicación directa de los precios en algún mercado de referencia.

La fijación arbitraria de los precios en el mercado nacional es posible para Pemex como monopolio, pero representa un esquema falso de márgenes y puede generar muy poco incentivo a la productividad y competitividad.

Puede adoptarse un mecanismo de precios en función de los costos en cada uno de los centros productores. En este esquema se tendrá la desventaja de contar con diferentes precios para un mismo producto, dependiendo de la eficiencia de cada una de las refinerías, además de representar también un freno a la productividad.

Otra opción sería la determinación de precios en función de los costos de producción más un margen preestablecido, pero con las mismas desventajas que el esquema anterior.

Si se toman directamente los precios de algún mercado de referencia estaremos sujetos a cambios en un perfil de demanda diferente al nacional, provocando que la señal sea errónea.

El mecanismo actual que se utiliza en Petróleos Mexicanos para determinar los precios nacionales consiste en poner en competencia la producción contra un mercado de referencia. Este esquema estimula la productividad, aunque también estará sujeto a variaciones con un perfil de demanda diferente al nacional.

Por su ubicación geográfica, los mercados "spot" lógicos que se pueden utilizar como referencia son el de California para la costa del Pacífico y el de la Costa Norteamericana del Golfo de México para el resto del país.

Al considerar a Pemex Refinación y a Pemex Exploración y Producción como empresas independientes, la primera representará al cliente más importante por su volumen de compras, tal y como se muestra en la figura 1.5.

Para determinar el precio que Pemex Refinación debe pagar por el crudo se tomará en cuenta la referencia de los diferentes mercados. Como primera opción se puede considerar el precio promedio ponderado en volumen de los diferentes mercados, es decir:



$$\text{Precio} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i P_i}{\sum_{i=1}^n v_i} \dots(1.1)$$

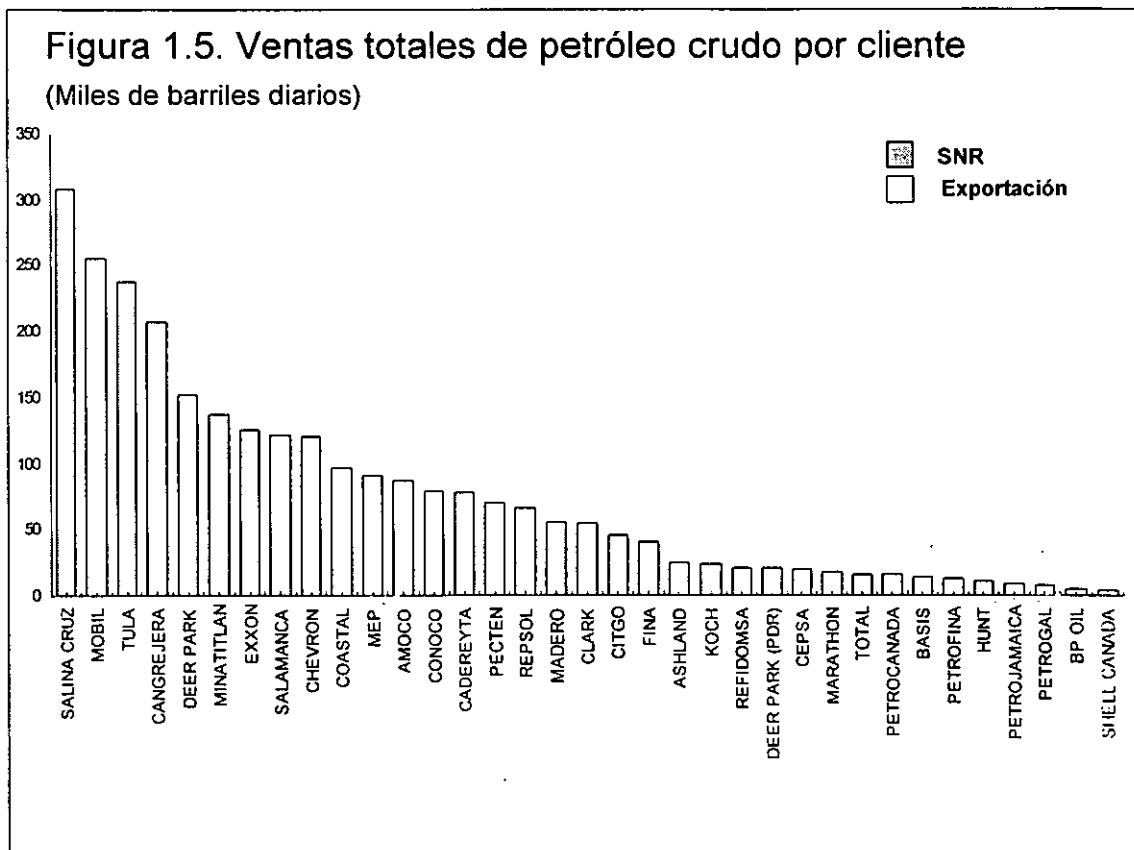
En donde:

v_i = Volumen exportado al mercado i .

P_i = Precio de exportación en el mercado i .

n = Número de mercados a los que se exporta crudo

Con este esquema se fortalece a Pemex Exploración y Producción, ya que podrá vender la tercera parte de su producción al mismo precio que el resto.



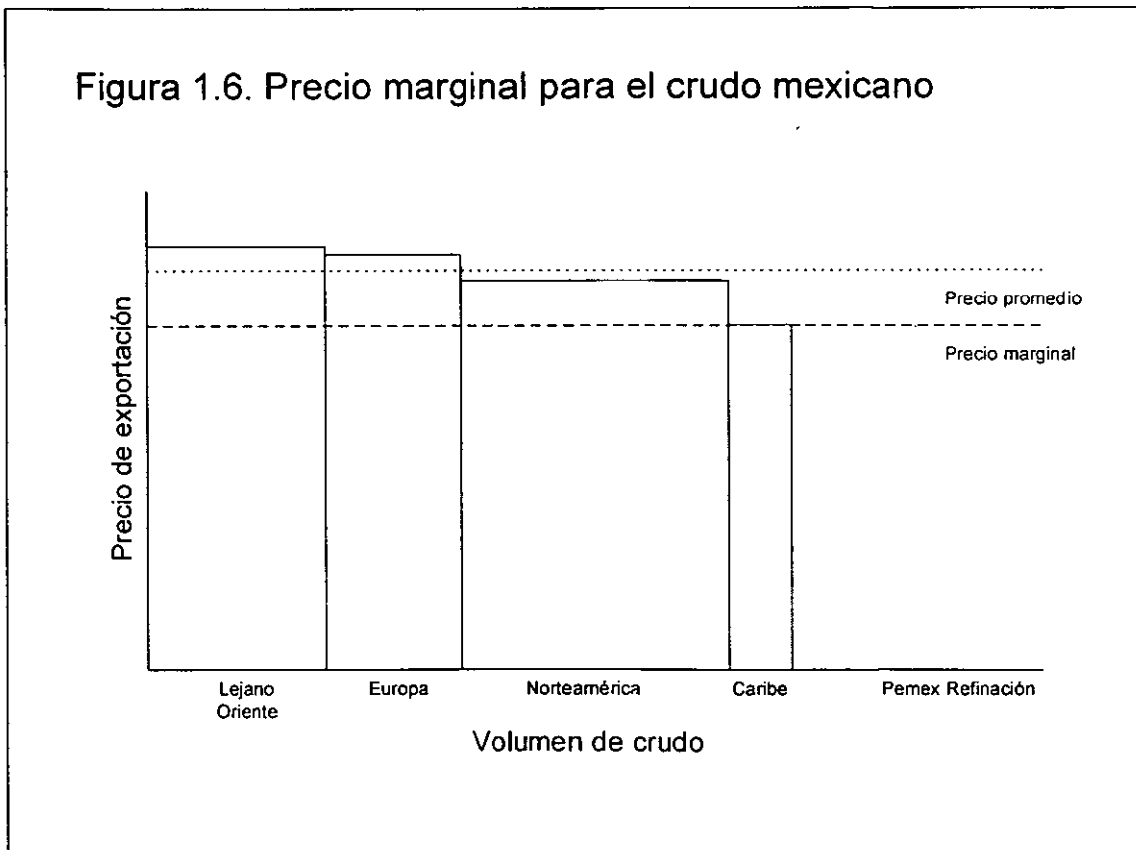
Si ordenamos los volúmenes de crudo de exportación en función de su precio, como se muestra en la figura 1.6, la tendencia al incrementar el volumen se observa una



disminución en el precio de exportación. Después de cubrir todos los contratos del exterior, si deseamos exportar mayor volumen de crudo, el precio será, cuando mucho, igual al cliente marginal. Así, el precio que Pemex Refinación deberá pagar por el crudo que procesa corresponde al precio del mercado marginal de exportación, es decir:

$$\text{Precio} = \text{Mínimo}(v_i P_i) \quad \dots(1.2)$$

Con este mecanismo se coloca a Pemex Refinación como competidor en el consumo de crudo nacional y aprovechando la ventaja de ser el cliente con mayor participación volumétrica.



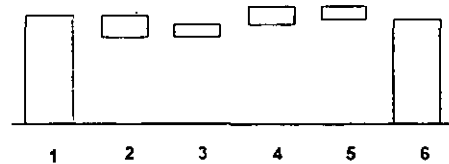
Como se mencionó antes, Pemex Refinación es el único ente que puede producir, comprar y comercializar productos petrolíferos, de modo que la decisión se deberá tomar entre producir y exportar o importar. El mecanismo de precios establece, según la balanza comercial del producto en cuestión, tres opciones para la determinación de precios de productos.



Importador neto. Para suministrar la demanda será necesario producir o importar cada uno de los diferentes productos petrolíferos. En este caso se asigna a la producción un precio equivalente al costo del producto importado más el transporte desde el mercado de importación hasta el centro de distribución, asumiendo que la producción está dedicada a la sustitución de importaciones. En la figura 1.7 se ejemplifica este mecanismo de precios.

Como primer punto debe tomarse el precio de referencia en el mercado "spot"; a este precio se le aplica, en caso de ser necesario, un ajuste por calidad; se suma el costo de transporte desde el mercado de referencia hasta el puerto mexicano de internación, se suma después el costo de transporte desde el puerto mexicano hasta el centro de distribución y, finalmente debe restarse el costo de transporte desde la refinería hasta la terminal de distribución. El resultado final corresponde al precio del producto en la refinería.

Figura 1.7. Precios para importaciones netas



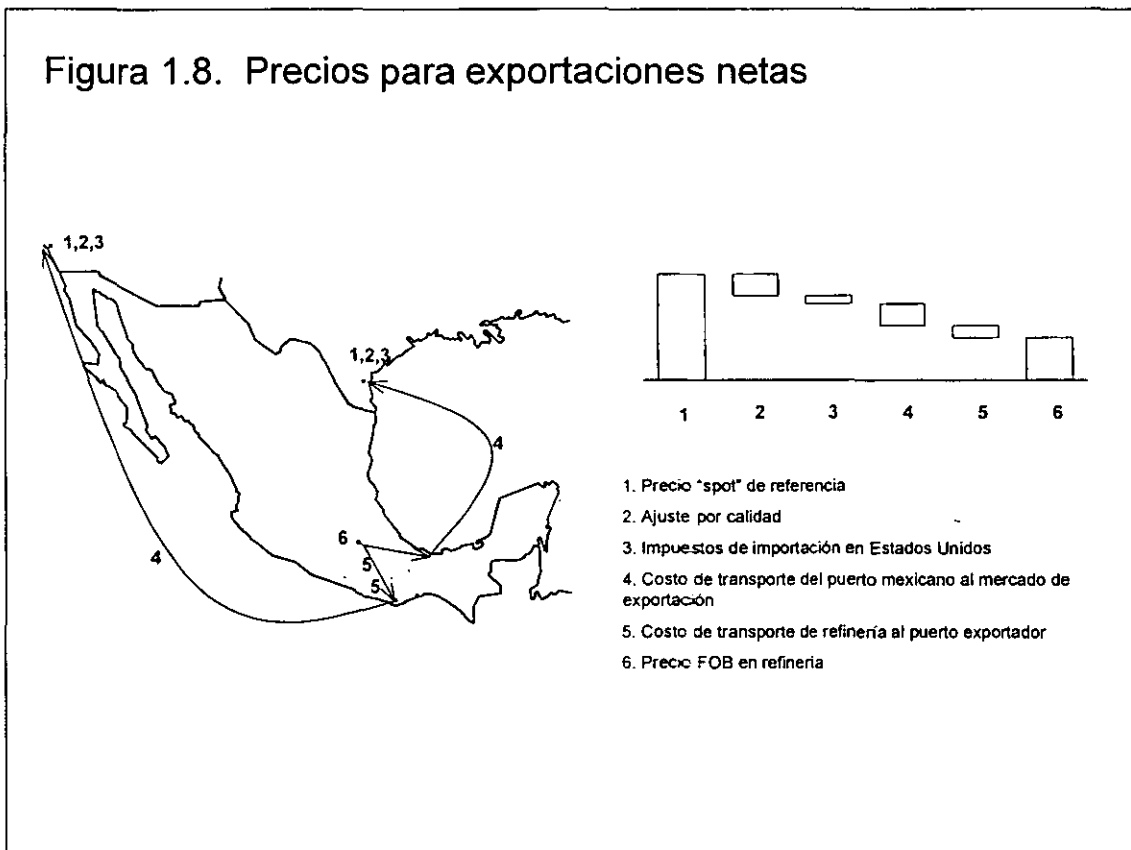
1. Precio "spot" de referencia
2. Ajuste por calidad
3. Costo de transporte a puerto mexicano
4. Costo de transporte del puerto mexicano al centro de distribución
5. Costo de transporte de refinería a centro de distribución
6. Precio FOB en refinería



Exportador neto. El perfil de productos en la demanda no es, generalmente, el mismo que el de la producción. Esto originará excedentes de algunos productos, los cuales no podrán ser absorbidos por el mercado nacional, dado que la demanda ya ha sido satisfecha. La única alternativa será, entonces, buscar un mercado para la exportación de estos excedentes y el precio de la producción será el precio en el mercado de referencia menos el transporte desde el centro productor. En la figura 1.8 se muestra este mecanismo.

Tomando como base el precio de referencia, ajustado por calidad, debemos restar los impuestos de importación en el mercado de destino para el producto, restamos el transporte desde el puerto exportador hasta el punto de venta y el costo de transporte desde la refinería hasta el puerto mexicano. El resultado es el precio FOB en refinería.

Figura 1.8. Precios para exportaciones netas

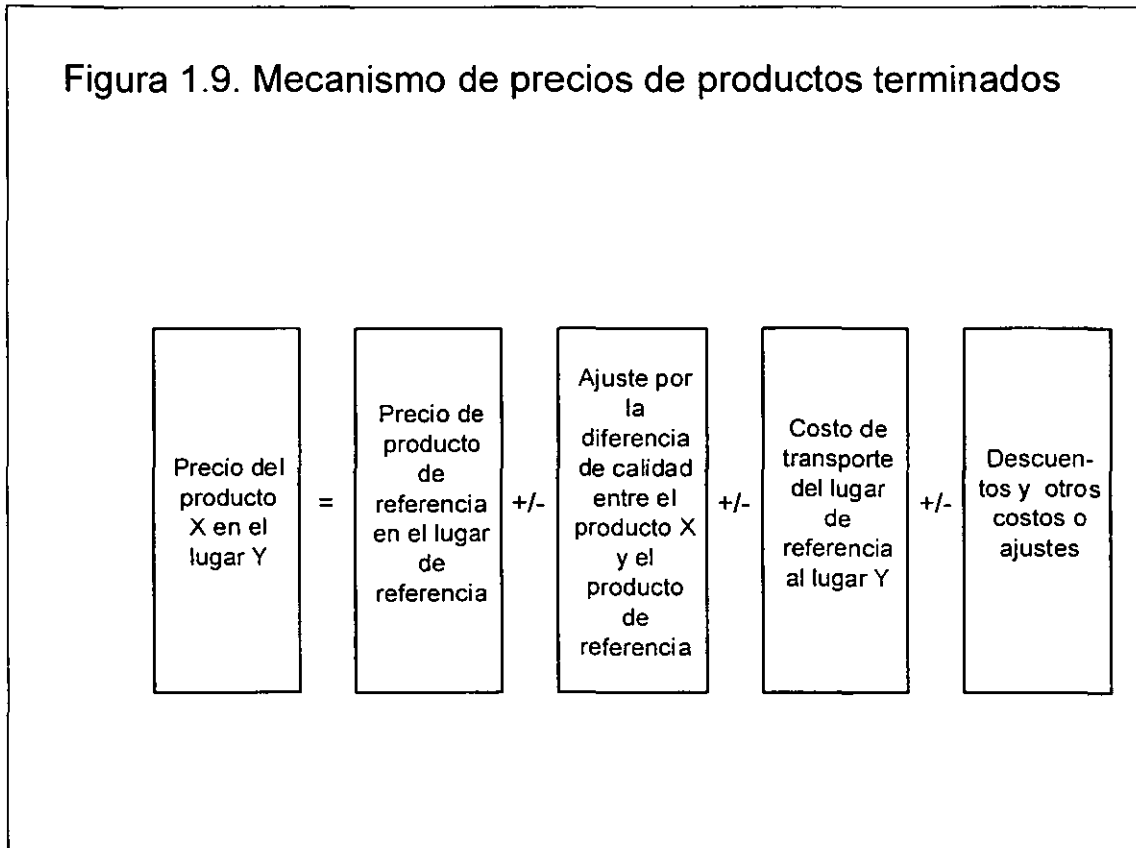


Paridad. Este mecanismo se aplicará a los productos cuyo volumen de comercio exterior sea muy pequeño, o bien no se observe una tendencia definida y de largo plazo de



importación o exportación. En este caso se aplicará exclusivamente el precio de referencia con su ajuste de calidad, sin considerar los costos de logística.

En resumen, los precios para productos terminados deberán calcularse como se indica en la figura 1.9



Si bien este esquema establece un entorno de competencia entre Pemex Refinación y los mercados de referencia, la importación representa un incentivo para poder capturar los costos de logística, imponiendo un tope a la producción y por consiguiente al proceso de crudo.

Con estos esquemas no es de extrañarse que México sea exportador de crudo e importador de productos refinados, situación que ha sido fuertemente criticada e incluso adoptada como bandera política por los opositores al gobierno.



Precios externos

El precio para los crudos mexicanos en cada uno de los diferentes mercados de exportación será calculado mediante fórmulas que hacen referencia a crudos marcadores y productos en el mercado en cuestión. Así, para determinar el precio del crudo de exportación al mercado norteamericano utilizaremos:

$$\text{Maya} \quad 0.40(\text{WTS} + \text{FO}_{3\%}) + 0.10(\text{LLS} + \text{BRD}) + K \quad \dots(1.3)$$

$$\text{Istmo} \quad \frac{1}{3}(\text{WTS} + \text{LLS} + \text{BRD}) + K_2 \quad \dots(1.4)$$

$$\text{Olmeca} \quad 0.40(\text{WTS} + \text{LLS}) + 0.20\text{BRD} + K_1 \quad \dots(1.5)$$

Estas fórmulas buscan, en cierto modo, igualar la destilación del crudo mexicano a la resultante de la mezcla que se obtendría de los productos que participan en la fórmula. Así, si hacemos una mezcla con 40% de crudo West Texas Sour (WTS), 10% de crudo Louisiana Light Suite (LLS), 10% de crudo Brentd (BRD) y 40% de combustóleo con 3% de azufre ($\text{FO}_{3\%}$), la destilación de esta mezcla se parecerá a la que se obtiene del crudo Maya.

La constante K se determina de manera que ofrezca a los posibles clientes un margen de refinación atractivo y comparable con el que obtendrían al procesar los posibles crudos competidores. De esta manera se puede establecer una política comercial como productores de crudo en el mercado internacional.

Las fórmulas que se utilizan para el crudo de exportación a Europa serán:

$$\text{Maya} \quad 0.527\text{BRD} + 0.467\text{FO}_{3.5\%} - 0.25(\text{FO}_{1\%} - \text{FO}_{3.5\%}) + K_3 \quad \dots(1.6)$$

$$\text{Istmo} \quad 0.887\text{BRD} + 0.113\text{FO}_{3.5\%} - 0.16(\text{FO}_{1\%} - \text{FO}_{3.5\%}) + K_4 \quad \dots(1.7)$$

Y en el mercado asiático aplicaremos:

$$\begin{array}{l} \text{Maya Istmo} \\ \text{Olmeca} \end{array} \quad \frac{\text{OMAN} + \text{DUBAI}}{2} + K_7 \quad \dots(1.8)$$

El precio de los crudos importados se tomará directamente de su cotización en el mercado de referencia correspondiente, el cual se muestra en la tabla 1.3.

Para los productos se tomará como referencia la cotización en el mercado de la Costa Norte del Golfo de México, considerando las calidades especificadas anteriormente.



Tabla 1.3. Mercados de referencia para crudos

<u>Crudo</u>	<u>Mercado de referencia</u>
1. Crudo Alaska North Slope	Golfo de Estados Unidos
2. Crudo Bonny Light y Medio	Norte de África (Bonny Offshore)
3. Crudo Brent Dated	Mar del Norte
4. Crudo Oseberg	Mar del Norte
5. Crudo Ekofisk	Mar del Norte
6. Crudo Iraní Pesado	Golfo Pérsico (Fateh)

Cuando se requiera, será necesario aplicar diferentes ajustes de calidad para determinar el precio de los productos que vende la refinería, debido a las exigencias particulares del mercado. Para gasolinas tomaremos en cuenta el índice de octano y la presión de vapor, que son las principales especificaciones que debe cumplir una gasolina. Así, el precio de la gasolina se determinará como el precio de la gasolina regular sin plomo, más un ajuste por el índice de octano y un ajuste por presión de vapor como:

$$P_{GAS} = P_{UR} + A_{OCT} + A_{RVP} \quad \dots(1.9)$$

El ajuste por octano se hará linealmente entre el octano de la gasolina que nos interesa y el de las gasolinas regular y premium utilizando la fórmula

$$A_{OCT} = \frac{(ON_{GAS} - ON_{UR})(P_{UP} - P_{UR})}{ON_{UP} - ON_{UR}} \quad \dots(1.10)$$

Para el ajuste por presión de vapor, éste se hará utilizando el precio del butano normal y las presiones de vapor, además del ajuste por octano del butano normal, es decir

$$A_{RVP} = \left(\frac{RVP_{GAS}^{1.25} - RVP_{UR}^{1.25}}{RVP_{UR}^{1.25} - RVP_{BUT}^{1.25}} \right) \left((P_{UR} - P_{BUT}) + \frac{(ON_{BUT} - ON_{UR})(P_{UP} - P_{UR})}{ON_{UP} - ON_{UR}} \right) \quad \dots(1.11)$$

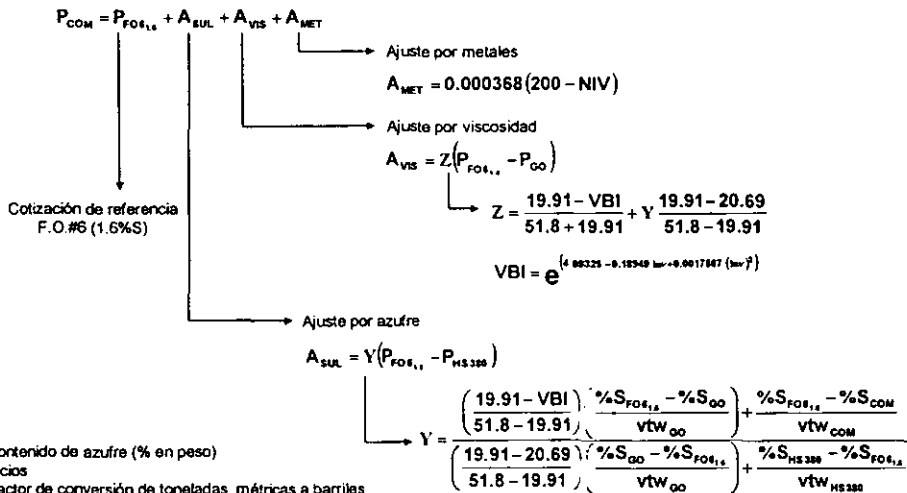
La aplicación de esta fórmula es el equivalente a mezclar gasolina regular, gasolina premium y butano normal para obtener una gasolina con idénticas propiedades a la que deseamos evaluar.



Para los productos destilados como el diesel y la turbosina, los ajustes serán principalmente debido al contenido de azufre y estarán asociados con el costo de hidrodesulfurar el producto a evaluar hasta obtener la calidad necesaria en el mercado de referencia.

Para el combustóleo, el ajuste se realiza suponiendo el mezclado de combustóleos de alto y bajo azufre, así como la adición de diesel en caso de que la viscosidad del producto sea mayor que la especificación en el mercado de referencia. El proceso de ajuste por calidad del combustóleo se presenta en la figura 1.10.

Figura 1.10. Precio para el combustóleo de importación



- Donde:
- %S=Contenido de azufre (% en peso)
 - P= Precios
 - Vtw=Factor de conversión de toneladas métricas a barriles
 - VBI=Índice de viscosidad
 - n =Viscosidad cinemática (cst)
 - NIV=Contenido de metales pesados (ppm)
 - COM=Combustóleo a evaluar
 - HS380= HSFO 380 cst
 - GO=Gasóleo (diluyente)
 - Fo16_e=FuelOil #6 1.6%S

Recordemos que será necesario considerar, además de las cotizaciones de referencia y los ajustes por calidad, el costo de transporte para ubicar el producto en el mercado base.



Dado que en el mercado hay diferentes formas para cotizar el costo del transporte de un insumo, es necesario llegar a un acuerdo sobre la cotización que debe ser utilizada. Esto dependerá de dos factores: Disponibilidad de rutas y confiabilidad de las cotizaciones. Los valores más representativos los proporciona la institución *John and Jacobs*, la cual toma como referencia los valores del *WorldScale*, donde éste último es la tarifa nominal por transportar, ya sea, productos sucios como el crudo y combustóleo y limpios como las gasolinas, desde el puerto de origen hasta el destino seleccionado. Estos *WorldScales* serán tomados directamente del "*New worldwide tanker nominal freight scale worldscale*".



2. Construcción del modelo de refinación

En este capítulo se establecen las bases para la construcción del modelo de refinación, como lo son la configuración de la refinería, restricciones volumétricas para insumos y productos, calidades requeridas y otras variables que definen los escenarios de análisis.

En la sección 2.1, infraestructura, se presenta la configuración de la refinería, capacidades de las plantas de proceso y consideraciones sobre sus rendimientos.

La sección 2.2, insumos y productos, trata sobre las variables externas que definen los requerimientos a cumplir por la refinería, como son la disponibilidad de materias primas y demanda de productos, Normas ambientales y restricciones operativas.

Finalmente, en la sección 2.3, escenarios económicos y políticos, se hacen las consideraciones que llevarían al refinador en libre competencia hasta un esquema de economía cerrada, determinando las políticas que definen los diferentes escenarios de análisis.

2.2. Construcción del modelo de refinación

Se utilizará una configuración típica de una refinería en la Costa del Golfo de Estados Unidos. La elección se debe a que el mercado de referencia corresponde a esta zona; además de que las refinerías que forman el Sistema Nacional de Refinación, SNR, se ajustan a este tipo de configuración.

Las capacidades resultantes de la "Súper refinería" se muestran en la tabla 2.1.

En la figura 2.1 se muestra un diagrama de bloques de una refinería con una configuración compleja con coquizadora.

Se asume la existencia de una sola refinería, la cual tendrá una capacidad igual a la suma de las capacidades de las seis refinerías que conforman el SNR. Esta simplificación elimina el efecto de la localización geográfica de las refinerías y los puntos de demanda. Para resolver esta limitación basta con añadir un modelo de transporte al esquema de refinación planteado, el cual está fuera de los objetivos de este trabajo.



Tabla 2.1. Configuración de la Super-Refinería

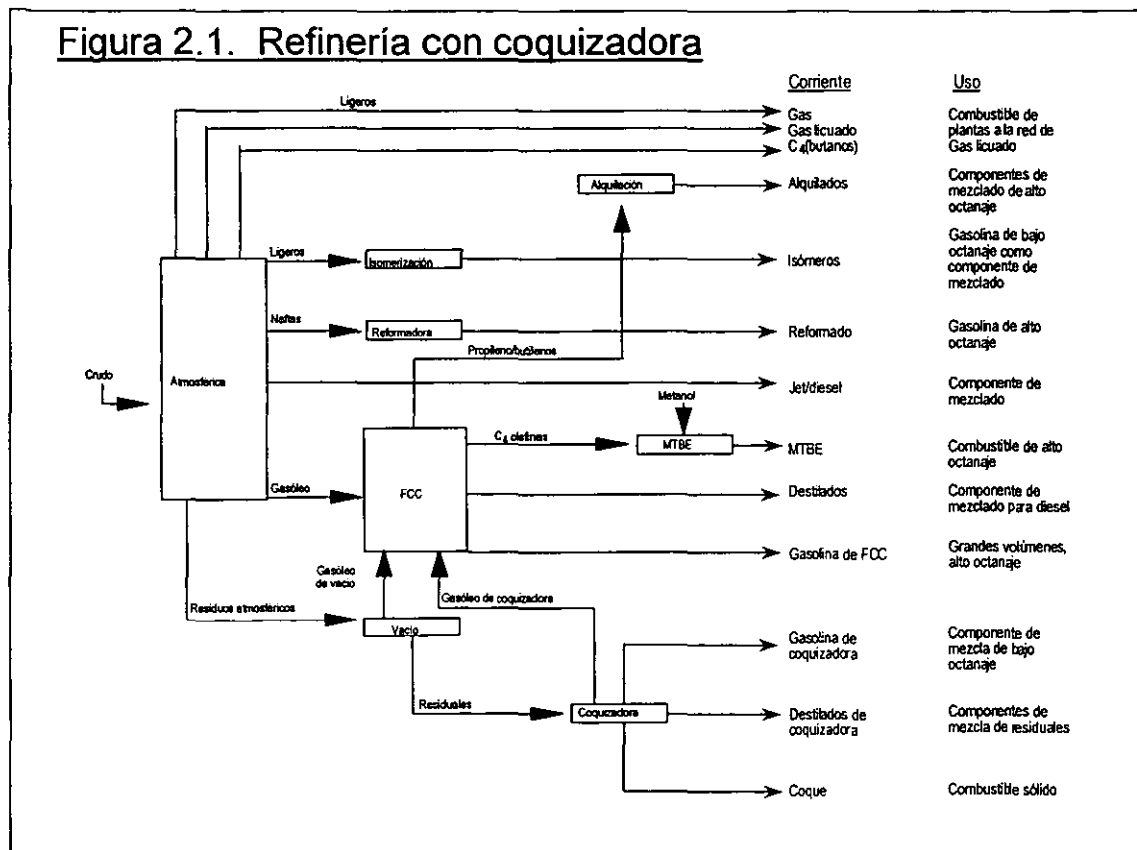
Planta	Unidades	Tula	Salamanca	Cadereyá	Madero	Salina Cruz	Minatitlán	Super Refinería
Primaria 1	MBD	330.0	250.0				212.0	792.0
Vacío 1	MBD	155.0	154.2				108.0	417.2
Primaria 2	MBD			235.0	195.0			430.0
Vacío 2	MBD			137.0	74.0			212.0
Primaria 3	MBD					330.0		330.0
Vacío 3	MBD					155.0		155.0
Reformadora 1	MBD	30.0	8.0	20.0	15.0	20.0	17.0	110.0
Reformadora 2	MBD	30.0	16.8	0.0	0.0	30.0	20.0	96.8
HT Destilados 1	MBD	50.0	38.0	50.0	40.0	50.0	59.0	287.0
HT Destilados 2	MBD	50.0	0.0	0.0	0.0	50.0	0.0	100.0
HT Naftas 1	MBD	36.0	8.0	36.0	16.0	25.0	12.0	133.0
HT Naftas 2	MBD	36.0	25.0	0.0	0.0	36.0	25.0	122.0
Alquilación	MBD	8.0	3.5	7.0	3.0	14.0	0.0	35.5
Isomerización	MBD	0.0	12.0	12.0	0.0	30.3	15.0	69.3
Polimerización	MBD	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.6	2.0
MTBE	MTA	90.0	45.0	30.0	0.0	30.0	0.0	195.0
TAME	MTA	90.0	0.0	0.0	0.0	60.0	0.0	150.0
Coquizadora	MBD	0.0	0.0	60.0	10.0	0.0	0.0	70.0
FCC 1	MBD	45.0	45.0	42.0	45.0	46.0	16.0	239.0
FCC 2	MBD	45.0	20.0	25.0	0.0	40.0	27.0	157.0
H-Oil	MBD	0.0	18.5	0.0	0.0	0.0	0.0	18.5
Viscorreductora	MBD	42.0	0.0	50.0	9.0	50.0	0.0	150.0
Deasfaltadora	MBD	0.0	17.2	0.0	35.0	0.0	0.0	52.2
Azufre	TD	220.0	160.0	70.0	43.0	70.0	50.0	613.0

Se modelaron tres torres de destilación, agrupando las capacidades por regiones, según se muestra en la figura 2.2. La alimentación de crudo a cada torre corresponde al crudo que puede procesarse en las refinerías, de modo que se tome en cuenta, aunque sea parcialmente, la desagregación geográfica de las mismas. Además, ésto evitará manejar en el modelo alternativas de proceso que no sean físicamente factibles. No se tiene



contemplado el manejo de varios períodos al mismo tiempo, por lo que no se considerará la tanquería en los modelos.

Figura 2.1. Refinería con coquizadora



Cada uno de los equipos de proceso se modeló de manera teórica, de modo que los rendimientos, consumo de catalizadores y consumo de energía corresponden a los típicos de un equipo en buen estado y operando a su capacidad de diseño.

Las propiedades de cada una de las corrientes dependerán de la calidad de la alimentación y del modelo de operación o severidad de cada equipo. Las interacciones y porcentajes de conversión utilizados también corresponden a datos teóricos.

En las torres de destilación los rendimientos y calidades corresponden a un ensayo de laboratorio denominado "destilación técnica", en el cual se separan los diferentes cortes de un crudo en una columna de destilación de laboratorio y se realizan los análisis característicos de cada corte.



Para mezclas de crudos, que será lo que se alimente a las torres de destilación reales, se asume un mezclado lineal de rendimientos y propiedades de los crudos individuales.

En todos los equipos deberá cumplirse el principio de conservación de masa, es decir que no se consideraran pérdidas de materia por evaporación, fugas o ineficiencias.

Figura 2.2. Agrupación de refinerías por zona



2.2. Insumos y productos

Volúmenes

Casi el total de los insumos de una refinería es el petróleo crudo. La disponibilidad de los diferentes crudos está ligada a la capacidad del campo productor. Los crudos mexicanos serán la base de la dieta de la refinería, de tal modo que la disponibilidad de



Los servicios auxiliares deberán ser generados dentro de la refinería, mediante la energía que se genere por la combustión de sus productos finales. Sólo se permitirá extracción de agua de pozo en el volumen necesario.

Tabla 2.2. Demanda de productos petrolíferos, zona I

Agencia	Nova Sin	Magna Sin	Magna Oxig.	Diesel	Diesel Sin	Gasóleo	Turboquina	Kerosina	Combustóleo		
									Bajo Azufre	Medio Azufre	Alto Azufre
Refinería de Minatitlán.											
Campeche	1.5	4.5		1.7				0.0			8.8
Escamela	1.9	1.4		3.1				0.0			
Frontera	0.2			0.2				0.0			
Jalapa	1.4	1.4		0.9				0.0			
Merida	3.3	4.8		5.5				0.1			5.1
Minatitlán				0.3				0.1		4.4	
Pajaritos	2.2	2.6		3.6			0.9				
Perote	1.2	0.5		1.3				0.0			
Poza Rica	1.9	2.3		2.5				0.1			42.3
Progreso	0.4	0.4		4.0			5.3	0.0			
Tierra Blanca	1.3	1.5		3.4				0.0			
Veracruz	2.6	3.7		4.5				0.0			11.6
Villahermosa	4.0	4.7		10.9				0.1			
Subtotal	21.9	27.9		42.0			6.2	0.5		4.4	67.8
Refinería de Salamanca.											
Aguascalientes	3.4	3.5		4.3				0.0			
Celaya	2.6	2.5		3.5				0.1		0.9	
Dolores								0.0			
Guadalajara	14.3	17.7		12.6				0.0		12.2	
Irapuato	1.4	1.3		2.0				0.0			
Leon	5.1	5.0		5.8				0.0			
Morelia	3.5	3.1		3.5				0.0			
Queretaro	5.2	5.0		8.7				0.0			1.4
Ruiz								0.0			
Salamanca	1.4	1.1		2.9			7.5	0.1		32.5	
San Luis Potosi	2.5	2.8		4.0				0.0			23.1
Uruapan	1.6	2.5		1.7				0.0			
Zacatecas	2.1	2.0		2.4				0.0			
Zamora	1.4	1.2		1.6				0.1			
Subtotal	44.4	47.8		53.0			7.5	0.6		45.6	24.5
Refinería de Tula.											
Azcapotzalco	56.8		57.6		26.8	6.0	18.4	0.5	6.5		
Cuahtla	2.3	1.4		1.3				0.0			
Guernavaca	2.4	3.5		1.1				0.0			
Iguala	1.7	1.9		1.1				0.0			
Pachuca	4.2	2.3		3.7				0.0			
Puebla	9.8	7.9		8.2				0.2			5.0
S.M. Texmeluca											
Tehuacan	1.4	0.6		1.5				0.0			
Toluca	8.4	5.4		4.9				0.1			
Tula	2.3	0.9		5.1			2.2	0.0		60.9	
Subtotal	89.3	24.0	57.6	26.9	26.8	6.0	20.6	0.9	6.5	60.9	5.0
Total Zona I	155.6	99.7	57.6	121.9	26.8	6.0	34.3	2.0	6.5	110.9	97.3



Por otro lado, la demanda que deba satisfacer la refinería determinará el modo de operación de los equipos de proceso. Se pueden manejar demandas puntuales o bien los promedios de un período determinado.

Para este trabajo se utiliza un escenario de demanda promedio anual, que se presenta en las tablas 2.2 a 2.4. Estas demandas se establecen tomando en cuenta el compromiso que tiene PEMEX como monopolio de abastecer todo el territorio nacional.

Para simular el efecto de la desagregación geográfica de la demanda, se zonificó ésta según el área de influencia de cada refinería. En la figura 2.3 se muestra esta distribución de agencias de ventas.

Agencia	Nova Sin	Magna Sin	Magna Oxig.	Diesel	Diesel Sin	Gasóleo	Turboquina	Kerosina	Combustóleo			
									Bajo Azufre	Medio Azufre	Alto Azufre	
Refinería de Cadereyta.												
Cadereyta	0.1	2.5		3.2			4.4	0.0				37.2
Cd. Juarez	0.0	14.5		3.1				0.2		2.3		
Chihuahua	3.0	6.7		5.3				0.6				
Durango	1.8	1.6		2.5				0.0				
Gomez Palacio	3.4	4.4		7.2				0.1				7.5
Matehuala	0.5	0.4		0.8				0.0				
Monclova	0.7	1.5		1.1				0.2				
Monterrey	6.6	19.8		13.6				0.0				
Nuevo Laredo	0.0	4.5		1.5				0.0				
Parral	0.6	0.9		0.8				0.0				
Sabinas	0.2	3.3		1.9				0.0				
Saltillo	1.4	3.0		2.3				0.1				
Subtotal	18.3	63.2		43.3			4.4	1.2		2.3		44.6
Refinería de Madero.												
Cd. Madero	2.3	5.0		5.3			0.3			31.4		
Mante	0.3	0.5		0.9				0.0				
Navojua	0.6	1.1		1.3				0.0				
Reynosa	0.1	10.1		2.5				0.1				0.0
Valles	1.1	1.4		1.4				0.0				
Victoria	1.2	3.4		2.4				0.0				
Subtotal	5.6	21.5		13.7			0.3	0.2		31.4		0.0
Total Zona II	23.9	84.7		57.0			4.6	1.4		33.7		44.7



Dentro del precio de cada uno de los productos en cada zona está descontado el costo promedio de transporte desde la refinería hasta todas las agencias de ventas.

Además de los volúmenes requeridos de cada uno de los diferentes productos, la calidad de éstos será determinante en el proceso de optimización del sistema.

Tabla 2.4. Demanda de productos petrolíferos, zona III

Agencia	Novo Sin	Magna Sin	Magna Oxig.	Diesel	Diesel Sin	Gasóleo	Turbosina	Kerosina	Combustóleo		
									Bajo Azufre	Medio Azufre	Alto Azufre
Refinería de Salina Cruz.											
Acapulco	2.2	4.3		2.4			1.3	0.0			
Arriaga	0.7	0.5		0.7				0.0			
Cactus											
Cananea	0.0	0.1		0.2				0.0			
Colima	1.2	1.8		1.0				0.0			
Cullacan	1.9	5.4		3.8				0.0			
Ensenada	0.1	2.3		2.4				0.0			
Guamuchil	1.3	1.5		1.7				0.0			
Guaymas	0.9	0.9		3.1			1.6	0.0			23.3
Hermosillo	2.6	5.3		4.4				0.1			
La Paz	1.2	4.2		2.8			1.0	0.0			2.3
Lozaro Cardenas	0.8	1.2		1.4							36.4
Los Mochis								0.0			
Magdalena	0.3	0.5		1.0				0.0			
Manzanillo	2.4	2.0		2.9				0.0	50.4		
Mazatlan	2.3	2.6		4.5				0.1			16.3
Mexicali	0.1	6.8		2.4				0.0			
Nogales	0.0	0.7		0.2				0.1			
Oaxaca	2.5	1.4		2.5				0.1			
Obregon	1.2	2.0		2.2				0.1			
Rosario	0.1	9.0		2.1			3.6	0.0			13.0
Salina Cruz	1.2	1.1		1.6			1.1	0.0			4.7
Tapachula	1.1	1.1		1.2				0.1			
Tepic	1.4	2.0		2.2				0.2			
Topolobampo	1.6	2.2		3.4				0.0			7.8
Tuxtla Gutierrez	3.2	2.3		2.0				0.1			
Subtotal	30.0	61.1		52.2			8.6	1.0	50.4		103.7
Total Zona III	30.0	61.1		52.2			8.6	1.0	50.4		103.7

Calidad

El día lunes 8 de agosto de 1994, se publicaron en el "Diario Oficial" las Normas Oficiales Mexicanas NOM-085-ECOL-1994 y NOM-086-ECOL-1994, que establecen el



nivel máximo permisible de emisión de contaminantes a la atmósfera y la calidad de combustibles, respectivamente.

NOM-085-ECOL-1994. Norma Oficial Mexicana que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, bióxido de azufre, neblinas de ácido sulfúrico y partículas suspendidas, así como los requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento indirecto por combustión y emisiones de bióxido de azufre en los equipos de calentamiento directo por combustión utilizados en fuentes fijas, que usan combustibles fósiles líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones.

En esta norma se definen límites para su cumplimiento inmediato y hasta diciembre de 1997; a partir del 1 de enero de 1998 se establecen nuevos límites más estrictos que los primeros. Se definen tres zonas: Zona Metropolitana de la Ciudad de México, Zonas Críticas y Resto del País. Los equipos de combustión se dividen en categorías según su capacidad, siendo para los equipos más grandes los límites más estrictos. Exceptuando la emisión de SO_2 , el control de las emisiones que marca esta norma depende de la operación y el tipo de equipo de combustión de que se trate. Por otro lado, las emisiones de SO_2 dependen del contenido de azufre en el combustible quemado, por lo que esta especificación deberá controlarse directamente en la refinería, ofreciendo un combustible con menor contenido de azufre.

La norma establece los niveles máximos permisibles en ppm en volumen dentro de los gases de combustión y como kg por 10^6 Cal. Tomando el calor de combustión del combustóleo y su gravedad específica, y haciendo los balances de materia y energía se obtienen los contenidos de azufre para el combustóleo en las tres zonas, y que serán utilizados como restricciones en el modelo.

NOM-086-ECOL-1994. Norma Oficial Mexicana que establece la calidad ecológica de los combustibles fósiles líquidos y gaseosos que se usan en las fuentes fijas y móviles. Se presentan tablas con especificaciones de calidad para gas natural y gas L.P.; gasolinas Nova y Magna-Sin; diesel desulfurado, diesel industrial y Diesel-Sin; gasóleo industrial y combustóleo. Se definen cinco regiones: Zona Metropolitana de la Ciudad de México, Zona Guadalajara, Zona Monterrey, Zona Fronteriza Norte y Resto del País. Para evitar el manejo de gran cantidad de productos, se tomaron las especificaciones de la ZMCM para gasolinas Nova y Magna-Sin oxigenada y para Diesel-Sin; de ZFN para Magna-Sin; y



RP para los demás productos. Estas restricciones se alimentan directamente en el modelo.

2.3. Escenarios económicos y políticos

En cada uno de los escenarios se modifican algunas de las restricciones inherentes a la operación de la refinería, que representarán diferentes alternativas de proceso y nos permitirán evaluar la sensibilidad de los precios de transferencia ante estos cambios. Además, en cada uno de los escenarios presentados se manejan dos perfiles de demanda, que son demanda libre y la demanda mínima a cubrir por la refinería. Este análisis nos permitirá evaluar la desventaja que tiene Pemex como monopolio ante el compromiso de garantizar el suministro de productos petrolíferos a nivel nacional. Los excedentes o faltantes de producción deberán comercializarse en un mercado "spot", que para la evaluación será el de la Costa Norte del Golfo de México.

Refinería en la CNGM

En este escenario suponemos que la refinería se encuentra ubicada en la Costa Norte del Golfo de México, de modo que participe directamente dentro del mercado "spot" de referencia. Este esquema se muestra en la figura 2.4.

Los precios de todos los insumos y productos corresponderán a los del mercado de referencia, de modo que el costo de logística no debe incluirse. Cuando se analice el suministro de la demanda nacional como mínimo tampoco deberán considerarse los costos de transporte, de modo que podremos analizar el costo de exigir un volumen mínimo de producción a la refinería.

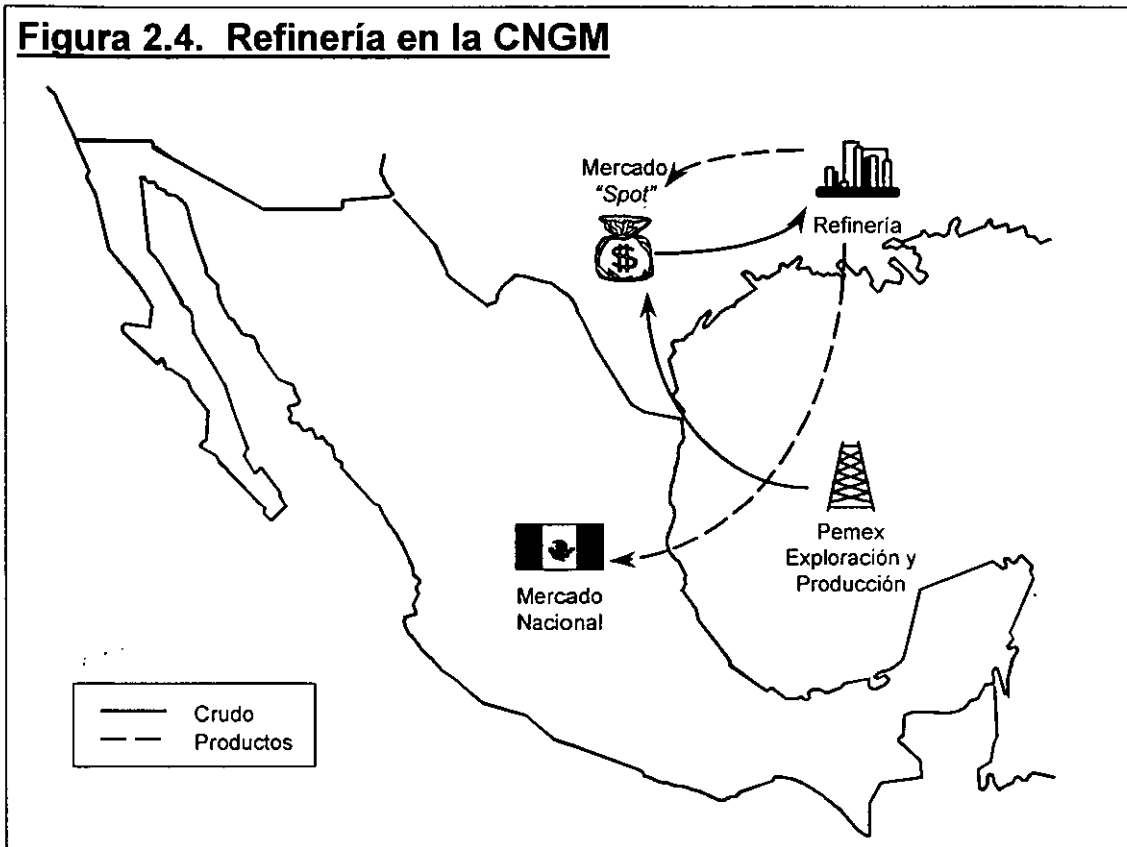
El petróleo crudo que compra la refinería puede ser nacional o extranjero, al precio que tendría cada uno de los crudos en el mercado de referencia, de modo que los crudos mexicanos serán más caros en este escenario debido al descuento en la logística cuando se consumen internamente y los crudos extranjeros tendrán un precio menor.

En este esquema no se toma en cuenta el efecto que tendría en el mercado una refinería del tamaño que estamos considerando, ya que los volúmenes manejados representarían una fracción importante de los que se comercializan en la zona, modificando las



condiciones de oferta y demanda con el consiguiente impacto en los precios. Sin embargo, en ninguno de los escenarios se toma en cuenta este efecto.

Dadas las condiciones anteriores se espera que este escenario represente las mayores ventajas, de modo que puede considerarse como el caso base.



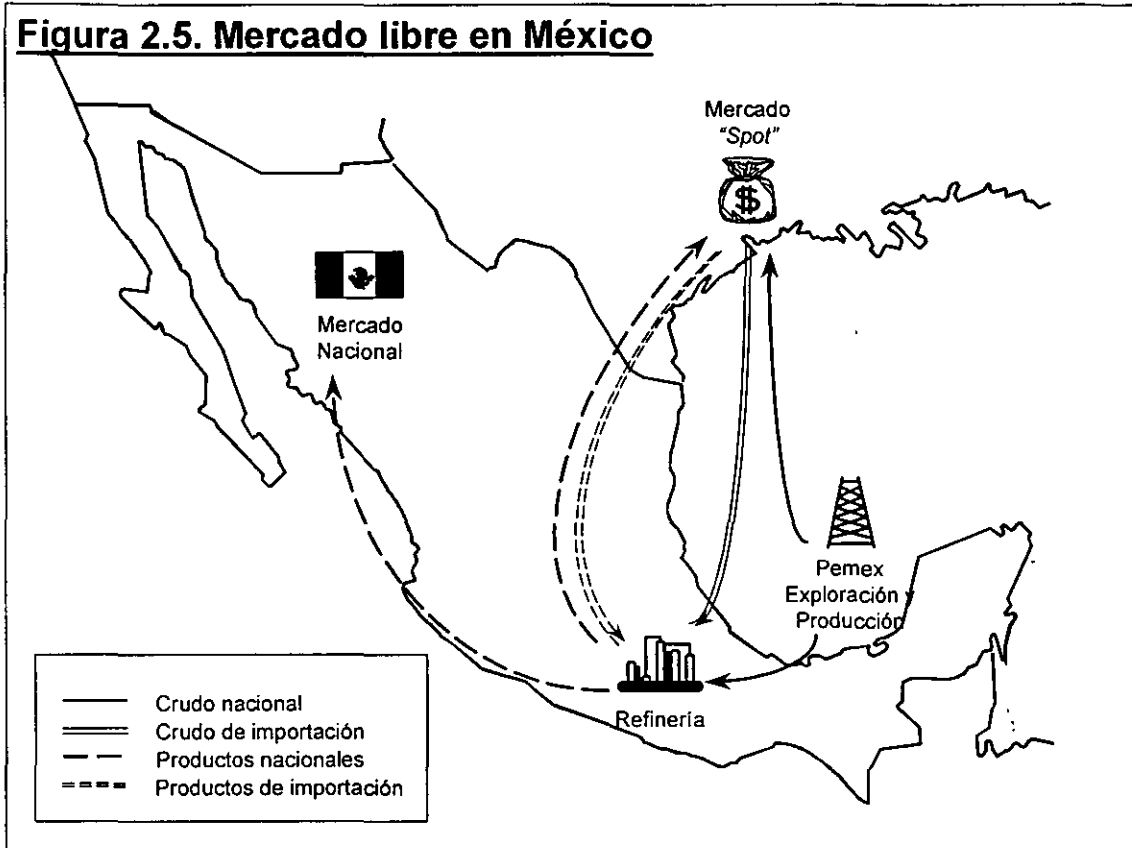
Mercado libre en México

En este escenario, figura 2.5, se ubica la refinería según la zonificación descrita, de modo que los precios de insumos y productos se verán afectados por los costos de transporte.

La refinería podrá procesar crudos nacionales e importados según le convenga. Los crudos nacionales tendrán un descuento debido a que no será necesario llevarlos al mercado de referencia, mientras que el precio de los crudos extranjeros y otros productos de importación se incrementa.



En el caso en que la demanda de productos es libre, éstos se venden en el mercado de referencia, de modo que deben restarse los costos de transporte al precio "spot", lo cual representa una clara desventaja con respecto al caso anterior.



Cuando deba cubrirse la demanda nacional, los precios de productos se calculan según el mecanismo descrito para cada una de las zonas. Los excedentes de producción se podrán vender en Houston, pero restando el costo de transporte al precio en dicho mercado.

Al comparar este escenario contra el de la refinería en la CNGM podremos evaluar la desventaja que tiene Pemex Refinación por estar sujeto al comercio internacional y no existir un mercado "spot" en México.



Mercado libre en México con 35% de crudo Maya

En él se incluye, con respecto al caso anterior, la decisión de procesar un cierto porcentaje de crudo Maya por refinería. Esta restricción adicional se debe a limitaciones tecnológicas en las plantas, ya que este crudo es demasiado viscoso y tiene un alto contenido de azufre, de modo que un volumen mayor no se puede manejar por restricciones hidráulicas y de corrosión.

La proporción a procesar de crudo Maya es más bien decisión política que tecnológica, ya que la composición de la mezcla final es la que determina cuánto crudo pesado se puede procesar en el sistema, según las propiedades fisicoquímicas resultantes. Sin embargo, cuando la disponibilidad de crudos nacionales está acotada de acuerdo a los compromisos de exportación, sólo se dispondrá de crudo Istmo para la dilución del Maya. Por tal motivo se impone al modelo que debe procesar 35% máximo de crudo Maya globalmente, entre 30% y 45% en la zona I, entre 25% y 38% en la zona II y entre 30% y 40% en la zona III.

Refinería en México sin importación de crudos

Según el marco histórico presentado, México pasó de ser importador a exportador de crudo en la década de los 70's. Desde entonces se ha manejado al petróleo como símbolo de la soberanía nacional, de modo que el gobierno no quiere asumir el costo social de importar crudo. Este esquema se presenta en la figura 2.6.

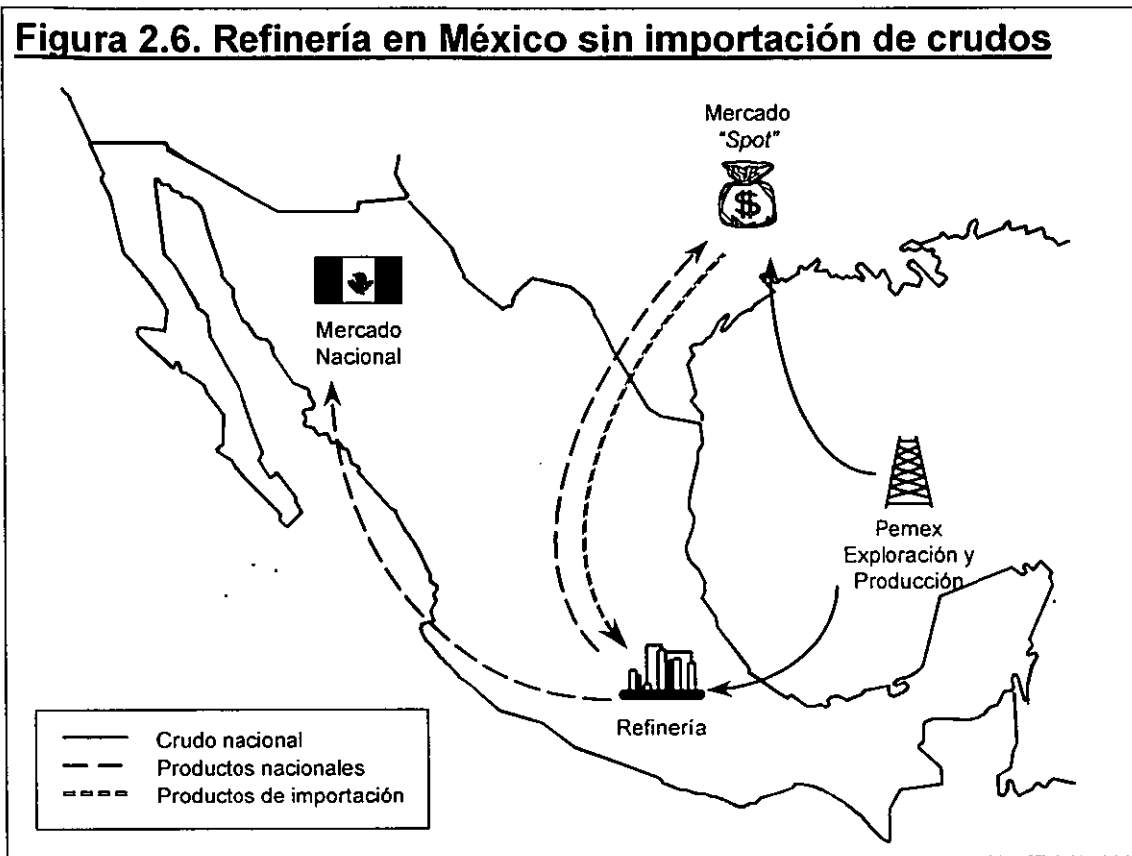
En este caso estamos hablando netamente de una decisión política. A los precios de crudos nacionales se les descuenta el costo de transporte al mercado de referencia. Los precios de productos para satisfacer la demanda nacional corresponderán a los calculados para cada una de las zonas y los excedentes de producción se exportan al mercado de referencia, restando el costo de la logística al precio "spot". En el caso de demanda libre toda la producción deberá exportarse al mercado de Houston.

Situación actual

En este escenario, con respecto al anterior, no se permite la importación de crudos, se importan los faltantes de producción y se exportan los excedentes, además de mantener una proporción máxima de crudo Maya de 35%.



Figura 2.6. Refinería en México sin importación de crudos



Economía cerrada

Este esquema se presenta en la figura 2.7 y corresponde a la visión que se tenía de Pemex en la década de los 80's.

En este escenario se trata de mantener la autosuficiencia en el suministro de la demanda nacional. Los precios que se aplican son los mismos que en el caso anterior, pero no se permite el comercio internacional por parte de Pemex Refinación.

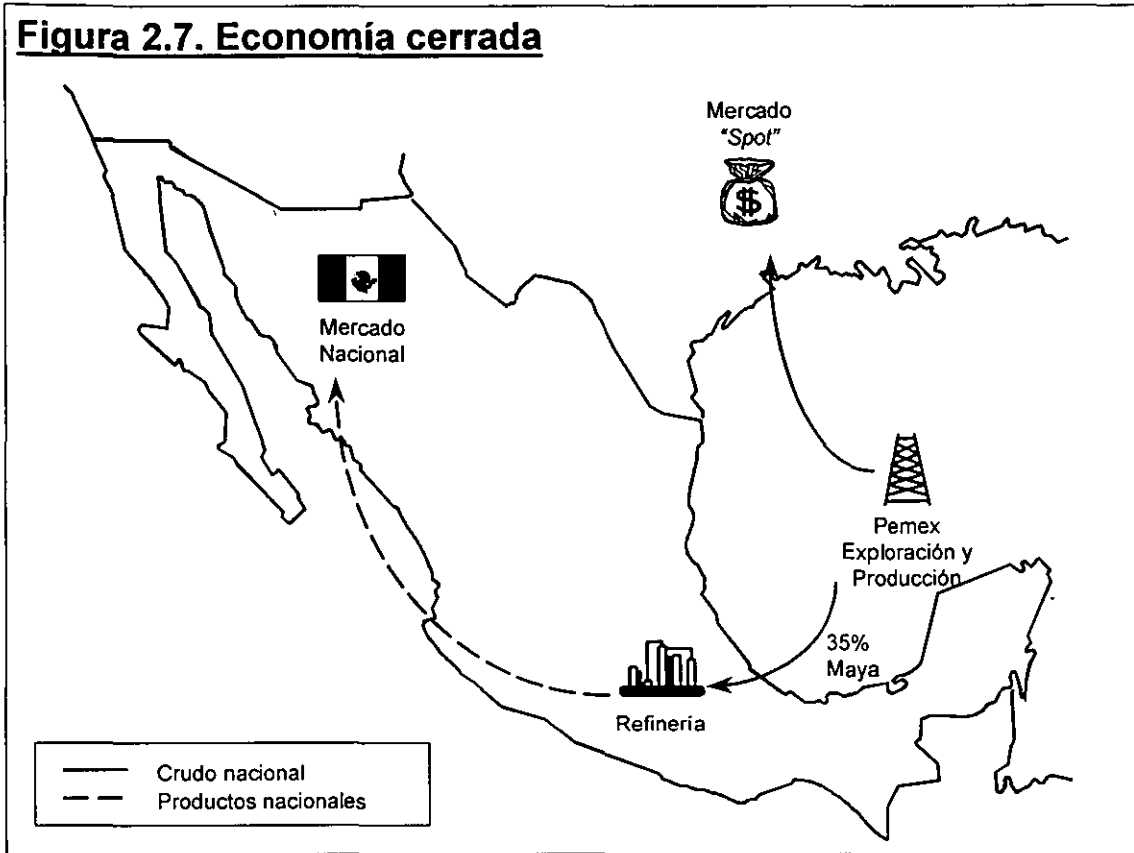
Cabe mencionar que los precios de productos son irrelevantes en este escenario, ya que la demanda estará fija al no poder exportar los excedentes de producción.

Para este escenario sólo se analiza el caso en que debe suministrarse la demanda nacional, ya que no se permiten las exportaciones.

Se mantendrá un máximo de 35% de crudo Maya como otra restricción adicional al SNR.



Figura 2.7. Economía cerrada





3. PIMS: La herramienta

En este capítulo se hace una breve descripción de la herramienta de cómputo utilizada, mostrando las bondades y limitaciones del paquete. No se pretende crear un manual para el usuario, sino describir las actividades básicas disponibles, los resultados que se obtienen de ellas y, lo que es realmente importante, la estructura matemática para la generación y solución del modelo.

En la sección 3.1, utilización de PIMS, se hace una descripción breve del paquete y sus principales módulos.

En la sección 3.2, notación de PIMS, se describe la mecánica para la generación de ecuaciones y variables para su posterior interpretación.

La sección 3.3, definición de propiedades, incluye una explicación de cómo se pueden manejar en PIMS las propiedades de corrientes que darán origen a la estructura no lineal en el modelo matemático.

En la sección 3.4, generación de ecuaciones y recursión distributiva, mediante un modelo simple de mezclado, se ejemplifica la construcción de ecuaciones y se muestra la técnica utilizada por PIMS para linealizar el sistema.

Finalmente, en la sección 3.5, limitaciones de PIMS, se hacen algunas sugerencias sobre aspectos que no deben perderse de vista en la aplicación del software.

3.1. Utilización de PIMS

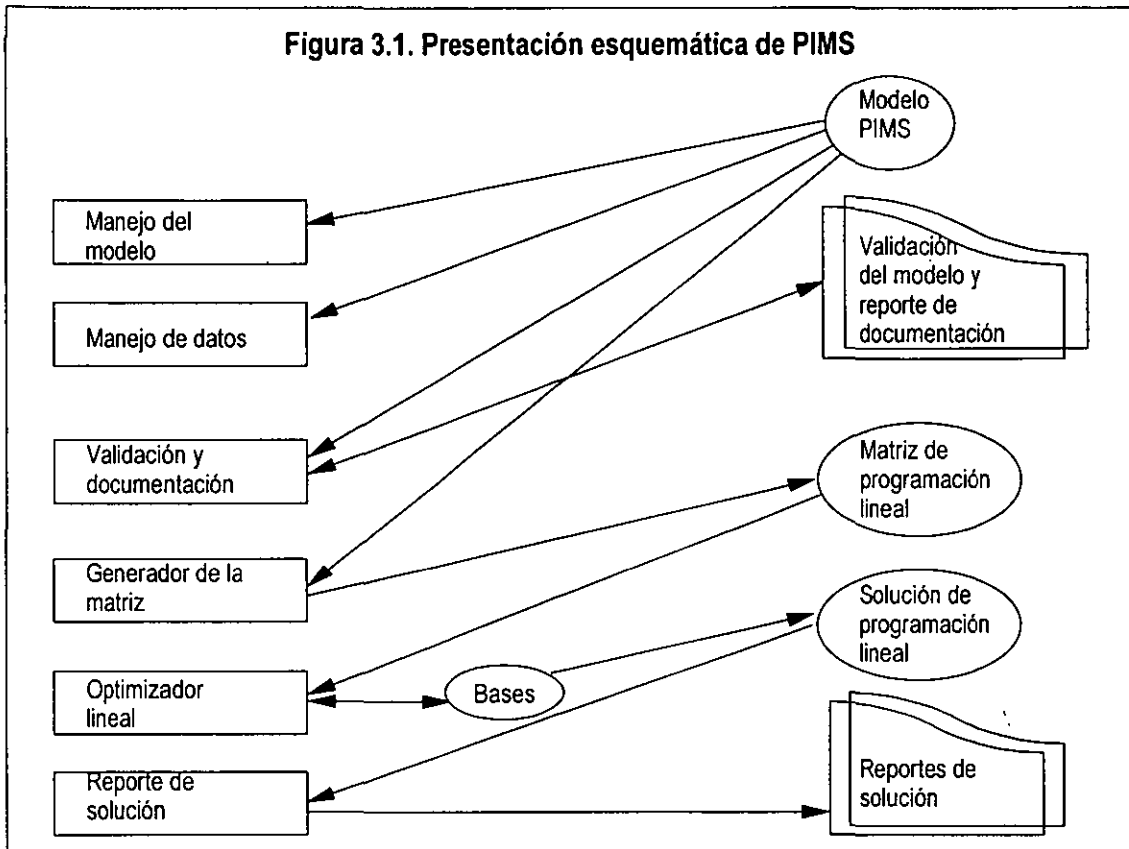
PIMS, *Process Industries Modeling System*, es un sistema computacional de Aspen Technology, Inc., el cual utiliza técnicas de programación lineal para optimizar la configuración y operación de plantas de proceso, principalmente de la industria del petróleo. Posteriormente se utiliza una técnica denominada "*recursión distributiva*" para resolver las no linealidades del sistema.

La modelación en PIMS consta de una serie de hojas de cálculo electrónicas (Lotus o Excel) agrupadas bajo un mismo subdirectorío, el cual lleva el nombre del modelo.

El escenario de planeación que se obtiene con PIMS consta de un solo período, es decir, no involucra la optimización ni manejo de inventarios. La duración de este período será seleccionada por el usuario.



PIMS está formado por módulos interconectados que pueden ser seleccionados independientemente por el usuario para su ejecución. En la figura 3.1 se muestra esquemáticamente la interconexión entre los diferentes módulos del sistema.



Manejo del modelo. En este módulo se pueden ver los modelos existentes en disco y las tablas que contienen; crear o copiar un modelo; consultar o imprimir un reporte y borrar los archivos de resultados de un modelo.

Manejo de datos. Comprende la creación y edición de las tablas del modelo, así como los reportes generados como hojas de cálculo. Se interactúa con Lotus o Excel sin abandonar el ambiente de PIMS.

Validación y documentación. Agrupa todas las tablas del modelo en un solo reporte, el cual puede ser de dos tipos. El primero, documentación, crea un solo archivo que contiene todas las tablas del modelo en el mismo formato que se apreciarían desde la



hoja de cálculo electrónica; el segundo, validación, verifica la congruencia entre los datos alimentados, detecta infactibilidad potencial y genera un listado de errores.

Generación de la matriz. Agrupa la información alimentada en las tablas del modelo, generando un listado de variables, los coeficientes que intervienen en cada ecuación y los lados derechos del sistema. El formato manejado en este archivo podrá ser reconocido por CPLEX O XPRESS.

Optimizador. Ejecuta el optimizador CPLEX O XPRESS para resolver la matriz, controla la recursión del sistema hasta su convergencia y genera los reportes de solución. También genera un reporte para rastrear las iteraciones realizadas durante la solución del modelo, que es de gran utilidad cuando se está probando un nuevo modelo o se quiere depurar uno existente.

Reportes de solución. Se pueden crear reportes en modo texto o como hojas de cálculo. Existen reportes condensados, en los cuales se hace un resumen de las compras, ventas y capacidades utilizadas; reportes completos, en los que se puede apreciar además la actividad de cada planta en particular, flujos y propiedades de todas las corrientes y un resumen de servicios auxiliares; y el primal-dual, en el cual se reporta la actividad de cada ecuación y variable del sistema, su holgura y su actividad dual.

Existe también la posibilidad de generar varios casos al mismo tiempo, donde sólo se alimentan las modificaciones al modelo original. Por ejemplo, cambio de precios o demandas.

Finalmente, PIMS tiene un algoritmo de recortado de crudos para crear mezclas de crudos o cambiar las temperaturas de los diferentes cortes, utilizando regresión cúbica para el ajuste de las propiedades en los nuevos cortes.

3.2. Notación de PIMS

Para entender la estructura de los modelos y la posterior construcción de la matriz, debemos adentrarnos en la notación de PIMS. Analizaremos los nombres de las tablas, que corresponden a la introducción de modelos; los renglones, a las ecuaciones; y las columnas, a las variables.



Tablas. Todas las entradas de datos a PIMS se efectúan mediante archivos generados en la hoja de cálculo electrónica. Deben cumplir con algunos requisitos generales, los cuales se encuentran en el manual del usuario. Podemos clasificarlas según su funcionalidad, tal como se muestra en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Descripción de las tablas de PIMS	
Tabla	Función
<u>Suministro-Demanda</u> BUY, SELL, UTILBUY, UTILSEL, ALTTAGS	Demanda, disponibilidad y precios para insumos, productos y servicios auxiliares.
<u>Destilación</u> ASSAYS, CRDDISTL, CRDPOOLS, SWING, CRDCUTS	Datos de rendimientos y propiedades de los diferentes crudos. Topología y consumo energético de cada una de las torres de destilación.
<u>Submodelos</u> SUBMODS, CAPS, Sxxx	Todos los submodelos que forman al modelo y sus capacidades. Las tablas de submodelos deben empezar con "S" más tres caracteres del nombre de cada equipo.
<u>Mezclado</u> BLENDS, BLNPROP, BLNMIX, BLNSPEC, BLNxxxx	Define especificaciones de mezclado y disponibilidad de componentes para cada uno de los productos. Las tablas BLNxxxx definen propiedades fijas de familias de corrientes.
<u>Recursión</u> RECURSE, PGUESS, PDIST	Define los parámetros para solución de la matriz y los estimados iniciales de propiedades y distribuciones en el modelo.
<u>Varias</u> SETUP, UNITS, CASE, PCALC, SCALE, ROWS, BOUNDS	Definen parámetros del sistema y unidades de medida, escalamiento y coeficientes para cálculo de propiedades. Manejo de varios casos y estructura adicional al modelo.

Nombres de corrientes, equipos, propiedades y servicios auxiliares. Cada uno de ellos deberá llevar un nombre de 3 caracteres alfanuméricos (A-Z, 0-9) y deberá ser único. No debe duplicarse el nombre de una corriente con el de los servicios de planta, ya que ambos se pueden comprar o vender; pero sí se puede utilizar el mismo nombre para un equipo y una corriente o servicio; para una corriente y una propiedad; o para una propiedad y un energético. Debe tenerse cuidado en la duplicación de nombres, ya que puede prestarse a confusión.



Renglones. El nombre consta de 8 caracteres y depende de la funcionalidad que tiene dentro del modelo. En la tabla 3.2 se muestran los diferentes nombres que pueden adoptar los renglones. Cada renglón dentro de la matriz es una ecuación.

Tabla 3.3. Renglones de PIMS

Nombre *	Función
OBJFN	Función objetivo
XTRA	Renglón extra (utilizado por CPLEX O XPRESS)
WBALxxx	Balance de materia en peso de la corriente xxx
VBALxxx	Balance de materia en volumen de la corriente xxx
UBALxxx	Balance de energía o servicio auxiliar xxx
CCAPxxx	Capacidad de la planta xxx
EVBLxxx	Balance de mezclado en volumen de la corriente xxx
EWBLxxx	Balance de mezclado en peso de la corriente xxx
Npppxxx	Especificación: Mínimo de la propiedad ppp para la corriente xxx
Xpppxxx	Especificación: Máximo de la propiedad ppp para la corriente xxx
RBALxxx	Recurción: Balance de materia para la corriente xxx
Rpppxxx	Recurción: Balance de la propiedad ppp para la corriente xxx
Eabcxyz	Ecuación de igualdad construída por el usuario
Labcxyz	Ecuación de menor que o igual construída por el usuario
Gabcxyz	Ecuación de mayor que o igual construída por el usuario
Pabcxyz	Renglones de impresión en reportes. No tienen efecto en la matriz.

* En todos los casos el nombre se generará con las mayúsculas tal como se presentan y las minúsculas se tomarán de los nombres de propiedades, corrientes, energéticos o submodelos correspondientes

Columnas. Son los nombres que adquiere cada variable a optimizar en la matriz. Los nombres que utilizan también dependen de su funcionalidad y se describen en la tabla 3.3.



Tabla 3.3. Columnas de PIMS

Nombre *	Función
PURCxxx	Compra de 1000 unidades de la corriente o servicio xxx
SELLxxx	Venta de 1000 unidades de la corriente o servicio xxx
BVBLxxx	Mezcla de 1000 unidades de volumen del producto xxx
BWBLxxx	Mezcla de 1000 unidades de peso del producto xxx
Bxxxyyy	Mezcla volumétrica de la corriente xxx en el producto yyy
FBLNxxx	1000 unidades de volumen del producto xxx mezclado por fórmula
Sxxxyyy	Actividad de la columna yyy en el submodelo xxx
Rpppxxx	Error en la recursión de la propiedad ppp en la corriente xxx

* En todos los casos el nombre se generará con las mayúsculas tal como se presentan y las minúsculas se tomarán de los nombres de propiedades, corrientes, energéticas o submodelos correspondientes

3.3. Definición de propiedades

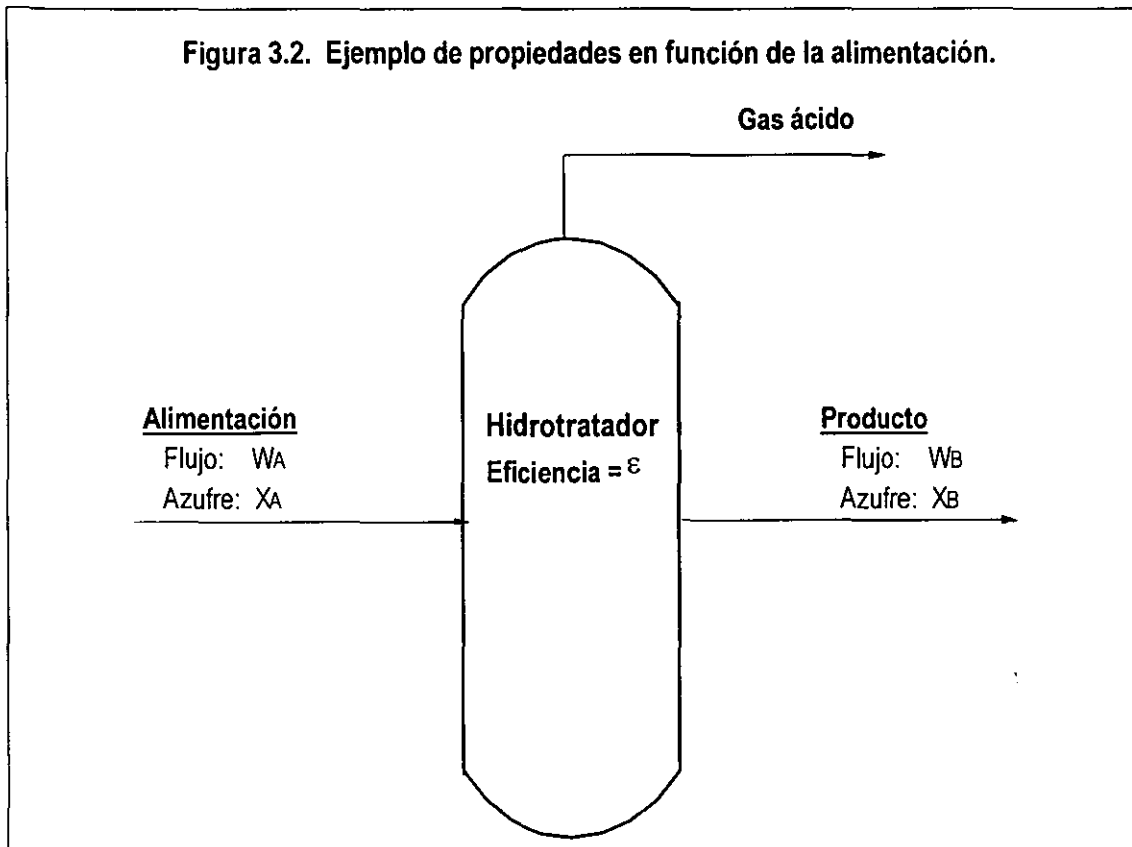
El problema de programación matemática que se plantea dentro del esquema de PIMS debe cumplir restricciones de calidad de productos, la cual estará definida como una función de las corrientes que los generan y valores máximos y mínimos a cumplir de las propiedades características de los productos finales.

La alimentación de propiedades al modelo se efectúa, en primer lugar, en la tabla **ASSAYS**. En esta tabla se definen los rendimientos que tendrán los diferentes crudos que se alimentan al sistema dentro de un proceso de destilación. También se definen las diferentes propiedades de cada uno de los cortes obtenidos en la torre si se procesara el crudo puro. Estos datos se determinan en el laboratorio mediante diferentes métodos analíticos, que en conjunto se denominan *destilación técnica*.

Otra fuente de alimentación de propiedades al modelo es mediante las tablas definidas en **BLNPROP**. En este caso se alimentan las propiedades de otros insumos diferentes al crudo, así como propiedades de corrientes internas que se conocen de antemano y que no



varían al cambiar la operación de la refinería. Un ejemplo de este tipo de corrientes internas es la gasolina de alquilación, cuyas propiedades están determinadas por el catalizador y el tipo de tecnología que se utiliza en el reactor, y están fijas desde el diseño del equipo.



Existen otro tipo de corrientes cuyas propiedades dependen linealmente de las propiedades de la corriente de alimentación al equipo en que son producidas. En este caso se definen coeficientes en la tabla PCALC, que determinan la relación entre la propiedad deseada en ambas corrientes. Por ejemplo, el contenido de azufre a la salida de un hidrotratador se puede determinar en función del contenido de azufre en la corriente de entrada y de la eficiencia de operación del equipo, alimentando el coeficiente necesario en la columna para el azufre y en el renglón que define las relaciones entre la corriente de salida con respecto a la de entrada. En la figura 3.2 se



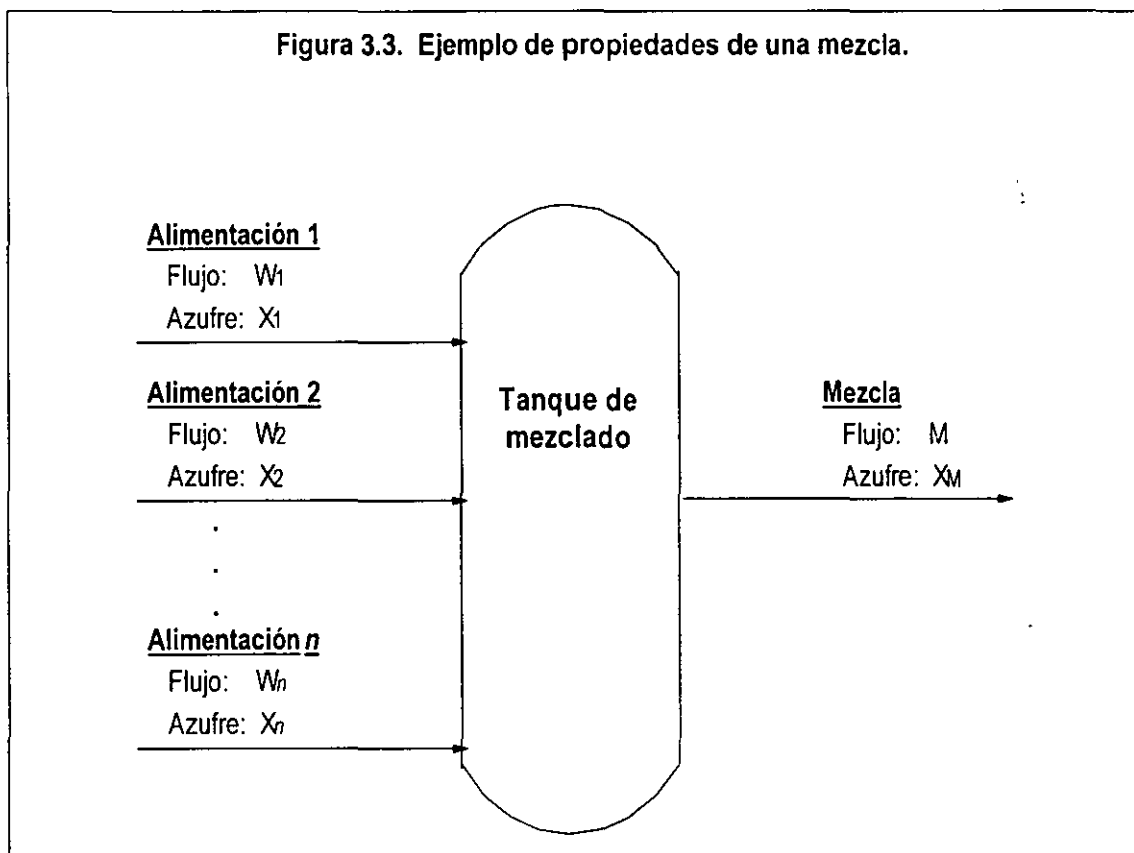
muestra este proceso, del que podemos derivar los balances de materia y de azufre como:

$$W_A = W_B + \text{GAS ACIDO} \quad \dots(3.1)$$

$$X_B = X_A(1 - \varepsilon) \quad \dots(3.2)$$

Finalmente, existen las propiedades de corrientes que deben ser calculadas por el modelo. Estas propiedades son función de la alimentación o del tipo de operación de los procesos específicos. A diferencia del caso anterior, ahora no existe una relación lineal con la alimentación, o bien se tienen más corrientes de entrada. Debe hacerse mención que el cálculo de estas propiedades no tiene nada que ver con los cálculos efectuados por un simulador de procesos, en el cual se determinan propiedades en función de otras conocidas; sino que la propiedad que se calcula es una función no lineal de la misma propiedad a la entrada.

Figura 3.3. Ejemplo de propiedades de una mezcla.





Un ejemplo de este tipo de cálculo es una mezcla de corrientes, figura 3.3. El flujo total de mezcla, M , y la propiedad de salida, X_M , estarán determinados por:

$$M = \sum W_i \quad \dots(3.3)$$

$$X_M = \frac{\sum X_i W_i}{\sum W_i} = \frac{\sum X_i W_i}{M} \quad \dots(3.4)$$

Como puede verse en estas ecuaciones, la relación entre X_M y las variables de flujo, W_i , es no lineal, por lo que PIMS las resuelve mediante un algoritmo de recursión que consiste en suponer un valor inicial de X_M y lo verifica después de optimizar los flujos de toda la refinería. El error entre el valor calculado y la estimación inicial se utiliza para suponer un nuevo valor mediante la técnica que Aspen denomina "*recursión distributiva*".

3.4. Generación de ecuaciones y recursión distributiva

Existe una gran variedad de métodos numéricos para la solución de problemas matemáticos. La recursión distributiva consiste en afectar el error en las propiedades de corrientes posteriores con el error de las corrientes de dónde se producen. Para entender cómo se deriva este método analicemos el siguiente ejemplo:

EJEMPLO 3.1. MEZCLADO DE GASOLINAS. se debe maximizar la ganancia al producir dos gasolinas cuyas características se muestran en la tabla 3.5.a. Las materias primas son dos naftas ligeras y dos naftas pesadas, que se muestran en la tabla 3.5.b.

El proceso consta de dos tanques de almacenamiento de naftas, un reformador y dos tanques para el mezclado de gasolinas. En la figura 3.4 se muestra un diagrama de flujo del proceso.

El reformador es capaz de incrementar el índice de octano, RON, hasta en 25 puntos, con un costo energético por barril y por 10 puntos de octano de 1 unidad para nafta pesada y 1.5 unidades para nafta ligera.

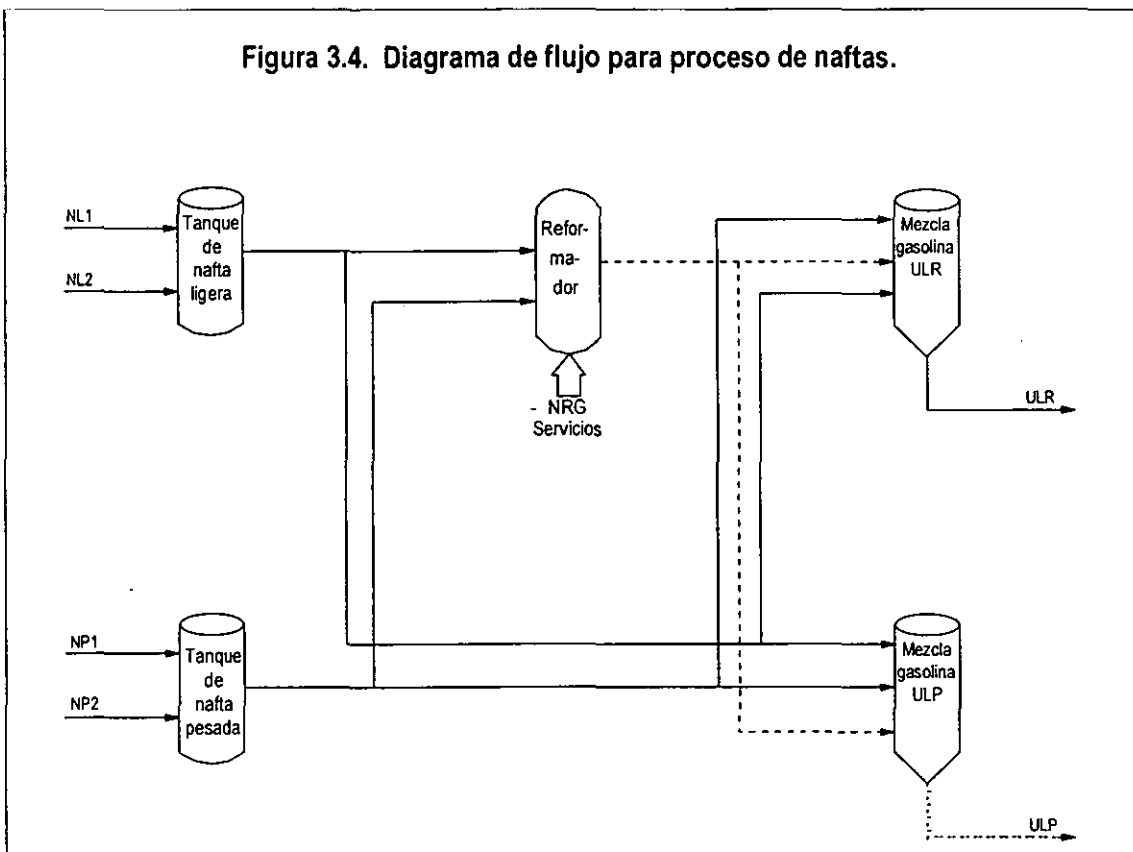
La unidad energética es una mezcla de energía eléctrica, catalizadores, calentamiento y enfriamiento necesarios para el proceso. Esta combinación tendrá un costo de \$3.00/unidad.



Tabla 3.5. Insumos y productos del mezclado de gasolinas.

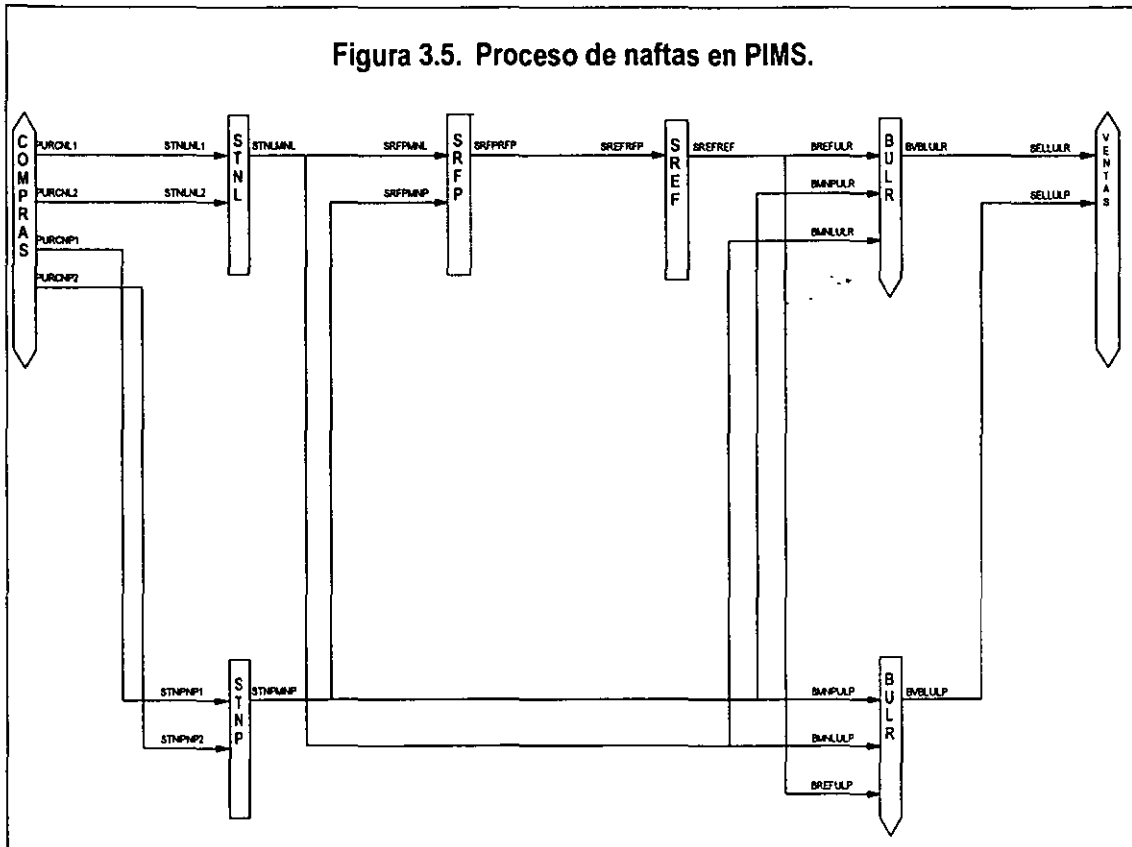
Producto	Volumen (MBD)	Precio (\$/bbl)	No. Octano (RON)	Gravedad específica (SPG)
Gasolina ULR	75 - 125	20.50	75 mínimo	Reportar
Gasolina ULP	75 - 125	25.00	85 mínimo	Reportar
a. Características de gasolinas a producir				
Producto	Volumen (MBD)	Precio (\$/bbl)	No. Octano (RON)	Gravedad específica (SPG)
Nafta ligera 1	60.0	16.60	65.02	0.6915
Nafta ligera 2	53.0	19.85	73.20	0.6457
Nafta pesada 1	40.0	8.35	41.11	0.7470
Nafta pesada 2	43.0	13.30	53.36	0.7487
b. Características de las naftas disponibles				

Figura 3.4. Diagrama de flujo para proceso de naftas.





SOLUCION. En primer lugar debemos identificar la función objetivo, las variables y restricciones del sistema. En la figura 3.5 se muestra nuevamente el diagrama de flujo, pero ahora utilizando la notación de PIMS descrita anteriormente. El submodelo SRFP que se añadió no representa ningún equipo físico, pero nos servirá para evaluar las propiedades de alimentación al reformador.



La función objetivo es maximizar el margen de operación de la planta, es decir:

$$\text{max: } - \text{Compras} + \text{Ventas} \quad \dots(3.5)$$

que utilizando la notación de PIMS es :

$$\begin{aligned} \text{OBJFN:} \quad & -16.60\text{PURCNL1} - 19.85\text{PURCNL2} - \\ & -8.35\text{PURCNP1} - 12.30\text{PURCNP2} - \\ & -3.00\text{PURCNRG} + 20.50\text{SELLULR} + \\ & + 24.00\text{SELLULP} \quad \dots(3.6) \end{aligned}$$



Las primeras restricciones que podemos identificar son los volúmenes máximo y mínimo de insumos y productos, es decir

$$0 \leq \text{PURCNL1} \leq 60 \quad \dots(3.7)$$

$$0 \leq \text{PURCNL2} \leq 55 \quad \dots(3.8)$$

$$0 \leq \text{PURCNP1} \leq 40 \quad \dots(3.9)$$

$$0 \leq \text{PURCNP2} \leq 45 \quad \dots(3.10)$$

$$75 \leq \text{SELLUR} \leq 125 \quad \dots(3.11)$$

$$75 \leq \text{SELLULP} \leq 125 \quad \dots(3.12)$$

Otra restricción al modelo es la capacidad del reformador

$$0 \leq \text{CCAPREF} \leq 100 \quad \dots(3.13)$$

Finalmente, el índice de octano de las gasolinas deberá ser mayor que o igual a la especificación requerida. El número de octano de las gasolinas es una función no lineal de los flujos de todas las corrientes involucradas, que tampoco se conocen. Para resolver estas no linealidades PIMS utiliza la recursión distributiva, la cual surge a partir de resolver los balances de materia y de propiedades.

Comencemos con los balances de materia globales, que por tratarse de corrientes con densidades muy parecidas, puede realizarse en volumen, de tal modo que :

$$\text{- Compras - Producción + Consumo + Ventas} = 0 \quad \dots(3.14)$$

al aplicarse a cada una de las corrientes que intervienen en el modelo tendremos

$$\text{VBALNL1:} \quad \text{-PURCNL1 + STNLNL1} = 0 \quad \dots(3.15)$$

$$\text{VBALNL2:} \quad \text{-PURCNL2 + STNLNL2} = 0 \quad \dots(3.16)$$

$$\text{VBALNP1:} \quad \text{-PURCNP1 + STNPNP1} = 0 \quad \dots(3.17)$$

$$\text{VBALNP2:} \quad \text{-PURCNP2 + STNPNP2} = 0 \quad \dots(3.18)$$

$$\text{VBALMNL:} \quad \text{-STNLNL1 - STNLNL2 + SRFPMNL +} \\ \text{+ BMNLULR + BMNLULP} = 0 \quad \dots(3.19)$$

$$\text{VBALMNP:} \quad \text{-STNPNP1 - STNPNP2 +} \\ \text{+ SRFPMNP + BMNPULR - BMNPULP} = 0 \quad \dots(3.20)$$

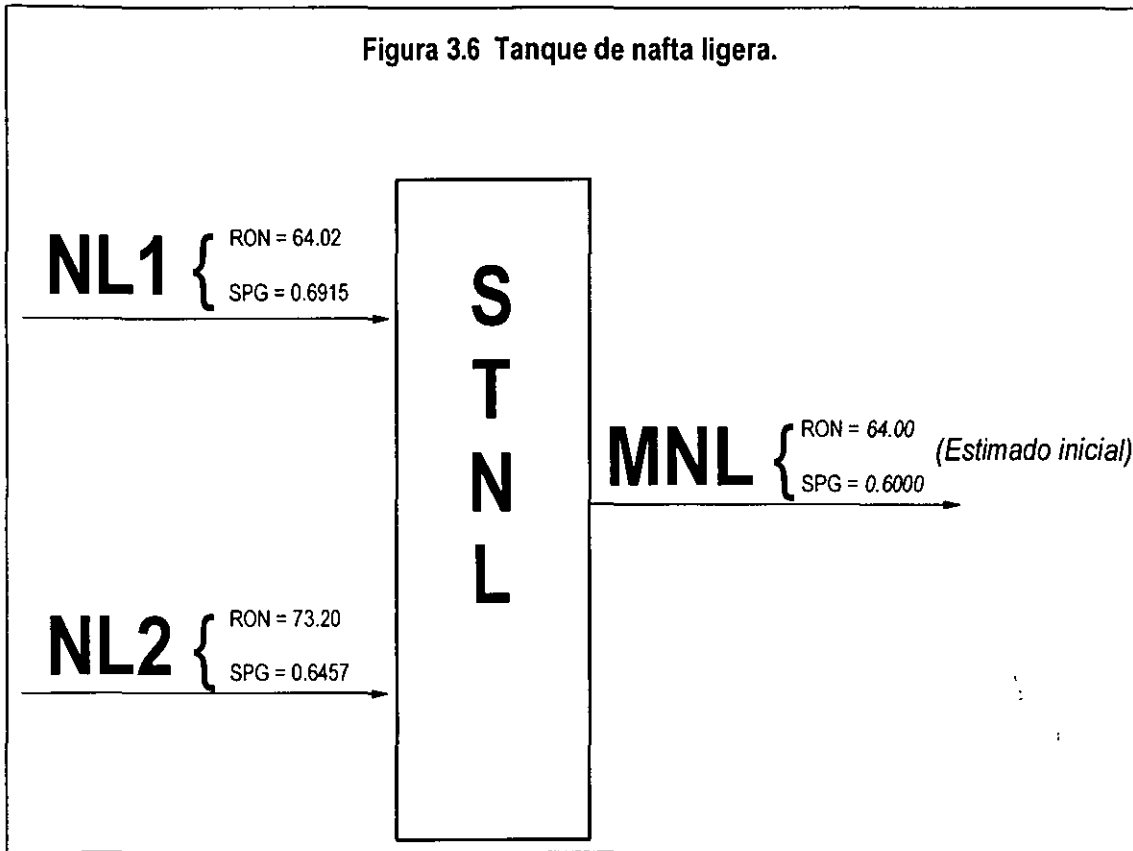
$$\text{VBALRFP:} \quad \text{-SRFPMNL - SRFPMNP + SRFPRFP} = 0 \quad \dots(3.21)$$



$$VBALREF: \quad -SREFRFP + BREFULR + BREFULP \quad \dots(3.22)$$

$$VBALULR: \quad -BVBLULR + SELLULR = 0 \quad \dots(3.23)$$

$$VBALULP: \quad -BVBLULP + SELLULP = 0 \quad \dots(3.24)$$



El siguiente paso será establecer los balances de materia en cada uno de los submodelos de la refinería. Para el tanque de nafta ligera, figura 3.6, el balance de materia será

$$RBALMNL: \quad -STNLNL1 - STNLNL2 + STNLMNL = 0 \quad \dots(3.25)$$

El balance de octano estará dado por

$$RRONMNL: \quad -0.6402STNLNL1 - 0.7320STNLNL2 + 0.6400STNLMNL + RRONMNL = 0 \quad \dots(3.26)$$



Nótese que se utilizó un factor de escalamiento, con el que se normalizan los coeficientes de la ecuación y se evitan errores de redondeo durante la solución numérica del modelo en la computadora. El factor de escala se alimenta a PIMS en una tabla independiente y se utiliza un número específico para cada propiedad.

La variable $RRONMNL$ será el error entre la suposición inicial y el cálculo de la propiedad. Después de la optimización podremos calcular el número de octano de salida como:

$$RON_{MNL} = \frac{0.6402STNLNL1 + 0.7320STNLNL2}{STNLNL1 + STNLNL2} \times 100 \quad \dots(3.27)$$

Combinando las ecuaciones (3.26) y (3.27) tendremos la diferencia entre el RON supuesto y el RON calculado:

$$\Delta RON = RON_{MNL} - 64.0 \quad \dots(3.28)$$

$$\Delta RON = \frac{0.6402STNLNL1 + 0.7320STNLNL2 + 0.64STNLMNL}{STNLNL1 + STNLNL2} \times 100 \quad \dots(3.29)$$

$$\Delta RON = \frac{RRONMNL}{STNLMNL} \times 100 \quad \dots(3.30)$$

de tal modo que el nuevo valor del octano para la mezcla de nafta ligera será :

$$RON_{MNL} = 64 + 100 \frac{RRONMNL}{STNLMNL} \quad \dots(3.31)$$

Este valor será utilizado en los submodelos en los que intervenga la corriente MNL, de modo que el error debido a la suposición inicial tenga impacto en los cálculos subsiguientes.

Efectuando, de igual manera, un balance para la gravedad específica, SPG , se obtiene

$$RSPGMNL: \quad -0.6915STNLNL1 - 0.6457STNLNL2 + 0.6000STNLMNL + RSPGMNL = 0 \quad \dots(3.32)$$

Y

$$SPG_{MNL} = 0.6 + \frac{RSPGMNL}{STNLMNL} \quad \dots(3.33)$$

Para el tanque de nafta pesada, figura 3.7, se derivan las ecuaciones:

$$RBALMNP: \quad -STNPNP1 - STNPNP2 + STNPMNP = 0 \quad \dots(3.34)$$



$$RRONMNP: \quad -0.4111STNPNP1 - 0.5238STNPNP2 + \dots(3.35)$$

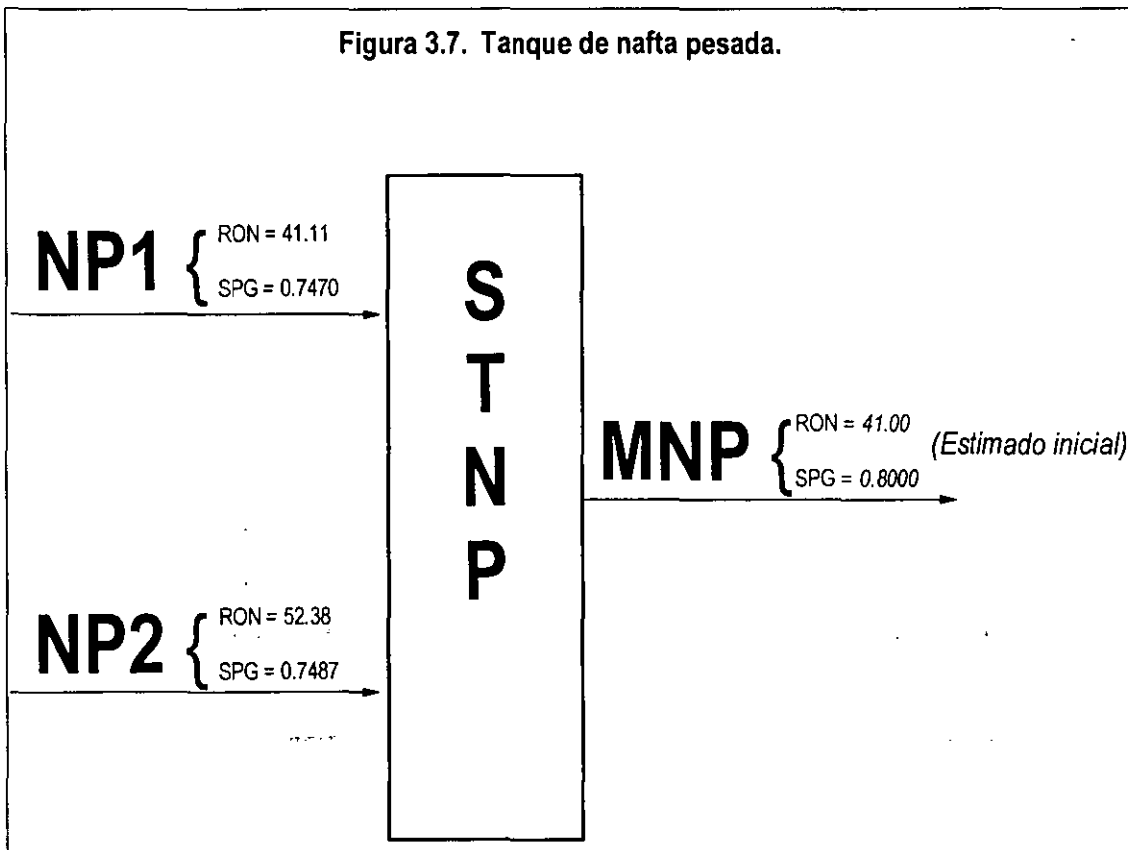
$$+ 0.4100STNPMNP + RRONMNP = 0$$

$$RSPGMNP: \quad -0.7470STNPNP1 - 0.7487STNPNP2 + \dots(3.36)$$

$$+ 0.8000STNPMNP + RSPGMNP = 0$$

$$RON_{MNP} = 41 + 100 \frac{RRONMNP}{STNPMNP} \dots(3.37)$$

$$SPG_{MNP} = 0.8 + \frac{RSPGMNP}{STNPMNP} \dots(3.38)$$



El siguiente submodelo que analizaremos será la alimentación al reformador, figura 3.8. Nótese que las propiedades utilizadas en la alimentación están afectadas por el error de los submodelos anteriores. El balance de materia será:

$$RBALRFP: \quad -SRFPMNL - SRFPMNP + SRFPRFP = 0 \dots(3.39)$$

Los balances de octano y gravedad específica quedarán como:

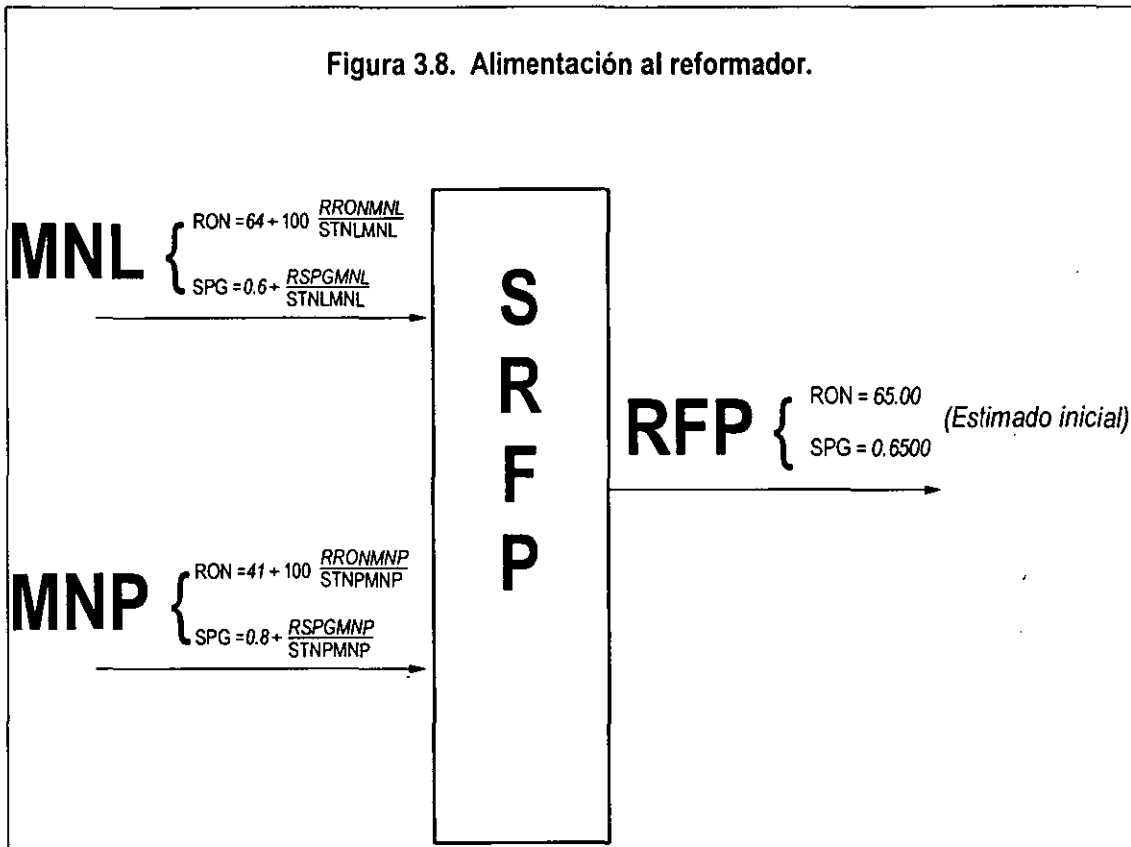


RRONRFP:

$$\begin{aligned}
 & - \left(0.64 + \frac{RRONMNL}{STNLMNL} \right) SRFPMNL - \\
 & - \left(0.41 + \frac{RRONMNP}{STNPMNP} \right) SRFPMNP + \dots(3.40) \\
 & + 0.65SRFPRFP + RRONRFP = 0
 \end{aligned}$$

RSPGRFP:

$$\begin{aligned}
 & - \left(0.6 + \frac{RSPGMNL}{STNLMNL} \right) SRFPMNL - \\
 & - \left(0.8 + \frac{RSPGMNP}{STNPMNP} \right) SRFPMNP + \dots(3.41) \\
 & + 0.65SRFPRFP + RSPGRFP = 0
 \end{aligned}$$



Las ecuaciones (3.40) y (3.41) son no lineales. Para deshacernos de esta no linealidad definiremos una *distribución* del flujo como:

$$\delta_{MNL RFP} = \frac{SRFPMNL}{STNLMNL} = 0.6 \dots(3.42)$$



que es la fracción de nafta ligera que se alimenta al reformador, con respecto al total de nafta ligera que sale del tanque. Esta fracción también requiere de una suposición inicial, según se marca, y se actualiza de una recursión a la otra de acuerdo a los flujos de las corrientes en el punto óptimo.

Para la nafta pesada la distribución será :

$$\delta_{\text{MNP RFP}} = \frac{\text{SRFPMNP}}{\text{STNPMNP}} = 0.5 \quad \dots(3.43)$$

Si sustituimos estas distribuciones en las ecuaciones (3.40) y (3.41) obtendremos :

$$\begin{aligned} \text{RRONRFP:} \quad & -0.64\text{SRFPMNL} - \delta_{\text{MNL RFP}}\text{RRONMNL} - \\ & -0.41\text{SRFPMNP} - \delta_{\text{MNP RFP}}\text{RRONMNP} + \\ & + 0.65\text{SRFPRFP} + \text{RRONRFP} = 0 \end{aligned} \quad \dots(3.44)$$

$$\begin{aligned} \text{RSPGRFP:} \quad & -0.6\text{SRFPMNL} - \delta_{\text{MNL RFP}}\text{RSPGMNL} - \\ & -0.8\text{SRFPMNP} - \delta_{\text{MNP RFP}}\text{RSPGMNP} + \\ & + 0.65\text{SRFPRFP} + \text{RSPGRFP} = 0 \end{aligned} \quad \dots(3.45)$$

Utilizando un estimado inicial de 0.6 y 0.5 para las naftas ligera y pesada, respectivamente, las ecuaciones (3.44) y (3.45) se transforman en :

$$\begin{aligned} \text{RRONRFP:} \quad & -0.64\text{SRFPMNL} - 0.41\text{SRFPMNP} + \\ & + 0.65\text{SRFPRFP} - 0.5\text{RRONMNL} - \\ & - 0.5\text{RRONMNP} + \text{RRONRFP} = 0 \end{aligned} \quad \dots(3.46)$$

$$\begin{aligned} \text{RSPGRFP:} \quad & -0.6\text{SRFPMNL} - 0.8\text{SRFPMNP} + \\ & + 0.65\text{SRFPRFP} - 0.5\text{RSPGMNL} - \\ & - 0.5\text{RSPGMNP} + \text{RSPGRFP} = 0 \end{aligned} \quad \dots(3.47)$$

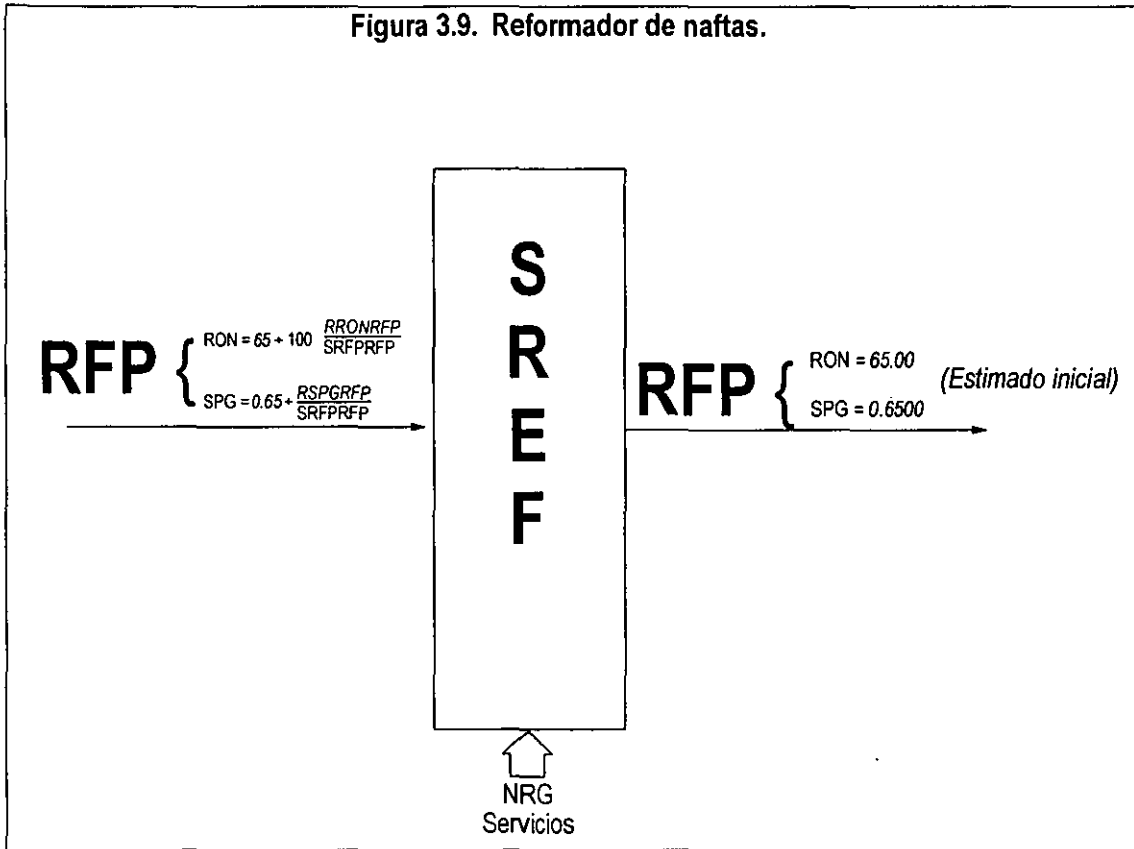
Como puede notarse, el error en el cálculo de propiedades de RFP incluye la fracción de los errores anteriores según la proporción del flujo estimada. Esta metodología es la denominada *recursión distributiva*.

La operación de varios equipos depende de las condiciones de la corriente de alimentación. Al modelar un equipo ficticio como en este caso, se conocerán las propiedades de la corriente de alimentación como si existiese un tanque de mezclado previo al equipo.



El costo energético de alimentar nafta ligera al reformador será 0.5 unidades mayor que para la nafta pesada, así que el balance de energía en este submodelo será :

$$NRG_{SRFP} = 0.5SRFPMNL \quad \dots(3.48)$$



Para el reformador, figura 3.9, el balance de materia está dado por:

$$RBALREF: \quad -SRFPRFP + SREFREF = 0 \quad \dots(3.49)$$

En este caso el balance de octano estará formado por el octano alimentado más el incremento en el reactor o severidad

$$RRONREF: \quad -\left(0.65 + \frac{RRONRFP}{SRFPRFP}\right)SREFRFP - \\ -0.1SREFSEV + 0.9SREFREF + \\ + RRONREF = 0 \quad \dots(3.50)$$

Como no existe otra opción de flujo para RFP, la distribución :



$$\delta_{RFPREF} = \frac{SREFRFP}{SRFPRFP} = 1.0 \quad \dots(3.51)$$

de modo que el balance de octano para la nafta reformada queda :

$$\begin{aligned} RRONREF: \quad & -0.65SREFRFP - 0.1SREFSEV + \\ & + 0.9SREFREF - RRONRFP + \\ & + RRONREF = 0 \end{aligned} \quad \dots(3.52)$$

Existe un límite en la severidad de operación del reactor, que no puede incrementar el octano más de 25 puntos, es decir:

$$SEVERIDAD = RON_{REF} - RON_{RFP} \leq 25 \quad \dots(3.53)$$

el número de octano a la entrada y a la salida será

$$RON_{RFP} = 65 + 100 \frac{RRONRFP}{SRFPRFP} \quad \dots(3.54)$$

$$RON_{REF} = 90 + 100 \frac{RRONREF}{SREFREF} \quad \dots(3.55)$$

Al multiplicar por el flujo, la diferencia de octano será

$$\begin{aligned} (RON_{REF} - RON_{RFP})SREFRFP &= \\ &= 0.9SREFREF + RRONREF - \\ &\quad - \left(0.65 + \frac{RRONRFP}{SRFPRFP} \right) SREFRFP \end{aligned} \quad \dots(3.56)$$

Combinando las ecuaciones (3.50) y (3.56) tendremos que:

$$(RON_{REF} - RON_{RFP})SREFRFP = 0.1SREFSEV \quad \dots(3.57)$$

que al combinarse con la ecuación (3.53) nos da

$$0.1SREFSEV \leq 0.25SREFRFP \quad \dots(3.58)$$

o bien, en notación de PIMS

$$LMAXOCT: \quad -SREFSEV + 0.4SREFRFP \leq 0 \quad \dots(3.59)$$

Para la gravedad específica tendremos

$$\begin{aligned} RSPGREF: \quad & -0.65SREFRFP + 0.65SREFREF - \\ & - RSPGRFP + RSPGREF = 0 \end{aligned} \quad \dots(3.60)$$

El balance de energía en el reformador será

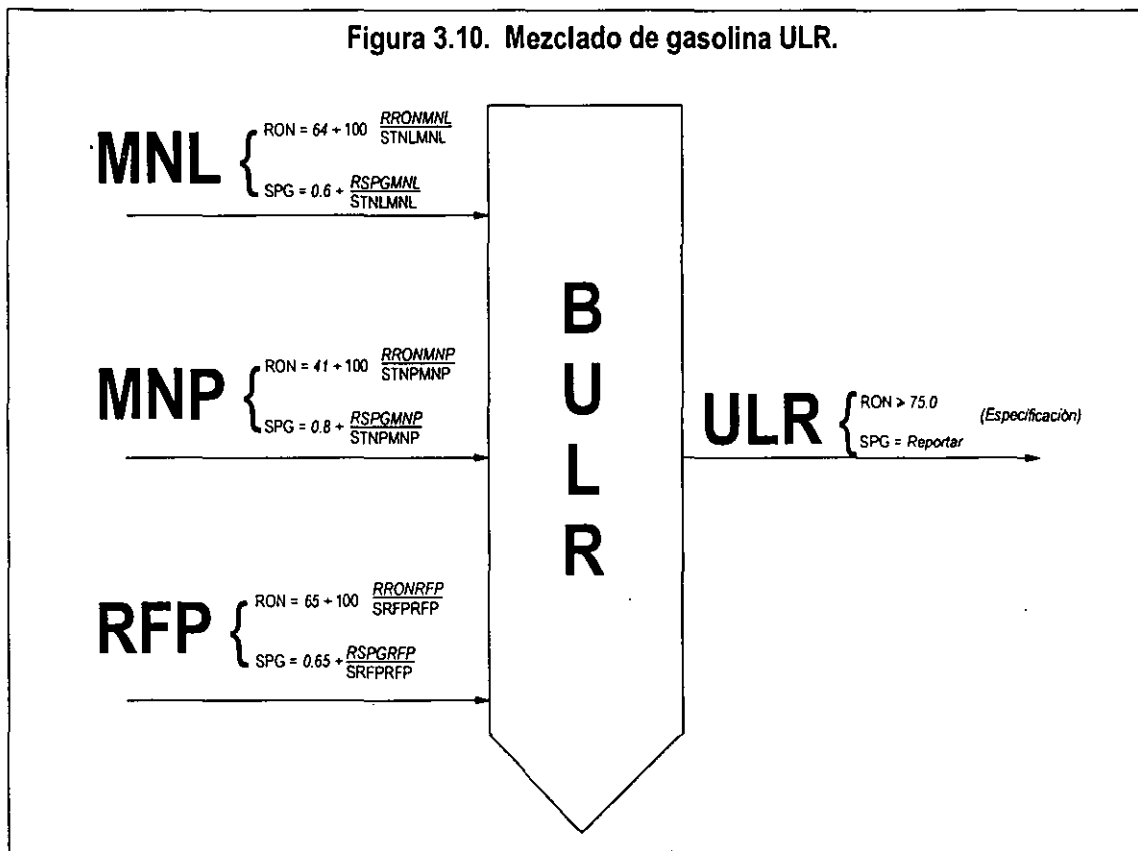
$$NRG_{SREF} = 1.0SREFRFP \quad \dots(3.61)$$



Como no existe otro consumo de energía en el modelo, ya se puede generar la ecuación de balance de energía global

$$UBALNRG: \quad -PURCNRG + 0.5SRFPMNL + 1.0SREFRFP = 0 \quad \dots(3.62)$$

El siguiente submodelo que se presenta es el tanque de mezclado de la gasolina ULR, figura 3.10.



En esta caso las propiedades calculadas deben verificarse contra la especificación de productos, por lo que la estructura de las ecuaciones es diferente. Realizando un balance de materia volumétrico se obtiene

$$EVBLULR: \quad BVBLULR - BMNLULR - BMNPULR - BREFULR = 0 \quad \dots(3.63)$$

Para verificar que se cumpla la restricción impuesta al octano se construye la desigualdad



NRONULR:

$$\begin{aligned}
&0.75BVBLULR - \left(0.64 + \frac{RRONMNL}{STNLMNL}\right)BMNLULR - \\
&\quad - \left(0.41 + \frac{RRONMNP}{STNPMNP}\right)BMNPULR - \\
&\quad - \left(0.90 + \frac{RRONREF}{SREFREF}\right)BREFULR \leq 0
\end{aligned} \tag{3.64}$$

En este caso también debe suponerse una distribución inicial, que es

$$\delta_{MNLULR} = \frac{BMNLULR}{STNLMNL} = 0.15 \tag{3.65}$$

$$\delta_{MNPULR} = \frac{BMNPULR}{STNPMNP} = 0.30 \tag{3.66}$$

$$\delta_{REFULR} = \frac{BREFULR}{SREFREF} = 0.60 \tag{3.67}$$

de modo que la ecuación (3.64) se convierte en

$$\begin{aligned}
\text{NRONULR:} \quad &0.75BVBLULR - 0.64BMNLULR - \\
&\quad - 0.41BMNPULR - 0.90BREFULR - \\
&\quad - 0.15RRONMNL - 0.30RRONMNP - \\
&\quad - 0.60RRONREF \leq 0
\end{aligned} \tag{3.68}$$

Para calcular la SPG de la gasolina necesitamos utilizar la relación que existe entre el peso y el volumen:

$$SPG = \frac{1\text{Ton}}{0.159\text{bbbl}} \tag{3.69}$$

de modo que, haciendo el balance de materia en peso:

$$\begin{aligned}
\text{EWBLULR:} \quad &BWBLULR - 0.159 \left(0.6 + \frac{RSPGMNL}{STNLMNL}\right)BMNLULR - \\
&\quad - 0.159 \left(0.8 + \frac{RSPGMNP}{STNPMNP}\right)BMNPULR - \\
&\quad - 0.159 \left(0.65 + \frac{RSPGREF}{SREFREF}\right)BREFULR = 0
\end{aligned} \tag{3.70}$$

Utilizando las distribuciones (3.65), (3.66) y (3.67) queda

$$\begin{aligned}
\text{EWBLULR:} \quad &BWBLULR - 0.095BMNLULR - \\
&\quad - 0.127BMNPULR - 0.103BREFULR - \\
&\quad - 0.024RRONMNL - 0.048RRONMNP - \\
&\quad - 0.095RRONREF = 0
\end{aligned} \tag{3.71}$$



y utilizando la ecuación (3.69)

$$SPG_{ULR} = \frac{BWBLULR}{0.159 BVBLULR} \quad \dots(3.72)$$

Finalmente, para la mezcla de la gasolina ULP, figura 3.11, se tendrá:

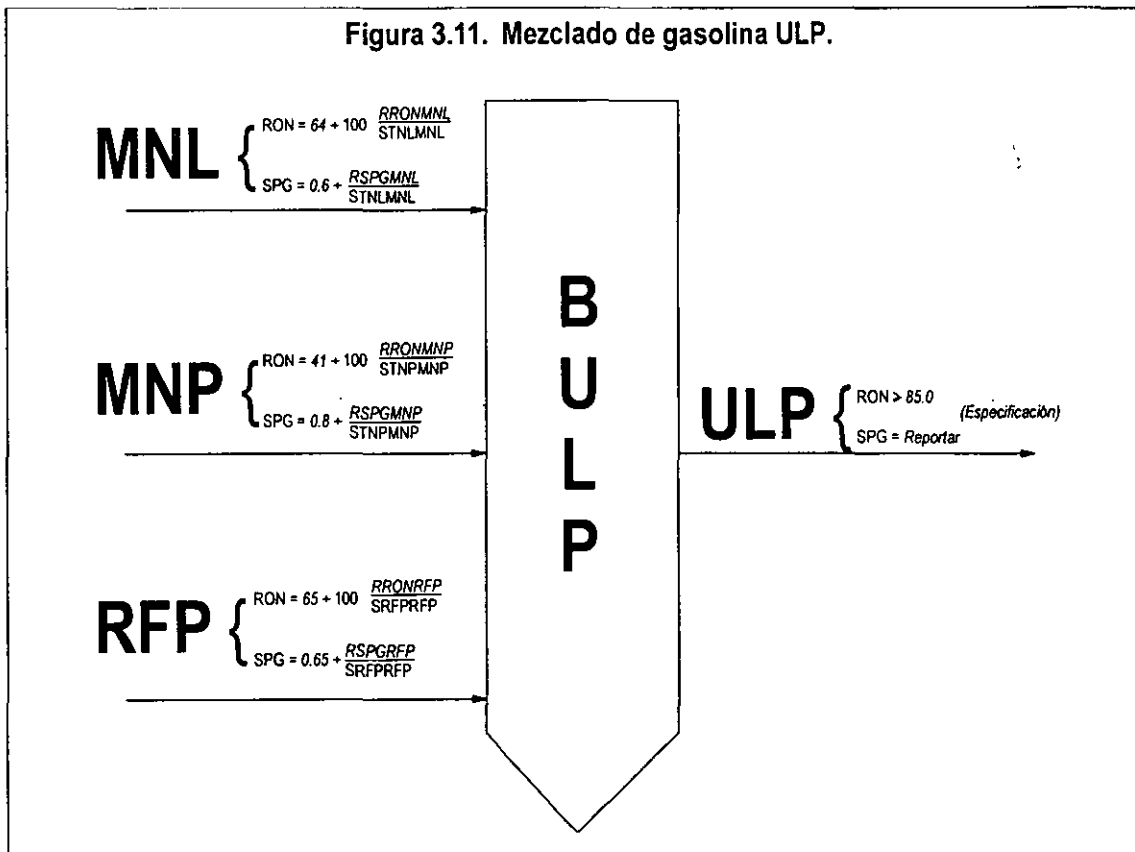
$$EVBLULP: \quad BVBLULP - BMNLULP - BMNPULP - BREFULP = 0 \quad \dots(3.73)$$

$$NRONULP: \quad 0.85BVBLULP - 0.64BMNLULP - \\ -0.41BMNPULP - 0.90BREFULP - \\ -0.25RRONMNL - 0.20RRONMNP - \\ -0.40RRONREF \leq 0 \quad \dots(3.74)$$

$$EWBLULP: \quad BWBLULP - 0.095BMNLULP - \\ -0.127BMNPULP - 0.103BREFULP - \\ -0.040RRONMNL - 0.032RRONMNP - \\ -0.064RRONREF = 0 \quad \dots(3.75)$$

$$SPG_{ULP} = \frac{BWBLULP}{0.159 BVBLULP} \quad \dots(3.76)$$

Figura 3.11. Mezclado de gasolina ULP.





Las distribuciones que se utilizaron son :

$$\delta_{\text{MNLULP}} = \frac{\text{BMNLULP}}{\text{STNLMNL}} = 0.25 \quad \dots(3.77)$$

$$\delta_{\text{MNPULP}} = \frac{\text{BMNPULP}}{\text{STNPMNP}} = 0.20 \quad \dots(3.78)$$

$$\delta_{\text{REFULP}} = \frac{\text{BREFULP}}{\text{SREFREF}} = 0.60 \quad \dots(3.79)$$

Es importante verificar que la suma de todas las distribuciones de una corriente hacia las otras sea la unidad.

En el apéndice B se presenta la solución numérica de este ejercicio, mostrando los valores que se obtienen en cada recursión. También se presenta todo el modelo en tablas de PIMS.

También se intentó resolver la matriz sin tomar en cuenta las distribuciones. En este caso el modelo no converge aún en el caso en que se alimentó como supuesto inicial la solución óptima. Ésto nos muestra que mediante la recursión distributiva el modelo puede evaluar la ventaja de un insumo más caro pero de mejor calidad.

3.5. Limitaciones de PIMS

Debe hacerse mención de que PIMS no es un simulador de proceso, y dista mucho de serlo. Las tablas alimentadas al modelo contienen los datos tecnológicos y económicos relativos al proceso, como son los balances de materia y energía, propiedades de corrientes, precios y capacidades de plantas. La solución será el modo de operación de la refinería, flujos y capacidades, de acuerdo a un óptimo económico.

La principal limitación de PIMS es que no deben variar significativamente las condiciones del proceso, ya que los rendimientos y propiedades de salida dependen en gran medida de éstas. Además, al modelar mediante ecuaciones lineales un problema no lineal, la convergencia dependerá de la construcción de la estructura de recursión, que puede contener errores de modelación, causando óptimos locales u oscilación entre soluciones alternas.



Debe, por lo tanto, tenerse especial cuidado durante la etapa de modelación; evitando manejar propiedades que posteriormente no se utilicen y se trunque la estructura de recursión. Tampoco es recomendable un modelo sobre-restringido, ya que puede tener algún paso infactible y desviarse de la solución óptima.

PIMS no determina directamente elasticidad de precios o demandas, pero puede ser una buena herramienta auxiliar en su determinación. El efecto de la interacción precio - volumen en un mercado determinado sólo se puede manejar de manera escalonada y no continua, pero se pueden manejar varios escalones en las tablas de compra de insumos y venta de productos.

Tampoco es posible determinar niveles óptimos de inventarios con PIMS, ya que sólo se optimiza un período. Existe una opción desarrollada por Aspen para el manejo de escenarios en el tiempo, denominada P-PIMS, pero su aplicación sale de los objetivos de este trabajo.

Finalmente, no se debe perder de vista que PIMS es un optimizador y no un simulador de procesos. Todas las condiciones de proceso deben ser alimentadas al modelo y éste únicamente selecciona los flujos y capacidades de operación, maximizando el margen variable de la refinería.



4. Metodología propuesta

El análisis económico es eje fundamental de este trabajo. De su aplicación surgen los precios de transferencia y éstos, a su vez, complementarán la información necesaria para reforzar o refutar una decisión de índole económica en la refinería.

En la sección 4.1, métodos tradicionales de evaluación, se presentan diferentes estrategias que tradicionalmente son utilizadas para el análisis económico y la determinación de precios.

La sección 4.2, análisis dual (precios sombra), describe la metodología propuesta, basada en los precios sombra que se obtienen durante la optimización de la refinería en un problema de programación matemática.

En la sección 4.3, selección e interpretación de ecuaciones, se hace una interpretación de los precios sombra asociados a los diferentes tipos de ecuaciones que forman el modelo matemático.

4.1. Métodos tradicionales de evaluación

Método de costos unitarios de promedio ponderado por complejidad de proceso

El método se basa en la complejidad de los procesos tomando en cuenta el valor monetario de los equipos instalados, suponiendo que éste es una medida del nivel tecnológico que encierran; por lo que se le da un peso o "puntuación" a cada uno de estos equipos en base a su factura. A medida que cada producto pasa por los diferentes equipos del proceso, va acumulando puntos, de tal suerte que, al final del proceso, cada producto terminado habrá acumulado una cantidad de puntos que refleje el grado de complejidad tecnológica en su elaboración.

Los porcentajes obtenidos por cada corriente, ponderados en volumen, serán la base para distribuir todos los gastos de la refinería, determinando, así, cuánto cuesta la unidad de cada producto al dividir el costo total de acuerdo a la puntuación entre el volumen producido en cada caso.



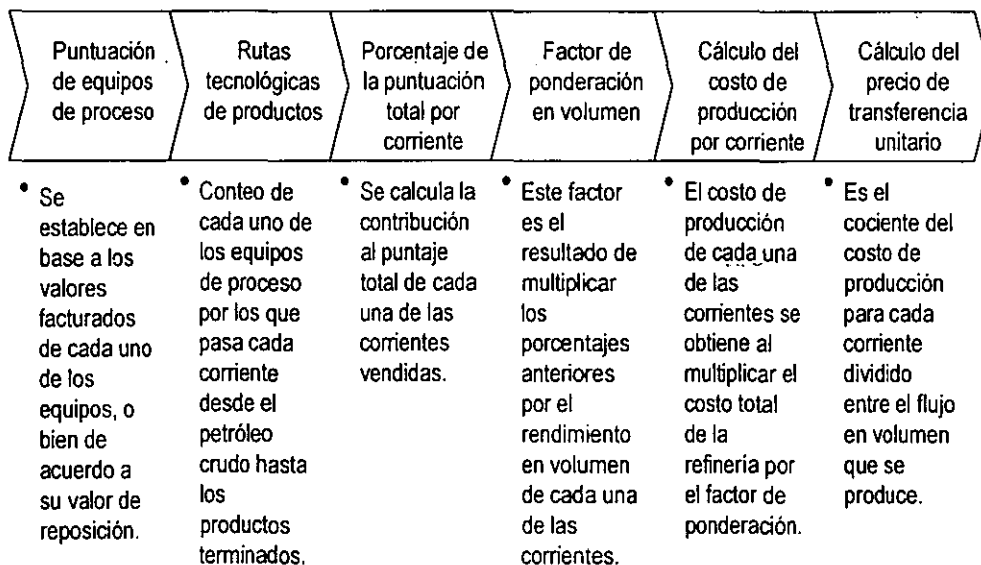
Este método es de fácil comprensión y utilización. Pueden introducirse todos los datos en una hoja de cálculo electrónica y obtener un sistema de cálculo de costos rápido y sencillo al operarse.

La complejidad del proceso de refinación, sin embargo, no permite un seguimiento claro de corrientes desde petróleo crudo hasta productos finales. Además, al aplicar este método estrictamente, se calcularán precios iguales para todas las corrientes de salida de un mismo equipo, de modo que, por ejemplo, tendría el mismo valor una gasolina catalítica que el residuo pesado o los gases de desfogue de una FCC.

Esta evaluación toma en cuenta exclusivamente un enfoque contable de los costos, sin considerar el valor agregado de un producto de acuerdo a su uso tecnológico. Los resultados así obtenidos no proporcionarán información adicional cuando se trate de selección de alternativas de proceso ni análisis preliminar de las operaciones de la refinería.

En la figura 4.1 se sintetiza este método.

Figura 4.1. Método de cálculo el costo ponderando el nivel tecnológico





Evaluación por bloques de proceso independientes

Esta evaluación consiste en un balance contable por bloques de proceso; se requiere conocer los rendimientos y propiedades de cada una de las corrientes que intervienen en el bloque a analizar.

De acuerdo a la calidad de cada una de las corrientes, se les asigna un valor como si fueran vendidas en un mercado " spot ", considerando un ajuste en el precio debido a la calidad, con respecto a los productos terminados. Por ejemplo, la nafta atmosférica se evaluará como gasolina, ajustando el precio por el índice de octano y presión de vapor; mientras el gasóleo primario se evalúa como diesel, ajustando el precio por índice de cetano y contenido de azufre.

Los precios de referencia corresponden a un mercado " spot " en un período determinado. Estos precios sirven para calcular los ajustes, utilizando dos productos similares, pero con diferente especificación. Por ejemplo, el valor del punto de octano por barril se calcula utilizando las cotizaciones de alto octanaje (RON=92) y de medio octanaje (RON=87).

Las propiedades que se utilizan para calcular el ajuste dependen de cada producto. El común denominador es que son las propiedades que normalmente quedan en el límite de la especificación para el refinador.

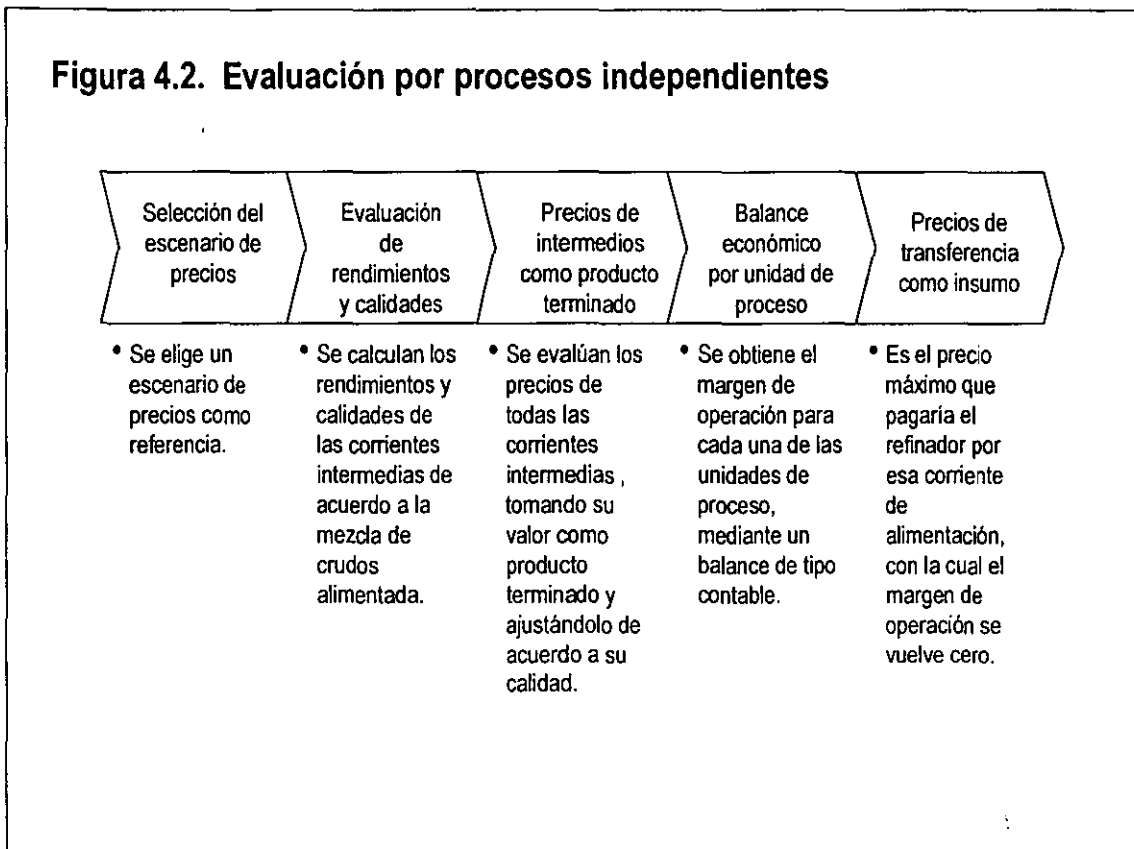
Una vez que se tienen los precios de cada una de las corrientes y sus rendimientos, se hace un balance contable del bloque para obtener el margen operacional del equipo en cuestión.

El precio máximo de transferencia del principal insumo será la suma del precio considerado más el margen operacional dividido entre el flujo de la corriente. Este precio haría cero el margen del bloque de proceso analizado y corresponde al máximo valor que el refinador estaría dispuesto a pagar por la corriente.

Si bien este tipo de evaluación es sencillo, depende de los valores de rendimientos y calidad utilizados, además de que en la evaluación independiente por bloques de procesos se pierde la interacción entre los diferentes equipos. Además, la evaluación de corrientes intermedias como producto terminado puede incurrir en errores de operación. Por ejemplo, si se evalúa una gasolina natural por su octanaje, el valor será muy pequeño, pero si la misma gasolina natural se evalúa como materia prima para tren de aromáticos, su valor resultará alto.



En la figura 4.2 se esquematiza este procedimiento.



Márgenes incrementales

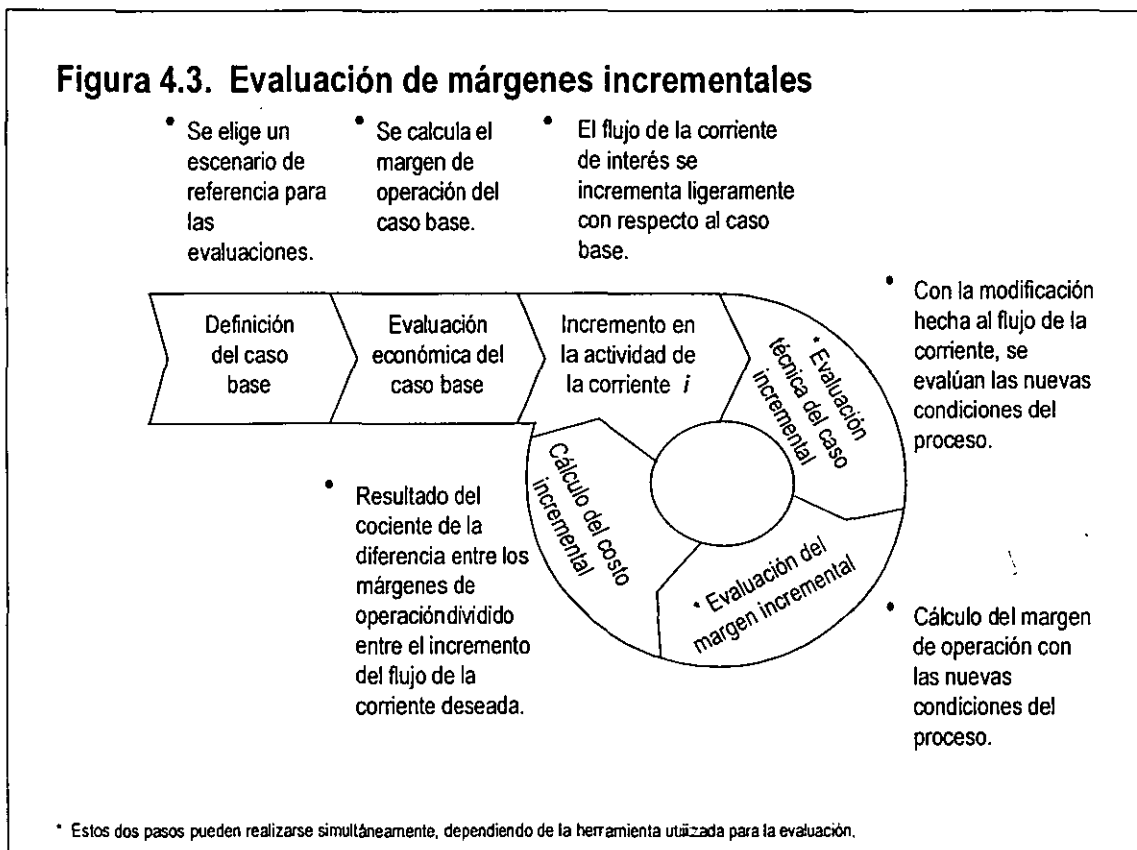
Este método se sustenta en la obtención del incremento en ganancia con respecto a un caso base donde las corrientes de interés, por ejemplo un crudo, pueden estar libres o no intervenir. En función al caso base se permitirán incrementos crecientes en volumen de cada una de las corrientes en estudio. Con el diferencial entre los márgenes de operación de los casos base e incremental y el aumento en volumen de la corriente de interés, se obtiene el margen unitario para dicha corriente.

El número que se obtiene es la pendiente de la recta que une los dos puntos de operación, en una gráfica en donde las abscisas es el nivel de la variable que queremos estudiar, y en las ordenadas el margen de operación de la refinería. Conforme el cambio



en el eje de las abscisas sea más pequeño, nos aproximaremos al valor de la derivada del margen operativo con respecto a la corriente en evaluación.

La evaluación de los márgenes de operación puede realizarse utilizando cualquier método, desde un simulador de procesos y posteriormente calcular un estado de resultados de la refinería, hasta un optimizador en el cual cambien las restricciones del caso de estudio con respecto al caso base.



Existe una amplia discusión sobre la utilización de este método conjuntamente con un optimizador, ya que al forzar un incremento en alguna de las restricciones puede cambiar la base óptima de la solución, de tal modo que la diferencia en los márgenes operacionales se verá afectada por la reoptimización del resto del sistema. Este problema puede resolverse si se acotan adecuadamente las condiciones de las cuales no nos interesa su contribución, de modo que al evaluar la diferencia en las funciones objetivo, el efecto de éstas se anula.



Por otro lado, si se permite la reoptimización del sistema, debe tomarse en cuenta que al adoptar una decisión sobre un cambio operativo, habrá de considerarse que son necesarios varios cambios para obtener los resultados predichos por la evaluación.

La sensibilidad y precisión de este método será la relativa al método utilizado para la evaluación del margen de operación de la refinería. Su aplicación es para determinar precios externos de transferencia y decisiones sobre cambios en las políticas de operación de la refinería.

La principal desventaja de este método es que requiere de una evaluación completa de toda la refinería para cada una de las corrientes que se quieran evaluar. En la figura 4.3 se muestran los pasos para evaluación económica basada en márgenes incrementales.

4.2. Análisis dual (precios sombra)

Durante el proceso de optimización se obtendrán, asociados a la solución, precios sombra relativos a las diferentes restricciones impuestas al escenario del que se trate, que representarán el impacto en la función objetivo al modificar en una unidad dichas restricciones.

Para la determinación de precios de transferencia se podrán utilizar los valores de la solución dual asociados, por ejemplo, a las ecuaciones de balance de materia para cada una de las corrientes de proceso.

El problema de optimización tiene una estructura no lineal, de modo que los precios sombra que se obtengan perderán precisión conforme se alejen a la vecindad del punto óptimo.

Para evitar la situación anterior, y sobre todo al tratarse de una corriente determinada, se puede fijar el nivel deseado de dicha corriente, a modo que se tome directamente el valor dual, también conocido como marginal, de esta restricción volumétrica como el precio de transferencia.

Determinación marginal

En este método se debe fijar el volumen de la corriente que nos interesa en un nivel determinado. Después de optimizar el sistema se suma algebraicamente el precio marginal de la restricción al precio alimentado en el sistema y el resultado será el precio



que debería tener esa corriente para que el modelo la seleccionara e ese volumen si estuviera libre.

Desde el punto de vista matemático, este valor será la pendiente de la recta tangente en el punto extremo de la gráfica de margen contra volumen de la corriente en estudio. No debe olvidarse que el valor marginal que se obtiene es el "ajuste" necesario al precio alimentado en el sistema. Si queremos que el resultado obtenido sea directamente el precio de transferencia de la corriente de interés, puede alimentarse precio cero en el modelo, de modo que el costo marginal será el precio de transferencia buscado.

El modelo para la optimización de la refinería determinará el nivel de precisión y sensibilidad de los resultados. Para este tipo de análisis es muy favorable la utilización de PIMS.

La desventaja de este método estriba en que se debe de fijar un volumen para el flujo de la corriente de interés, y se requiere de una optimización independiente para cada precio de transferencia. Además, los valores obtenidos serán correspondientes a un punto extremo, por lo que un cambio en el volumen supuesto conllevará un cambio en la base óptima del problema matemático, de tal modo que el análisis de sensibilidad de la solución cambiará, y los precios obtenidos sólo serán válidos para una vecindad pequeña del valor preestablecido.

En la figura 4.4 se presentan los pasos a seguir para evaluación de precios marginales.

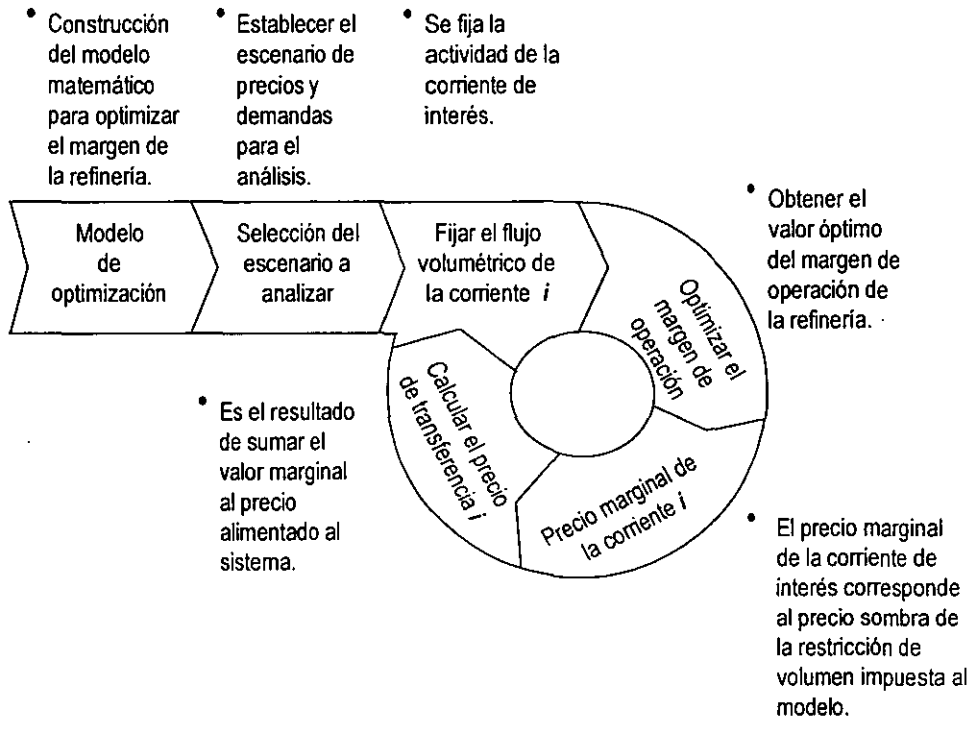
Determinación en el punto óptimo

En este método se analiza la actividad dual y la holgura de los renglones del problema matemático y no de las variables. El resultado se obtendrá sin la necesidad de forzar ningún volumen y, por lo tanto, será el nivel óptimo para cada una de las corrientes.

El valor dual de las ecuaciones de balance de materia tal y como son generadas por PIMS, las cuales siempre deben ser iguales a cero, corresponderá al precio de transferencia de cada una de las corrientes. Su interpretación matemática es la pendiente de la recta tangente del margen con respecto al volumen de las corrientes. La principal diferencia con el caso anterior, es que los valores obtenidos serán válidos en la vecindad de la solución óptima, mientras que los precios marginales corresponden a un punto extremo.



Figura 4.4. Precios marginales



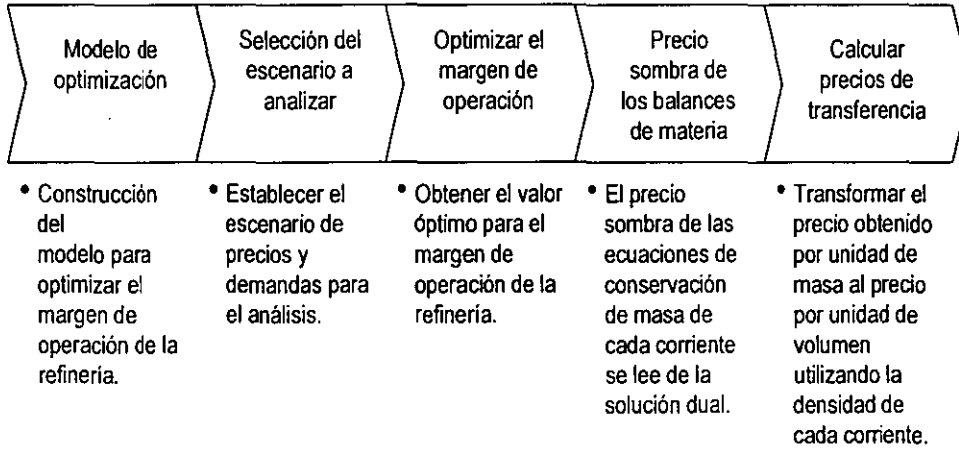
Con este método se obtienen todos los precios de transferencia mediante una misma corrida del modelo y serán válidos para el escenario de precios analizado. Si el escenario de precios o demandas se cambia, deberá reoptimizarse el sistema y obtener nuevamente los precios de transferencia. No puede considerarse esto último como desventaja, ya que al cambiar el escenario dejan de ser válidos los precios de transferencia calculados por cualquiera de los métodos descritos.

En la figura 4.5 se esquematiza el cálculo de precios vía análisis dual.

Debe tomarse en cuenta que los precios sombra para los insumos y productos que están incluidos dentro de la base óptima será igual al precio de compra o venta, respectivamente. De tal suerte, la aplicación de esta estrategia deberá enfocarse más a corrientes intermedias que a transferencias externas.



Figura 4.5. Análisis dual.



Comparación entre los diferentes métodos

El método de costos unitarios de promedio ponderado por complejidad de proceso, como se dijo anteriormente, sólo considera un punto de vista contable para el análisis de resultados de la refinería y no es comparable con los otros métodos.

La evaluación por bloques de proceso independientes representa la desventaja de que las interacciones entre los diferentes procesos no se toman en cuenta, de modo que una corriente se evaluará indistintamente de las variaciones de volumen y calidad de las demás.

La evaluación de precios de transferencia mediante márgenes incrementales arrojará como resultado el valor promedio para la refinería entre los dos puntos analizados. La precisión de los resultados dependerá fuertemente del método que se utilice para determinar los impactos en el proceso debido a los volúmenes que se incrementan y su



contribución al margen operativo. Si la estructura es no lineal, este precio será la pendiente de la recta secante entre los dos puntos en una gráfica de margen con respecto al volumen, y sólo podrá ser aplicado dentro del intervalo analizado.

Al determinar precios sombra en algún punto extremo, obtendremos el valor marginal para la corriente en estudio, pero no podremos disponer de manera simultánea los relativos a otras corrientes. En ese caso será necesario repetir el ejercicio para cada una de las corrientes que nos interesan.

Además de la desventaja que representa la evaluación individual de cada una de las corrientes, tampoco se podrá determinar el efecto que sobre una tienen las demás, principalmente en el caso no lineal.

El análisis dual tiene la ventaja de que sólo requiere resolver el escenario óptimo para obtener todos los precios de transferencia, mientras que el análisis de precios marginales y sustitución incremental requieren evaluaciones independientes para cada una de las corrientes a evaluar.

En la tabla 4.1 se muestra una comparación cualitativa de los cinco métodos presentados.

Tabla 4.1. Comparación entre los diferentes métodos de evaluación					
	Promedio ponderado	Procesos independientes	Márgenes incrementales	Precios marginales	Análisis dual
Evaluación de corrientes	Simultánea	Simultánea	Aislada	Aislada	Simultánea
Cálculo de operación de la refinería	Previo	Previo	Se optimiza o por separado	Se optimiza	Se optimiza
Número de casos	Base	Base	Base + No. de corrientes	Base + No. de corrientes	Base
Utilización	Contable	Comercial	Financiero, comercial, proyectos	Financiero, comercial, proyectos	Financiero, comercial, proyectos
Sensible a la calidad de productos	No	Sí	Según método de cálculo	Sí	Sí
Visión global del proceso	No	No	Según método de cálculo	Sí	Sí



4.3. Selección e interpretación de ecuaciones

La construcción del modelo de optimización deberá ser clara en su notación, selección de variables y restricciones. Es de suma importancia utilizar factores de escalamiento para mantener los coeficientes de la matriz dentro de un rango determinado y evitar, en caso contrario, que la precisión del método numérico provocara la pérdida de cifras significativas durante la inversión de la matriz.

Para poder interpretar correctamente los valores duales asociados a un problema de optimización, será necesario entender la estructura matemática de cada una de las restricciones y realizar un análisis dimensional de las mismas considerando los factores de escala utilizados.

Variables

El caso más sencillo es aquel en el que se acota directamente el volumen de alguna compra o venta directa, y este valor representa un punto extremo en la solución óptima. El precio sombra será directamente el impacto en la función objetivo al comprar o vender una unidad adicional de dicha corriente.

Si la cota en el punto extremo se refiere a una variable cualquiera, su precio sombra será el impacto en la función objetivo al cambiar una unidad dicha restricción.

Al acotar una de las variables y forzarla a su punto extremo, estaremos determinando el precio marginal de dicha cota. Así, por ejemplo, si deseamos obtener el precio marginal de la gasolina, bastará con forzar el volumen de ventas de acuerdo a la demanda que debe satisfacerse, es decir:

$$\text{SELLMAG} = \text{RHS} \quad \dots(4.1)$$

Que representa la venta de gasolina magna, en miles de barriles diarios. Como la función objetivo está en miles de dólares diarios, tendremos que el análisis dimensional para el precio sombra será:

$$P_s = \frac{dFO}{u \text{SELLMAG}} = \frac{[\text{MS/día}]}{[\text{MB/día}]} = [\$/\text{B}] \quad \dots(4.2)$$

y estará asociado con el premio o descuento que se deberá aplicar al precio utilizado durante la optimización.



Una alternativa para determinar de manera directa los precios marginales es asignar precio cero en las variables que estamos acotando, que al tener fija su actividad no se verá afectado el punto óptimo.

Para poder interpretar correctamente el signo del valor dual, es necesario considerar el signo que la variable en cuestión tiene dentro de la función objetivo

$$\text{OBJFN:} \quad \text{maximizar :} \\ -\text{PURCxxx} - \text{PURCuuu} + \text{SELLyyy} + \text{SELLwww} \quad \dots(4.3)$$

Que coincide con los signos correspondientes a un estado de resultados, de modo que el signo positivo en el dual para una variable debe interpretarse como premio al precio propuesto, mientras que el signo negativo nos dice qué descuento habrá que aplicar para satisfacer los volúmenes solicitados.

La variable que se fuerza a un nivel determinado puede ser parte de la matriz, pero no tener un costo asociado en la función objetivo. En este caso debe buscarse la conexión que existe entre dicha variable y la función objetivo. Por ejemplo, las compras de crudo Maya tendrán diferente precio dependiendo de la ubicación de la refinería. Así, se construye una ecuación para controlar el volumen total de crudo Maya en el sistema

$$\text{EMAYTOT:} \quad \text{TOTMAY} - \text{PURCMY1} - \text{PURCMY2} - \text{PURCMY3} = 0 \quad \dots(4.4)$$

$$\text{TOTMAY} = \text{RHS} \quad \dots(4.5)$$

De tal modo que al acotar el total de crudo Maya mediante la ecuación 4.5, el precio sombra será el cambio en la función objetivo derivado de comprar mil barriles adicionales de crudo Maya, sin importar cuál de las refinerías lo compre, en dólares por barril.

Ecuaciones

La ecuación 4.4, al ser de estricta igualdad, también tendrá asociado un precio sombra. El cambiar de esta ecuación en una unidad, el resultado será equivalente al modificar la cota volumétrica de la ecuación 4.5, de modo que podrá leerse de manera indistinta el precio sombra de la ecuación de control para las compras totales o el de la restricción a la variable que representa el total.



Es recomendable que al construir estas ecuaciones, busquemos que los signos correspondan a la notación utilizada en la función objetivo, de modo que los signos de los precios sombra sean consistentes.

Analicemos ahora la ecuación general para los balances de materia:

$$\begin{aligned} \text{VBAL}_{xxx}: \quad & -\text{PURC}_{xxx} - \text{SPRO}_{xxx} - \text{BVBL}_{xxx} \\ & + \text{SCON}_{xxx} + \text{Bxxxppp} + \text{SELL}_{xxx} = 0 \end{aligned} \quad \dots(4.6)$$

En donde **SPRO** son los submodelos que representan la producción en los diferentes procesos y **SCON** los submodelos que utilizan la corriente de proceso como insumo.

En el caso de que existieran todas las opciones posibles para una corriente de proceso, el valor dual de esta ecuación sería directamente el precio de transferencia buscado, sin considerar los precios propuestos para las compras y las ventas, ya que éstos tendrán su influencia directa en el precio sombra, según se combinen las diferentes restricciones en la solución óptima.

Variable	Restricciones que la afectan
PURC _{xxx}	Límites o contratos en el suministro
SPRO _{xxx}	Capacidad de plantas que producen "xxx"
BVBL _{xxx}	Infraestructura de mezclado
SCON _{xxx}	Capacidad de plantas que consumen "xxx"
Bxxxppp	Calidad y volumen requerido del producto "ppp"
SELL _{xxx}	Demanda mínima y máxima para el producto

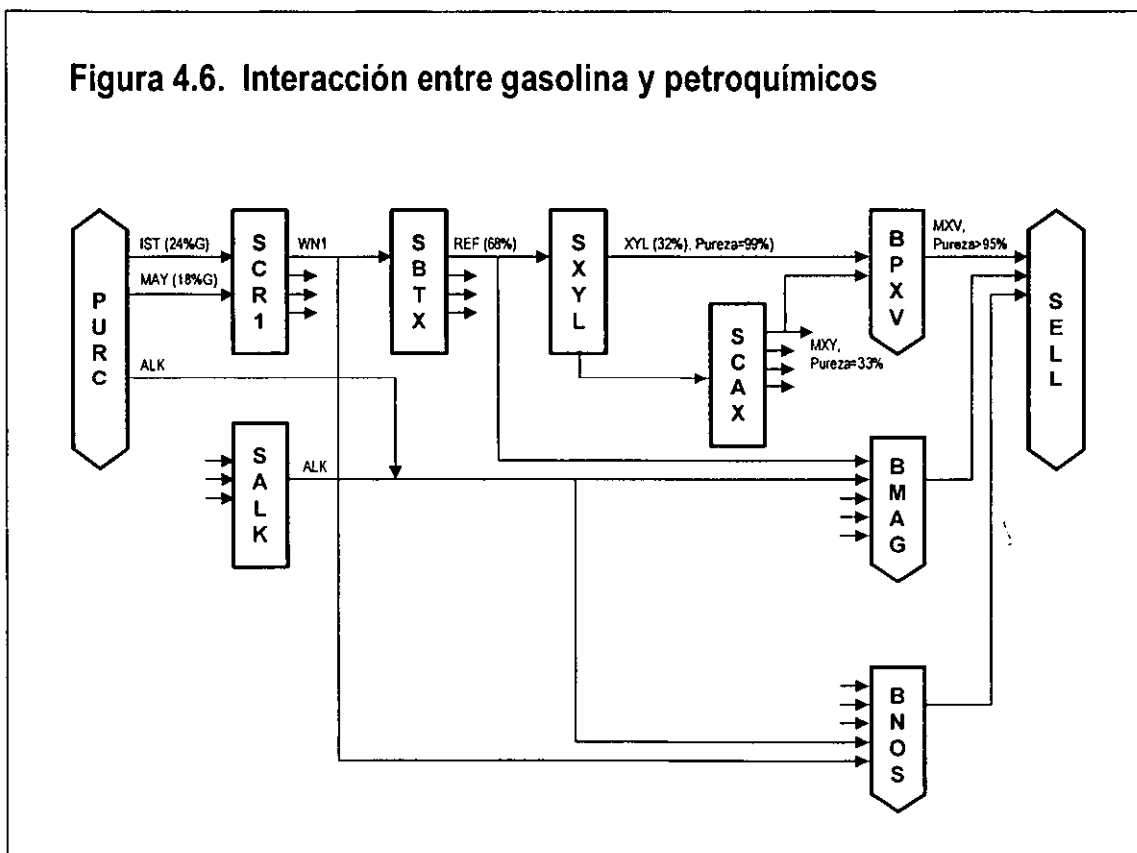
Las cotas que afectan a cada una de las variables que participan en la ecuación 4.6 pueden identificarse en la tabla 4.2.

No es muy frecuente, sin embargo, encontrar todas las opciones para una determinada corriente de proceso, sino que unas y otras están relacionadas mediante la estructura matemática de los submodelos.



Así, por ejemplo, al analizar las interacciones entre la producción de gasolina y petroquímicos que se muestra en la figura 4.6. El proceso de los diferentes crudos en la planta primaria tendrá un impacto en la producción de gasolina primaria, que tendrá como destinos la carga a la planta BTX o para el mezclado de la gasolina NOS. Su ecuación de balance para será:

$$\begin{aligned} \text{WBALWN1:} \quad & -0.24\text{SCRIIST} - 0.18\text{SCRIMAY} \\ & + \text{SBTXBAS} + 0.116\text{BWNINOS} = 0 \end{aligned} \quad \dots(4.7)$$



El balance para el reformado, REF, dependerá de la cantidad de gasolina primaria que se alimente a la planta BTX, con un rendimiento de 68%; éste podrá ser alimentado a la fraccionadora de xilenos, SXYL, o mezclarse en la gasolina MAG; quedando como

$$\text{WBALREF:} \quad -0.68\text{SBTXBAS} + \text{SXYLBAS} + 0.121\text{BRCAMAG} = 0 \quad \dots(4.8)$$



Para el alquiler, ALK, tendremos la opción de importarlo o producirlo en la planta SALK con un rendimiento de 85%; este producto será utilizado en la mezcla de gasolinas NOS y MAG:

$$\begin{aligned} \text{WBALALK:} \quad & -0.117\text{PURCALK} - 0.85\text{SALKBAS} \\ & + 0.117\text{BALKMAG} + 0.117\text{BALKNOS} = 0 \end{aligned} \quad \dots(4.9)$$

La producción de paraxileno, PXY, nos dice que obtendremos 32% del reformado alimentado a la fraccionadora, SXYL, y se puede mezclar en el producto final, PXV, utilizando el factor de conversión de masa a volumen:

$$\text{WBALPXY:} \quad -0.32\text{SXYLBAS} + 0.128\text{BPXYPXV} = 0 \quad \dots(4.10)$$

El producto final se obtiene mediante la mezcla del paraxileno proveniente de la fraccionadora con el efluente de la planta catalítica de aromáticos, SCAX:

$$\text{EVBLPXV:} \quad -\text{BPXYPXV} - \text{BMXYPXV} + \text{BVBLPXV} = 0 \quad \dots(4.11)$$

La mezcla final se ofrece a la venta, de modo que su balance en volumen estará dado por:

$$\text{VBALPXV:} \quad -\text{BVBLPXV} + \text{SELLPXV} = 0 \quad \dots(4.12)$$

Finalmente, el producto comercial deberá tener una pureza superior al 95%, de modo que las proporciones entre paraxileno y mezcla deberán ser tales que se cumpla esta especificación, expresada como máximo nivel de impurezas:

$$\text{XIMPPXV:} \quad -0.05\text{BVBLPXV} + 0.01\text{BPXYPXV} + 0.67\text{BMXYPXV} \geq 0 \quad \dots(4.13)$$

Nótese que se está utilizando un factor de escala de 0.01 para expresar los porcentajes como fracción.

La determinación directa del precio de transferencia para la gasolina primaria, dado el esquema anterior, estará alejado de una solución simple. Sin embargo, al utilizar el precio sombra de su ecuación de balance de masa, tendremos una visión de todas las interacciones mencionadas en el punto óptimo y sólo será necesario utilizar la densidad para convertir el resultado, que estará en dólares por tonelada, a dólares por barril.

Para determinar el precio del reformado se puede utilizar una cotización de referencia y hacer el correspondiente ajuste por calidad como gasolina. Si bien este esquema contempla la competencia con la importación de alquiler, es totalmente ajena a la producción de productos petroquímicos. La utilización del precio sombra de la ecuación 4.8 nos dará una mejor visión de la competencia entre la producción (o importación) de gasolina y la venta de productos petroquímicos.



La ecuación 4.13 representa el nivel máximo de impurezas que puede contener el paraxileno comercial, sus unidades serán:

$$X_{IMP_{PXV}} = \frac{[\%_{IMP}]}{100} [MBD_{PXV}] \quad \dots(4.14)$$

El análisis dimensional del precio sombra nos dará:

$$P_s = \frac{\frac{[MS]}{[día]}}{\frac{[\%_{IMP}]}{100} \frac{[MB_{PXV}]}{[día]}} = \frac{100[\$]}{[\%_{IMP}] [B_{PXV}]} \quad \dots(4.15)$$

Que puede interpretarse como el costo de modificar la especificación de pureza en 1% –0.01 considerando el factor de escala— para un barril de producto. En este caso sólo se tendrá un precio sombra cuando dicha especificación represente una limitante dentro de la solución óptima.



5. Casos de aplicación

En este capítulo se presentan los resultados que se obtienen con la metodología propuesta ante diferentes evaluaciones de casos prácticos, así como el impacto que sobre los mismos tengan las restricciones que representan los escenarios de análisis descritos en el capítulo 2.

Por razones de espacio se presentan únicamente algunos ejemplos escogidos, aunque se cuenta con resultados completos para cada uno de los escenarios planteados.

En la sección 5.1, consumo adicional de crudo Maya, se presenta la evaluación de incrementar el recibo de este insumo en el SNR en diferentes escenarios operativos, así como el impacto corporativo de las diferentes alternativas de solución.

La sección 5.2, exportaciones a Guatemala, presenta la aplicación de los precios sombra para determinar la conveniencia que tendrá para la refinería de Salina Cruz la firma de un contrato de suministro de gasolina y diesel al país centroamericano, aprovechando su ventaja geográfica.

El tercer caso de aplicación, cambio de especificación del diesel, sección 5.3, se refiere a la evaluación económica de una propuesta de Norma ambiental basada en el análisis dual.

En la sección 5.4, competencia con productos petroquímicos, se muestra la aplicación de los valores duales en la determinación del precio de transferencia para una corriente intermedia, la cual tiene destino hacia la producción de gasolina o de petroquímicos.

La sección 5.5, comparación entre métodos, hace un resumen de los resultados que pueden obtenerse con diferentes métodos de evaluación, presentando las coincidencias y divergencias entre ellos.

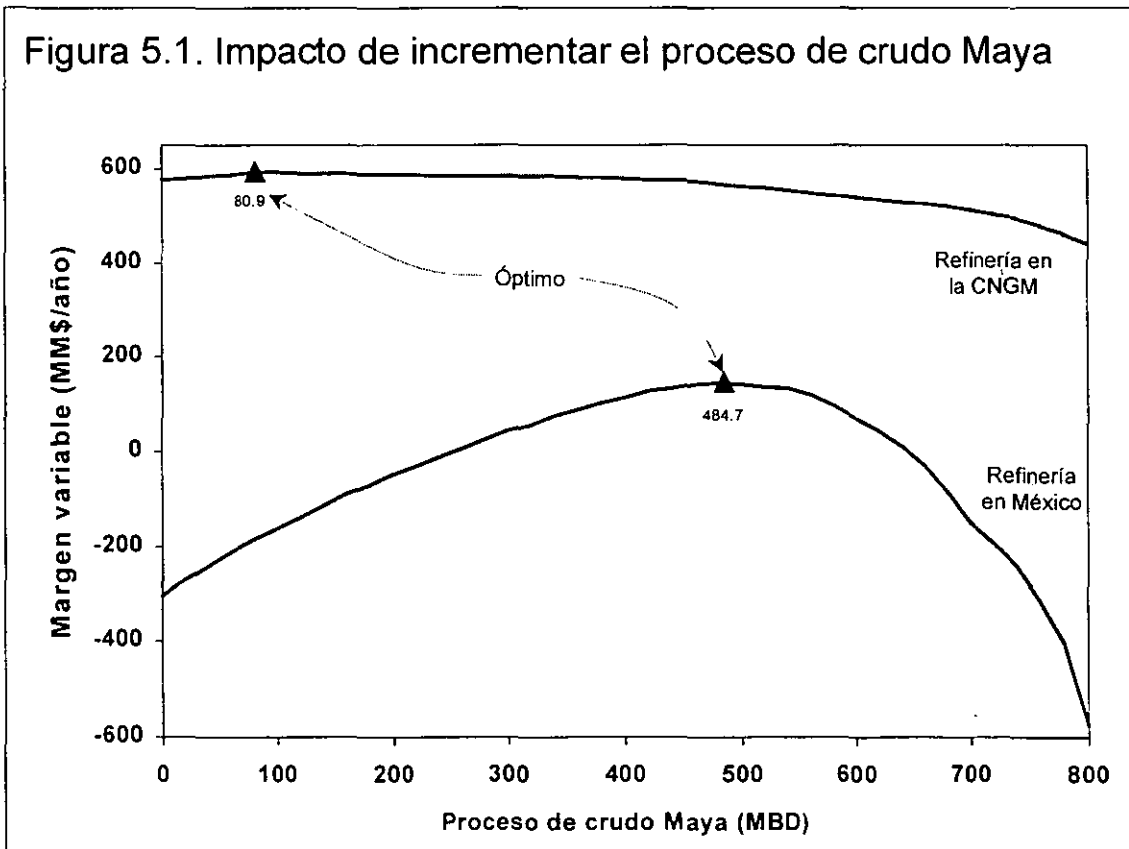
Finalmente, en la sección 5.6, escenarios de análisis, se ejemplifica la sensibilidad de los precios sombra ante los diferentes escenarios planteados.



5.1. Consumo adicional de crudo Maya

Las variaciones en el mercado internacional de petróleo crudo obligaron a los países productores del hidrocarburo a firmar acuerdos para reducir la producción y evitar un mayor deterioro de los precios. El compromiso adquirido por México en este rubro representó un impacto en Pemex que llevaba a tomar decisiones sobre el cierre de pozos de producción, o bien un incremento en el consumo interno, principalmente de crudo Maya.

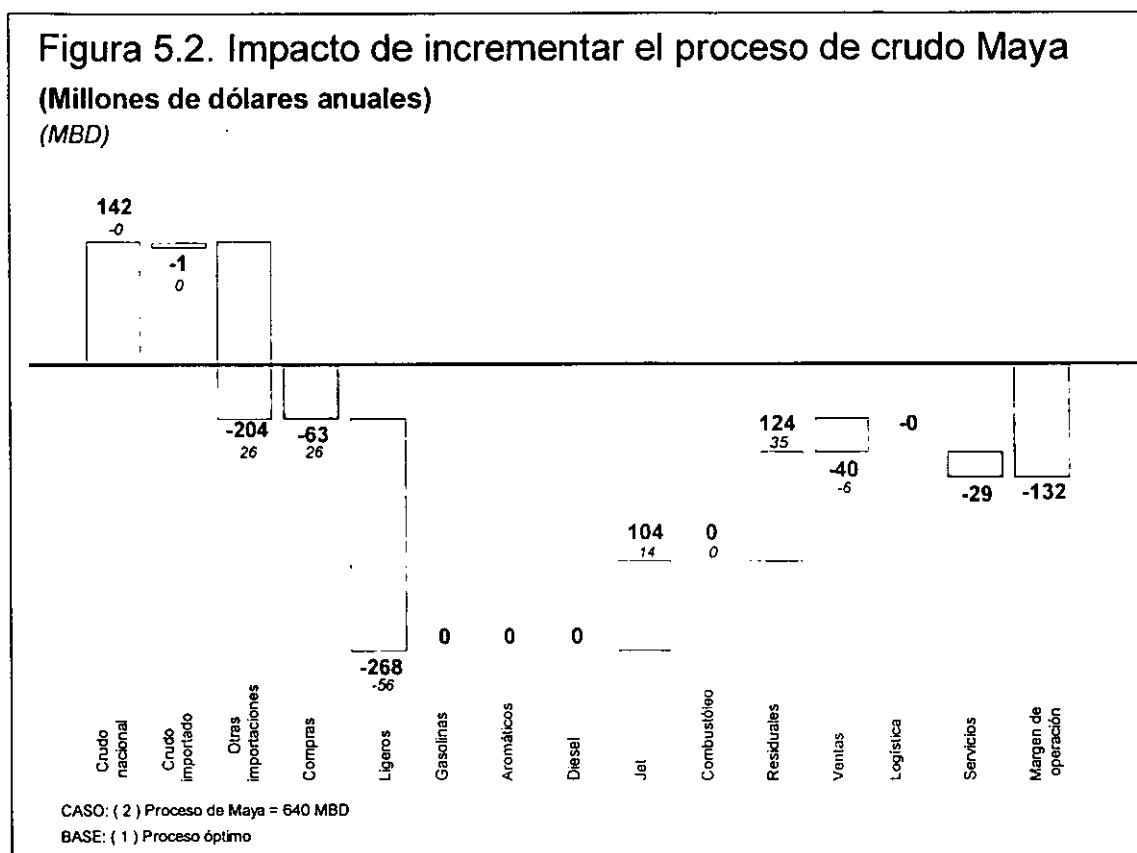
Se determinó que de no disminuir la oferta de este crudo se tendría un impacto directo en el precio, afectando a toda la producción entre 1 y 2 dólares por barril, es decir una disminución en los ingresos de la paraestatal equivalente a 638 millones de dólares anuales, en el mejor de los casos.





El cierre de pozos conlleva el riesgo de perder la presión del yacimiento y que sea imposible recuperar el flujo actual y por ende los ritmos de producción en el momento que la respuesta de los mercados fuera favorable a los productores de crudo.

No existe, pues, otra alternativa viable que asumir la pérdida mencionada o incrementar el proceso de crudo Maya en el Sistema Nacional de Refinación. El impacto económico de esta última opción se presenta en las figuras 5.1 y 5.2.

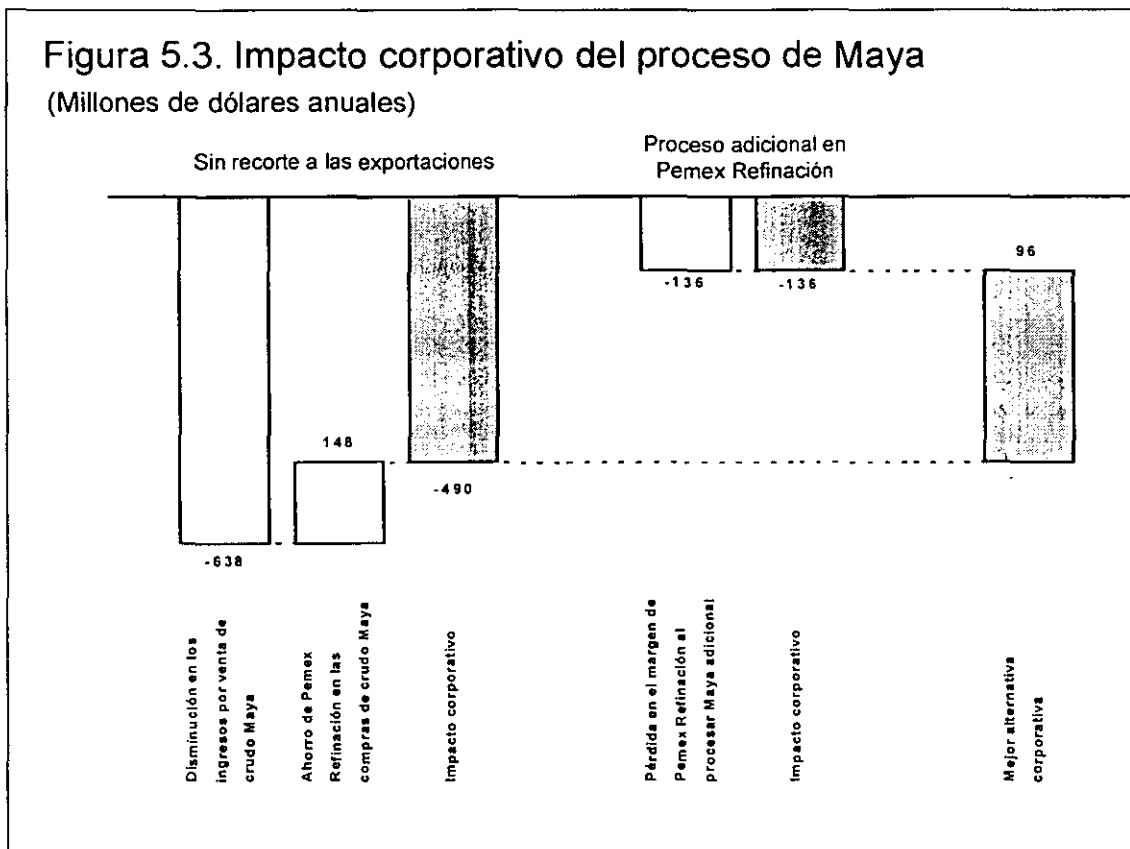


Nótese que la variación de la función objetivo con respecto al volumen de crudo Maya procesado es fuertemente dependiente de la ubicación geográfica de la refinería. El cambio es menor cuando localizamos la refinería en la CNGM, lo cual se explica por la disponibilidad de crudos extranjeros con características fisicoquímicas similares al Maya que podrán servir como sustituto del mismo en cualquier escenario, no así cuando situamos la refinería en México y sin permitir la importación de petróleo crudo.



Utilizaremos esta última consideración por representar la situación actual de Pemex Refinación.

Como puede observarse, al ubicar la refinería en México y sin la importación de crudos, la pérdida en la que incurre Pemex Refinación resulta ser de 132 millones de dólares anuales, cifra menor que el impacto en los precios del crudo de 638 millones de dólares descrito con anterioridad, de modo que la decisión sobre el incremento de procesamiento de crudo Maya cumple con los objetivos corporativos de minimizar la pérdida, tal y como se aprecia en la figura 5.3.

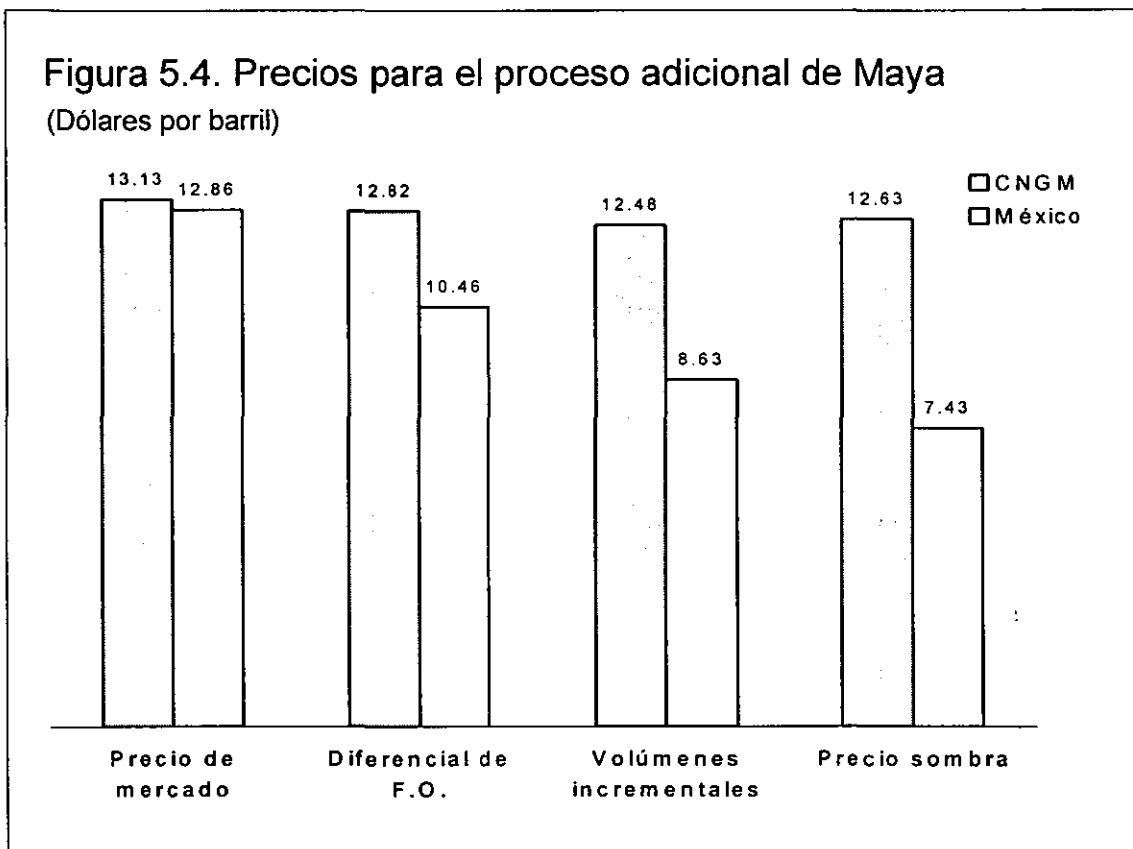


Será necesario, entonces, determinar un nuevo precio de transferencia para el crudo Maya entre Pemex Exploración y Producción y Pemex Refinación que permita a la segunda colaborar con los objetivos corporativos sin ver afectado su estado de resultados.



Si llevamos el proceso de crudo Maya hasta 640 MBD, límite en donde se considera por parte de las áreas operativas que es técnicamente manejable, debemos evaluar el precio de transferencia al cual se iguala el margen de Pemex Refinación con su caso óptimo.

En la figura 5.4 se presentan los resultados para el precio de transferencia al aplicar los diferenciales entre las funciones objetivo, márgenes incrementales y precios sombra.



5.2. Exportación de productos a Guatemala

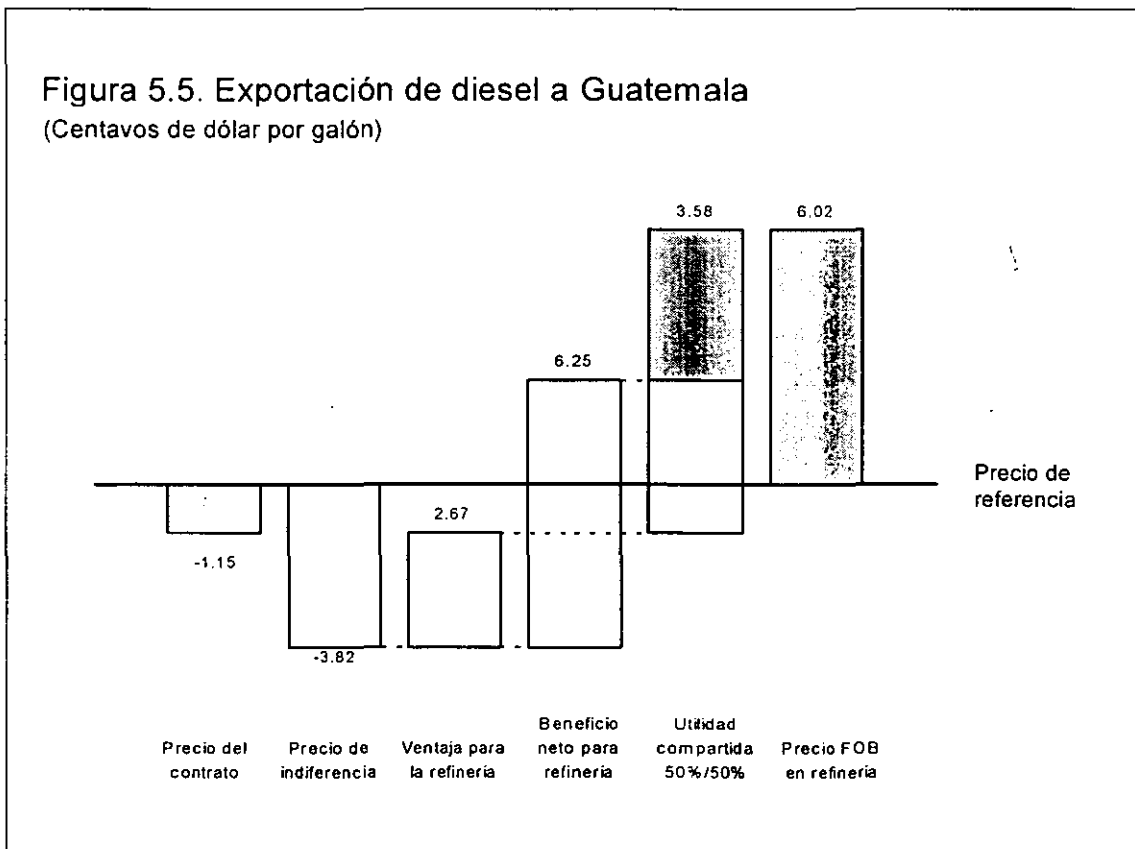
La refinería de Salina Cruz, de acuerdo a su capacidad instalada y proceso de crudo, tiene un superávit de gasolina y diesel. El área comercial propone la firma de un contrato de suministro de estos productos a Guatemala y aprovechar la ventaja geográfica de



esta refinería con respecto a los posibles competidores, que tendrían que llevar el producto desde Houston o Venezuela, incurriendo en mayores costos de transporte.

En el contrato se propone determinar el precio mediante una fórmula basada en la cotización de referencia en el mercado de la Costa Norteamericana del Golfo de México, descontando 1.15 y 0.25 centavos de dólar por galón al diesel y a la gasolina, respectivamente. Las utilidades resultantes entre el precio final de venta y el determinado mediante esta fórmula, descontando los costos de logística, serán compartidos en partes iguales por la refinería y el área comercial. Además, existe una cláusula de suministro obligatorio para ambos productos.

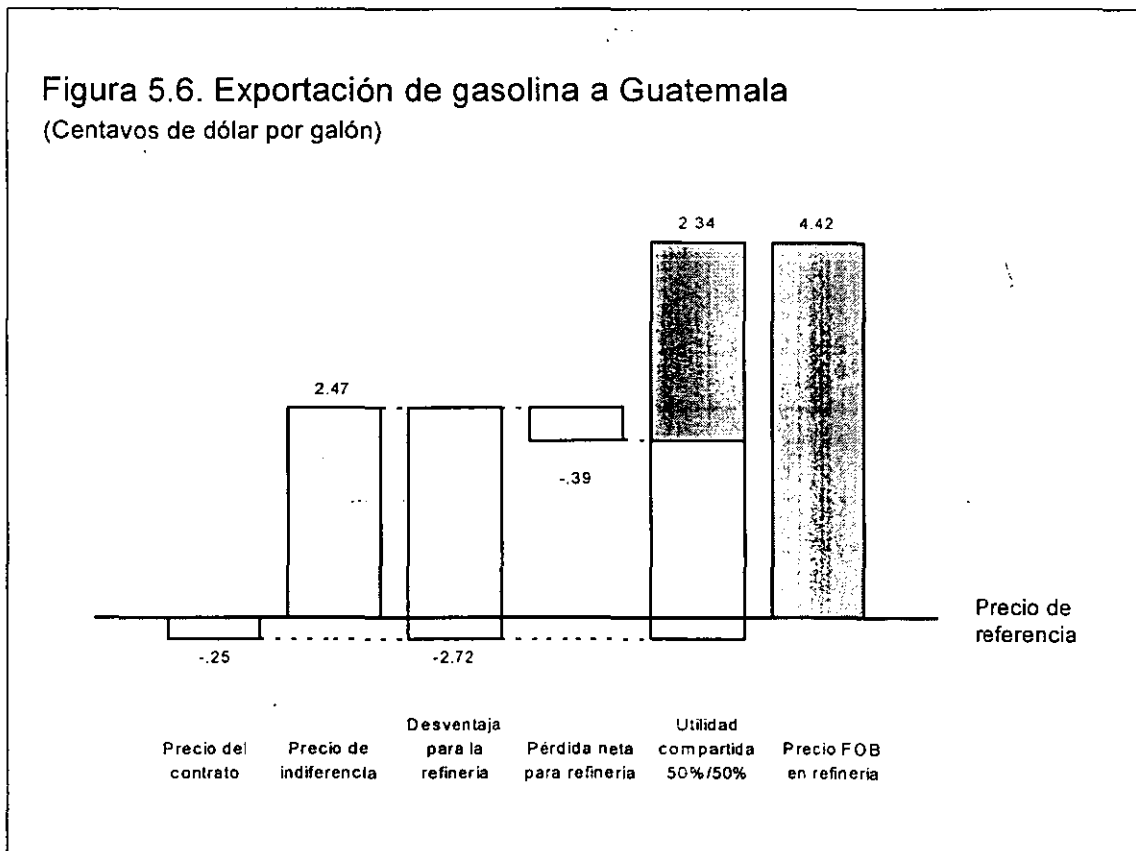
Con el propósito de determinar si este contrato es conveniente para Pemex Refinación determinaremos primero el precio de indiferencia para ambos productos, que se puede obtener directamente del precio sombra del modelo optimizado.





El segundo paso será determinar un precio probable de venta de los productos en el mercado guatemalteco, que estimaremos de acuerdo a los potenciales competidores. Un refinador en Houston vendería su producto en el mercado de referencia, de modo que para que le sea rentable la operación, tendrá que ofrecer los productos a un precio tal que, después de restarle el costo de transporte, resulte mayor que el de su mercado natural.

El costo de transporte marítimo para el diesel desde Houston hasta la costa guatemalteca, más el costo ponderado de transporte terrestre hacia las principales centrales termoeléctricas, sería de 5.02 centavos de dólar por galón. La gasolina sería distribuida directamente desde una central de almacenamiento en el puerto de descarga, de modo que únicamente se considera el transporte marítimo de 5.42 centavos de dólar por galón.



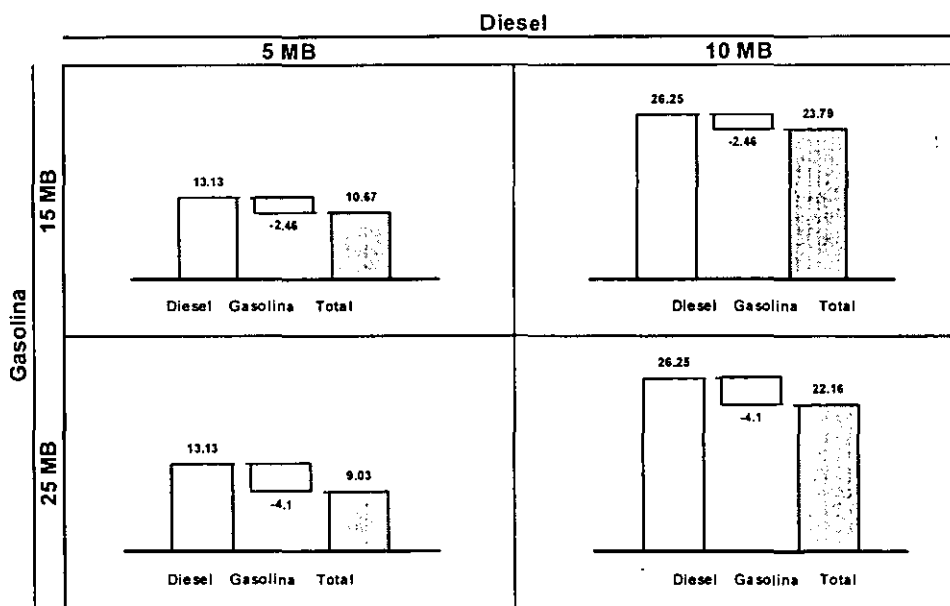


En la figura 5.5 se puede apreciar que la propuesta resulta rentable para la refinería en el caso del diesel, cuyo precio de indiferencia se determinó por debajo del precio base propuesto en el contrato, de modo que le representa una utilidad adicional a la repartición de utilidades con el área comercial.

Para la gasolina, figura 5.6, el precio sombra resultó mayor que el propuesto para la transacción, de modo que representa un subsidio por parte de la refinería al área comercial, que podría inclusive representar pérdidas.

La mejor alternativa para la refinería consiste en aceptar el suministro de diesel, pero no el de gasolina. Sin embargo, el contrato establece el compromiso de suministro para ambos productos, de modo que será necesario considerar los volúmenes que se solicitan en el mismo para determinar la conveniencia de su firma.

Figura 5.7. Balance del contrato de exportaciones a Guatemala (Miles de dólares mensuales)





Los volúmenes contractuales solicitados para el diesel oscilarían entre 5 y 10 MB mensuales, mientras que para gasolina serían entre 15 y 25 MB. Al aplicar la utilidad calculada para el diesel y restarle las pérdidas asociadas a la venta de gasolina, podremos determinar el costo o beneficio asociado a la operación.

En la figura 5.7 se presenta la utilidad potencial para la refinería de Salina Cruz, en donde observamos que el beneficio asociado a este contrato estará entre 9,030 y 23,793 dólares mensuales, de modo que se recomienda la firma del mismo, con revisiones periódicas para determinar los posibles cambios en los precios de indiferencia para la refinería.

5.3. Cambio de especificación en el diesel

Las normas ecológicas han evolucionado a parámetros cada vez más estrictos en el entorno mundial y México no representa la excepción. Los cambios en las especificaciones de los combustibles automotrices juegan un papel sumamente importante dentro del control de emisiones a la atmósfera, determinado por el número de unidades que los utilizan.

Las principales emisiones de dióxido de azufre en las zonas metropolitanas en los pasados años estaban asociadas al consumo de diesel automotriz, con una especificación del contenido de azufre máxima 0.5% en peso, equivalente a 5000ppm.

El diesel que se utiliza en Estados Unidos contiene un máximo de 50ppm de azufre, mientras que en la Unión Europea es de 30ppm. Utilizaremos la especificación norteamericana, dada la vecindad, como la propuesta más probable para una nueva norma ambiental.

Para evaluar el impacto económico que tendría esta norma utilizaremos dos procedimientos diferentes. El método tradicional consistirá en comparar las funciones objetivo de un caso base con la norma actual y otro aplicando la propuesta ecológica. Al dividir esta diferencia entre el volumen total de diesel producido, se determinará el incremento necesario en el precio de este producto.

Alternativamente utilizaremos el precio sombra de la ecuación de balance de azufre en el diesel y le aplicaremos el cambio necesario para determinar el costo asociado a la



nueva especificación. La ecuación que representa el nivel máximo de azufre en el diesel será, tal y como la construye PIMS,

$$XSULDSL: \quad S_D W_D - \sum S_i W_i \leq 0 \quad \dots(5.1)$$

Llamemos Φ al precio sombra asociado a esta ecuación, que según su análisis dimensional tendrá como unidades \$/Ton de azufre total contenido en el diesel.

$$\Phi = \frac{dFO}{uS_D W_D} = \frac{[M\$ / día]}{[\%_s][MT_D / día]} = \frac{[\$]}{[T_s]} \quad \dots(5.2)$$

El costo asociado al cambio de especificación en este producto se podrá calcular como

$$\text{Costo} = \Phi W_D (S_2 - S_1) \quad \dots(5.3)$$

Al dividir este costo entre el volumen total de diesel obtendremos

$$\phi = \frac{\Phi W_D (S_2 - S_1)}{V_D} \quad \dots(5.4)$$

Aplicando la definición de densidad

$$\delta = \frac{W}{0.159V} \quad \dots(5.5)$$

en la ecuación 5.3 obtendremos, finalmente, la modificación necesaria en el precio del diesel derivada del cambio de especificación, que es

$$\phi = 0.159\delta(S_2 - S_1)\Phi \quad \dots(5.6)$$

Los resultados de esta fórmula se aplicarán a la corrida del caso base con 5000ppm y se compararán con los resultados obtenidos mediante el método tradicional.

En la tabla 5.1 se presenta un resumen de las principales variables operativas obtenidas para cada una de las dos alternativas para la especificación del contenido de azufre en el diesel, situando la refinería en México, suprimiendo la importación de crudos y considerando la obligación de satisfacer la demanda promedio como mínimo.

Según se puede apreciar en los resultados, será necesario sustituir 35 MBD de crudo Maya por crudo Istmo, que es más ligero y con un menor contenido de azufre, pero más caro. También se observa un incremento en la producción de combustóleo derivado de las corrientes de gasóleos amargos que anteriormente se derivaban a diesel, sustituyéndose este volumen con una menor producción de turbosina para exportación.



Tabla 5.1. Evaluación del azufre en diesel

	Azufre en diesel		Diferencias	
	5000ppm	50ppm	MBD	M\$/Día
Función Objetivo, M\$/día	-161.46	-490.71		-329.25
Crudo Total, MBD	1,555.23	1,555.23		-88.90
Maya	458.28	423.81	-33.46	455.52
Istmo	693.35	728.81	33.46	-548.77
Otros	403.61	403.61		3.35
Producción, MBD	1,553.95	1,541.87	-10.80	-220.02
Ligeros	60.08	60.08		
Gasolina	360.40	360.40		0.01
Turbosina	107.72	95.54	-11.17	-219.92
Diesel	231.14	231.14		
Gasóleos	33.76	33.76		0.02
Combustóleo	693.82	693.55	-1.27	
Otros	68.02	68.39	0.37	-0.12
Servicios auxiliares, M\$/D	-233.81	-255.12		-20.31

Desde el punto de vista económico, para compensar una disminución de la función objetivo de 329.25 miles de dólares diarios, deberá incrementarse el precio del diesel en 1.42 dólares por barril, que resulta del cociente entre la pérdida en el margen del SNR y el volumen total de diesel producido, que es de 231.14 MBD.

Si aplicamos los resultados de la corrida base en la fórmula 5.5, en donde

$$\delta = 0.8313$$

$$S_1 = 0.5\%$$

$$S_2 = 0.05\%$$

$$\Phi = 28.18\$/T_s$$

obtendremos:



$$\begin{aligned}\phi &= 0.159(0.8313)(0.5 - 0.05)(28.18) \\ &= 1.68\$/B\end{aligned}\quad \dots(5.7)$$

O bien, sustituyendo en la ecuación 5.2, el costo de la nueva norma sería:

$$\begin{aligned}\text{Costo} &= (28.18)(30.55)(0.5 - 0.05) \\ &= 387.38 \text{ MMS}/\text{Día}\end{aligned}\quad \dots(5.8)$$

La diferencia contra los 329.25 M\$/Día obtenidos mediante el método de evaluación más rigurosa se deben, en mayor medida, a la reoptimización del sistema.

5.4. Competencia con productos petroquímicos

Se desea evaluar la conveniencia de desviar un determinado volumen de gasolina primaria del SNR a Petroquímica Cangrejera con el objetivo de garantizar la carga del tren de producción de aromáticos de esta última. Al incrementar la carga a este proceso se tendrá un excedente de reformado de alto octanaje que podría ser regresado hacia el SNR para la producción de gasolina. Esta transacción se presenta esquemáticamente en la figura 5.8.

Existe actualmente un mecanismo de precios para evaluar ambas transferencias entre las dos empresas, de modo que se puede evaluar directamente si el precio resultante es atractivo para Pemex Refinación.

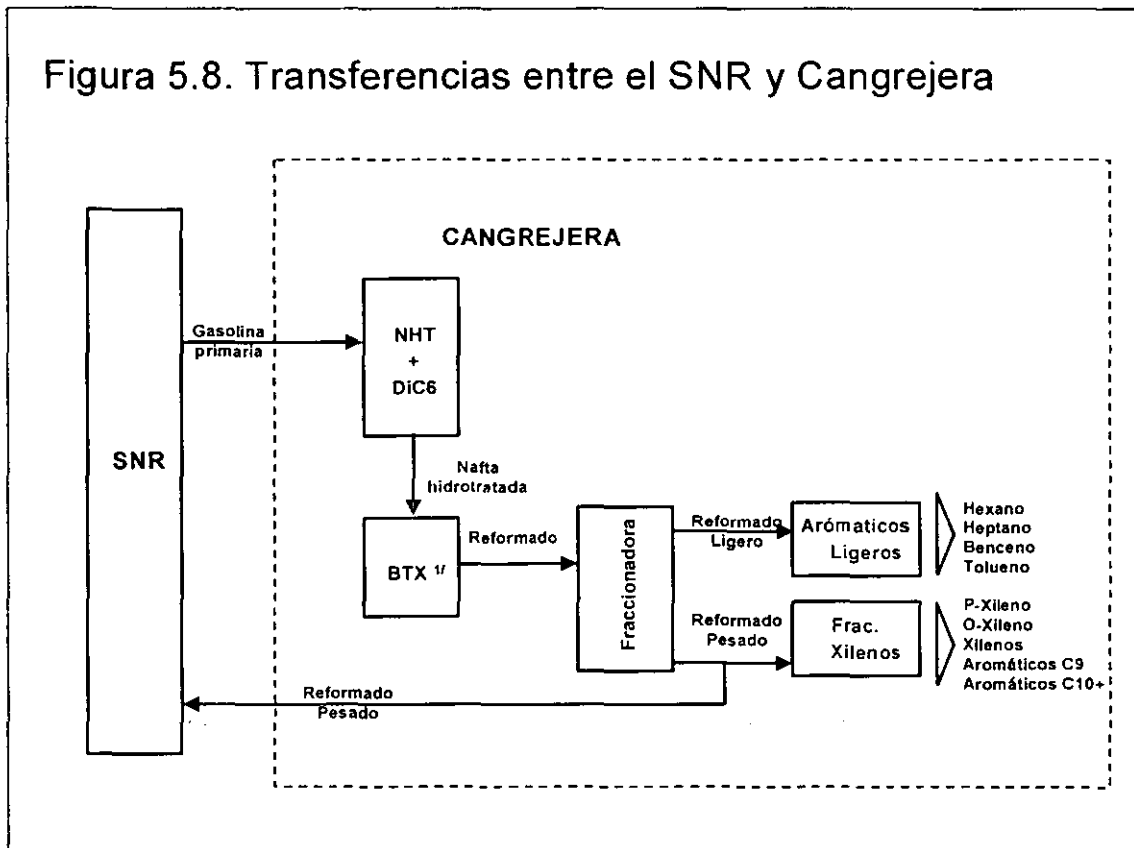
Al utilizar el modelo de optimización se determina que no es rentable para el SNR vender la gasolina primaria, mientras que el reformado de alto octano sí resulta una buena alternativa para la producción de gasolina y sustituir importaciones. Sin embargo, al no suministrar naftas a Cangrejera, ésta no tendrá disponibilidad de reformado pesado para retornar al SNR.

Por parte de petroquímica, igualmente se puede evaluar la conveniencia de dichas transferencias con el mecanismo de precios vigente utilizando un modelo de optimización similar. Los resultados de éste nos dicen que la gasolina primaria es un insumo atractivo económicamente para el complejo petroquímico, mientras que el reformado tiene un valor agregado dentro del tren de aromáticos que supera el precio de venta del mismo.



Al comparar los resultados que se obtienen de ambos modelos de optimización, se ve claramente que la mejor alternativa para una empresa es contradictoria para la otra. Por otro lado, resulta difícil una negociación cuando el punto inicial entre las partes resulta diametralmente opuesto.

Figura 5.8. Transferencias entre el SNR y Cangrejera



Para resolver esta problemática se plantea una función objetivo que maximice la utilidad combinada de ambas empresas, construyendo un modelo de optimización que refleje las operaciones de ambas, en donde los flujos entre las filiales formen parte integral del modelo.

Los resultados obtenidos en el modelo combinado nos dicen que ambas transferencias, tanto la de gasolina primaria del SNR a Cangrejera como el retorno de reformado, forman parte de la base óptima. De esta corrida se puede ver, sin embargo, una señal similar a la que cada una de las empresas determinó por separado, lo cual podemos observar en la tabla 5.3.



Un incremento en el precio de la gasolina primaria de \$0.82/B colocaría a Pemex Refinación dentro de su curva de indiferencia, pero mantiene sin cambio la decisión de Cangrejera de aceptar esta corriente como materia prima. Para el reformado pesado la situación es diferente, ya que el precio máximo al cual está dispuesto a pagarlo el SNR aún está por debajo del valor agregado que obtiene en el tren de aromáticos de Cangrejera.

	Gasolina primaria	Reformado
Mecanismo actual	28.33	39.56
SNR	29.15	40.38
Cangrejera	37.02	41.83

El beneficio potencial que obtendría Cangrejera al comprar naftas casi \$8/B por debajo de su precio sombra compensaría el descuento de \$1.45/B que requiere el SNR en el reformado para mantener su margen variable en equilibrio.

De este modo, el modelo integrado nos arroja que la decisión deberá ser la utilización de ambas transferencias, con un precio mayor para la nafta primaria del SNR a Cangrejera y un reformado que no exceda el valor marginal para Pemex Refinación.

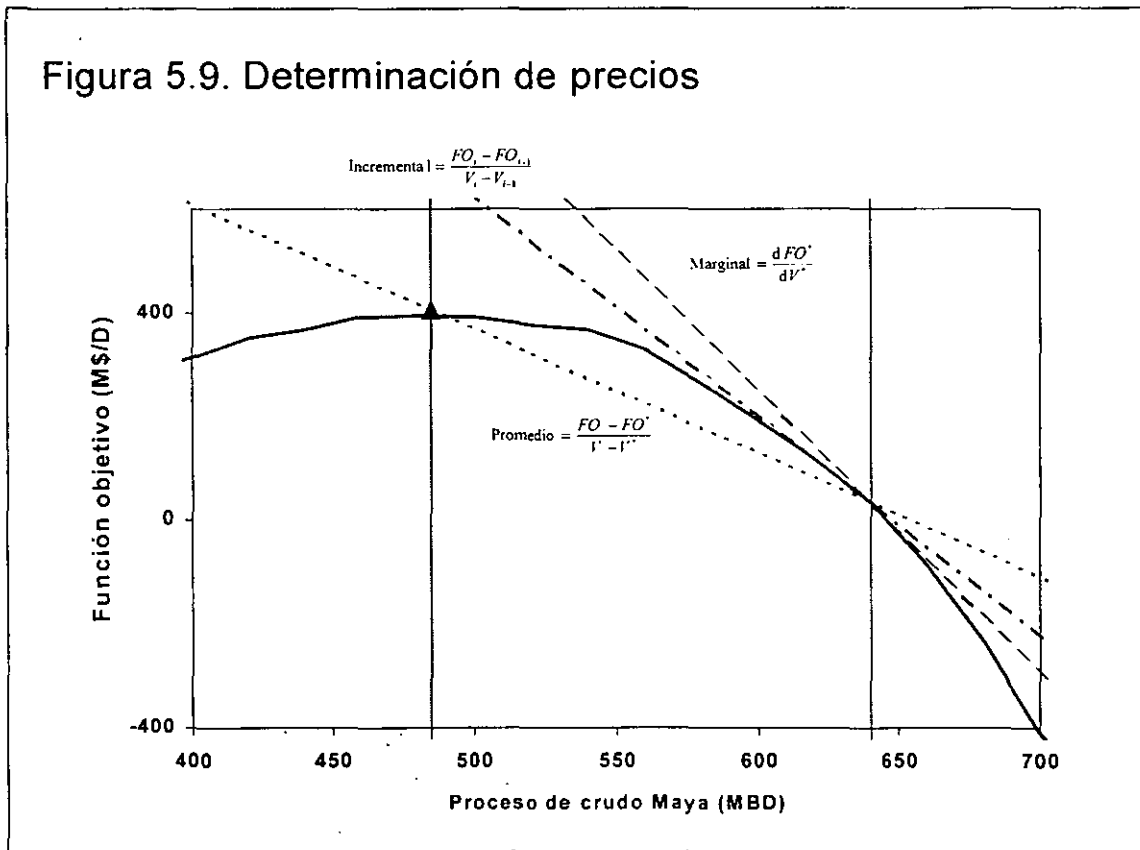
Como refuerzo de estos resultados, se realizaron corridas adicionales como análisis de sensibilidad en el modelo combinado, obteniéndose pérdidas al cerrar el suministro de gasolina primaria del SNR a Cangrejera equivalentes a 55.6 millones de dólares anuales y pérdidas de 93.3 millones de dólares anuales al impedir la transferencia de reformado de Cangrejera al SNR.

Se ve claro que este enfoque global del problema determina el mejor camino a seguir por ambas empresas y que es posible alinear los intereses particulares de cada una mediante ajustes a los precios de transferencia.



5.5. Comparación entre métodos

Volviendo al caso del crudo Maya presentado en la sección 5.1, es fácil observar cómo influye el escenario de análisis en los resultados para la determinación de precios. También se puede observar cómo cambian éstos al evaluarlos como promedio, mediante volúmenes incrementales o aplicando precios sombra. En la figura 5.9 se observa de manera conceptual la diferencia entre cada uno de los tres métodos.



Nótese que en los tres casos se está determinando el cambio en el precio como la pendiente de la curva de función objetivo contra el volumen de crudo Maya. La diferencia entre cada uno estriba únicamente en qué puntos considerar para determinar esa pendiente.

El precio promedio será la pendiente de la recta secante entre el punto óptimo y el punto que desea evaluarse. El valor obtenido corresponde a un equilibrio en el margen de

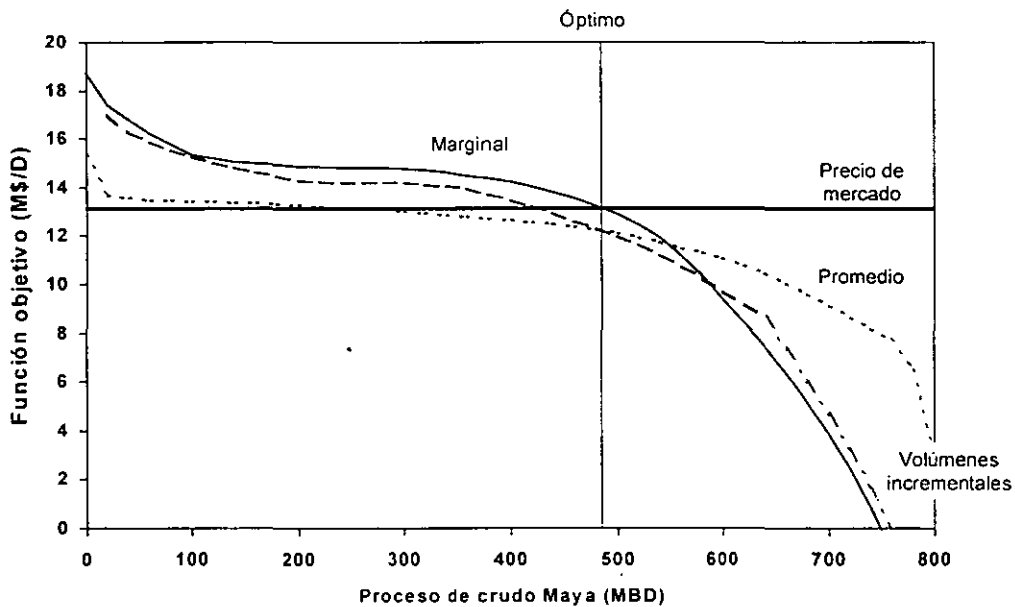


operación entre el punto óptimo y el nivel evaluado, pero si se aplica en valores por encima del mismo, tendremos pérdidas.

Al utilizar los márgenes incrementales, determinamos ajustes en el precio para pequeños escalones por debajo de la curva, y obtendremos el costo del último escalón. Al exceder el volumen del valor evaluado, el escalón será mayor y, por lo tanto, también se incurrirá en pérdidas, aunque éstas serán menores que cuando se evalúa con precios promedio. Además, dependiendo del caso, al aplicar el costo del último tramo, éste será mayor que el de los primeros escalones y podrá compensar y hasta superar las pérdidas del volumen adicional.

Conforme los incrementos para la determinación de la pendiente se hacen cada vez más pequeños, llegaremos al límite en el cual tienden a cero, representando entonces el valor de la diferencial, que corresponde a la pendiente de la recta tangente a la función objetivo en el punto evaluado, y que se determina mediante el precio sombra.

Figura 5.10. Precio del crudo Maya



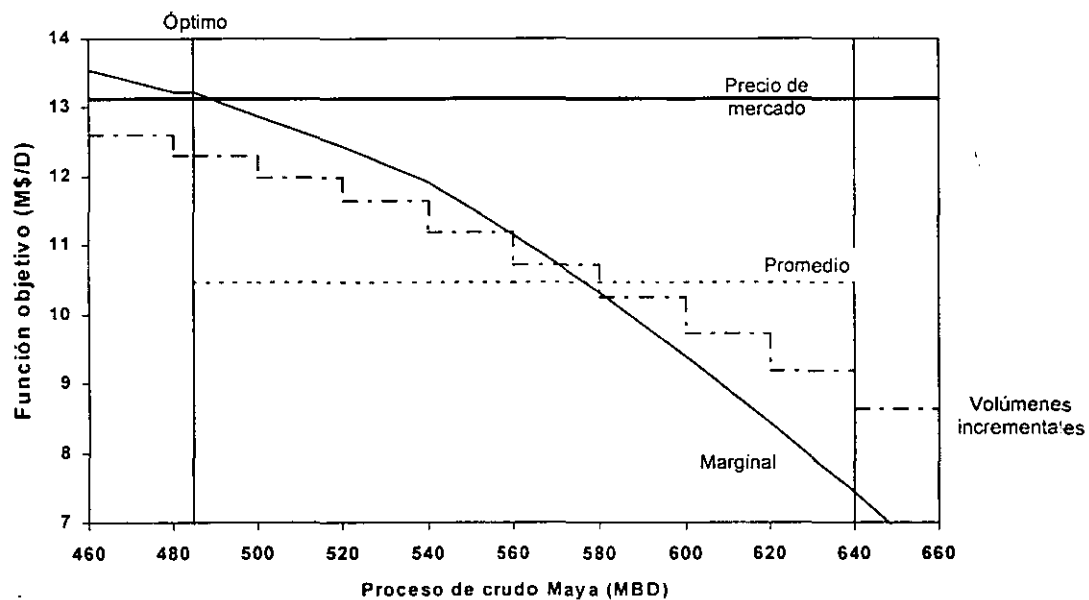


En la figura 5.10 observamos la variación del precio para el crudo Maya a diferentes volúmenes para cada uno de los tres métodos.

Nótese que el cálculo al aplicar volúmenes incrementales se aproxima al precio marginal, ya que los incrementos utilizados para construir la curva son de 20MBD, que en un proceso de crudo total de 1500MBD resultan muy pequeños.

Si analizamos más a detalle la zona entre el punto óptimo y el valor estudiado de 640 MBD, figura 5.11, observaremos que los cambios al aplicar los diferentes métodos varían entre sí. De igual manera se puede observar que el método de los volúmenes incrementales variará de acuerdo al tamaño de los incrementos considerados para la variable independiente.

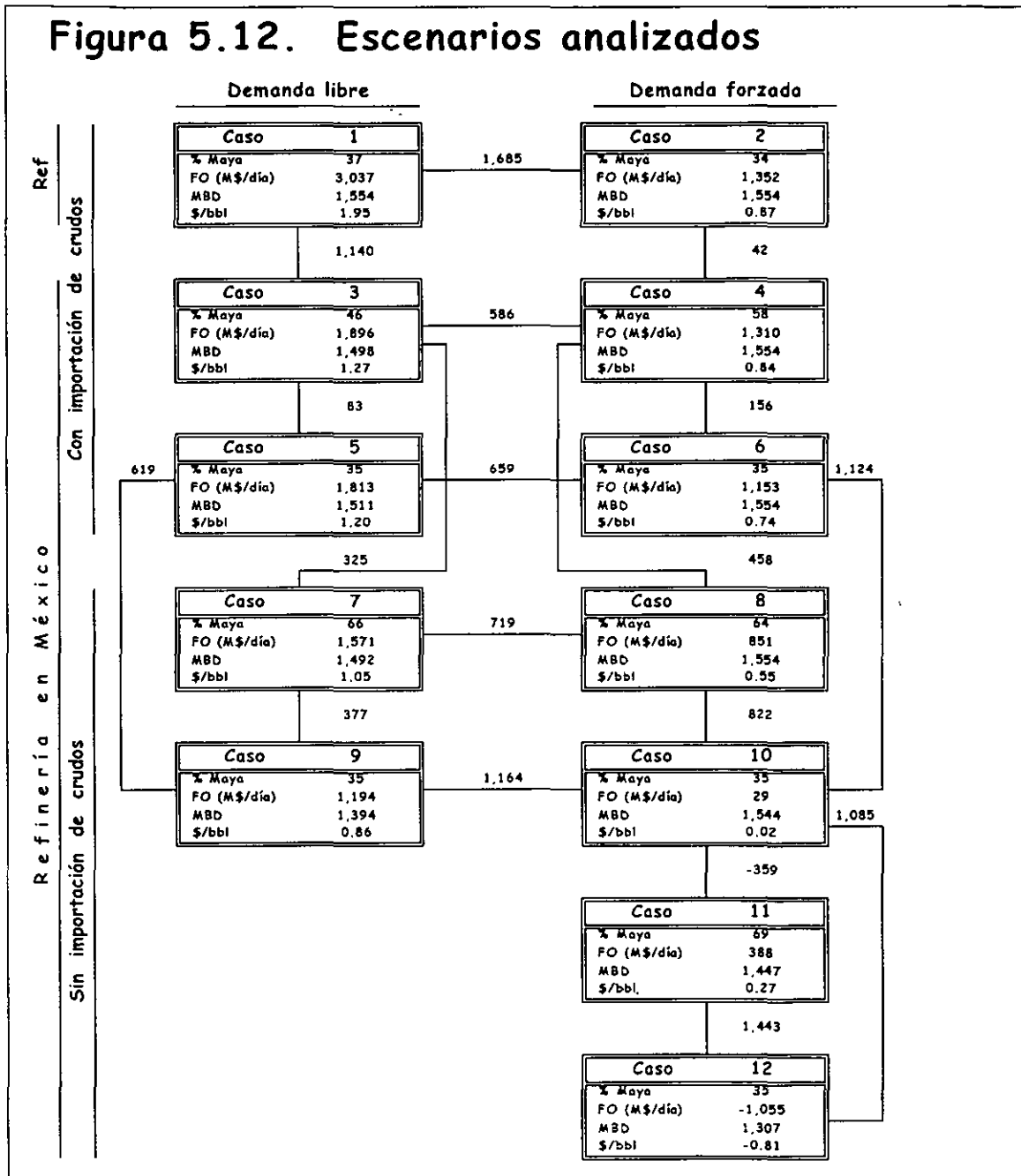
Figura 5.11. Precio del crudo Maya a 640MBD





5.6. Escenarios de análisis

En la figura 5.12 se muestra un resumen de los resultados obtenidos para cada uno de los escenarios planteados en el capítulo 3.





El suministro obligado de la demanda de petrolíferos implica un alto costo para Pemex Refinación, independientemente del entorno económico y político que se considere para la evaluación. El margen variable unitario de la refinería, por ejemplo, disminuye 34% con la refinería en México con un entorno de libre competencia y hasta 98% en el caso de no procesar crudos extranjeros y forzar el proceso de crudo Maya al 35%.

La ubicación de la refinería tendrá un impacto fuerte si el perfil de la demanda es libre, pero prácticamente no tendrá efecto al imponer la restricción de suministro derivada de la condición de monopolio de Pemex Refinación. La caída en el margen variable unitario de la refinería con demanda libre y forzada es de 35% y 3%, respectivamente.

La decisión de no importar crudos extranjeros implica una reducción en el margen variable unitario de la refinería del 17% con demanda libre y de 34% con demanda fija. Si además consideramos la restricción de procesar 35% de crudo Maya, la caída en el margen variable unitario de la refinería al dejar de importar crudos sería del 97% con la demanda fija y 28% con demanda libre.

De igual manera, si analizamos los precios sombra para algunas corrientes de proceso, observaremos variaciones importantes al modificar el escenario económico y político del que se trate, en medida de cómo las restricciones que definen el caso de estudio afecten a la producción de la corriente de proceso a la cual queremos determinarle su valor marginal.

Así, por ejemplo, el precio sombra de la gasolina Magna Oxigenada oscilará entre \$19.32/B y \$28.12/B (45.5%), dependiendo del volumen demandado, costos de transporte y cotas al comercio exterior; mientras que para el diesel la variación de su valor marginal estará entre \$15.99/B y \$19.44/B (21.6%).

Nótese que la restricción que representa la condición de monopolio de Pemex Refinación tiende a encarecer los productos terminados, esto debido a que la composición de la demanda nacional difiere de la canasta óptima de producción.

Al impedir la importación de crudo se tiene un impacto directo en las corrientes intermedias en cualquier escenario, mientras que los productos terminados son sensibles a esta variable principalmente cuando se fuerza la satisfacción de la demanda.

Cuando restringimos el proceso de crudo Maya, el principal impacto se notará en los productos amargos y en los residuales, aunque el sentido de las variaciones dependerá de la combinación con otras restricciones. Por ejemplo, el combustóleo se abarata cuando no



existe una limitante en la demanda, pero resulta más caro cuando se requiere satisfacer un mínimo.

Tabla 5.3. Ejemplo de precios sombra

a. Gasolinas y destilados							
(\$/B)	Alquilado ligero	Gasolina primaria	Gasolina Magna Oxigenada	Tolueno	Diesel Amargo	Diesel desulfurado	
Demanda libre							
<u>Importación de crudos</u>							
Refinería en la CNGM	23.31	18.72	20.17	35.27	18.43	19.22	
Refinería en México	20.85	18.69	19.32	33.42	17.59	18.37	
35% de crudo Maya	20.63	18.12	19.32	33.42	17.59	18.37	
<u>Crudos nacionales</u>							
Refinería en México	21.21	17.64	19.32	33.42	17.64	18.37	
35% de crudo Maya	20.50	18.01	19.32	33.42	17.65	18.37	
Demanda mínima							
<u>Importación de crudos</u>							
Refinería en la CNGM	23.71	17.46	20.26	35.27	18.24	19.24	
Refinería en México	20.65	18.47	19.80	33.42	17.98	18.82	
35% de crudo Maya	20.53	17.75	19.83	33.42	17.82	18.69	
<u>Crudos nacionales</u>							
Refinería en México	20.65	17.83	19.80	33.42	18.64	19.44	
35% de crudo Maya	21.17	13.27	20.32	33.42	17.95	18.73	
Economía cerrada	29.38	20.56	27.53	33.42	18.11	19.34	
35% de crudo Maya	28.82	17.79	28.12	33.42	15.27	15.99	

Finalmente, el mayor impacto se observa en un entorno de economía cerrada, en donde los costos derivados de una política de autosuficiencia mal entendida representan un subsidio a la ineficiencia.



Tabla 5.3. Ejemplo de precios sombra

b. Residuales						
(\$/B)	Gasóleo de vacío	Carga a FCC	Combustóleo	Residuo Atmosférico	Residuo de vacío	Residuo de VBR
Demanda libre						
<u>Importación de crudos</u>						
Refinería en la CNGM	15.80	15.67	13.07	13.11	10.99	9.53
Refinería en México	17.59	15.00	13.07	11.99	10.94	9.58
35% de crudo Maya	17.56	13.91	11.96	13.29	11.09	9.73
<u>Crudos nacionales</u>						
Refinería en México	17.44	13.69	13.03	11.97	11.20	9.55
35% de crudo Maya	17.75	15.31	11.89	13.58	10.46	8.69
Demanda mínima						
<u>Importación de crudos</u>						
Refinería en la CNGM	15.80	15.66	13.53	13.19	13.32	11.79
Refinería en México	17.75	15.66	13.97	13.51	13.41	13.40
35% de crudo Maya	17.75	15.63	15.47	15.24	13.69	13.22
<u>Crudos nacionales</u>						
Refinería en México	17.75	15.12	13.96	13.39	13.24	13.49
35% de crudo Maya	17.75	15.91	15.55	15.71	13.95	13.75
Economía cerrada	25.25	21.72	17.31	17.15	15.76	15.72
35% de crudo Maya	29.28	23.48	18.50	18.32	18.81	18.68



Conclusiones

El método propuesto, basado en el análisis dual, representa una alternativa viable para la determinación de precios de transferencia, puesto que considera una verdadera competencia entre las diferentes opciones de proceso para la corriente que desea evaluarse, arrojando como resultado un precio de oportunidad para la misma.

La posibilidad de obtener en un solo ejercicio todos los precios de transferencia representa una ventaja en tiempo y recursos. Su determinación puede quedar de manera automática a partir de los archivos de resultados generados por PIMS y en el formato necesario para las aplicaciones subsecuentes.

Al tratarse de un problema no lineal, resuelto mediante aproximaciones lineales sucesivas, la precisión de los precios sombra se irá perdiendo conforme nos alejemos de la vecindad al punto evaluado, de modo que será mejor determinar un nuevo precio si estamos modificando significativamente las cotas del escenario de análisis.

Si bien los resultados que se obtienen de esta manera no coinciden en valor absoluto con aquellos calculados mediante los métodos tradicionales, sobre todo al determinar los cambios en el margen de operación, sí existe congruencia cualitativa entre ambos números para la toma de decisiones.

Cuando se hace una evaluación mediante la diferencia entre funciones objetivo, existe una reoptimización del sistema. Ésto es lo que provoca las diferencias en el valor absoluto de los resultados al compararlos con los obtenidos mediante el análisis dual. Por otro lado, se dispondrá de información adicional sobre los cambios necesarios en el modo de operación de los procesos y otras variables operativas que no serán determinadas al disponer únicamente de un caso base.

Cuando se determinan los precios de transferencia en un punto extremo, se tendrá el costo menor -o el beneficio mayor- al aplicarse al volumen total, que



representará una ventaja para el área evaluada, pero en perjuicio de los intereses de la contraparte. Siempre será mejor integrar las operaciones de ambas empresas y determinar el precio de equilibrio al maximizar las utilidades combinadas para ambas, tal y como se resolvió el problema de las naftas a Cangrejera.

La integración de procesos nos permitirá, en el punto óptimo, obtener los volúmenes que deben transferirse entre las diferentes áreas involucradas, en un entorno de libre competencia por las corrientes intercambiadas en los diferentes procesos. También permitirá determinar las implicaciones para cada una de las empresas en las variables que de primera instancia no tienen nada que ver con los flujos entre ambas, pero que sufren cambios en la optimización global.

La dependencia que tienen los precios sombra ante las restricciones que definen los diferentes escenarios económicos, políticos y operativos permitirán que en el planteamiento del problema se induzca el resultado hacia valores que favorezcan a una de las áreas involucradas, lo cual puede significar una desventaja en la aplicación de una metodología que se buscaría fuese transparente, reproducible y de fácil aplicación por cualquiera de las partes interesadas.

Por ejemplo, si consideramos la demanda de combustóleo correspondiente a los meses de agosto o septiembre, fecha en la que han concluido las labores de la zafra y las plantas hidroeléctricas trabajan a su máxima capacidad, tendremos una disminución de entre 15% y 20% en el requerimiento mínimo de este producto, con una repercusión directa a la baja en el volumen óptimo de crudo Maya, así como en el deterioro del precio sombra en el nivel máximo técnico de 640MBD planteado en el ejercicio 5.1.

Se requiere de un conocimiento detallado del modelo y de la construcción de las ecuaciones para determinar qué precio sombra tomar para cada corriente que nos interese, de modo que el requisito de transparencia y reproducibilidad del método no será fácilmente alcanzado de esta manera.



Por otro lado, será necesario mantener el modelo de optimización actualizado con las operaciones de cada una de las refinerías, que pueden estar representadas de manera estadística o teórica, ya sea de diseño o calculada.

La modelación de los procesos con información estadística reflejarán los impactos derivados de ineficiencias que impactarán directamente los resultados. Por el contrario, si utilizamos información teórica para la construcción del modelo de optimización, tratando de representar el máximo potencial de las refinerías, pueden obtenerse números demasiado optimistas y que no sean alcanzables en la realidad.

La utilización de este método como fuente absoluta para la determinación de precios de transferencia es cuestionable. Su mayor ventaja será desde el punto de vista del análisis económico para decidir sobre la conveniencia de casos particulares.

No es admisible la aplicación de un método en el cual puede inducirse un sesgo a los resultados, en el que se requiera de un alto nivel de especialización para poder reproducirlos y en el que éstos dependan del criterio que se utilizó durante la fase de modelación. Por tal motivo, no se recomienda este método como la mejor alternativa para la determinación de precios de transferencia.



Bibliografía

1. Robert A. Meyers, "Handbook of Petroleum Refining Process", Mc.Graw-Hill
2. James H. Gary, Glenn H. Handwerk, "Petroleum Refining Technology and Economics", Marcel Dekker, Inc.
3. Robert E. Maples, "Petroleum Refinery Process Economics", PennWell Publishing Co.
4. W.L. Luyben, "Process Modeling, Simulation and Control for Chemical Engineers", Mc.Graw-Hill
5. Thomas H. Cormen, Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest, "Introduction to Algorithms", Mc.Graw-Hill
6. Wayne L. Winston, "Operations Research Applications and Algorithms", PWS-Kent Publishing Co.
7. B.S.Jung, W.Mirosh, W.H. Ray, "Large Scale Optimization Techniques Applied to Chemical and Petroleum Process", The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol.19, Dec.1971, pp.844-852
8. A.Rashad Abed-khalil, Edward J. Lusk, "Transfer Pricing, a Synthesis", Journal of Business, Vol.XLIX, No.1, pp.8-23
9. José Ángel Orozco Vargas, "Método para calcular costos unitarios de fabricación en los procesos de productos múltiples", Pemex-Refinación
10. NOM-085-ECOL-94. Diario Oficial de la Federación, 1 de agosto de 1994
11. NOM-086-ECOL-94. Diario Oficial de la Federación, 10 de agosto de 1994
12. Alan S. Mane, "A Linear Programming model for the U.S. Refinery Industry", Econometrica, New Haven, pp.67-106
13. E.M.Ventura, "Etude de la Structure Optimale de l'Industrie de Raffinage et des Transports de Produits Pétroliers", Ministerio Francés de Industria y comercio, 1958
14. Bonner & Moore Management Science, "Refining Economics Seminar", 1992
15. Basil L. Joffe, "The Distributive Recursion Method as Implemented in PIMS", Presented at the 1st. PIM Users Conference, 1987
16. Emanuel Singer, "Simulation and Optimization of Oil Refinery Design", Chemical Engineering, No.37, Vol.58, pp.62-74



Apéndice A. Conceptos básicos de la Investigación de Operaciones

La investigación de operaciones surge durante la segunda guerra mundial, donde se buscaba la mejor asignación de recursos limitados a diferentes operaciones de guerra. Desde entonces ha tenido aplicaciones diversas y existe una amplia bibliografía al respecto.

Cualquier persona iniciada en las técnicas básicas de la investigación de operaciones podrá omitir este capítulo. Aquí se presentan los conceptos básicos en los cuales se basa el análisis desarrollado en este trabajo.

Los conceptos teóricos se presentan más bien desde una perspectiva práctica sin ahondar en la formalidad matemática, para la cual puede consultarse la literatura.

Como primer punto se describe el problema general de optimización y las diferencias contra la simulación. Después se introduce el concepto de optimización lineal y se hace una extrapolación para la optimización no lineal, partiendo de problemas con una sola variable y extendiendo los conceptos a espacios multidimensionales. También se mencionan algunas métodos numéricos que se pueden utilizar para resolver problemas de optimización.

Finalmente se tratará el tema de dualidad y su interpretación conceptual en el análisis de sensibilidad.

A.1. Modelación, Optimización y Simulación

Los conceptos de optimización y simulación son frecuentemente interpretados, de manera errónea, como sinónimos. Si bien existe una gran relación entre ellos, sus usos e interpretaciones resultan totalmente diferentes, aunque en muchas ocasiones complementarios. En la tabla A.1 se resumen los dos de manera conceptual y matemático.



Modelación

Como primer paso, definiremos el concepto de modelo como un símil de la realidad. Por ejemplo, un modelo a escala de un avión se parecerá en forma y proporciones al objeto real, pero su funcionamiento será completamente diferente. Por otro lado, un avión de papel cumplirá relativamente el objetivo de volar, aunque su forma será algo diferente a un avión real.

	Modelación	Simulación	Optimización
Conceptual	Símil de la realidad. Grado de complejidad según necesidades	Predice el comportamiento del sistema a ciertas condiciones	Selecciona la mejor alternativa de acuerdo a un objetivo planteado
Matemático	Conjunto de ecuaciones que trata de reproducir un ente o fenómeno físico	Resuelve las ecuaciones una vez agotados los grados de libertad	Juega con los grados de libertad para seleccionar la mejor alternativa

Existen, pues un gran número de ejemplos de modelos que se crean con diferentes objetivos y diferentes niveles de abstracción, por lo que es primordial tener clara la utilización que se dará al modelo antes de crearlo.

Desde el punto de vista matemático, un modelo es un conjunto de ecuaciones con las que se pretende representar un ente o fenómeno físico. En este caso también debe plantearse el uso del modelo antes de crearlo, el resultado será el nivel de complejidad del mismo. Cada una de las incógnitas representará un parámetro característico que se presenta en el ente real, como dimensión, temperatura, presión, tiempo, etc. Las ecuaciones serán la relación que existe entre estas variables del sistema.

El nivel de modelación dependerá también de los recursos que se tengan disponibles para resolverlo, así como de la información necesaria para alcanzar la precisión deseada. Durante la fase de modelación es frecuente que se construyan modelos sucesivos, en los cuales se incrementa el nivel de complejidad cada vez. Con esta técnica se depuran los errores de modelación y se adquiere un aprendizaje del concepto que se modela y de la



técnica de modelación. En la tabla A.2 se resumen las ventajas y desventajas inherentes a la complejidad del modelo.

Como ejemplo de modelos matemáticos podremos enlistar tantos como se nos ocurran; desde un modelo de crecimiento poblacional hasta un modelo que prediga el comportamiento de un reactor químico; desde el modelo de una estructura metálica hasta la teoría de fractales; etcétera.

Tabla A.2. Ventajas y desventajas de la complejidad del modelo.

Modelo sencillo	Modelo complejo
<ul style="list-style-type: none">• Se requiere poca información para construirlo.• Es fácil de resolver.• El tiempo de solución es rápido.• Los resultados serán aproximados.• Genera información básica.• Se entiende más fácilmente.	<ul style="list-style-type: none">• Se requiere más información para construirlo.• Su solución será más compleja.• Tiempo de solución lento.• Resultados más precisos.• Genera mayor cantidad de información.• Se requiere mayor conocimiento para entenderlo.

Una vez construido el modelo es importante no perder de vista las limitaciones de éste en el momento de su aplicación, ya que la utilización incorrecta del modelo matemático arrojará resultados de poca utilidad e inclusive con un efecto negativo en el sistema.

Simulación

El concepto de simulación trata de reproducir la realidad o predecir su comportamiento. Por ejemplo, un simulador de vuelo que utiliza el concepto de "realidad virtual" trata de reproducir el entorno en el cual se encontraría el usuario al pilotear un avión de verdad.

Desde el punto de vista matemático, la simulación se enfoca más en la predicción del comportamiento de las variables características del sistema, dado un estado específico en el que se encuentre. Para ello, se utiliza un modelo matemático y se resuelven las ecuaciones necesarias.



En el modelo matemático generalmente existirán grados de libertad. Esto quiere decir que habrá mayor número de variables que el número de ecuaciones que las relacionan. La simulación, estrictamente hablando, consiste en agotar los grados de libertad, con lo que se define un estado específico del sistema y calcular el resto de las variables.

Optimización

El concepto de optimización es la búsqueda de la mejor opción de acuerdo a un objetivo planteado. Un proceso puede optimizarse mediante la experiencia, sin necesidad de utilizar un modelo como herramienta. Una característica importante de la optimización radica en que se tienen varias opciones para resolver el problema, de entre las cuales habrá alguna mejor de acuerdo al parámetro de medición indicado. Por ejemplo, la optimización de un espacio determinado para oficinas.

Desde el punto de vista matemático la optimización difiere de la simulación en que ésta juega con los grados de libertad para encontrar la combinación óptima de variables; mientras que aquélla resuelve el sistema en un estado predeterminado.

Así pues, en el proceso de búsqueda de la solución óptima, se prueba una combinación de variables y se resuelve el sistema (simulación), hasta llegar a una alternativa que no se pueda mejorar.

En un proceso de optimización debe definirse la función objetivo, que puede ser una variable económica o de proceso, tales como maximizar ganancias o minimizar desperdicios; maximizar producción, etc.

La identificación de la función objetivo no es suficiente en la definición de un problema de optimización. Deben tomarse en cuenta las restricciones existentes en el sistema. Por ejemplo, si queremos minimizar el costo energético de un proceso, al no operarlo no se consume en energía y ésa sería la solución, pero el sentido común nos indica que no es lo que buscamos. Entonces el problema debe plantearse indicando el nivel de producción requerido, la disponibilidad de materiales y mano de obra, capacidad de maquinaria, etc.

Otras restricciones que no se indican explícitamente por ser obvias tienen que ver con el significado real de cada variable, como puede ser la no negatividad de la producción o del tiempo utilizado.

En la Tabla A.3 se resume el problema general de optimización.



Tabla A.3. Problema general de optimización.

Función objetivo:	Maximizar (minimizar):	$f(x_1, x_2, \dots, x_n)$
Restricciones:	Sujeto a:	$g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) @ b_1$
		$g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) @ b_2$
		.
		.
		$g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) @ b_m$
		$x_i \leq 0 \quad ; \quad x_j \geq 0$

El símbolo @ denota el sentido de la restricción, que puede ser (\leq), (\geq) ó ($=$). Las funciones f y g_i pueden ser de cualquier tipo.

A.2. Optimización de funciones de una variable

Un punto óptimo se define matemáticamente como máximo si:

$$f(x^*) \geq f(x^* + \Delta x); \quad \forall \Delta x \quad \dots(A.1)$$

o bien

$$-f(x^*) \leq -f(x^* + \Delta x); \quad \forall \Delta x \quad \dots(A.2)$$

Un punto mínimo se define como:

$$f(x^*) \leq f(x^* + \Delta x); \quad \forall \Delta x \quad \dots(A.3)$$

ó

$$-f(x^*) \geq -f(x^* + \Delta x); \quad \forall \Delta x \quad \dots(A.4)$$

Si definimos una función

$$g(x) = -f(x) \quad \dots(A.5)$$



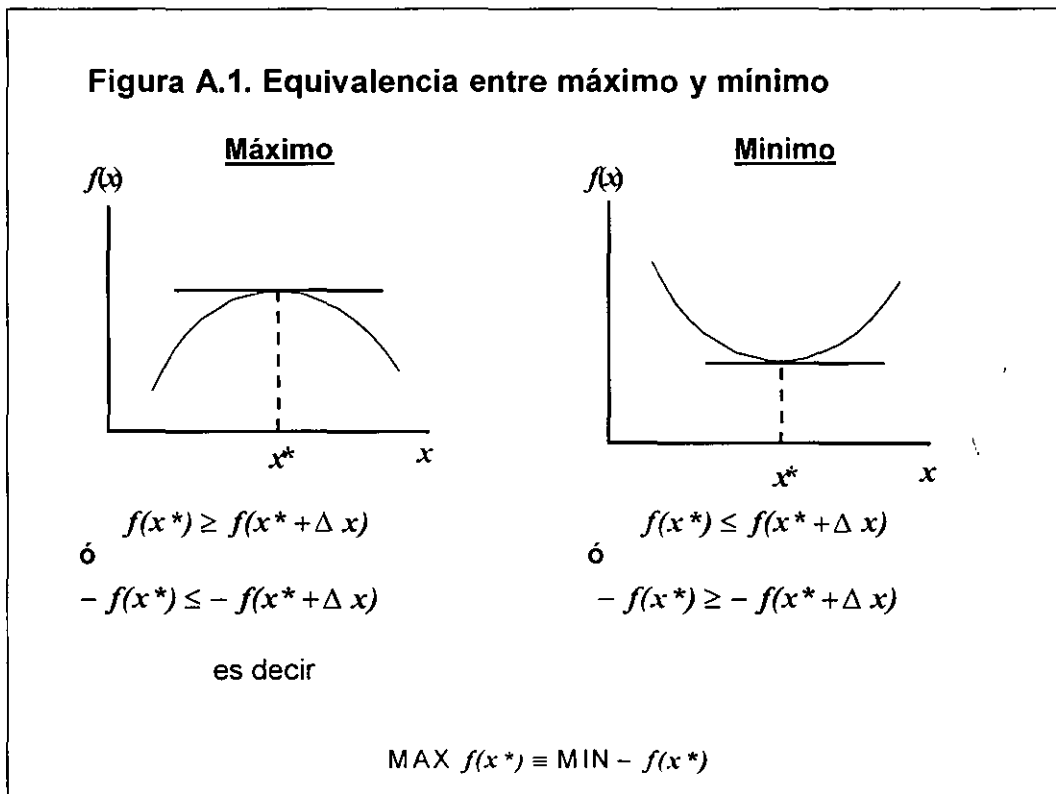
y la aplicamos a la ecuación (A.2) tendremos

$$g(x^*) \leq g(x^* + \Delta x); \quad \forall \Delta x \quad \dots(A.6)$$

que es idéntica a la definición de punto mínimo (A.3). Entonces, existe una equivalencia entre un punto máximo y un punto mínimo, que es :

$$\text{MAX } f(x) \equiv \text{MIN} - f(x) \quad \dots(A.7)$$

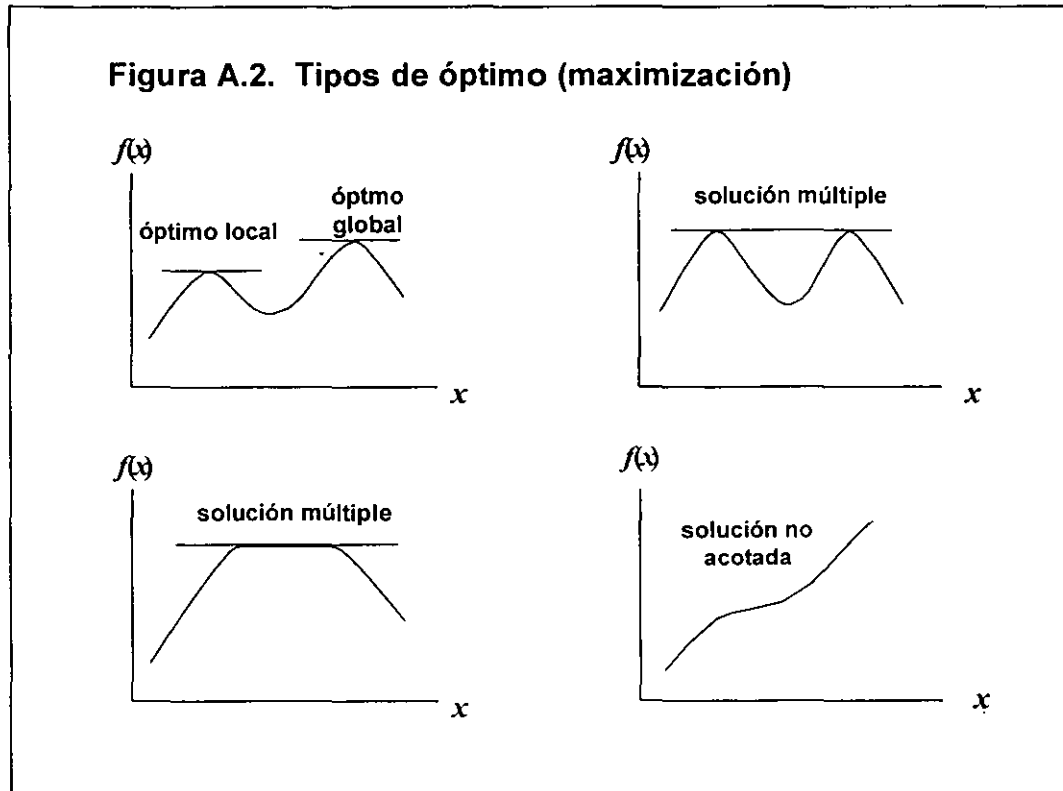
de tal modo que todas las deducciones que se apliquen a un punto máximo serán aplicables a un punto mínimo. Esta situación se ilustra en la figura A.1.



Cuando la condición de optimalidad (A.1) se cumple para todo el dominio de la función, hablaremos de un óptimo global. Si además sólo se cumple como desigualdad se tratará de una solución única. Si existe una Δx que haga que se cumpla la igualdad tendremos soluciones múltiples.



En el caso en que la condición de optimalidad se cumpla sólo en una vecindad del punto óptimo, pero no en todo el dominio de la función, a este punto se le denomina óptimo local o relativo, que también puede ser único o múltiple.

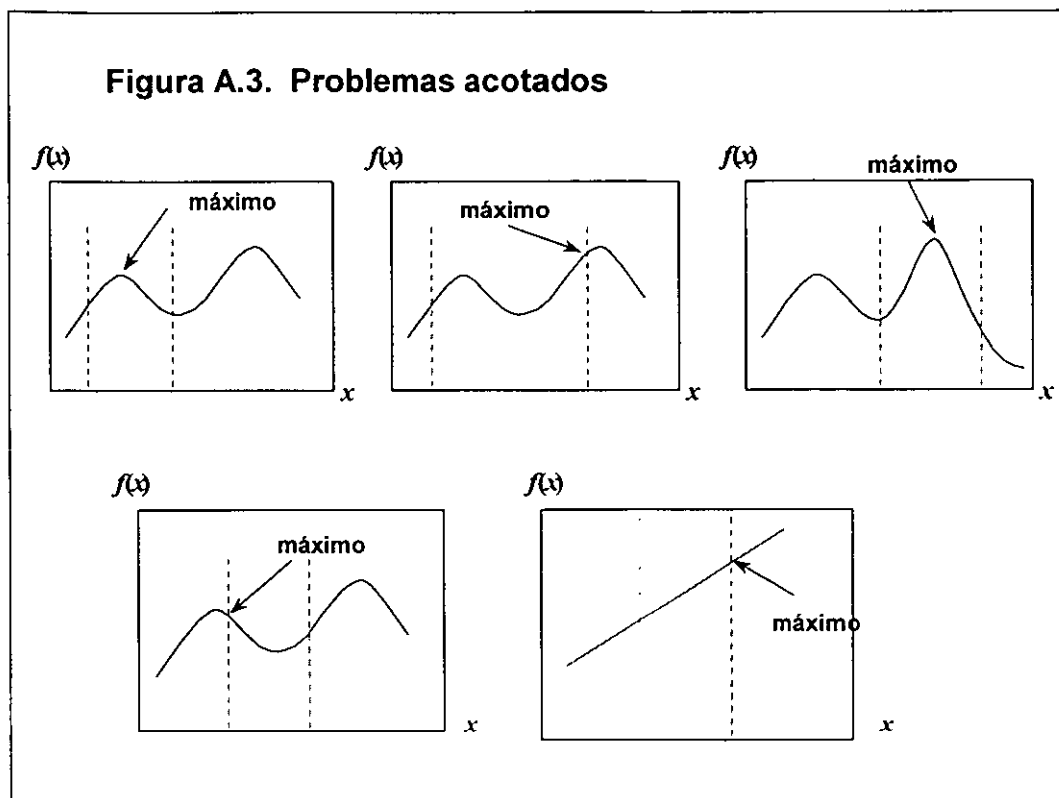


Existen funciones en las cuales no se cumple la condición de optimalidad, como lo es una función creciente en todo su dominio. A este caso se le conoce como solución no acotada.

En la figura A.2 se muestran los diferentes tipos de óptimos.

El problema matemático carecerá de importancia mientras no tenga una aplicación práctica. Así, la variable independiente deberá estar acotada según sus límites físicos. En la figura A.3 se muestra cómo estos límites afectan a la solución óptima. También se observa cómo una función creciente tendrá su óptimo en un punto extremo.

En general tendremos que el punto óptimo ocurrirá en un punto extremo, o bien cuando la recta tangente a la curva de la función es horizontal, es decir que la primera derivada de la función sea igual a cero.



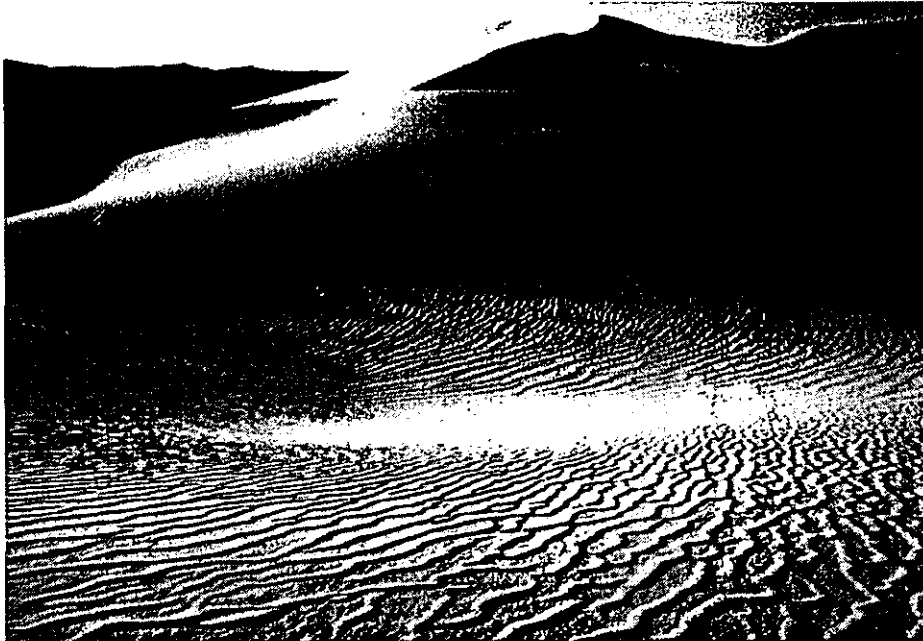
Recordando el cálculo diferencial, podremos reconocer tres tipos de situación cuando la primera derivada es igual a cero: máximo, mínimo y punto de inflexión. En el primer caso, la segunda derivada debe ser negativa, o la primera derivada de orden superior diferente de cero debe ser par y negativa; para el caso mínimo debe ser positiva; y en el punto de inflexión la primera derivada de orden superior diferente de cero debe ser impar.

A.3. Optimización de funciones multivariantes

Al tratarse de problemas multidimensionales la situación se complica. Imaginemos una función con la topología que se muestra en la figura A.4; el objetivo sería encontrar el pico más alto (o el valle más profundo), en cuyo caso el plano tangente a la función sería horizontal.



Figura A.4. Problemas multidimensionales



El análisis hecho para las funciones de una variable es extrapolable a problemas multivariantes, de tal modo que si:

$$f(X^*) \geq f(X^* + \Delta X); \quad \forall \Delta X \quad \dots(A.8)$$

entonces X^* será el punto máximo buscado, donde X es un vector de dimensión n .

Para un punto mínimo, la condición de optimalidad será

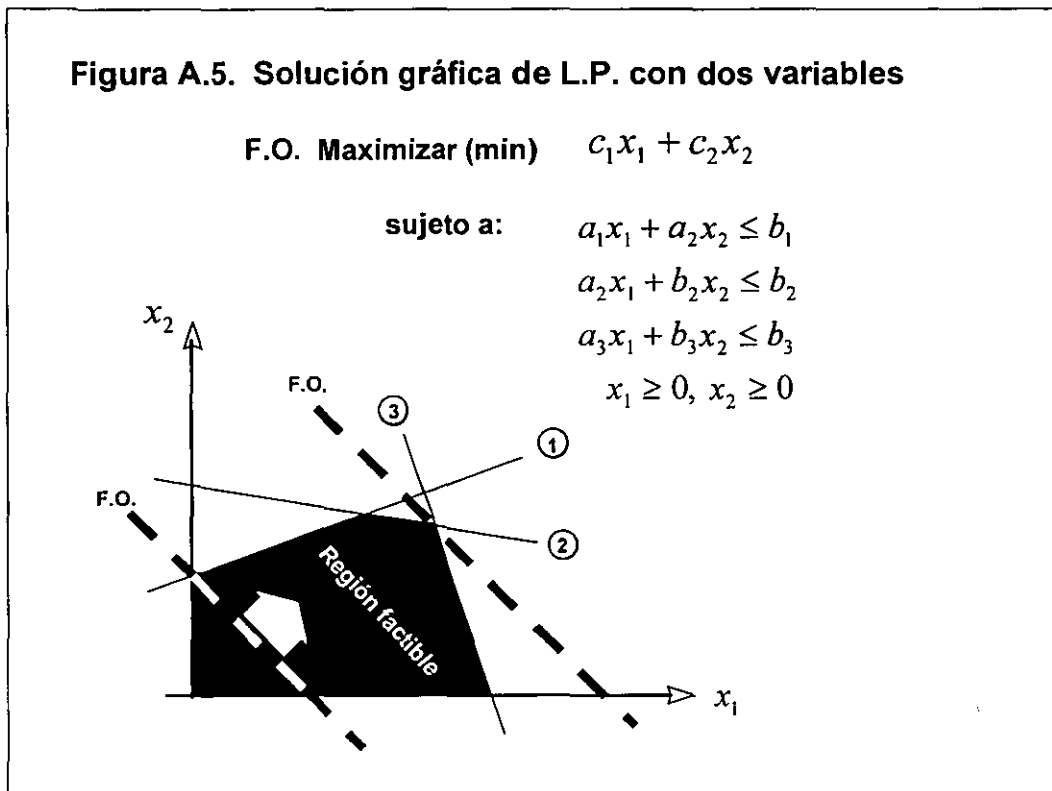
$$f(X^*) \leq f(X^* + \Delta X); \quad \forall \Delta X \quad \dots(A.9)$$

que es análoga a la condición (A.3).

La definición de óptimo absoluto y relativo, solución única o múltiple también es aplicable a funciones multivariantes. De igual manera nos interesaran límites físicos a las variables, que pueden resultar en restricciones no lineales multivariantes.



Distinguiremos el caso en que tanto la función como las restricciones sean lineales, conocido como programación lineal, del caso no lineal. En las figuras A.5 a A.7 se muestra una representación gráfica de ambas y su comparación.



En el caso bidimensional se pueden graficar todas las restricciones y desplazar paralelamente la función objetivo. La intersección de todas las restricciones formará en el caso lineal, un polígono convexo conocido como región factible. El punto óptimo se encontrará al probar el valor de la función objetivo en los diferentes vértices. Nótese que no será necesario probar exhaustivamente cada vértice del polígono si se identifica la dirección en la cual mejora la función objetivo hasta alcanzar el último de los vértices, que corresponderá al punto óptimo.

Para las funciones (y restricciones) no lineales la situación es algo diferente y ya no será posible resolverlas gráficamente, pero existen métodos numéricos y analíticos para resolverlas. En la tabla A.4 se presenta un resumen de las condiciones de optimalidad y sus analogías con el caso de una variable.



Figura A.6. Representación gráfica de un problema no lineal

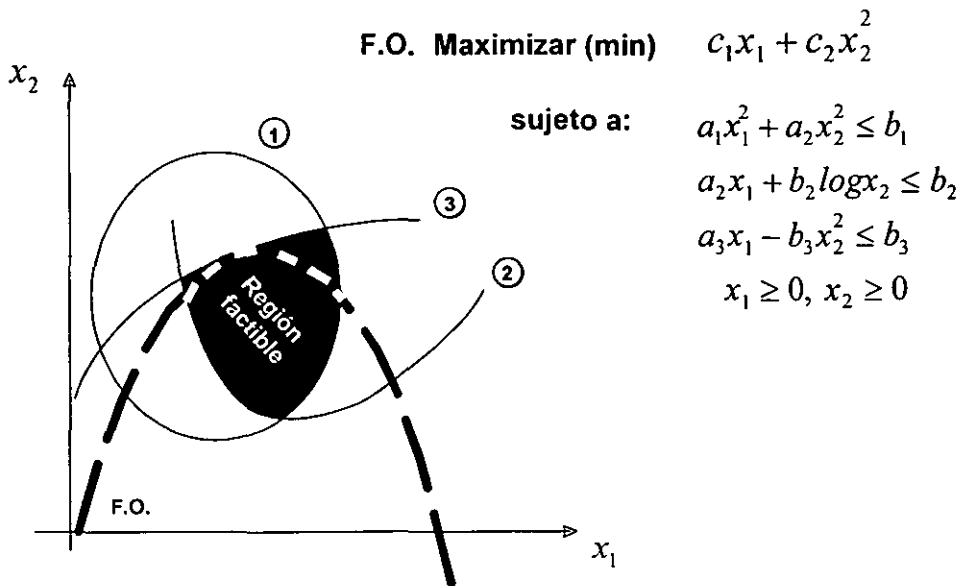
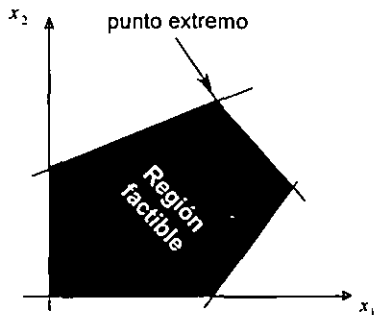
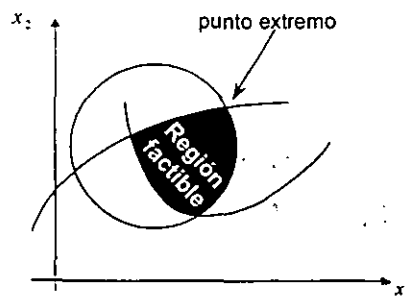


Figura A.7. Discusión lineal vs no lineal



La solución óptima siempre estará en un punto extremo



La solución puede estar en un punto extremo o tangente a una de las curvas



Tabla A.4. Condiciones de optimalidad.

	1 Variable	Multivariable
General		
Máximo	$f(x^*) \geq f(x^* + \Delta x); \quad \forall \Delta x$	$f(x^*) \geq f(x^* + \Delta x); \quad \forall \Delta x$
Mínimo	$f(x^*) \leq f(x^* + \Delta x); \quad \forall \Delta x$	$f(x^*) \leq f(x^* + \Delta x); \quad \forall \Delta x$
Lineal	minimizar: Cx s. a. $a \leq x \leq b$ Punto óptimo: b si $c < 0$ a si $c > 0$	minimizar: Cx s.a. $Ax \geq b; \quad x \geq 0$ ó maximizar *: wb s.a. $wA \leq c; \quad w \geq 0$ Condiciones de Kuhn-Tucker : $Ax \geq b; \quad x \geq 0$ $c - wA - v = 0; \quad w \geq 0; \quad v \geq 0$ $w(Ax - b) = 0; \quad vx = 0$
No lineal		
Condición:	Primera derivada: $f'(x) = 0$	Gradiente: $\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} + \frac{\partial f}{\partial x_2} + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \right) = 0$
Máximo:	Segunda derivada negativa: $f''(x) < 0$	Hessiana negativa definida: $H(x) = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n^2} \end{pmatrix} < 0$
Mínimo:	Segunda derivada positiva: $f''(x) > 0$	Hessiana positiva definida: $H(x) > 0$
Punto de inflexión:	Derivada de orden impar: $f''(x) = 0; \quad f'''(x) \neq 0$	Hessiana no definida: $H(x) \text{ N.D.}$



A.4. Métodos numéricos

Existen diferentes métodos para la solución de sistemas de ecuaciones y de problemas de optimización. Podremos clasificarlos en dos categorías: analíticos y numéricos.

La solución analítica consiste en la aplicación de diferentes teoremas al sistema, de tal modo que se obtenga una expresión para las variables independientes en función de los datos conocidos del problema. En este caso se puede obtener una solución algebraica para un problema general, parametrizando las diferentes constantes del sistema, de modo que se aproveche el trabajo previo en la solución de una familia de problemas similares. Además, los valores que se calculan para las incógnitas serán exactos.

Los métodos numéricos resuelven únicamente un caso particular del problema, normalmente son iterativos y la solución que se obtiene es aproximada. Ésto no es una desventaja, ya que el grado de precisión se define en el mismo método.

En la tabla A.5 se hace un resumen de los métodos numéricos más utilizados.

		Solución de ecuaciones	Optimización
Una variable	Lineal	Álgebra	Gráfico, exhaustivo
	No lineal	Bisección, Newton-Raphson, aproximaciones sucesivas (tanteo)	Gráfico, método diferencial (solución analítica)
Multivariable	Lineal	Kramer, Gauss-Jordan, Sustitución	Método diferencial, gráfico, programación lineal (simplex, dual-simplex, etc.)
	No lineal	Newton Raphson, Cuasi-Newton	Programación cuadrática, programación no lineal, PLS (Programación lineal sucesiva)



EJEMPLO A.1. Problema no lineal de 1 variable: Obtener los puntos máximos y mínimos de la función

$$f(x) = 2x^4 - 12x^3 + 21x^2 - 5x + 1$$

en el intervalo cerrado $[0,3]$.

A. SOLUCIÓN ANALÍTICA: Para aplicar las condiciones de optimalidad presentadas en la tabla A.4 debemos comenzar con obtener la primera y segunda derivadas:

$$f'(x) = 8x^3 - 36x^2 + 42x - 5$$

$$f''(x) = 24x^2 - 72x + 42$$

Al igualar la primera derivada a cero obtendremos la ecuación cúbica:

$$8x^3 - 36x^2 + 42x - 5 = 0$$

Esta ecuación se puede resolver por fórmula, mediante factorización o aplicando un método numérico. La ecuación tendrá tres raíces reales o una raíz real y dos complejas conjugadas. Si una de las raíces es racional, deberá ser una combinación de la descomposición en números primos de los coeficientes de tercer orden y el término independiente. Al probar cada uno de estos números obtenemos:

x	8/5	4/5	2/5	1/5	5/3	5/8	5/4	5/2	1/8	1/4	1/2	1
f'(x)	2.8	9.7	6.6	2	2	9.1	6.9	0	-0.3	3.4	8	9

como $x=5/2$ es una raíz, podemos factorizar la ecuación cúbica como

$$\left(x - \frac{5}{2}\right)(8x^2 + 16x + 2) = 0$$

y las dos raíces restantes se obtienen al resolver la ecuación cuadrática:

$$(8x^2 + 16x + 2) = 0$$

que son $x = 1 \pm \frac{\sqrt{3}}{2}$.

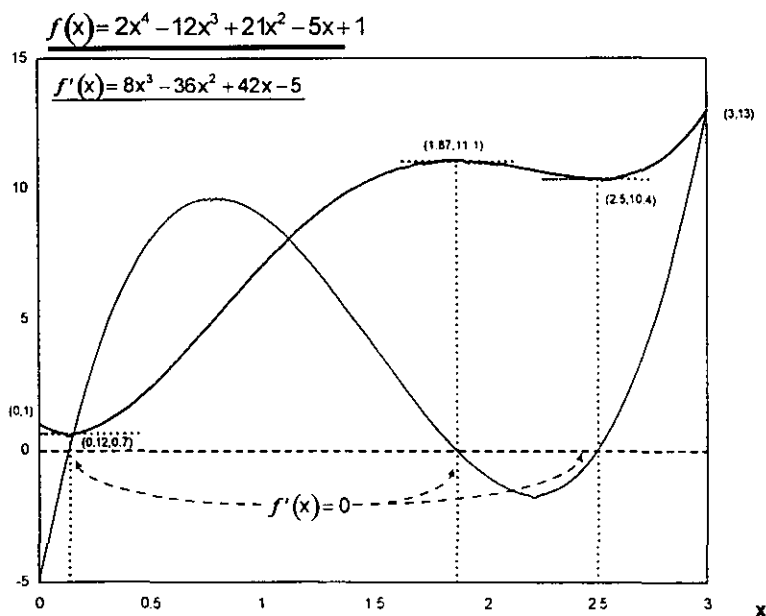
Una vez obtenidos los valores en los cuales ocurre un punto extremo, el siguiente paso es evaluar la segunda derivada para determinar el tipo de punto extremo.

Nótese que el punto máximo absoluto corresponde a un punto extremo y no al máximo relativo, mientras que el punto mínimo absoluto sí coincide con uno de los puntos mínimos relativos.



x	f(x)	f'(x)	f''(x)	COMENTARIOS.
0	1.000	-5.00	42	Extremo del intervalo.
$1 - \frac{\sqrt{3}}{2} = 0.134$	0.679	0.00	33	Mínimo absoluto.
0.12	0.682	-0.46	34	Cumple con la definición de mínimo (A.3)
0.15	0.683	0.52	32	
$1 + \frac{\sqrt{3}}{2} = 1.866$	11.071	0.00	-9	Máximo relativo.
1.7	10.983	1.66	-11	Cumple con la definición de máximo (A.1)
2.0	11.000	-1.00	-6	
$5/2 = 2.5$	10.375	0.00	12	Mínimo relativo.
2.48	10.377	-0.23	11	Cumple con la definición de mínimo (A.3)
2.52	10.377	0.25	13	
3	13.000	13	42	Extremo del intervalo. Máximo absoluto.

B. SOLUCIÓN GRÁFICA. Al graficar la función y la primera derivada tenemos:



Leyendo los datos de la gráfica obtenemos :

x	f(x)	COMENTARIOS.
0	1.0	Extremo del intervalo.
0.12	0.7	Mínimo absoluto.
1.87	11.1	Máximo relativo.
2.5	10.4	Mínimo relativo.
3	13.0	Extremo del intervalo. Máximo absoluto.



La solución será aproximada debido al error en el trazo y la lectura en la escala gráfica.

C. SOLUCIÓN NUMÉRICA. Utilizaremos el método de la sección dorada. Como primer paso debemos tener localizados los puntos extremos, los cuales estarán en medio de dos puntos con pendiente de signo contrario. Como la función es derivable, estos cambios de signo en la pendiente ocurrirán cuando la segunda derivada es igual a cero, de modo que al resolver la ecuación:

$$24x^2 - 72x + 42 = 0$$

obtendremos las raíces $x_1=0.793$ y $x_2=2.207$. Con estos puntos y los puntos extremos se construyen tres subintervalos: $[0,0.793)$, $(0.793,2.207)$, $(2.207,3]$. Cada uno de estos subintervalos contendrá un máximo o mínimo relativo.

Después de 25 recursiones tendremos para cada uno de los intervalos:

x	f(x)	ERROR	COMENTARIOS.
0	1.0		Extremo del intervalo.
0.134	0.679	2.0×10^{-10}	Mínimo absoluto.
1.866	11.071	-2.4×10^{-10}	Máximo relativo.
2.5	10.375	-8.8×10^{-11}	Mínimo relativo.
3	13.0		Extremo del intervalo. Máximo absoluto.

El error reportado es la diferencia entre el valor de la función en ambos extremos del intervalo. El punto óptimo reportado es el punto medio del intervalo.

Cuando se trata de resolver sistemas pequeños, tales como el ejemplo anterior, los métodos analíticos son muy usados. Sin embargo, a medida que el sistema va creciendo, o bien las ecuaciones resultan más complejas, los métodos numéricos nos brindan la facilidad de solución mientras que los analíticos se vuelven cada vez más complejos. Esta situación ha motivado el desarrollo de múltiples programas de computadora para la solución de problemas matemáticos.

Para sistemas multivariables se destaca por su simplicidad, pero gran utilidad práctica, el caso lineal. En este tipo de problemas la solución óptima siempre corresponderá a un punto extremo. En el caso particular de sistemas bidimensionales se puede obtener fácilmente la solución gráfica.

EJEMPLO A.2. Problema lineal de 2 variables: En una planta de refinación con capacidad de 100 MBD se pueden alimentar crudo ligero y pesado. Debido a limitaciones tecnológicas no se puede alimentar más del 60% de crudo pesado ni menos del 40%. Se debe determinar la mezcla de crudos que



maximice la utilidad del refinador, tomando en cuenta los siguientes precios, disponibilidad de crudos, demanda y rendimiento de productos:

Rendimientos	Crudo pesado	Crudo Ligero	Demanda (MBD)	Precio (\$/barril)
Crudo pesado	100%		13-58	13
Crudo ligero		100%	15-65	15
Gas L.P.	5%	10%	2 mínimo	15
Gasolina	30%	40%	25-40	25
Diesel	25%	35%	20-30	21
Combustóleo	40%	15%	20-30	10

SOLUCIÓN. El primer paso será la construcción del modelo matemático. Llamaremos x_1 al volumen de crudo pesado y x_2 al volumen de crudo ligero. El problema matemático será:

Utilidad: maximizar $4.50x_1 + 5.35x_2$

Crudo pesado $13 \leq x_1 \leq 58$

Crudo ligero $15 \leq x_2 \leq 65$

Capacidad: $x_1 + x_2 \leq 100$

Gas L.P. $2 \leq 0.05x_1 + 0.10x_2$

Gasolina $25 \leq 0.30x_1 + 0.40x_2 \leq 40$

Diesel $20 \leq 0.25x_1 + 0.35x_2 \leq 30$

Combustóleo $20 \leq 0.40x_1 + 0.15x_2 \leq 30$

Mínimo pesado: $0 \leq 0.6x_1 - 0.4x_2$

Máximo pesado: $0.4x_1 - 0.6x_2 \leq 0$

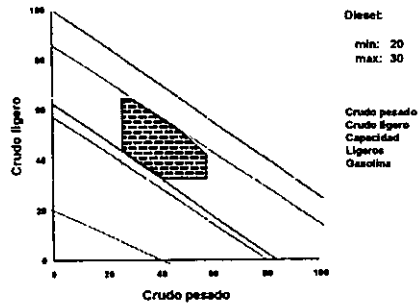
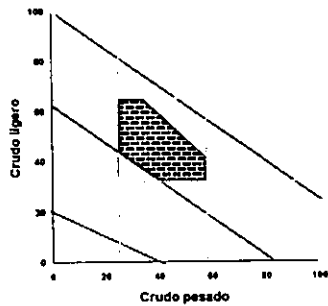
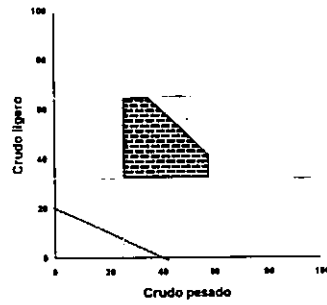
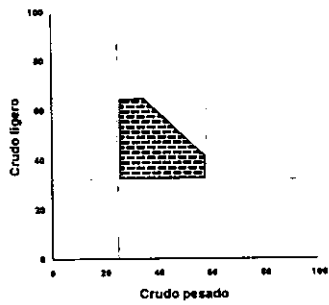
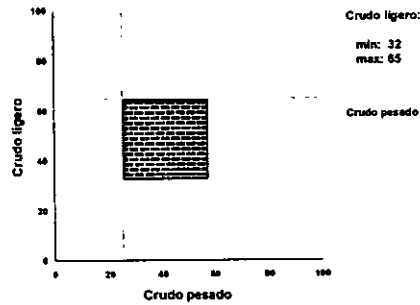
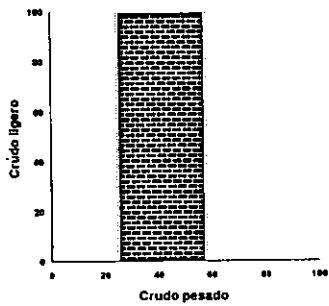
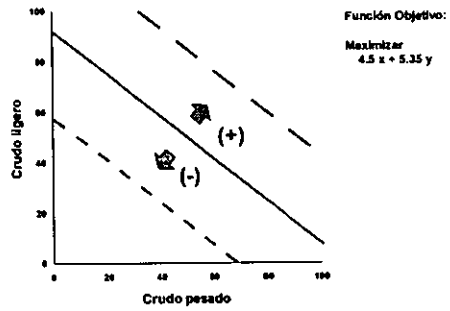
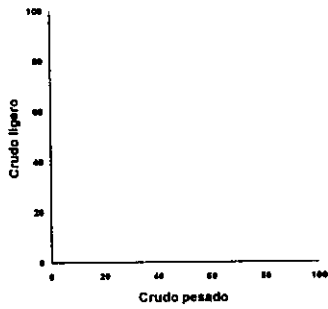
Ya que se tiene desarrollado el modelo matemático, el siguiente paso es graficar cada una de las restricciones. Nótese que la función objetivo variará de acuerdo a las actividades de cada uno de los crudos pero su desplazamiento es paralelo, ya que al ser lineal su pendiente se mantiene constante.

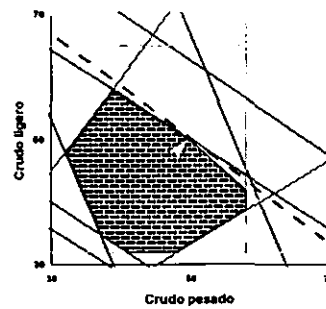
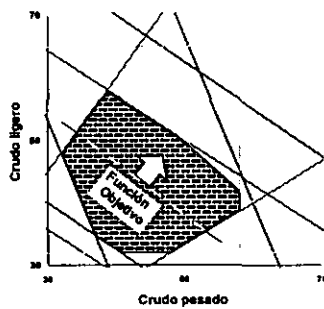
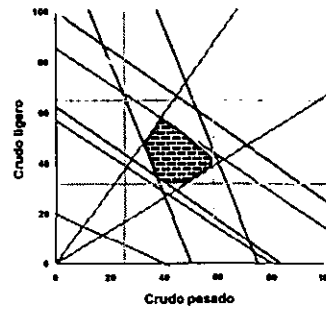
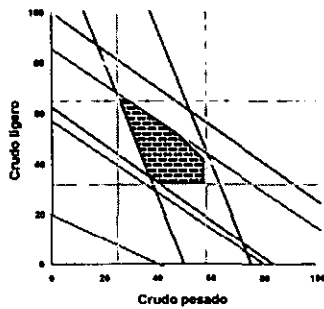
Es importante determinar el sentido en el cual crecerá la función objetivo para posteriormente detectar el punto óptimo.

Al graficar cada una de las restricciones se reduce la región factible. Posteriormente se determinará el óptimo como el último vértice del polígono que alcanza a tocar la función objetivo, tal como se muestra continuación:



Precios de Transferencia en una Refinería





Para determinar los valores exactos del punto óptimo se puede resolver el sistema de ecuaciones que se obtiene de las restricciones que forman el vértice óptimo. Las actividades de cada uno de los productos se calcularán al sustituir los volúmenes de cada uno de los crudos, es decir, mediante una simulación.

Para problemas lineales de mayor tamaño no es posible obtener una solución gráfica, pero existen varios algoritmos para su solución, el más usado de todos es el método simplex, el cual se aplica en el siguiente ejemplo.

EJEMPLO A.3. Problema lineal multivariables: Un fabricante de poliuretano produce aglomerado, bloque y esponja, los cuales tienen un precio en el mercado de 35, 36 y 40 pesos por pieza, respectivamente. Para la fabricación de cada pieza se utiliza uretano, freón y catalizador en las siguientes proporciones:

	Agglomerado	Bloque	Esponja
	[pza]	[pza]	[pza]
Uretano [kg]	5	8	2
Freón [kg]	6	4	9
Catalizador [g]	2	1	4



En el almacén tiene 72 toneladas de uretano, 118 toneladas de freón y 46 kg de catalizador. Determinar los niveles de producción que maximicen la utilidad del fabricante.

SOLUCIÓN. Como primer paso pondremos toda la información en forma tabular, por millar de unidades producidas, conocida como *tableau*.

	Producción			Inventarios			Total
	Aglomerado	Bloque	Esponja	Uretano	Freón	Catalizador	
\$	35	36	40				
Uretano	5	8	2	1			73
Freón	6	4	9		1		118
Catalizador	2	1	4			1	46

De esta tabla podremos ver que al asignar cero a cada uno de los productos los balances para los materiales se cumplen, manteniendo cada una de las materias primas en el almacén.

Como el objetivo es maximizar la utilidad, comenzaremos con la producción de esponja, que es el producto de mayor precio. El volumen a producir, dentro de esta primera iteración, será aquel que consuma por completo alguna de las materias primas, que en este caso es el catalizador, suficiente para producir 11,500 unidades de esponja. La utilidad será de \$460,000.⁰⁰

Como agotamos el catalizador, si queremos producir aglomerado o bloque tendremos que dejar de fabricar esponja. Así, si queremos tener 1 g de catalizador tendremos que dejar de producir 0.25 unidades de esponja, se dejarán de consumir 0.5 kg de uretano y 2.25 kg de freón y el ingreso será \$10.⁰⁰ menor.

Para producir una unidad de aglomerado se necesitan 2 g de catalizador, que equivalen a 0.5 unidades de esponja. La utilidad se reduce a \$15.⁰⁰ debido a la disminución en el ingreso descrita anteriormente, el consumo de uretano será de 4 kg y el de freón de 1.5 kg, ya que al dejar de producir esponja se liberan 1 y 4.5 kg de uretano y freón, respectivamente.

Para la producción de una unidad de bloque la utilidad se reduce a \$26.⁰⁰, el consumo de uretano a 7.5 kg, el freón a 1.75 kg y se deberán dejar de producir 0.25 unidades de esponja.

Al descontar los materiales consumidos tendremos 50 toneladas de uretano y 14.5 toneladas de freón en el almacén.

La tabla con estos nuevos datos, cambiando el balance de catalizador por un balance de esponja, será:



Precios de Transferencia en una Refinería

	Producción			Inventarios			Total
	Aglomerado	Bloque	Esponja	Uretano	Freón	Catalizador	
\$	15	26				-10	-460
Uretano	4	7.5		1		-0.5	50
Freón	1.5	1.75			1	-2.25	14.5
Esponja	0.5	0.25	1			0.25	11.5

Nótese que esta nueva tabla de datos es el resultado de *pivotear* sobre el elemento seleccionado dentro del círculo en la tabla original, aplicando eliminación *gaussiana*. En este paso se dice que se introduce la producción de esponja a la base y el inventario de catalizador sale de la base.

Ahora nos convendrá vender bloque, ya que la utilidad es mayor que en el caso del aglomerado. Aplicando el mismo razonamiento que en la iteración anterior obtendremos:

	Producción			Inventarios			Total
	Aglomerado	Bloque	Esponja	Uretano	Freón	Catalizador	
\$	1.133			-3.47		-8.27	-633
Bloque	0.533	1		0.133		-0.07	6.667
Freón	0.567			-0.23	1	-2.13	2.833
Esponja	0.567		1	-0.03		0.267	9.833

De esta tabla podemos ver que la producción de aglomerado aún genera utilidad, de modo que al introducirlo a la base y sacar al freón obtendremos:

	Producción			Inventarios			Total
	Aglomerado	Bloque	Esponja	Uretano	Freón	Catalizador	
\$				-3	-2	-4	-639
Bloque		1		0.353	-0.94	1.941	4
Aglomerado	1			-0.41	1.765	-3.76	5
Esponja			1	0.118	-0.65	1.647	8



Hemos llegado a un punto en el cual ninguna de las variables del sistema genera utilidad al ser introducida a la base, de tal modo que la solución es óptima, la producción debe ser de 5000 unidades de aglomerado, 4000 unidades de bloque y 8000 unidades de esponja; la utilidad será de \$639,000.⁰⁰.

Existen problemas de optimización en los cuales no es posible aplicar un modelo lineal. Su solución requerirá de aplicar métodos específicos de acuerdo al tipo de ecuaciones que se generen.

A.5. Dualidad y sensibilidad

La actividad de cada una de las variables independientes, la evaluación del sistema y la función objetivo en el punto óptimo pueden no satisfacer las expectativas del problema. A veces es necesario un análisis de sensibilidad, al cambiar alguna de las restricciones.

Volviendo al ejemplo de la refinería, podemos plantear un proyecto que incremente la capacidad de la planta, o bien la exportación de gasolina a un mercado foráneo descontando los costos de logística.

Si volvemos a resolver todo el sistema encontraremos las respuestas a estas interrogantes, sin embargo resultaría en una gran cantidad de trabajo.

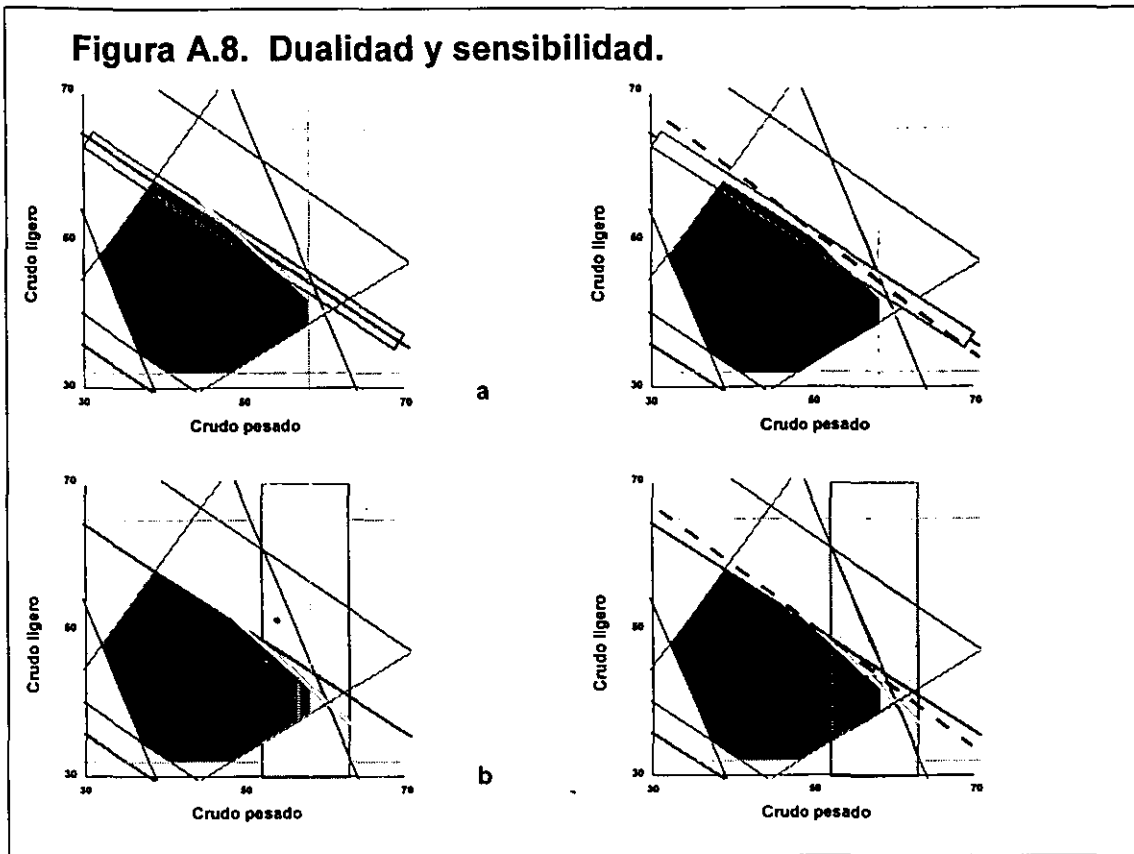
En la figura A.8.a. se muestra el efecto que tiene modificar el límite superior de la demanda de gasolina. Obsérvese que tanto la región factible como la función objetivo cambian, ya que esta restricción está en el límite. A la razón de cambio entre la función objetivo y la restricción de gasolina se le conoce como *valor marginal* o *precio sombra*.

En la figura A.8.b. se cambia la disponibilidad máxima de crudo pesado. La región factible se modifica, pero el punto óptimo permanece igual, ya que la restricción está sobrada. A la cantidad que puede cambiar el máximo disponible de crudo pesado hasta desplazar al punto óptimo se le conoce como *holgura*.

Utilizando la misma información del problema original, *primal*, se puede plantear un nuevo problema, el cual es conocido como *dual*.



Figura A.8. Dualidad y sensibilidad.



EJEMPLO A.4. Problema dual: Recordemos el problema del fabricante de poliuretano. Ahora se deben encontrar los precios a los cuales el fabricante estaría dispuesto a pagar los insumos, de tal manera que no se rebase el precio de venta de cada uno de los productos, y el valor total de los inventarios sea máximo.

SOLUCIÓN. Aplicando el método simplex tendremos la siguiente secuencia de tableaux:

	Inventarios			Producción			\$
	Uretano	Freón	Catalizador	Aglomerado	Bloque	Esponja	
Volumen	73	118	46				
Aglomerado	5	6	2	1			35
Bloque	8	4	1		1		36
Esponja	2	9	4			1	40



Precios de Transferencia en una Refinería

	Inventarios			Producción			\$
	Uretano	Freón	Catalizador	Aglomerado	Bloque	Esponja	
Volumen	46.78		-6.44			-13.1	-524
Aglomerado	3.667		-0.67	1		-0.67	8.333
Bloque	7.111		-0.78		1	-0.44	18.22
Freón	0.222	1	0.444			0.111	4.444

	Inventarios			Producción			\$
	Uretano	Freón	Catalizador	Aglomerado	Bloque	Esponja	
Volumen			2.061	-12.8		-4.61	-631
Uretano	1		-0.18	0.273		-0.18	2.273
Bloque			0.515	-1.94	1	0.848	2.061
Freón		1	0.485	-0.06		0.152	3.939

	Inventarios			Producción			\$
	Uretano	Freón	Catalizador	Aglomerado	Bloque	Esponja	
Volumen				-5	-4	-8	639
Uretano	1			-0.41	0.353	0.118	3
Catalizador			1	-3.76	1.941	1.647	4
Freón		1		1.765	-0.94	-0.65	2

Si observamos los tableaux inicial y final, y los comparamos contra los correspondientes del ejemplo 3, observamos que están compuestos de los mismos números, pero traspuestos. La solución de este segundo problema se puede observar directamente en el renglón de precios del problema original, denominado *primal*, y que corresponden a los precios sombra. De igual manera, en el renglón de volumen de este problema *dual* se ve la solución del problema *primal*.

Al utilizar el método simplex para resolver un problema lineal, el resultado incluye no sólo la actividad de cada una de las variables, sino la holgura y el valor marginal de cada



una de las restricciones, así como el precio sombra de las variables. Este conjunto de valores se conoce como solución *dual*.

La correcta interpretación de la solución dual nos permitirá realizar un análisis de sensibilidad rápido con respecto a un caso base, con lo cual obtendremos toda la información necesaria para la toma de decisiones.



Apéndice B. Modelo del mezclado de naftas

Aquí se presenta el modelo de mezclado de naftas que sirvió de ejemplo para describir la construcción de ecuaciones en PIMS. Como primer punto se incluyen las tablas que conforman el modelo y posteriormente los resultados que se obtienen durante el proceso iterativo y la solución final, tanto para el modelo original como en el caso en el que se ignora la distribución del error en la técnica de la recursión distributiva.

B.1. Tablas de PIMS

* TABLE BUY

* MATERIAL PURCHASES

*

	TEXT		MIN	MAX	COST	VOL	GROUP
*							
LN1	NAFTA LIGERA A		1.0	60.0	16.58	1.0	1.0
HN1	NAFTA PESADA A		1.0	40.0	8.34	1.0	1.0
LN2	NAFTA LIGERA B		1.0	55.0	19.87	1.0	1.0
HN2	NAFTA PESADA B		1.0	45.0	12.29	1.0	1.0

* TABLE SELL

* MATERIAL PURCHASES

*

	TEXT		MIN	MAX	PRICE	VOL	GROUP
*							
ULR	GASOLINA 75 RON		75.0	125.0	20.51	1.0	2.0
ULP	GASOLINA 85 RON		75.0	125.0	24.00	1.0	2.0



Precios de Transferencia en una Refinería

*TABLE GROUPS

*

TEXT

1 NAFTAS

2 GASOLINAS

*TABLE UTILBUY

*

TEXT

MIN

MAX

COST

NRG SERVICIOS [\$/BB

0

999

3

* TABLE UNITS UNITS OF

*

MEASURE

*

TEXT

SPG

API

VTW

*

LN1 0.6915

HN1 0.7470

LN2 0.6457

HN2 0.7487

* TABLE BLENDS

*

TEXT

SPEC

FORM

*

ULR GASOLINA 75 RON 1.00

ULP GASOLINA 85 RON 1.00



Precios de Transferencia en una Refinería

* TABLE BLNMIX

* MATERIAL PURCHASES

*

	TEXT	ULR	ULP
REF	REFORMADO	1.00	1.00
LNN	POOL NAFTAS LIGERAS	1.00	1.00
HNN	POOL NAFTAS PESADAS	1.00	1.00

*TABLE BLNNAPH

*

	TEXT	RON
LN1	NAFTA LIGERA A	64.0163
HN1	NAFTA PESADA A	41.1116
LN2	NAFTA LIGERA B	73.2000
HN2	NAFTA PESADA B	52.3800

*TABLE BLNSPEC

*

	TEXT	ULR	ULP
NRON	MINIMO RON	75	85
PSPG	GRAVEDAD ESPECIFGICA	1	1

*TABLE SUBMODS

*

	TEXT
SLNN	POOL NAFTAS LIGERAS
SHNN	POOL NAFTAS PESADAS
SREF	POOL REFORMADORA
SREF	REFORMADORA



*TABLE CAPS
* PLANT CAPACITIES
*
TEXT MIN MAX
CREF REFORMADORA 0 100

*TABLE SHNN
* POOL NAFTAS PESADAS
*
TEXT HN1 HN2 HNN *
VBALHN1 NAFTA PESADA A 1
VBALHN2 NAFTA PESADA B 1
VBALHNN POOL NAFTAS PESADAS -1 -1
*
RBALHNN RECURSION -1 -1 1
RRONHNN RECURSION DE RON -999 -999 999
RSPGHNN RECURSION DE SPG -999 -999 999

*TABLE SLNN
* POOL NAFTAS LIGERAS
*
TEXT LN1 LN2 LNN *
VBALLN1 NAFTA LIGERA A 1
VBALLN2 NAFTA LIGERA B 1
VBALLNN POOL NAFTAS LIGERAS -1 -1
*
RBALLNN RECURSION -1 -1 1
RRONLNN RECURSION DE RON -999 -999 999
RSPGLNN RECURSION DE SPG -999 -999 999



Precios de Transferencia en una Refinería

*TABLE SRFP

* POOL DE REFORMADORA

*

	TEXT	LNN	HNN	RFP *
VBALLNN	POOL NAFTAS LIGERAS	1		
VBALHNN	POOL NAFTAS PESADAS		1	
VBALRFP	POOL DE REFORMADORA	-1	-1	
*				
RBALRFP	RECURSION	-1	-1	1
RRONRFP	RECURSION DE RON	-999	-999	999
RSPGRFP	RECURSION DE SPG	-999	-999	999
*				
PSPGAV44	SPG ENTRADA REF.			999
PRONAV22	RON ENTRADA REF.			999
UBALNRG	SERVICIOS [\$/TON]		0.5	

*TABLE SREF

* REFORMADORA

*

	TEXT	RFP	REF	BAS
VBALRFP	POOL DE REFORMADORA	1		
VBALREF	REFORMADO	-1		
*				
CCAPREF	CAPACIDAD [MBD]		1	
*				
UBALNRG	SERVICIOS [\$/TON]			1
*				
RBALREF	RECURSION	-1	1	
RSPGREF	RECURSION DE RON	-999	999	
RRONREF	RECURSION DE SPG	-999	999	-10
*				
LMAXOCT	MAXIMO INCREMENTO	-1		0.4



* TABLE PDIST FOR MODEL NAFTAS
* IMPORTED FROM SOLUTION AT 02/02/95 12:12:01
*
*

	LNN	HNN	RFP	REF
ULR	0.1500	0.3000		0.6000
ULP	0.2500	0.2000		0.4000
RFP	0.6<	0.5<		
REF			1	

* TABLE PGUESS FOR MODEL NAFTAS
* IMPORTED FROM SOLUTION AT 02/01/95 18:12:49
*
*

	RON	SPG
LNN	64	0.6
HNN	41	0.8
RFP	65	0.65
REF	90	0.65

*TABLE SCALE
*
SCALE
RON 0.01

B.2. Solución numérica

Se construyó la matriz, en una hoja de Excel, según la nomenclatura descrita en el capítulo 5 y se obtuvieron los resultados del proceso iterativo hasta lograr el nivel de convergencia deseado. A continuación se presenta la matriz original y su evolución hasta el resultado final, el cual coincide con la solución de PIMS.

	RESTR.	PURCLN1	PURCHN1	PURCLN2	PURCHN2	SELLUR	SELLUP	BVBLUR	BVBLUP	BREFUR	BLNNUR	BHNNUR	BREFUP	BLNNUP	BHNNUP	SLNNLN1	SLNNLN2	SLNNLN	SHNNH1	SHNNH2	SHNNHN	SREPLN	SREPHN	SREPRP	SREFSUS	SREFRP	SREFEF	RRONLN	RRONHN	RRONRP	RRONRF	RSPGLN	RSPGHN	RSPGRF	RSPGRP	RSPGREF			
XI	RESTR.	46.34 < 80	3.66 < 40	55.00 < 55	45.00 < 45	75.00 < 125	75.00 < 125	75.00 > 75	75.00 > 75	25.70 > 0	49.30 > 0	0.00 > 0	74.30 > 0	0.70 > 0	0.00 > 0	46.34 > 0	55.00 > 0	-101.34 > 0	3.66 > 0	45.00 > 0	48.66 > 0	51.34 > 0	48.66 > 0	100.00 > 0	250.00 > 0	100.00 > 0	100.00 > 0	0.00 < 7.534	2.09 < 7.534	2.09 < 7.534	2.09 < 7.534	0.00 < 7.534	-1.88 < 7.534	-1.88 < 7.534					
OBJFN	66.54	-16.0	-8.3	-19.9	-12.3	-3.0	20.6	24.0																															
CCAPREF	100.00 < 100																								1.00														
EVBLUP	0.00 = 0								1.00				-1.00	-1.00	-1.00																								
EVBLUR	0.00 = 0							1.00		-1.00	-1.00	-1.00																											
EWBLUP	0.00 = 0												-0.12	-0.11	-0.12																								
EWBLUR	0.00 = 0							1.00		-0.12	-0.11	-0.12																											
LMAXOCT	0.00 < 0																							0.40	-1.00														
NRONULP	0.00 < 0							0.85					-0.83	-0.69	-0.52																								
NRONULR	0.00 < 0						0.75			-0.83	-0.69	-0.52																											
RBALHNN	0.00 = 0																		-1.00	-1.00	1.00																		
RBALLNN	0.00 = 0															-1.00	-1.00	1.00																					
RBALREF	0.00 = 0																									-1.00	1.00												
RBALRFP	0.00 = 0																																						
RRONHNN	0.00 = 0																		-0.41	-0.52	0.52																		
RRONLNN	0.00 = 0															-0.84	-0.73	0.69																					
RRONREF	0.00 = 0																																						
RRONRFP	0.00 = 0																																						
RSPGHNN	0.00 = 0																		-0.75	-0.75	0.75																		
RSPGLNN	0.00 = 0															-0.69	-0.65	0.67																					
RSPGREF	0.00 = 0																																						
RSPGRFP	0.00 = 0																																						
UBALNRG	0.00 = 0																																						
VBALHN1	0.00 = 0		-1.00																																				
VBALHN2	0.00 = 0				-1.00																																		
VBALHNN	0.00 = 0				0.00	0.00						1.00		1.00					-1.00	-1.00																			
VBALLN1	0.00 = 0	-1.00			0.00	0.00										1.00																							
VBALLN2	0.00 = 0				-1.00	0.00	0.00											1.00																					
VBALLNN	0.00 = 0				0.00	0.00					1.00		1.00			-1.00	-1.00																						
VBALRFP	0.00 = 0				0.00	0.00																																	
VBALULP	0.00 = 0				0.00	0.00	1.00		1.00																														
VBALULR	0.00 = 0				0.00	0.00	1.00	0.00	-1.00																														

999.9 = Coeficientes con recursión

	L.O.	RESTR	PURCLN1	PURCHN1	PURCLN2	PURCHN2	PURONRG	SELLUR	SELLUP	EBLULR	EBLULP	BWBLULR	BWBLUP	BREFULR	BREFULP	BUNNULR	BUNNULP	BHNNULR	BHNNULP	SINLNLN1	SINLNLN2	SINLNLN	SHNHNN1	SHNHNN2	SHNHNN	SFPPLN	SFPPLN	SFPFRFP	SFPFRFP	SREFSUS	SREFRFP	SREFRFP	RRONLNN	RRONHNN	RRONRFP	RSPGLNN	RSPGHNN	RSPGRFP	RSPGRFP						
Xi		RESTR	46.34 < 60	3.66 < 40	55.00 < 55	45.00 < 45	275.7 > 0	75.00 < 125	75.00 < 125	75.00 > 75	8.12 > 0	75.00 > 75	8.41 > 0	27.27 > 0	72.73 > 0	47.73 > 0	0.00 > 0	0.00 > 0	0.00 > 0	46.34 > 0	55.00 > 0	101.34 > 0	3.66 > 0	45.00 > 0	48.66 > 0	51.34 > 0	100.00 > 0	250.00 > 0	100.00 > 0	100.00 > 0	0.00 < 2E-11	0.00 < 2E-11	0.00 < 2E-11	0.00 < 2E-11	0.00 < 2E-11	0.00 < 2E-11	0.00 < 2E-11	0.00 < 2E-11	0.00 < 2E-11						
OBJFN	66.54		-10.0	-8.3	-19.9	-12.3	-3.0	20.5	24.0																																				
CCAPREF	100.00 < 100																																												
EBLULP	0.00 = 0										1.00																																		
EBLULR	0.00 = 0									1.00																																			
EWBLULP	0.00 = 0																																												
EWBLULR	0.00 = 0																																												
LMAXOCT	0.00 < 0																																												
NRONULP	0.00 < 0										0.85																																		
NRONULR	0.00 < 0									0.75																																			
RBALHNN	0.00 = 0																																												
RBALLNN	0.00 = 0																																												
RBALREF	0.00 = 0																																												
RBALRFP	0.00 = 0																																												
RRONHNN	0.00 = 0																																												
RRONLNN	0.00 = 0																																												
RRONREF	0.00 = 0																																												
RRONRFP	0.00 = 0																																												
RSPGHNN	0.00 = 0																																												
RSPGLNN	0.00 = 0																																												
RSPGREF	0.00 = 0																																												
RSPGRFP	0.00 = 0																																												
UBALNRG	0.00 = 0																																												
VBALHN1	0.00 = 0																																												
VBALHN2	0.00 = 0																																												
VBALHNN	0.00 = 0																																												
VBALLN1	0.00 = 0																																												
VBALLN2	0.00 = 0																																												
VBALLNN	0.00 = 0																																												
VBALREF	0.00 = 0																																												
VBALRFP	0.00 = 0																																												
VBALULP	0.00 = 0																																												
VBALULR	0.00 = 0																																												

999.9 = Coeficientes con recursión



B.3. Matriz truncando distribuciones

Se repitió el ejercicio anterior, pero esta vez truncando la distribución del error. La estabilidad matemática del modelo se pierde, inclusive al partir del punto óptimo como estimado inicial. Con ésto se demuestra la importancia de verificar que la estructura necesaria para la recursión distributiva de PIMS sea correcta. La matriz original (óptimo) y su evolución se presentan a continuación.

