



“Estructuras genéricas para regiones productoras y consumidoras de petróleo”

Autor: Br. Luis A. Labrador G.
Tutor: Vicente Ramírez N.

Proyecto de Grado presentado ante la ilustre Universidad de Los Andes como requisito final para optar al título de Ingeniero de Sistemas.

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE SISTEMAS

(Noviembre, 2005)

Resumen

En este proyecto se presenta el diseño, la elaboración y análisis de un modelo de simulación de dinámica de sistemas para representar estructuras genéricas para regiones productoras y consumidoras de petróleo. Adicionalmente, se discuten los aspectos generales de la dinámica de sistemas y se describe la dinámica del mercado petrolero mundial. Luego se muestra la conceptualización y formalización del modelo propuesto por medio de diagramas causales y de flujo, mostrándose además las ecuaciones matemáticas del modelo. También se muestran las corridas del modelo de simulación base y algunos escenarios de prueba, con las respectivas trayectorias generadas por el programa de simulación Vensim. El producto principal de este proyecto es un modelo de simulación de dinámica de sistemas que da una descripción de la estructura y comportamiento de la producción, consumo y los inventarios, probada para algunas regiones seleccionadas.

www.bdigital.ula.ve

Tabla de contenido

Capítulo 1 Introducción

1.1 Antecedentes y motivación.....	1
1.2 El problema.....	2
1.3 Objetivo general.....	2
1.3.1 Objetivos específicos.....	2
1.4 Metodología.....	3
1.5 Organización del documento.....	3

Capítulo 2 Aspectos generales de la dinámica de sistemas

2.1 Introducción.....	5
2.2 Dinámica de sistemas.....	5
2.3 Estructura y comportamiento de los modelos de dinámica de sistemas.....	7
2.3.1 Relación causa efecto y los lazos de realimentación.....	8
2.3.2 Diagramas de ciclo causal.....	12
2.3.3 Diagrama de flujo.....	13
2.4 Modelado mediante dinámica de sistemas.....	15
2.4.1 Conceptualización.....	15
2.4.2 Formulación.....	16
2.4.3 Análisis y evaluación.....	16
2.5 Estructuras genéricas.....	17
2.6 Conclusiones.....	17

Capítulo 3 Descripción del mercado petrolero mundial

3.1	Introducción.....	18
3.2	El petróleo.....	18
3.3	Factores que integran el mercado.....	20
3.4	La oferta petrolera.....	21
3.4.1	Las reservas de petróleo.....	24
3.4.2	Costos de producción.....	26
3.4.3	Factores tecnológicos.....	27
3.4.4	Demanda y precios.....	28
3.4.5	Capacidad de producción.....	28
3.5	La demanda petrolera.....	29
3.5.1	Crecimiento económico.....	30
3.5.2	Oferta y precios.....	30
3.5.3	Competencia con otras fuentes de consumo.....	31
3.5.4	Demandas estacionales.....	31
3.5.5	Incertidumbre, shocks políticos y ambientales.....	32
3.6	Precios del petróleo.....	32
3.7	Conclusiones.....	35

Capítulo 4 El modelo: conceptualización y formulación

4.1	Introducción.....	36
4.2	Conceptualización.....	36
4.2.1	Diagrama causal.....	38
4.2.2	Horizonte temporal.....	40
4.3	Formulación.....	40
4.3.1	Diagrama de flujo.....	40
4.4	Conclusiones.....	61

Capítulo 5 Análisis y evaluación de resultados

5.1 Introducción.....	62
5.2 Análisis de resultados del mercado petrolero mundial.....	62
5.2.1 Países consumidores.....	63
5.2.2 Países productores.....	69
5.2.3 Oferta mundial.....	79
5.2.4 Demanda mundial.....	80
5.3 Escenarios de prueba.....	81
5.4 Conclusiones.....	101

Capítulo 6 Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones.....	103
6.2 Recomendaciones.....	105

www.bdigital.ula.ve

Tabla de Figuras

Figura 2.1 Lazo de realimentación positivo y negativo.....	9
Figura 2.2 Estructuras dinámicas y su comportamiento.....	11
Figura 2.3 Diagrama ciclo causal del mercado petrolero.....	13
Figura 3.1 Factores que integran el mercado petrolero.....	20
Figura 3.2 Oferta mundial.....	23
Figura 3.3 Reservas probadas mundiales.....	25
Figura 3.4 Demanda mundial.....	29
Figura 4.1 Algunos componentes de la producción petrolera.....	37
Figura 4.2 Diagrama causal del modelo.....	39
Figura 4.3 Diagrama de flujo.....	41
Figura 4.4 Diagrama de flujo de países consumidores.....	43
Figura 4.5 Reservas probadas (América del norte).....	44
Figura 4.6 Producción esperada (América del norte).....	46
Figura 4.7 Producción esperada.....	46
Figura 4.8 Consumo de referencia.....	49
Figura 4.9 Producción esperada para reservas estratégicas AN.....	52
Figura 4.10 Producción esperada para reservas estratégicas AN.....	52
Figura 4.11 Diagrama de flujo de países productores.....	56
Figura 4.12 Capacidad de producción esperada (NO OECD).....	57
Figura 4.13 Capacidad de producción esperada.....	57
Figura 4.14 Exportaciones de la NO OECD.....	59
Figura 4.15 Oferta mundial.....	59
Figura 4.16 Demanda mundial.....	60
Figura 5.1 Diagrama de flujo de regiones consumidoras.....	64
Figura 5.2 Dinámica de reservas probadas de América del norte.....	64
Figura 5.3 Relación entre reservas y producción.....	65
Figura 5.4 Inventarios de América del norte.....	66
Figura 5.5 Comparación de consumo.....	67

Figura 5.6 Consumo Insatisfecho de América del norte.....	68
Figura 5.7 Relación entre el nivel de reservas estratégicas y su consumo.....	68
Figura 5.8 Comparación de las regiones consumidoras.....	68
Figura 5.9 Diagrama de flujo de regiones productoras.....	71
Figura 5.10 Reservas probadas de NO OECD.....	72
Figura 5.11 Relación entre reservas probadas y producción.....	73
Figura 5.12 Diferencia entre capacidad de producción y producción.....	74
Figura 5.13 Excedente en producción NO OECD.....	75
Figura 5.14 Exportaciones de la región NO OECD.....	76
Figura 5.15 Diferencia entre producción y consumo.....	76
Figura 5.16 Semejanza entre consumo simulado y consumo de referencia.....	77
Figura 5.17 Comparación de ofertas en regiones productoras.....	78
Figura 5.18 Consumo de las regiones productoras.....	78
Figura 5.19 Diagrama de flujo de oferta mundial.....	79
Figura 5.20 Oferta mundial.....	80
Figura 5.21 Diagrama de flujo de demanda mundial.....	80
Figura 5.22 Demanda mundial.....	81
Figura 5.23 Inventarios América del norte.....	82
Figura 5.24 Cambios en el consumo.....	83
Figura 5.25 Cambios en el consumo total.....	83
Figura 5.26 Consumo Insatisfecho.....	84
Figura 5.27 Reservas estratégicas.....	85
Figura 5.28 Reservas probadas.....	86
Figura 5.29 Producción OECD.....	86
Figura 5.30 Diagrama de flujo de exportaciones mundiales.....	87
Figura 5.31 Reservas probadas OECD.....	88
Figura 5.32 Producción OECD.....	89
Figura 5.33 Consumo OECD.....	89
Figura 5.34 Consumo Insatisfecho OECD.....	90
Figura 5.35 Consumo de referencia OECD.....	91
Figura 5.36 Consumo Insatisfecho OECD.....	91

Figura 5.37 Consumo de reservas estratégicas OECD.....	92
Figura 5.38 Reservas estratégicas OECD.....	92
Figura 5.39 Consumo insatisfecho OECD.....	93
Figura 5.40 Consumo de reservas estratégicas.....	94
Figura 5.41 Reservas estratégicas OECD.....	95
Figura 5.42 Consumo de referencia de NO OECD.....	96
Figura 5.43 Capacidad de producción y producción NO OECD.....	96
Figura 5.44 Inventarios NO OECD.....	97
Figura 5.45 Reservas probadas NO OECD.....	98
Figura 5.46 Capacidad de producción NO OECD.....	99
Figura 5.47 Producción FSU.....	99
Figura 5.48 Exportación FSU.....	100
Figura 5.49 Producción FSU.....	101

www.bdigital.ula.ve

Capítulo 1

Introducción

1.1 Antecedentes y motivación

La humanidad ha hecho del “petróleo un bien esencial, la base del aparataje industrial moderno y tiene una múltiple utilización que le confiere el carácter de base energética fundamental de la sociedad moderna” [Zanoni 2002].

Es por ello que surge la necesidad de estudiar y entender la dinámica del mercado petrolero mundial, prestando mayor atención a las estructuras de producción y consumo, para conocer su funcionamiento, a través del conocimiento de los factores relevantes de dicho mercado y la interacción que existe entre ellos.

En la literatura existen modelos estáticos que son utilizados para estimar requerimientos energéticos que sirven de apoyo a la toma de decisiones en el sector petrolero [WEPS 2002]. Sin embargo, estos modelos no expresan o representan la estructura y la dinámica del mercado petrolero, que sirva como marco de referencia para evaluar posibles escenarios. Se hace entonces relevante el estudio de dicho sistema, su estructura y su dinámica, desde un punto de vista sistémico.

Existe un proyecto realizado en la Universidad de Los Andes, realizado por Bastidas (2003) en el que se propone un modelo del mercado petrolero mundial, el cual sirvió como punto de partida a este proyecto.

1.2 El problema

Con este proyecto se ha pretendido representar una parte del mercado petrolero mundial, por medio de estructuras genéricas para regiones de producción y consumo. En tal sentido, se han estudiado los esquemas de producción y comercialización petrolera, dichos esquemas se han generalizado y simplificado para obtener un modelo que sintetice los elementos fundamentales que lo caracterizan.

Luego, a partir de este esquema simplificado y genérico de producción, ajustado por parámetros para diferentes regiones, hemos estudiado los elementos relevantes a nivel macroeconómico del mercado mundial petrolero haciendo particularmente énfasis en la dinámica generada por la interacción de la producción y el consumo.

El problema de representar la dinámica del mercado mundial del petróleo es complejo y no se ha indagado en todos los detalles involucrados. Se ha querido, más bien, partiendo del modelo propuesto por Bastidas (2003), producir un prototipo macroeconómico que represente la estructura y la dinámica de la producción y el consumo de diferentes regiones, de manera sencilla y, en la medida de lo posible, con los elementos económicos fundamentales que lo definen, que permita evaluar hipotéticos escenarios.

1.3 Objetivo general

El objetivo de este proyecto es diseñar, elaborar y analizar un modelo de simulación de dinámica de sistemas para representar estructuras genéricas de producción y consumo petrolero aplicadas a distintas regiones mundiales.

1.3.1 Objetivos específicos

- a) Mejorar el modelo propuesto por Bastidas (2003), revisando el nivel de especificaciones de las variables relacionadas y las causas efecto entre éstas.
- b) Estudiar la estructura y el comportamiento de la producción petrolera a través del diseño y análisis de un modelo de dinámica de sistemas.

- c) Diseñar un modelo que permita conocer y entender de manera sencilla el comportamiento e interacción de la oferta y demanda petrolera.
- d) Sentar las bases para un modelo más amplio sobre el mercado petrolero.

1.4 Metodología

El proyecto fue desarrollado usando para ello la metodología de la Dinámica de Sistemas [Forrester 1968]. El modelo de simulación fue programado/implementado utilizando la herramienta computacional VensimPLE 5.5a [Vensim 2005].

La herramienta computacional Vensim es un programa, desarrollado por Ventana Systems Inc., para iniciarse en el modelado y simulación utilizando los conceptos y el lenguaje de la Dinámica de Sistemas. También permite construir modelos a través de diagramas causales o en versión texto, y en cualquiera de las dos modalidades permite comparar fácilmente los resultados de distintos experimentos, superponer gráficos de distintas variables, cambiar escalas, periodos de estudio, etc. [Martínez, S., 2005]

1.5 Organización del documento

El Capítulo 2 presenta el marco conceptual que describe la dinámica de sistemas. En él se explican los conceptos más importantes que definen esta metodología y las fases seguidas para la construcción de modelos usando dinámica de sistemas.

En el Capítulo 3 se realiza, en síntesis, el estudio de los diversos factores que integran el mercado petrolero y el análisis de sus principales características.

En el Capítulo 4 se desarrollan las dos primeras fases del proceso de modelado: conceptualización y formulación. En éste se explica con detalle la estructura del sistema. En este capítulo se presentan las estructuras genéricas de producción y consumo petrolero propuestos con este proyecto, programado/implementado en el software de simulación para modelos de dinámica de sistemas VensimPLE [Vensim 2005].

En el Capítulo 5 se lleva a cabo la última fase del proceso de modelado: análisis y evaluación. Aquí se procede a la simulación del modelo para analizar su funcionamiento y validar su comportamiento de acuerdo al sistema real. Así mismo, se incluye el análisis de sensibilidad y se evalúan distintas políticas alternativas, expresadas fundamentalmente en la planeación de posibles escenarios.

El Capítulo 6 presenta las conclusiones del proyecto y se describen algunas recomendaciones para la mejora del modelo implementado.

www.bdigital.ula.ve

Capítulo 2

Aspectos generales de la dinámica de sistemas

2.1 Introducción

En este capítulo se hace una breve explicación del origen, fundamentos y principales características de la metodología de modelado utilizada: la dinámica de sistemas. El propósito del capítulo es proporcionar el marco metodológico sobre el cual se sustenta el estudio del problema que nos concierne: *estructuras genéricas para regiones productoras y consumidoras de petróleo*.

2.2 Dinámica de sistemas

La dinámica de sistemas es una metodología para la construcción de modelos de sistemas sociales susceptibles de ser simulados por ordenador. El origen de esta técnica se remonta a finales de los años cincuenta y su implantación definitiva se produce durante la década de los sesenta. El desarrollo de esta metodología se debe al trabajo de J. W. Forrester del Instituto Tecnológico de Massachussets, quién por primera vez utilizó técnicas pertenecientes a las disciplinas de ingeniería automática para el estudio de procesos sociales y económicos [Torrealba 2000].

Según Juan Martín García:

La dinámica de sistemas se entiende, en el sentido de Forrester (1968) como una metodología para entender el cambio, utilizando las ecuaciones en diferencias finitas o ecuaciones diferenciales. Dada la representación de los procesos se pueden estudiar la dinámica del conjunto de los estados disponibles por el sistema que es el tema central de la modelación [García 2003, p. 14].

La dinámica de sistemas surgió de la búsqueda de una mejor comprensión de la administración. Su aplicación se ha extendido ahora al cambio medio ambiental, la política, la conducta económica, la medicina y la ingeniería, así como a otros campos [Introducción a la Dinámica de Sistemas, 2002].

El objetivo básico de esta metodología es llegar a comprender las causas estructurales que provocan el comportamiento del sistema que se estudia. Los problemas que se confrontan desde esta perspectiva tienen al menos dos características en común:

1. Son dinámicos: involucran variables cuantitativas que cambian con el tiempo y pueden expresarse en términos de gráficas.
2. Se involucra el concepto de retroalimentación, que es la transmisión y regreso de información.

En los ámbitos en los que se construyen modelos mediante la Dinámica de Sistemas no suele haber leyes de comportamiento perfectamente establecidas. Los sistemas objeto de su estudio no están descritos por leyes matemáticas de carácter cuantitativo preciso y aceptadas unánimemente por la comunidad científica. En estos sistemas sí que hay expertos que conocen bien aquello con lo que trabajan, pero no siempre hay unanimidad de criterio entre los propios expertos.

No obstante, para que un sistema sea estudiado a través de la metodología de Dinámica de Sistemas, se requiere que, aun cuando no se conozcan leyes precisas que lo describan, los elementos que integran el sistema objeto de estudio posea atributos cuantificables y puedan llegar a ser establecidas relaciones funcionales de naturaleza cuantitativa entre dichos atributos. Así, con esta técnica, se han realizado aportes de interés en terrenos tan diversos como biología, economía, gestión empresarial, urbanismo, psicología y muchos otros [Torrealba 2000].

2.3 Estructura y comportamiento de los modelos de dinámica de sistemas

Un modelo es una representación de un sistema que permite dar cuenta de su estructura y de su comportamiento. Un sistema puede ser representado por una gran cantidad de modelos, lo que diferencia unos modelos de otros es el modo como son desarrollados y su utilidad. La dinámica de sistemas es una manera de expresar modelos [Bastidas 2003].

Los modelos que se emplean con la dinámica de sistemas ofrecen un soporte para tomar decisiones en base a los resultados obtenidos, y también por el análisis de los efectos observados de las acciones propuestas. En concreto los modelos nos permiten:

- *Facilitar la comprensión de una situación compleja:* Los modelos permiten realizar una síntesis de los aspectos esenciales de un problema. La estructura de los sistemas provoca el comportamiento que observamos, pero esta estructura no es visible con facilidad. Los modelos de dinámica de sistemas nos permiten un mejor análisis de la estructura real y su comportamiento.
- *Identificar los elementos más sensibles:* Si nuestro propósito es modificar el comportamiento del sistema, la identificación de los elementos más sensibles nos permitiría modificar su estructura y eventualmente su comportamiento, de una forma muy eficiente.
- *Analizar múltiples alternativas:* Los modelos permiten comparar el efecto de las acciones previstas de una forma clara, y también permiten comparar los resultados que tendrán diferentes acciones alternativas, en sus diferentes horizontes o plazos.
- *Proponer con claridad las acciones a tomar:* Los modelos permiten exponer con claridad las diferentes propuestas analizadas, y los motivos que permiten sugerir una en relación a las otras [Cátedra UNESCO 2003].

Un sistema puede ser modelado en términos de dinámica de sistemas si las variables de interés varían a lo largo del tiempo, las fuerzas que producen esta variabilidad pueden describirse causalmente y si las influencias causales pueden ser contenidas en un sistema cerrado de lazos de realimentación [Roberts et al 1983].

2.3.1 Relación causa-efecto y los lazos causales de realimentación

Las relaciones causa-efecto tiene que ver con las influencias de una variable sobre otra, es decir, como aumenta o disminuye en función de que otra, de la cual depende, experimente algún tipo de variación. Una forma natural de representar elementos y relaciones es mediante un grafo orientado. A veces, cuando el sentido de la influencia es conocido, se suele incluir un signo más o un signo menos que hace alusión a una influencia del mismo sentido o de sentido opuesto según el caso.



A tiene influencia en B



Un incremento de A produce un incremento de B
o bien una disminución de de A provoca una
disminución de B.



Un incremento de A produce una disminución de B
o bien una disminución de A provoca un incremen-
to de B teniendo así una relación negativa.

El tipo de problemas en los que habitualmente se trabaja con la dinámica de sistemas se caracteriza porque en éstos siempre aparecen relaciones causales estructuradas en bucles cerrados: Este concepto de bucle o lazo de realimentación, es muy útil porque permite partir desde la estructura del sistema que se analiza hasta su comportamiento dinámico. Una acción ejecutada por o sobre un elemento del bucle se propaga por el mismo de manera que tarde o temprano esa acción repercute sobre sus propios valores futuros. Se distinguen dos tipos de lazos de realimentación, lazos positivos y negativos.

Los lazos positivos son aquellos bucles en los que una variación en un elemento se ve reforzada por las influencias mutuas entre los elementos. En estos bucles, todo movimiento es amplificado produciendo más movimiento en la misma dirección, es decir, partiendo de una situación buena se llega a una mejor o partiendo de una situación mala se llega a una peor, produciendo por tanto, inestabilidad en el sistema. Un lazo de realimentación es positivo si contiene un número par de relaciones negativas. La Figura 2.1a muestra un lazo de realimentación positivo.

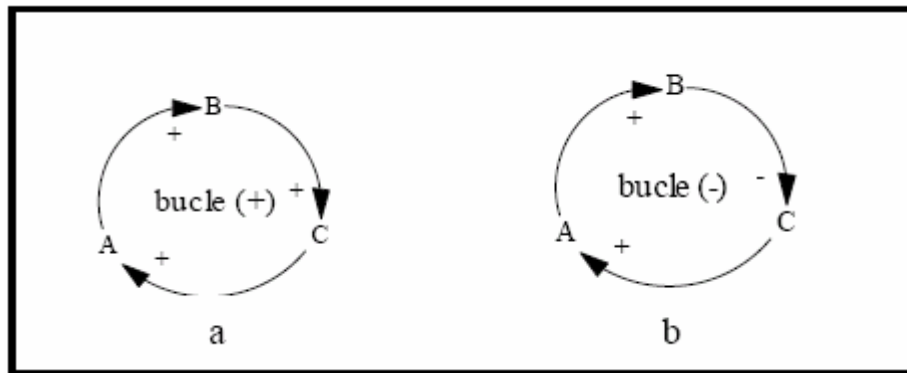


Figura 2.1 Lazo de realimentación positivo y negativo

En los lazos negativos una variación en cualquiera de sus elementos tiende a ser contrarrestada por las influencias en sentido contrario que se generan en el lazo, es decir, la discrepancia entre el estado y objetivo determina la acción que modifica el estado. Los bucles negativos actúan como elementos estabilizadores en los sistemas al dirigirlos a un objetivo determinado. Un bucle de realimentación negativa tiene la notable propiedad de que si, por una acción exterior se perturba alguno de sus elementos, el sistema, en virtud de su estructura, reacciona tendiendo a anular esa perturbación. La Figura 2.1b muestra un lazo de realimentación negativo. Un lazo de realimentación negativo contiene un número impar de relaciones negativas

Los sistemas dinámicos están formados por un conjunto de lazos de realimentación positivos y negativos que interactúan entre sí determinando el comportamiento global del sistema. La mayoría de las dinámicas observadas en los sistemas parten de tres modos fundamentales de comportamiento: crecimiento exponencial, objetivo-diferencia (*goal-seek*), y oscilaciones [Sterman 2000].

Estos modos de comportamiento son mostrados en la Figura 2.2. Un lazo de realimentación positiva genera el *crecimiento exponencial*. La realimentación positiva ocurre cuando un cambio que se propaga en el sistema produce más cambio en la misma dirección. El *goal-seeking* está determinado por un lazo de realimentación negativo y en su comportamiento está implícita la definición de un objetivo o meta. La acción correctiva sobre el estado del sistema¹ disminuye a medida que se alcanza el objetivo. La *oscilación* surge de un lazo de realimentación negativo con un significativo número de demoras (*delay*). La acción correctiva para alcanzar un equilibrio en el estado del sistema o para lograr cierto objetivo continua incluso después que el equilibrio ha sido alcanzado. Esto se debe a que las demoras tardan en identificar los efectos de las acciones sobre los sistemas.

La combinación entre las tres principales estructuras dinámicas da lugar a interacciones no-lineales las cuales generan otros patrones complejos de comportamiento [Sterman 2000]. El *crecimiento en S* se caracteriza por tener en su régimen transitorio dos fases, una de ellas en crecimiento exponencial y otra en decrecimiento asintótico. La realimentación positiva que genera el crecimiento exponencial se estrecha por la realimentación negativa, que conduce a la estabilización del crecimiento. El *crecimiento de S con sobredisparo (overshoot)* ocurre cuando después de una fase de crecimiento exponencial, un lazo negativo con retardos comienza a dominar. En este caso el sistema oscila alrededor del estado de equilibrio. *Sobredisparo y colapso* ocurren como resultado de que el mismo estado de equilibrio empieza a declinar después que la fase de crecimiento exponencial ha comenzado. En este caso el lazo negativo empuja al sistema a un nuevo estado de equilibrio.

¹ Ver apartado 2.3.3

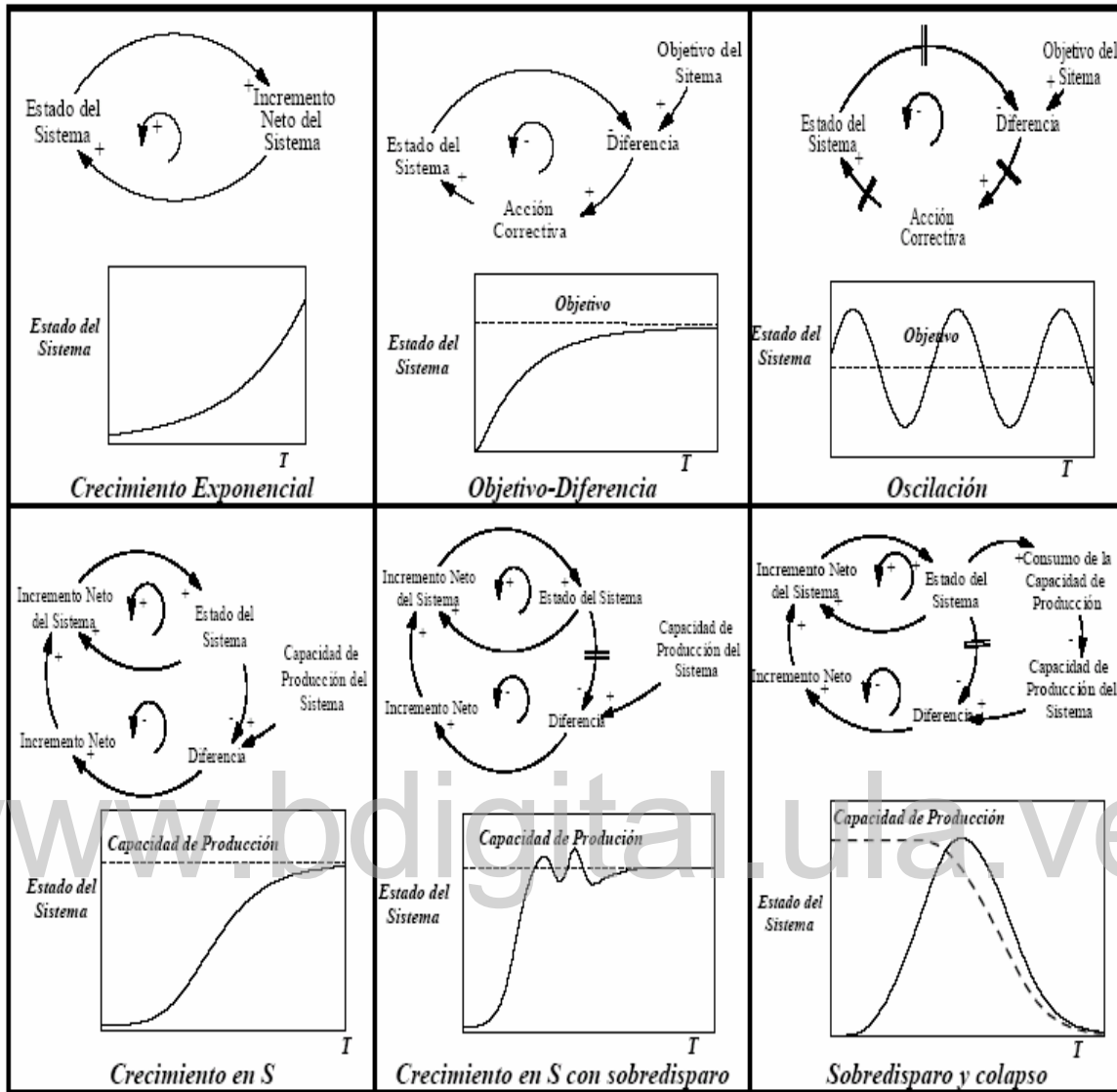


Figura 2.2 Estructuras dinámicas y su comportamiento [Sterman 2000]

Un aspecto importante que se debe considerar en el estudio de sistemas dinámicos es el retraso que se produce en la transmisión de información o de materiales a lo largo de estos. Un retraso es conocido también por retardo o demora. Para formarse una idea sobre la situación de cierto problema es necesario que trascorra cierto tiempo antes de tomar una decisión, y una vez tomada ésta, debe transcurrir algún tiempo hasta que se observen los efectos en la misma. Pueden nombrarse dos tipos de retrasos: *retrasos de materiales*, se producen cuando existen elementos en el sistema que almacenan el material que fluye por el mismo; Los *retrasos en*

transmisión de información, resultan de la necesidad de conservar y procesar información del sistema antes de tomar una decisión.

La introducción de retrasos en la dinámica de sistemas sólo esta justificada por la bondad de los resultados finales que, desde un punto de vista práctico se alcanzan con ellos. Para lograr una correcta utilización de los retrasos es necesario la utilización de ciertas reglas prácticas basadas en la experiencia.

Estas son:

- **Cuando incluir un retraso:** Se debe hacer siempre que el tiempo de ajuste esté comprendido entre 1/20 y 10 veces el horizonte temporal del modelo.
- **Selección del orden del sistema:** Se debe seleccionar de primer orden si el retraso responde inmediatamente a un cambio en el flujo de entrada. Por otro lado, si lo que se requiere es un cierto tiempo para que la salida responda, debe usarse un retraso de tercer orden. Se debe considerar que el orden de un retraso tiene normalmente poco efecto en el comportamiento del modelo. La variable más importante que caracteriza a un retraso es el tiempo de ajuste, el cual es el tiempo medio empleado en un retraso material [Introducción a la Dinámica de Sistemas, 2002].

2.3.2 Diagramas de ciclo causal

El conjunto de las relaciones entre los elementos de un sistema recibe la denominación de estructura del sistema y se representa mediante el diagrama de influencias o causal, en el cual se recogen los elementos claves del sistema. Este tipo de diagramas nos muestran los signos de las relaciones causales entre las distintas variables que aparecen en el modelo y si existen lazos de realimentación positiva o negativa.

Un ejemplo de este tipo de diagramas se presenta a continuación en la Figura 2.3 donde se describe la relación causa-efecto entre algunas de las variables que intervienen en el mercado petrolero mundial, el cual se discutirá más adelante².

² Véase también los diagramas de ciclo causal de la Figura 2.2, que dan origen a los comportamientos discutidos en el apartado anterior.

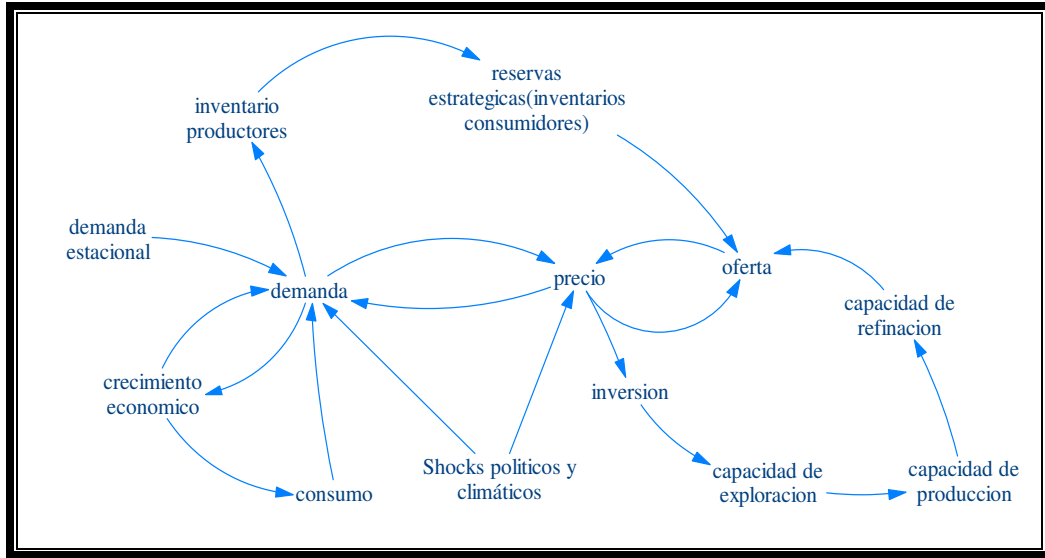


Figura 2.3 Diagrama ciclo causal del mercado petrolero

2.3.3 Diagrama de flujo

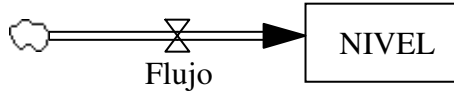
También llamado diagrama de Forrester, es el diagrama característico de la dinámica de sistemas. Es una traducción del diagrama causal a una terminología que facilita la escritura de las ecuaciones en el ordenador. En este diagrama se hace más fácil la distinción entre las variables y su importancia en el sistema [García 2003]. A continuación se muestran los tipos de variables y otros elementos usados en Vensim³ para la construcción de diagramas de flujos, dando una descripción y el símbolo utilizado por la herramienta.

- Nivel: son aquellos elementos que nos muestran en cada instante la situación del modelo, presentan una acumulación y varían solo en función de otros elementos llamados flujos. Son llamados también variables de estado.



³ Vensim es un lenguaje de simulación para el modelado de dinámica de sistemas. Ver el capítulo 1 para mayor información.

- Flujos: son los elementos que pueden definirse como funciones temporales. Puede decirse que recogen las acciones resultantes de las decisiones tomadas en el sistema, determinando las variaciones de los niveles.



- Nube: indica una fuente o un sumidero de una variable de nivel que genera o consume en forma inagotable.



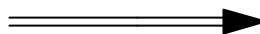
- Variable Auxiliar y parámetros: permiten una mejor visualización de los aspectos que condicionan el comportamiento de los flujos.



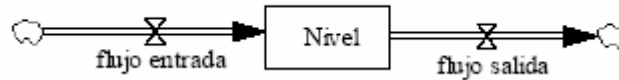
- Variables exógenas: son magnitudes que afectan al sistema pero no son a su vez afectadas por el sistema. Se representan como las variables auxiliares.
- Canales de información: canal de transmisión de cierta información.



- Canal de material: canal de transmisión de una magnitud física entre flujos y niveles.



Las tasas y los niveles junto con los lazos de realimentación son los elementos centrales en los que se basa la metodología de la dinámica de sistemas. El conjunto de variables de nivel define el estado del sistema y las variables de flujo la dinámica del cambio de dicho estado. La relación flujo-nivel corresponde a una ecuación diferencial:



$$\text{Nivel}(t) = \text{Nivel}(t_0) + \int [\text{flujo entrada}(t) - \text{flujo salida}(t)] dt$$

Las variables auxiliares no son niveles ni tampoco flujos; las variables auxiliares guardan consistencia dimensional y son usadas para dar un mayor entendimiento en los pasos que se llevan a cabo para hacer los cálculos que dan como resultado cambio en las variables de estado.

2.4 Modelado mediante dinámica de sistemas

“El proceso de modelado consiste en el conjunto de operaciones mediante el cual, tras el oportuno estudio y análisis, se construye el modelo del aspecto de la realidad que resulta problemático. Este proceso, consiste, en esencia, en analizar toda la información de la que se dispone con relación al proceso, depurarla hasta reducirla a sus aspectos esenciales, y reelaborarla de modo que pueda ser transcrita al lenguaje sistémico que estamos viendo” [Aracil 1995, p.58,59].

Luego de contar con la información necesaria para realizar el estudio del sistema se hace necesario seguir las siguientes fases propuestas por Forrester para el modelado mediante dinámica de sistemas.

2.4.1 Conceptualización

Primeramente debe realizarse una descripción verbal y mental del sistema de tal manera que pueda tenerse una idea preconcebida antes de proceder con un estudio más específico, que vendrá dado por el diagrama de relaciones causales que permitirá establecer

cuales son las variables más relevantes del sistema y sus relaciones, tanto endógenas como exógenas.

Además deben identificarse los bucles de realimentación existentes, tanto positivos como negativos, para tratar de predecir qué comportamiento podrá tener el sistema. Además es importante realizar una definición precisa del modelo en el tiempo, es decir, saber su horizonte temporal.

2.4.2 Formulación

En esta fase se convierte el diagrama causal, alcanzado en la anterior, en el diagrama de Forrester o de flujo, identificando las variables de estado del sistema, las de flujo, las variables auxiliares y seleccionando los parámetros adecuados para la simulación.

A partir de este diagrama se pueden escribir las ecuaciones del modelo, convirtiendo así las relaciones causales en expresiones cuantitativas. Al final de la fase se dispone de un modelo del sistema programado en un computador.

2.4.3 Análisis y evaluación

En esta fase se somete el modelo a una serie de ensayos y análisis por medio de la simulación para evaluar su validez y calidad. Estos análisis son muy variados y comprenden desde la comprobación de la consistencia lógica de las hipótesis que incorpora, hasta el estudio del ajuste entre las trayectorias generadas por el modelo y las registradas en la realidad y comparación con otros modelos desarrollados en el pasado.

Así mismo, se incluyen análisis de sensibilidad que consiste en un estudio sistemático de cómo afectan a las conclusiones de un modelo las posibles variaciones en los valores de los parámetros y en las relaciones funcionales que incluye. La forma más simple de realizar el análisis consiste en modificar los valores numéricos de cada uno de sus parámetros. Para ello se incrementa el valor del parámetro cuya sensibilidad se quiere estudiar en un cierto porcentaje y se analiza en qué medida esta variación afecta a las conclusiones del modelo (a las trayectorias que genera). Realizándolo de forma sistemática para todos los parámetros, con

incrementos y decrementos previamente establecidos, se puede tener una evaluación de los efectos de esas modificaciones sobre las conclusiones del modelo.

También se deben analizar políticas alternativas que pueden aplicarse al sistema que se está estudiando. Estas políticas alternativas se definen normalmente mediante escenarios que representan las situaciones a las que debe enfrentarse el usuario del modelo y pueden ir desde simples cambios en los parámetros hasta la reformulación de ecuaciones y cambios en la estructura del modelo. Todo lo anterior con el fin de llevar a cabo la implementación del modelo de simulación para, de esa forma, cumplir con los objetivos que se haya trazado el modelador y ver su utilidad en la toma de decisiones o en las proyecciones a futuro de un determinado sistema

2.5 Estructuras genéricas

Son de utilidad en el modelado mediante la dinámica de sistemas, ya que permiten que distintos sistemas se adapten a la misma estructura, variándose solamente los parámetros de las variables del sistema en estudio.

2.6 Conclusiones

En este capítulo se ha presentado una síntesis de los términos básicos que describe la metodología de la dinámica de sistemas: relación causa-efecto, lazos causales de realimentación, diagrama causal, diagrama de flujo. También se hizo un breve análisis de las estructuras dinámicas según Sterman y su comportamiento: crecimiento exponencial, objetivo-diferencia, oscilaciones, crecimiento en S, crecimiento en S con sobredisparo y sobredisparo y colapso; finalmente se dio una breve explicación de los pasos que se siguen para la construcción de modelos de dinámica de sistemas: conceptualización, formulación, análisis y evaluación.

En el siguiente capítulo se hace una descripción de la dinámica del mercado mundial petrolero. Esto permite luego en los siguientes capítulos, utilizar lo expuesto en este segundo capítulo para representar dicho mercado y un esquema genérico de producción y consumo de las regiones petroleras que conforman dicho mercado.

Capítulo 3

Descripción del mercado petrolero mundial

3.1 Introducción

En este capítulo se hace una breve revisión de las características del mercado petrolero mundial, su funcionamiento, perspectivas y las interrelaciones entre los principales elementos que concurren en el mercado, poniendo particular atención en la demanda y oferta. También se presenta una explicación simple sobre el peso de las decisiones políticas, factor determinante en la evolución y estabilidad de la industria petrolera.

El propósito fundamental es ofrecer una visión general del funcionamiento y dinámica del mercado mundial de petróleo. El cual sirve como marco de referencia para el desarrollo de estructuras genéricas de producción y consumo que se proponen en este proyecto.

3.2 El petróleo

La palabra petróleo, proviene de las voces latinas *petra* y *oleum*, que significan piedra y aceite, no porque sea aceite de piedra, sino por estar aprisionado entre piedras [Azcona, J. , 2002]. También se le conoce como "aceite mineral". Éste se encuentra en el interior de la tierra y se compone principalmente de carbono e hidrógeno; lo que significa que es un hidrocarburo y no un mineral, ya que procede de sustancias orgánicas.

La industria mundial de hidrocarburos líquidos clasifica el petróleo de acuerdo a su densidad API, parámetro internacional del Instituto Americano del Petróleo, que diferencia las calidades del crudo. En la tabla 3.1 se muestra esta clasificación.

Existen diversos tipos de crudo que se diferencian, principalmente, por el grado de viscosidad (grado API) y su contenido de azufre. Mientras más ligero (mayor grado API), es mayor la proporción de combustibles ligeros, de mayor valor, que puede obtenerse mediante procesos simples de destilación.

Mientras más pesado (menor grado API), es menor la proporción de hidrocarburos volátiles (de 5 a 10 átomos de carbono) y mayor los requerimientos de procesos adicionales para obtener combustibles ligeros. El contenido de azufre igualmente impacta en la complejidad del proceso de refinación y en la calidad de los productos obtenidos.

Petróleo Crudo	Densidad (g/cm ³)	Densidad Grados API
Extrapesado	>1.0	10.0
Pesado	1.0 – 0.92	10.0 – 22.3
Mediano	0.92 – 0.87	22.3 – 33.1
Ligero	0.87 – 0.83	33.1 – 39
Superligero	<0.83	>39

Tabla 3.1 Tipos de petróleo según la densidad. Fuente: www.imp.mx

El arte de la industria petrolera está en identificar de la manera más precisa posible la localización, condiciones y volumen de crudo existente, extraerlo de la manera más eficiente y transformarlo en combustibles útiles para el transporte, la producción de electricidad y la industria en general, así como en insumos para la producción de petroquímicos.

Desde el último tercio del siglo XIX, el petróleo es la energía primaria más importante del mundo. Prácticamente todas las actividades económicas, en todo el mundo, se sustentan en el petróleo como fuente energética, representando alrededor del 40% de las necesidades energéticas mundiales.

3.3 Factores que integran el mercado petrolero

Un mercado es un sitio, no necesariamente físico, donde oferentes y demandantes se ponen de acuerdo con respecto a un precio, con el fin de intercambiar dinero o medios de pago por un producto o servicio. Este concepto parece muy fácil en teoría, pero cuando se revisa un mercado tan complejo como el petrolero, nos encontramos que no resulta tan sencillo.

El mercado petrolero tiene una gran cantidad de protagonistas, los cuales están divididos, como cualquier mercado, entre compradores (países consumidores) y vendedores (países productores), está signado por la incertidumbre, en el que confluyen diversos factores, (económicos, técnicos y políticos). Además está articulado por el mecanismo de la oferta y la demanda, y las previsiones del modo como estas dos variables evolucionan, mientras hay numerosos elementos que afectan dichas variables: crecimiento de la población, condiciones geopolíticas, tecnológicas, económicas, etc. [Zanoni 2002].

El comercio mundial de petróleo es muy importante, ya que es en la actualidad la materia prima vital para el desarrollo económico mundial. Por esta razón, el mercado petrolero es muy sensible a cualquier alteración económica o política y esto se refleja en una volatilidad alta en los precios a pesar de que se rige por la dinámica de oferta y demanda.

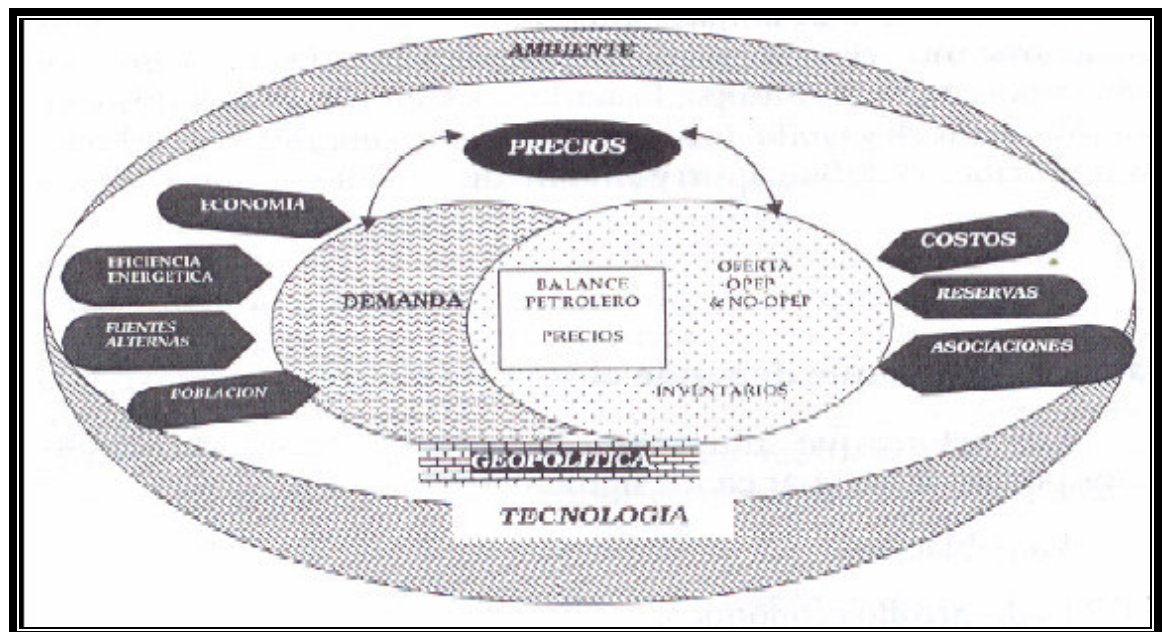


Figura 3.1 Factores que integran el mercado petrolero Fuente: MEM, PDVSA

Según la Figura 3.1, pueden notarse otros factores que intervienen en el mercado petrolero como son: el desarrollo económico, la tecnología los factores ambientales y ecológicos, las tendencias energéticas y las posibilidades de sustitución del petróleo por fuentes de energía alternativas, las incertidumbres. La conjunción de estos factores y sus diferentes pesos en el mercado determinan el desarrollo del mismo.

3.4 La oferta petrolera

La oferta petrolera puede ser conceptualizada como el flujo que origina la producción de petróleo que va destinada a su procesamiento en refinerías, su utilización directa, y a inventarios. Este flujo está basado en un *stock*, que lo constituyen las reservas de petróleo y está determinado por los niveles de producción que alcance la explotación del recurso [Zanoni 2002].

La producción de petróleo está concentrada en pocos países, que pueden dividirse en: OPEP¹ y NO-OPEP. La OPEP trata de desempeñar el papel de agente regulador del mercado petrolero, ya que sus países miembros poseen la mayor cantidad de reservas, razón por la cual concentra mayores niveles de producción.

En la actualidad los desequilibrios entre la oferta y la demanda del petróleo han jugado con los precios del crudo. Los temores a un desajuste por parte de la oferta han elevado los precios a niveles insospechados, lo cual ha hecho sonar las alarmas del mercado petrolero. La OPEP ha demostrado que se encuentra limitada para aumentar su oferta diaria y el resto de países productores no exceden de manera importante la capacidad de producción del cartel.

La Tabla 3.2 muestra los países con mayor producción a nivel mundial, se dividen en países pertenecientes a la OPEP y los NO OPEP.

¹ Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP), organización internacional que se ocupa de coordinar las políticas relativas al petróleo programadas por sus Estados miembros. Fundada en 1960, en la actualidad está constituida por los siguientes países: Arabia Saudita, Argelia, Emiratos Árabes Unidos, Indonesia, Irak, Irán, Kuwait, Libia, Nigeria, Qatar y Venezuela.

País/Región	Producción (mbd) Año 2004
No-OPEP	
USA	8.8
Canadá	3.1
México	3.9
Mar del Norte	5.2
Ex URSS	11.6
China	3.7
Otros No-OPEP	12.7
Total No-OPEP	49
OPEP	
Golfo Pérsico	22.43
Venezuela	2.98
Otros OPEP	6.93
Total OPEP	32.45
Total Mundial	81.45

Tabla 3.2 Producción petrolera mundial

Fuente: www.eia.doe.gov

Según los expertos la oferta carece de posibilidades de crecimiento al tiempo que sufre más conflictos laborales y de violencia geopolítica. La guerra que se desató en Irak, los atentados terroristas en Arabia Saudita, la temporada de huracanes, son algunos de los contratiempos que experimenta el bombeo de crudo. El año pasado comenzó a experimentarse una reducción en la oferta del energético. Venezuela e Irak vieron caer su producción en 230.000 y 690.000 barriles diarios, respectivamente. Ante esta situación, la OPEP aumentó su producción en 1,88 millones de barriles, apoyándose en Arabia Saudita. Este país, clave dentro de la organización, aumentó su producción en más de 1 millón de barriles y logró cuota récord en sus últimos 22 años [Varo, V *et. al.*, 2005].

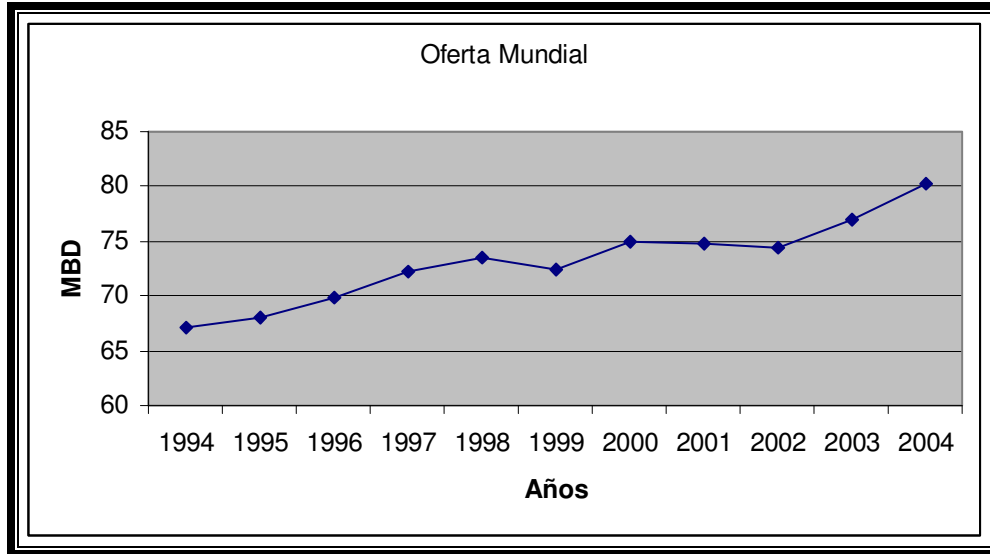


Figura 3.2 Oferta mundial Fuente: BP Statistical 2004

Por otra parte, la producción petrolera fuera de la OPEP en el 2003 creció en 830.000 barriles diarios, por debajo de los 1,33 millones que aportaban en 2002. Sin embargo, este nivel superó su promedio en los últimos 10 años. Rusia apoyó este incremento sustancial en la oferta con un aumento de 840.000 barriles. También México y Canadá, que no pertenecen a la OPEP, participaron de éste avance, ya ambos aumentaron su oferta en más de 100.000 barriles diarios en 2003.

La reducción en la oferta de países no miembros de la OPEP se debió, en gran parte, a la disminución de la producción de Estados Unidos y el Reino Unido que vieron caer sus cuotas diarias en 170.000 y 220.000 barriles, respectivamente. [Varo, V *et. al.*, 2005]. En la Figura 3.2 puede verse como ha aumentado la oferta mundial en los últimos 10 años.

Lo expuesto anteriormente muestra la importancia de la oferta como motor en el mercado petrolero y la situación actual en la que se encuentra la producción.

Ahora bien, es necesario conocer los principales factores que determinan la oferta, a saber: la cuantía de las reservas y su calidad, la capacidad de producción, los costos de producción y los factores de mercado, demanda y precios.

3.4.1 Las reservas de petróleo

Se entiende por reservas de petróleo de un yacimiento al volumen de hidrocarburos que será posible extraer del mismo, en condiciones rentables, a lo largo de su vida útil. Para determinarlas lo primero que se debe saber es cuánto petróleo contiene el yacimiento, lo que se conoce como el "petróleo original in situ". La reserva de un yacimiento es una fracción del "petróleo original in situ", ya que nunca se recupera el total del petróleo existente. Para establecerla hay que conocer cuál será el factor de recuperación del yacimiento, factor que implica conocer el tipo de empuje del yacimiento, agua/gas; su presión; permeabilidad de la roca; medida de la transmisibilidad entre los poros de la roca y la forma de explotación. Para la obtención de estos datos se efectúa un seguimiento del comportamiento del yacimiento a través de diversas pruebas y ensayos, lo que conlleva un tiempo considerable y una importante inversión económica. El valor resultante de esta fracción varía entre un 15% y un 60% del total del petróleo existente [Azcona, J. 2002]

Las reservas de petróleo son un factor básico para determinar la capacidad de oferta de un país y especialmente para atender su consumo interno y su participación como exportador en el mercado internacional [Zanoni 2002].

En función del grado de seguridad que se tenga en cuanto a la existencia del yacimiento y su volumen comercialmente recuperable, las reservas pueden ser agrupadas en: *probadas, probables y posibles*.

Las *reservas probadas* pueden ser definidas como aquellas cantidades de petróleo que se estima pueden ser recuperadas en forma económica y con las técnicas disponibles, de acumulaciones conocidas a partir de los datos con que se cuentan en el momento de la evaluación.

Las reservas probadas pueden a su vez dividirse en "*probadas desarrolladas*", que se esperan recuperar mediante los pozos y las instalaciones de producción existentes, y en "*probadas no desarrolladas*", que se esperan recuperar de pozos a perforar e instalaciones de producción a emplazar y de las cuales se tiene un alto grado de certidumbre ya que se ubican en yacimientos conocidos.

Las *reservas probables* son los volúmenes estimados de petróleo crudo asociados a acumulaciones conocidas, que han sido descubiertas y podrán ser explotadas con una tecnología y rentabilidad cercanas a las que prevalecen actualmente.

Son también comunes los términos *reservas posibles* y *recursos potenciales* o especulativos. Tales términos demuestran un importante grado de incertidumbre en cuanto a su existencia, por lo que se expresan en intervalos y responden al conocimiento geológico de una cuenca sedimentaria. Las *reservas posibles* son aquellas que aún no han sido descubiertas, son simplemente recursos potenciales que se esperan descubrir a partir de yacimientos desconocidos.

Por otro lado, la posición geopolítica de las reservas hace de la industria y del mercado petrolero una actividad de alcance global, con un comercio internacional intenso e importante. Como muestra la Figura 3.3 las reservas probadas de petróleo están fundamentalmente localizadas en los países de la OPEP, que controlan un 75% de las reservas mundiales.

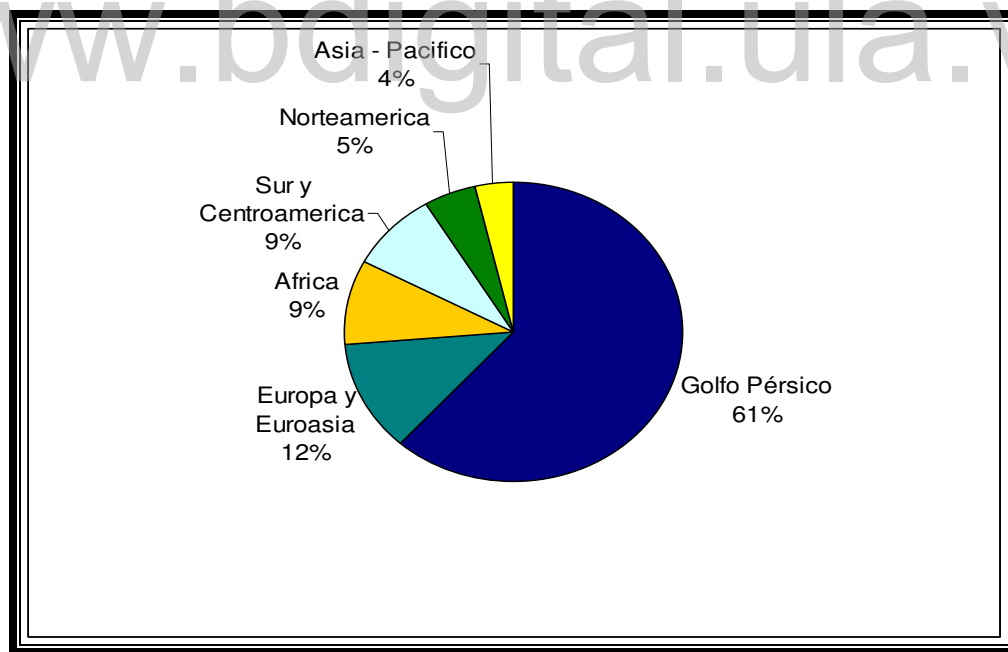


Figura 3.3 Reservas probadas mundiales Fuente: BP Statistical 2004

Las reservas naturales probadas de crudo convencional (explotable comercialmente) son relativamente amplias. Podrían alcanzar, al actual ritmo de consumo, para 40 años; pero

con mejoras tecnológicas y precios altos, podrían durar para 70 años a un ritmo de consumo más alto. Hay que recordar que el nivel de stock de las reservas probadas en un punto temporal es afectado por dos factores, la extracción y los nuevos hallazgos.

En los países que se caracterizan por ser netamente consumidores, se manejan otro tipo de reservas, como lo son, las *reservas estratégicas*, que son cantidades de petróleo que permanecen almacenadas, con el propósito de garantizar el suministro en momentos en los que se producen interrupciones extraordinarias, como lo que sucedió recientemente con los huracanes en las costas de USA. La autorización para abrir las reservas en el caso de USA, debe provenir del propio presidente, en base a una recomendación del Departamento de Energía y tras un pedido de ayuda de parte de compañías petroleras. El petróleo puede ser entregado en venta a una compañía que lo necesite o como un préstamo, que luego debe ser devuelto con intereses. Una vez abiertas, las reservas podrían bombear un millón de barriles de petróleo diarios durante 18 meses antes de que se agoten [Las reservas estratégicas de petróleo de EEUU, 2005].

El manejo de las reservas es un factor importante en la producción del petróleo, ya que indica las cantidades de crudo que se encuentran almacenadas y disponibles para satisfacer el consumo. Además nos muestra la política de reservas estratégicas que manejan los países con mayores niveles de consumo para evitar fallas en el suministro.

3.4.2 Costos de producción

Los costos de producción representan todos aquellos gastos en que incurre la industria petrolera relacionados con las actividades de extracción, exploración y desarrollo necesarias para establecer la capacidad de producción.

Los costos de producción se ven influenciados de manera importante por la fusión, asociaciones estratégicas, la especialización, la diversidad operativa y la aparición de nuevas técnicas en la exploración y explotación del crudo; estos costos tienden a disminuir a medida que aumenta el desarrollo tecnológico, que ha sido un factor importante en el aumento de la producción, en especial en la incorporación de los países NO-OPEP que han logrado superar a los de la OPEP [Zanoni 2002]. Los costos globales de producción en los países de la OPEP son menores a los de los países no-OPEP, esto se debe a sus abundantes reservas.

Dentro de la estructura de los costos petroleros, hay que diferenciar los dos principales rubros: los costos de producción y los costos de reposición de reservas. Para explotar un barril de petróleo, además de las inversiones involucradas en el pozo productivo, hay que incurrir en costos operativos y contribuir al mantenimiento de los costos de estructura (indirectos). Además, el barril producido obliga a reponer reservas; la reposición de reservas tiene costos de exploración y de desarrollo que resultan del desempeño de la empresa para sumar reservas e incluyen la ampliación de áreas en explotación, descubrimientos, revisiones de reservas ya comprobadas y mejoras en los sistemas de recuperación. Con criterio amplio, pueden incluirse en este concepto las adquisiciones de reservas.

La Tabla 3.3 muestra los costos de producción de cada barril de petróleo en algunos países y regiones del mundo.

Región	U\$S por barril
Estados Unidos	3,00-7,00
Mar del Norte	3,00-6,00
América del Sur	2,00-6,00
África	2,00-5,00
Medio Oriente	1,00-5,00
Argentina	3,00-6,00

Tabla 3.3 Costos de Producción

Fuente: Montamat. Op.Cit.

3.4.3 Factores tecnológicos

“El desarrollo tecnológico es un factor dinámico que impulsa la industria petrolera; de allí que las inversiones de las compañías en investigación y desarrollo son de gran cuantía reflejando el interés de ellos por descubrir y poner en acción los yacimientos con tecnologías más eficientes, rentables y ahorradoras de mano de obra” [Zanoni 2002 Pág. 82].

Las innovaciones tecnológicas en las actividades petroleras en los últimos años han disminuido los costos de producción y han permitido incrementar la extracción de crudos

difíciles de explotar (*offshore*), así como también aumentar las reservas en todo el mundo. Por ejemplo, según la EIA (2002), el gran impulso tecnológico que experimentó la industria petrolera entre 1975 y 1995 permitió incrementar las reservas probadas.

3.4.4 Demanda y precios

La evolución de la oferta está estrechamente ligada a la demanda y a los precios. Las fluctuaciones de la demanda y sus previsiones condicionan los ritmos de la oferta que deberá atender estas variaciones, bien aumentando la producción o efectuando recortes en ella.

El precio actúa como un mecanismo de estímulo en todo el aparato productor. Si el precio aumenta, pueden entrar en producción yacimientos pocos rentables e intensificar costosas actividades de exploración [Zanoni 2002].

La demanda de petróleo marca la pauta en la oferta petrolera, ya que según los requerimientos de crudo que existan, los países productores aplicarán distintas políticas con el objetivo de abastecer el mercado.

3.4.5 Capacidad de producción

La producción petrolera está limitada por la capacidad que tenga cada país para suplir los requerimientos de petróleo tanto internos como externos. La capacidad de producción depende de las reservas probadas y de las tecnologías que se estén empleando en la extracción del crudo.

En la actualidad la mayoría de los países productores han llegado al límite de su capacidad de producción, de allí la problemática de aumentar las cuotas de producción en el caso de la OPEP, y la preocupación sobre futuros desabastecimientos en la industria. Solo países como Arabia Saudita y Rusia aún disponen de cierto excedente en su producción, lo cual les permitiría aumentar su producción ante cualquier falla de suministro.

3.5 La demanda petrolera

La demanda petrolera puede ser conceptualizada como la cantidad de crudo que se necesita para satisfacer un volumen determinado de consumo petrolero, en un país, región o el mundo [Zanoni 2002].

La demanda petrolera es clave dentro del mercado, ya que sirve de motor en la determinación del precio y en los ajustes por parte de la oferta. Actualmente la demanda ha alcanzado grandes niveles de aumento, esto debido a la reactivación económica que experimentan principalmente Estados Unidos y Japón, además del auge económico de naciones como China y la India que ante su reciente industrialización han despertado altas tasas de consumo.

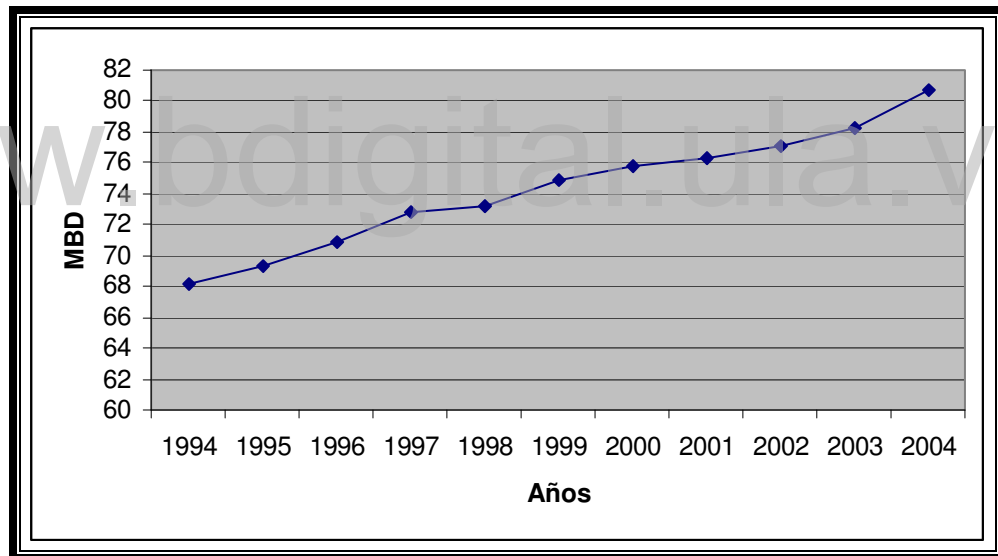


Figura 3.4 Demanda mundial Fuente: BP Statistical 2004

En la Figura 3.4 se nota como la demanda mundial de petróleo ha tenido una tendencia alcista en los últimos años.

Los principales factores que determina la demanda petrolera son:

- Crecimiento económico.
- Oferta y precios.

- Competencia con el consumo de otras fuentes.
- Demandas estacionales
- Incertidumbres, Shocks políticos y ambientales

3.5.1 Crecimiento económico

El crecimiento de la actividad económica determina la demanda petrolera, ya que el petróleo es la principal fuente energética sobre las que se basan las actividades económicas de la sociedad industrializada [Zanoni 2002].

El crecimiento económico estimula el alza de la demanda en los países, sobre todo en las naciones industrializadas, debido a que sus economías desarrolladas y grandes, son las que utilizan la mayor parte de la producción petrolera mundial.

El Centro de Estudios Globales de la Energía (CGES), con sede en Londres, señala en su más reciente reporte mensual de perspectivas petroleras que los altos precios del crudo registrados durante el presente año finalmente han comenzado a generar un notable impacto negativo en el crecimiento económico y en la demanda petrolera [Mogollón, M. 2004].

Indica el CGES que las cifras del tercer trimestre comienzan a mostrar un descenso marcado en el crecimiento económico. En consecuencia, los especialistas del centro han ajustado sus estimaciones sobre el equilibrio de la demanda de petróleo para el año 2005 de 1,5 a 1,35 millones de barriles diarios. Es por esto que en los últimos años el crecimiento económico ha sido lento, sobre todo en los países no industrializados.

3.5.2 Oferta y precios

El aumento de la oferta petrolera está íntimamente ligado a la demanda que ha demostrado una tendencia creciente a lo largo del tiempo, revelando su inelasticidad ante la variación de los precios, y presionando hacia aumentos de la producción petrolera. La relativa inelasticidad de la demanda permite que aumentos de precios estimulen la oferta sin mayores riesgos de disminución de la demanda [Zanoni 2002].

Los niveles de precios no afectan en gran manera la demanda, por ello se dice que esta es inelástica con respecto al precio, ya que la mayoría de países necesita satisfacer sus necesidades de consumo energético, sobre todo en las naciones industrializadas. Sin embargo, como todo mercado el precio puede hacer que los países respondan en su demanda, aunque sea en pequeños decrementos.

3.5.3 Competencia con otras fuentes de energía

El actual consumo mundial de energía se ubica en el equivalente a 215 millones de barriles de petróleo por día – 215 mbd - , de ese gran total de energía, un 38% es aportado por el crudo que se produce diariamente. Es decir, 80 millones de barriles de petróleo. Adicionalmente, 22% de esa energía proviene del gas natural, 26% del carbón, 7% de la energía nuclear y el restante 7% de otras fuentes como la hidráulica, la eólica y la solar.

El petróleo representa la mayor parte del consumo de energía en relación con cualquier otra fuente, y se espera que permanezca en esta posición durante las tres primeras décadas de este siglo, hasta el año 2030, permaneciendo sin cambio durante este lapso en el 38 por ciento del consumo total mundial, debido al hecho que muchos países en diversas partes del mundo incrementarán su consumo de gas natural y otros combustibles. Se proyecta que el consumo mundial aumentará un 2,3% anual, desplazándose de 75 millones de barriles por día en 1999 a 120 millones de barriles por día en el año 2020. De acuerdo con los expertos, para el año 2020 los países en desarrollo consumirán aproximadamente la misma cantidad de petróleo que los países industrializados [Vargas 2003].

3.5.4 Demandas estacionales

Se refiere a las alzas o bajas que hay en la demanda petrolera según las estaciones climáticas. En las regiones mundiales donde se cumplen las 4 estaciones climáticas la demanda suele variar, en casos de inviernos gélidos, la demanda aumenta para el consumo gasóleo² y otros combustibles para la calefacción. Los países que requieren incrementar su

² Mezcla de hidrocarburos obtenida por destilación fraccionada del petróleo crudo. Se emplea principalmente como combustible en motores diésel, para vehículos y para calefacción.

demanda durante estos periodos lo hacen con unos meses de antelación para estar preparados y no sufrir de escasez de combustible, un ejemplo de esto son los Estados Unidos y los países de Europa. En estos casos la demanda mundial sufre variaciones, ya que sobre todo los países industrializados, que son los mayores consumidores de energía, son los que requieren más petróleo en distintos periodos del año.

3.5.5 Incertidumbres, shocks políticos y ambientales

La demanda se ve influenciada por la incertidumbre que reina en el mercado petrolero mundial, cuando empiezan rumores sobre posibles desabastecimientos del crudo la demanda tiende a subir, esto también sucede cuando hay rumores sobre posibles conflictos bélicos en los países productores.

En el caso de los fenómenos climáticos, las tensiones permanecen latentes ya que estamos en plena temporada de huracanes y tormentas en Norteamérica. Las actividades en las plataformas petroleras en el Golfo de México después de las interrupciones han vuelto a la normalidad, sin embargo, los efectos de los huracanes y otros fenómenos naturales pudieran dar lugar a las rupturas serias en la producción normal, lo cual hace que la demanda se vea afectada.

3.6 Precios del petróleo

Los precios del petróleo constituyen un factor determinante en el mercado petrolero, dependiendo de la relación los agentes económicos del mercado, tales como: los costos de producción, el nivel de reservas, el desarrollo tecnológico, el entorno económico mundial, demanda, oferta y la situación geopolítica mundial [Zanoni 2002]. Los precios actúan como un mecanismo de estímulo en todo el aparato productor, ya que altos precios alientan todas las ramas de la actividad de producción: se agiliza la exploración, la producción, el transporte y la refinación.

En el mundo, existen cientos de tipos de petróleo, cada uno de ellos con unas características especiales que lo hacen especialmente útil para su refinado en determinados

productos. Sin embargo, la mayoría de las transacciones se refieren a un número limitado de tipos, según la AIE (2005), los más importantes son:

- **Brent:** Es el petróleo de referencia en el mercado europeo, pero también lo es para el 65% de los distintos tipos de crudo mundial, que se refieren a él y cuyos precios se expresan como una prima o un descuento contra el Brent. El Brent es un petróleo de alta calidad, caracterizado por ser ligero (petróleo crudo con una gravedad baja específica y alta gravedad API). El Brent cotiza en el *Internacional Petroleum Exchange* (IPE) de Londres mediante unos instrumentos financieros denominados opciones y futuros del Brent. Su unidad monetaria de cotización es el dólar.
- **West Texas Intermediate (WTI):** es un petróleo de mayor calidad que el Brent, es ligero (39,6 grados API), con un bajo contenido en azufre. Por ello, suele cotizar entre dos y cuatro dólares por encima del Brent. Es el tipo de crudo de referencia en el mercado estadounidense y cotiza en la *New York Mercantile Exchange* (NYMEX).
- **Dubai:** Es el crudo de referencia para el petróleo pesado y azufroso en Asia, y sobre él se refieren, otros crudos de la zona que no cotizan en el mercado. El Dubai es un tipo de petróleo de baja calidad; es pesado (31 grados API, frente a los más de 38 grados del Brent) y de alto contenido en azufre (2,04%, cinco veces más que el Brent).
- **Arab Light:** Durante décadas, el *Arab Light*, producido en el yacimiento Ghawar, en Arabia Saudita, fue la referencia mundial para el precio del petróleo. El *Arab Light* es un crudo medio (34 grados API, y un contenido en azufre del 1,78%), pero su producción es enorme: en la actualidad, más de cinco millones de barriles.
- **Cesta OPEP:** La OPEP fija sus decisiones de política petrolera con la vista fija en la denominada cesta OPEP, una media aritmética de los principales crudos de exportación de cada uno de los países miembros, entre ellos el BCF 17 (Venezuela), *Saharan Blend* (Argelia), Minas (Indonesia), *Irán Heavy* (Irán),

Basra Light (Irak), *Kuwait Export* (Kuwait), *Es Sider* (Libia), *Bonny Light* (Nigeria), *Qatar Marine* (Qatar), *Arab Light* (Arabia Saudita), *Murban* (Emiratos Árabes Unidos). La nueva cesta de referencia presenta una gravedad API más pesada, de 32,7 grados, en comparación con los 34,6 grados de la cesta anterior, constituida por 7 crudos. Igualmente, el contenido de azufre de la nueva cesta de referencia es más ácida en 1,77%, comparada con la anterior de 1,44%.

Durante los últimos 25 años, los precios del petróleo han sido muy volátiles. En el futuro, se puede esperar que la conducta volátil pueda repetirse principalmente debido a las circunstancias naturales, políticas y económicas imprevistas. Está bien reconocido que las tensiones en el Medio Oriente, por ejemplo, pudieran dar lugar a las rupturas serias en la producción normal y en los modelos comerciales.

Los precios están variando rápida e inesperadamente a cambios en la oferta y demanda. Cuando los precios son muy altos afectan las economías de los países consumidores de crudo y, cuando son muy bajos, afectan los países exportadores y dependientes del ingreso petrolero. La racionalidad dice que los precios deberían estar en un nivel donde haya armonía entre países consumidores y productores. Es decir, lo suficientemente bajos para evitar la entrada de productores ineficientes o promover la sustitución por otras fuentes de energía, y lo suficientemente altos para compensar la justa retribución del capital extraído a los países productores [Varo, V *et. al.* 2005].

La Tabla 3.4 muestra los tipos de petróleo con mayor participación en el mercado, cada una con su respectiva densidad API

Tipo de petróleo	Densidad (API)
BCF 17 (Venezuela)	16.5
Saharan Blend (Argelia)	43.6
Minas (Indonesia)	35
Irán Heavy (Irán)	30.2
Basra Light (Irak)	33.7
Kuwait Export (Kuwait)	32.4
Sider (Libia)	37
Bonny Light (Nigeria)	35.4
Qatar Marine (Qatar)	36.2
Arab Light (Arabia Saudita)	34
Murban (Emiratos Árabes Unidos)	40.4
Petróleo Intermedio de Texas (WTI)	39,6
Brent	38.3
Dubai	31

Tabla 3.4 Tipos de petróleo Fuente: *Energy Intelligence Group, Inc (2003)*

3.7 Conclusiones

En este capítulo se ha presentado una descripción del mercado mundial del petróleo a través del estudio de la oferta y la demanda petrolera y de los principales factores de los que dependen estas variables: económicos, geopolíticos, tecnológicos, etc. También se ha realizado un breve análisis del carácter político y del futuro del mercado petrolero. Todo esto permite tener una visión sobre la interacción de los factores fundamentales del mercado, especialmente el papel primordial que juegan la oferta, la demanda y el manejo de inventarios.

El siguiente capítulo describe la conceptualización y formulación del modelo de dinámica de sistemas propuesto en este proyecto, basado en la descripción expuesta en este capítulo, se modelan estructuras genéricas de producción y consumo para diferentes regiones.

Capítulo 4

El modelo: conceptualización y formulación

4.1 Introducción

En este capítulo se presentan las dos primeras fases en el desarrollo del modelo según Forrester: conceptualización y formulación.

En la conceptualización se describe la estructura y el funcionamiento de la producción petrolera mundial, con algunos de los principales factores que la integran, además de las relaciones causales existentes entre estos y se identifican los bucles o lazos de realimentación tanto positivos como negativos que son fundamentales en el comportamiento dinámico del sistema. El resultado de esta fase es el establecimiento del diagrama causal (DC) del sistema.

En la fase de formulación se desarrolla el diagrama de flujo (DF) en donde las relaciones causales establecidas en la fase anterior se convierten en expresiones precisas y cuantitativas. En esta fase se definen formalmente las variables del modelo, se determinan las ecuaciones matemáticas y estiman y seleccionan los parámetros para la simulación; todo esto utilizando el software de simulación dinámica Vensim PLE¹.

4.2 Conceptualización

En el modelo se parte de la interacción entre la demanda y la oferta, también en la manera como los países manejan sus inventarios y reservas estratégicas, ya que éstas son las variables de interés para el modelo que se desarrolló. Los demás elementos del mercado

¹ Paquete de software de modelación basado en MS Windows para elaborar modelos de dinámica de sistemas
Visite <http://www.vensim.com>

petrolero no se toman en cuenta por razones de tiempo y alcance para tener un modelo simplificado, con el objetivo de enfocar la atención en las estructuras que generan la dinámica de la producción petrolera. En la Figura 4.1 se muestra las relaciones causales existentes entre estas variables, permitiendo de esta manera tener una visión de la estructura del sistema.

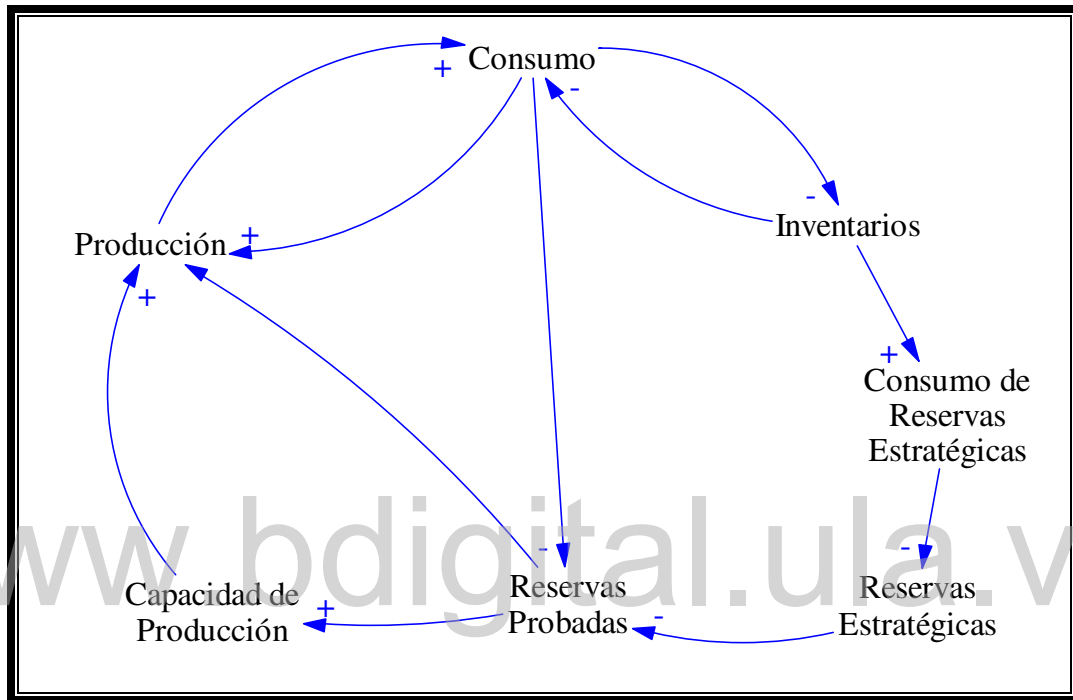


Figura 4.1 Algunos componentes de la producción petrolera

La relación causal entre producción y oferta nos indica que un aumento del consumo del crudo genera un crecimiento en la producción, la cual aumenta con el fin de satisfacer la demanda. Otra relación causal que puede observarse es la de consumo-inventarios, ella muestra que, al aumentar el consumo, disminuyen las cantidades de petróleo que están almacenadas, y el hecho de que bajen los inventarios hace que el consumo también disminuya ya que depende de las cantidades que estén disponibles en los inventarios. La siguiente relación causal muestra que, una baja en los inventarios trae como consecuencia el aumento del consumo de las reservas estratégicas, ya que los inventarios no llegan a satisfacer todo el consumo. Al aumentar el consumo de reservas estratégicas, lógicamente el nivel de éstas tiende a disminuir.

Ahora bien, el hecho de consumir parte de las reservas estratégicas, quiere decir, que el consumo ha aumentado, lo cual a su vez genera una disminución en las reservas probadas, tal como se ve en la relación causal de la Figura 4.1.

Otra relación causal muestra que la disminución de las reservas probadas es debido a un aumento de la capacidad de producción, lo que a su vez hace que aumente la producción.

Todas las relaciones causales antes descritas permiten tener una visión general sobre la interacción entre los factores del mercado como son: producción, consumo y manejo de inventarios, los cuales son los elementos de interés en las estructuras genéricas que desarrollaron en esta fase.

4.2.1 Diagrama causal

Cada uno de los componentes del mercado mencionados en la sección anterior dependen de un conjunto de factores o elementos que interactúan y forman relaciones causales más complejas, así como una gran multiplicidad de lazos de realimentación. En nuestro modelo se recogen los elementos y procesos de realimentación considerados para definir la estructura de producción del mercado petrolero.

El diagrama causal que se ilustra en la Figura 4.2 nos permite abstraer la estructura del sistema, ayudando así a tener una idea más completa de la estructura de producción petrolera basado en algunos de los elementos que lo conforman, observando los lazos de retroalimentación positivos y negativos, los cuales generan la dinámica del sistema y delimitan el espacio donde se lleva a cabo el estudio.

En el diagrama se observa la relación entre los distintos elementos que se han escogido del mercado petrolero, lo cual permite tener una idea primaria sobre la estructura que genera la dinámica del consumo y producción petrolera.

Puede notarse también que no se incluyen los precios del petróleo como elemento dinamizador del sistema, ya que en este estudio el interés principal es reflejar la estructura de producción y consumo de diferentes regiones.

producción sobre el consumo. Lo cual provoca que el consumo de las reservas estratégicas aumente, ya que las reservas son utilizadas para satisfacer la demanda, trayendo como consecuencia la disminución en el nivel de reservas estratégicas.

El lazo L4 es positivo y muestra que a mayor crecimiento económico de los países, mayor será su necesidad energética, lo cual produce aumentos en el consumo o demanda de petróleo.

El lazo L5 es negativo, también genera estabilidad del sistema. Aquí se deja ver la relación directa entre el consumo y los inventarios. Cuando aumenta el consumo, el nivel de inventarios disminuye.

El lazo L6 es negativo, generando estabilidad al sistema. En este lazo se muestra que a medida que disminuyen los inventarios, el consumo también baja, ya que depende de la cantidad de petróleo almacenado que haya en los inventarios. Al bajar el consumo la producción debe disminuir para evitar la sobre-oferta en el mercado.

4.2.2 Horizonte temporal

El horizonte de tiempo para la simulación del modelo es de 10 años. El tiempo de corridas es en días para ser consistentes con las unidades clásicas de las variables petroleras.

4.3 Formulación

4.3.1 Diagrama de flujo

En esta fase se presenta el diagrama de flujo del sistema desarrollado. En la Figura 4.3 se muestran los 4 subsistemas que componen el modelo: países consumidores, países productores, demanda mundial y oferta mundial.

A continuación se explica la estructura interna de cada subsistema, las relaciones causales entre las variables que conforman dichas estructuras, así como sus ecuaciones. Estas

² Por simplificaciones del modelo cuando se hable de oferta se estará refiriendo también a la producción.

ecuaciones se presentan según el formato de VensimPLE. El número en el paréntesis corresponde al número agregado por el software a la variable del modelo.

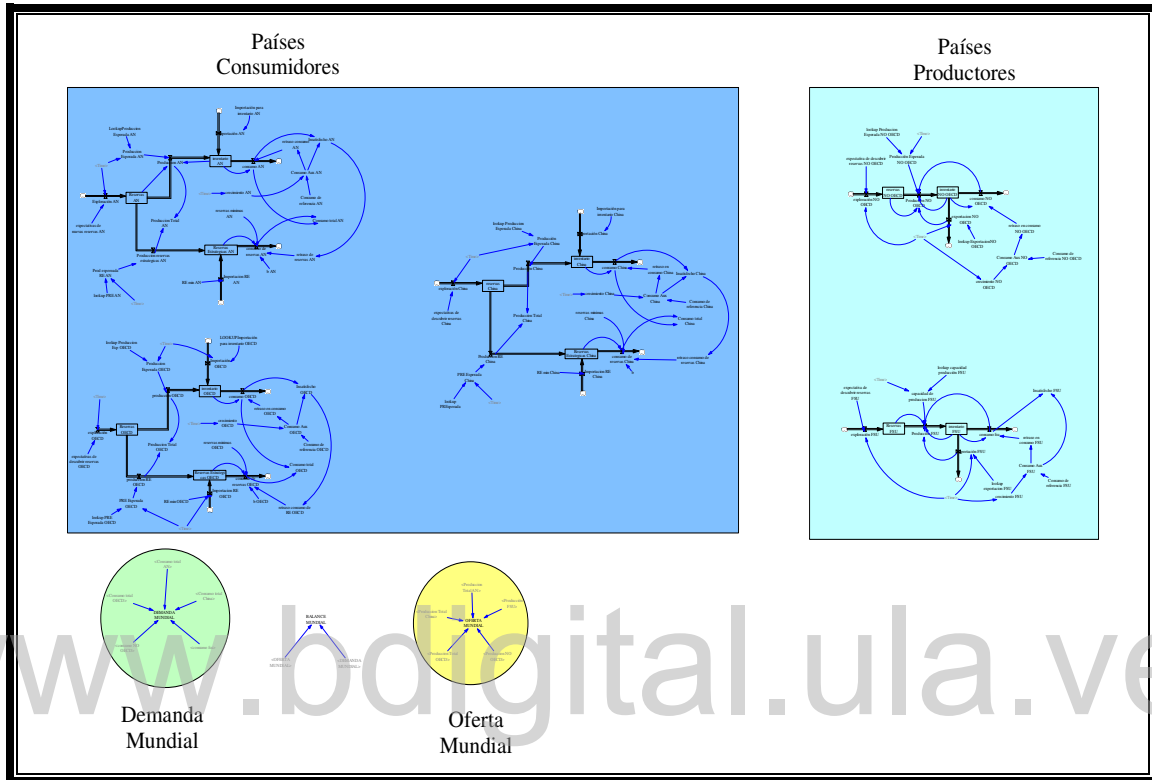


Figura 4.3 Diagrama de flujo

Cada uno de los subsistemas está compuesto por algunos elementos primordiales de la producción petrolera mundial, tales como demanda, oferta y los distintos tipos de inventarios o reservas que manejan las regiones definidas.

Cada subsistema fue diseñado para abstraer lo relevante de cada región, dependiendo si es netamente productora o consumidora. Y en cada subsistema se encuentra la estructura que genera la dinámica de algunos de los elementos más importantes del mercado: demanda, oferta y reservas, todos estos elementos interactúan para producir en parte, la dinámica de la producción petrolera mundial.

- Países Consumidores

En este subsistema se agrupan 3 regiones mundiales en los que se concentra la mayor parte del consumo mundial: América del Norte (USA, México y Canadá) con un 25% del consumo mundial, China, con un 8% y los países industrializados miembros de la OECD³ con un 34%. En total estas regiones representan el 67% del consumo mundial, es por ello que, para efectos de este proyecto, se les considera regiones netamente consumidoras de petróleo. Los países consumidores se muestran en la parte superior y a la izquierda de la Figura 4.3.

La estructura que define el comportamiento de los países consumidores de petróleo de cada región se muestra en la Figura 4.4. Dicha estructura deja ver la interacción entre consumo, producción y la manera en que distribuyen sus reservas con el fin de mantener su nivel de consumo.

Para la explicación de este subsistema se usa como referencia la región de América del Norte (AN), con el fin de mostrar todas las relaciones y ecuaciones de la estructura del modelo.

³ Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), ente internacional compuesta por los 28 países más industrializados del mundo, cuyo objetivo es coordinar, en forma conjunta, sus políticas económicas y sociales. Para este modelo se excluyen USA, México y Canadá de la OECD debido a que se encuentran en otra región diferenciada en el modelo.

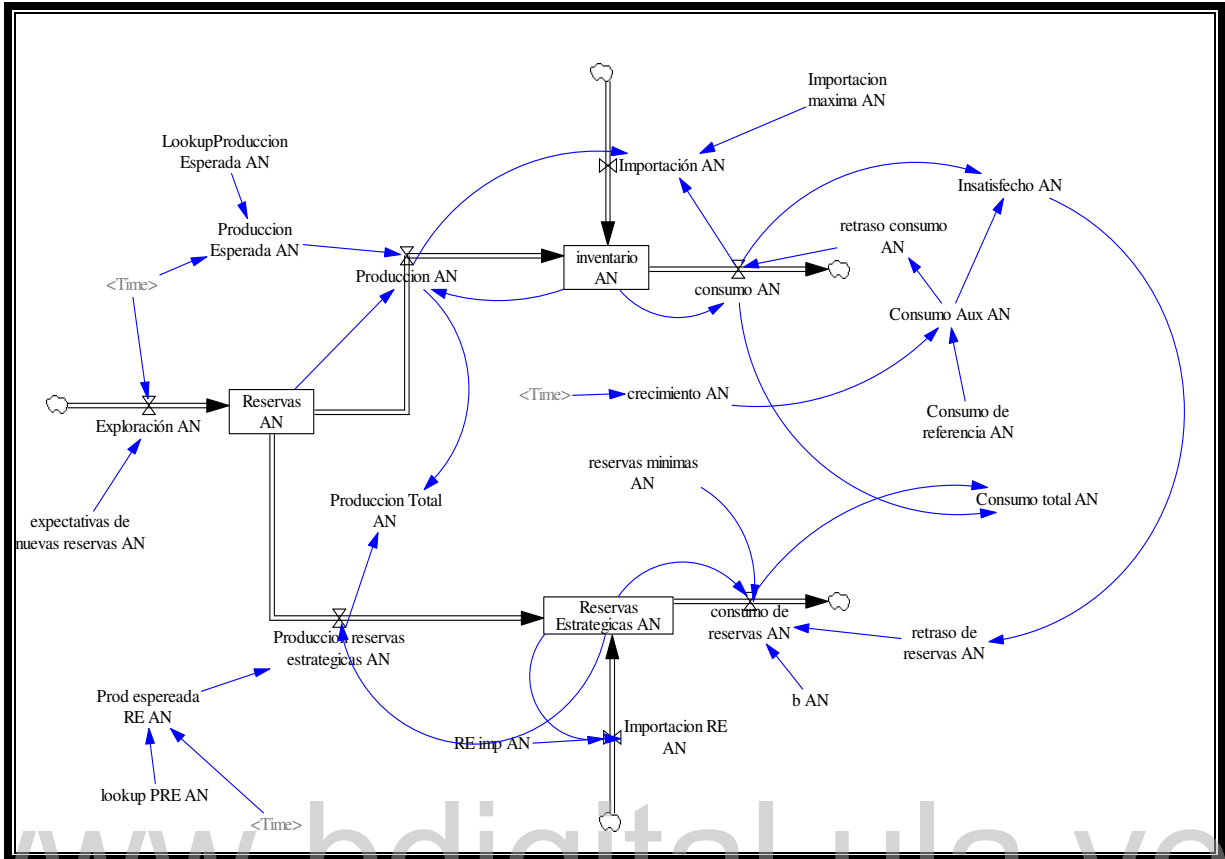


Figura 4.4 Diagrama de flujo de países consumidores (América del norte)

Reservas AN: es un nivel⁴ que representa las cantidades de petróleo que están almacenadas en el subsuelo y que pueden ser recuperadas. La acumulación de este nivel viene dada por el flujo que resulta de la exploración de nuevos yacimientos. De las cantidades que se acumulan en las reservas probadas dependen los flujos de producción para el consumo y para las reservas estratégicas. El valor inicial para este nivel es de 101.9 MB (millones de arriles).

$$\text{Reservas Probadas AN} = \text{INTEG} (\text{Exploración AN} - \text{Producción AN} - \text{Producción reservas estratégicas AN}, 101.9)$$

Units: MB

⁴ Véase el Capítulo 2.

Exploración AN: es un flujo que muestra como varía la exploración de nuevos yacimientos, afectando de esta manera el estado de las reservas probadas. La exploración es afectada por la variable expectativas de nuevas reservas.

$$\begin{aligned} \text{Exploración AN} = & \text{IF THEN ELSE}(\text{Time} \leq 1825, -0.00663301, \\ & \text{IF THEN ELSE}(\text{Time} \leq 3285, -0.0189041, -0.00328767)) \\ & + \text{expectativas de nuevas reservas AN} \\ & \text{Units: MBD} \end{aligned}$$

En la ecuación anterior se usa la función IF THEN ELSE de Vensim, con el fin de condicionar que si el tiempo es menor que 1825 días se usa el valor -0.00663301, en caso contrario, si el tiempo está entre 1825 y 3285 días toma el valor -0.0189041 y si el tiempo es mayor que 3285 la exploración toma el valor -0.00328767.

Los valores para esta variable son obtenidos a partir de hallar las pendientes de las rectas que conforman la evolución de las reservas en los últimos 10 años, con el fin de tener una función de entrada adecuada para el integrador del nivel de reservas, esto se muestra en la Figura 4.5.

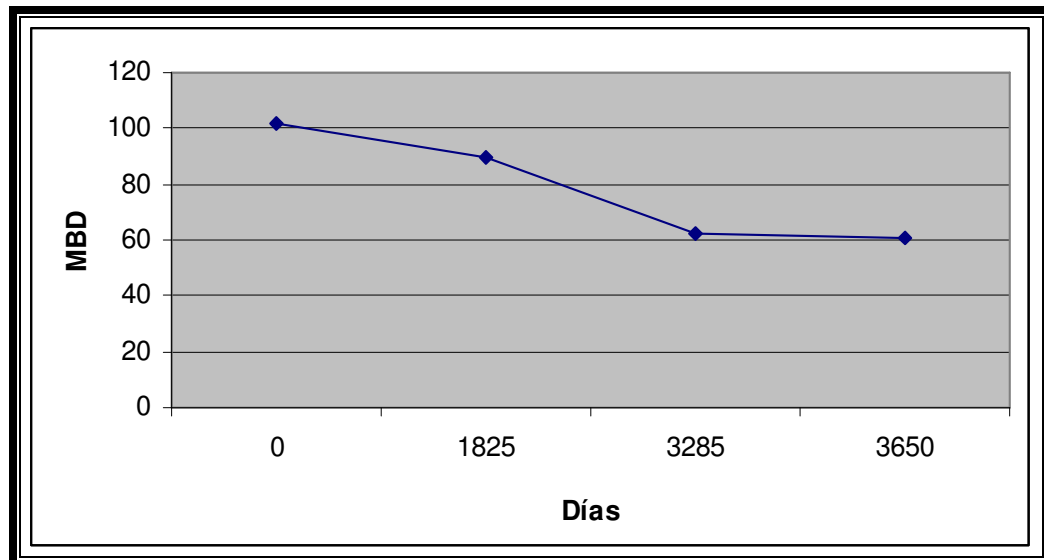


Figura 4.5 Reservas Probadas (América del norte) Fuente: BP Statistical 2004

Expectativa de nuevas reservas: es una constante que indica la cantidad de barriles que se espera descubrir mediante el proceso de exploración⁵.

expectativas de nuevas reservas AN=14

Units: MBD

Producción AN: es un flujo que muestra el comportamiento de la producción en el tiempo. Esta se ve influenciada por el nivel de reservas y por un multiplicador de la producción esperada de cada región.

Producción AN=IF THEN ELSE(Reservas AN>=Producción Esperada AN, Producción Esperada AN, inventario AN)

Units: MBD

La ecuación anterior indica que, la producción está condicionada por el hecho de que las reservas probadas deben ser mayores que la producción esperada, si esto se cumple se produce la cantidad esperada, en caso contrario, se produce la cantidad que haya en el inventario de almacenamiento para el consumo.

Lookup Producción Esperada AN: es una variable lookup⁶ que muestra el comportamiento de la producción esperada en el tiempo. Los pares de valores están graficados en la Figura 4.6, con datos históricos de la producción en los últimos 10 años. Se tomó el 80% de la producción para almacenar en los inventarios, el otro 20% está destinado a las reservas estratégicas.

⁵ El valor de esta constante es una de las suposiciones hechas en el modelo, ya que no se encontró un dato exacto.

⁶ Lookup es un tipo de variable de Vensim que sirve para definir formas funcionales entre dos variables.

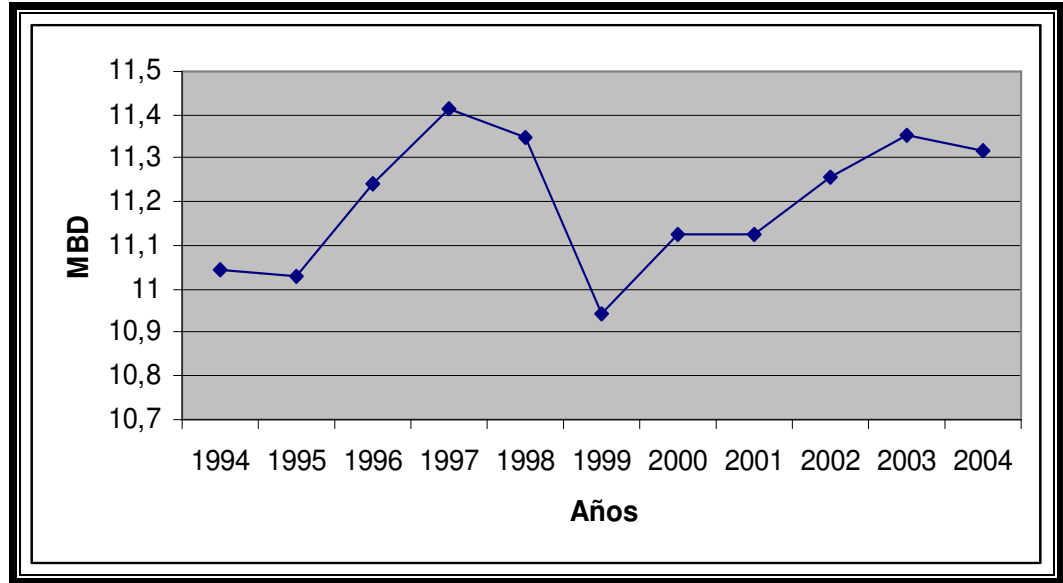


Figura 4.6 Producción Esperada (América del norte) Fuente: BP Statistical 2004

Producción Esperada AN: es una función dependiente del tiempo que afecta la producción de la región. La Figura 4.7 muestra el comportamiento de esta función.

Producción Esperada AN = LookupProduccion Esperada AN (Time)
 Units: MBD

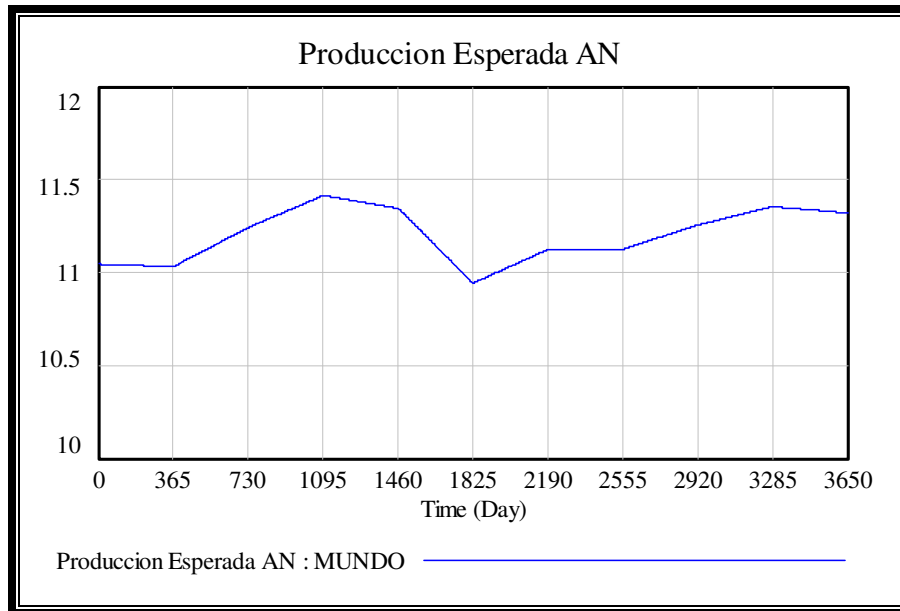


Figura 4.7 Producción Esperada (América del norte)

Inventario AN: es un nivel que representa las cantidades de petróleo que son almacenadas provenientes de la producción y de la importación, con el fin de satisfacer la demanda interna de la región. El valor inicial para esta variable es 270 MBD, el cual es tomado de los informes semanales emitidos por el Departamento de Energía de USA.

$$\text{Inventario AN} = \text{INTEG} (+\text{Importación AN} + \text{Producción AN} - \text{consumo AN}, 270)$$

Units: MBD

Importación para Inventario AN: es un flujo que representa la cantidad de barriles que un país compra con el fin de satisfacer sus requerimientos de consumo. Depende de la diferencia ente el consumo y la producción y de una cantidad máxima que puede ser importada, esto se observa en la siguiente ecuación

$$\text{Importación AN} = \text{IF THEN ELSE}(\text{consumo AN} - \text{Producción AN} > \text{Importación máxima AN}, \text{Importación máxima AN}, \text{consumo AN} - \text{Producción AN})$$

Units: MBD

Importación máxima AN: es una constante que muestra la cantidad máxima que puede importar la región.

$$\text{Importación máxima AN} = 10$$

Units: MBD

Consumo AN: es un flujo que, en este caso por simplificación del modelo, representa la demanda, es afectado por el nivel de inventarios con los que cuenta el país, el cual es afectado por una constante de crecimiento de la demanda y por una variable llamada retraso consumo AN.

$$\text{consumo AN} = \text{IF THEN ELSE}(\text{inventario AN} > \text{retraso consumo AN}, \text{retraso consumo AN}, \text{inventario AN})$$

Units: MBD

La ecuación deja ver la relación existente entre el consumo y el nivel de inventarios, de tal manera que si la cantidad de petróleo almacenada en inventarios es mayor que el retraso en consumo (variable que se explica a continuación) entonces se consume la cantidad que esté en retraso en consumo, en caso contrario, se consumirá lo que haya disponible en inventarios.

Consumo Aux AN: es una variable auxiliar que sirve de referencia del consumo a través del tiempo, marca el crecimiento exponencial de la demanda de cada región, su comportamiento depende de un valor inicial de consumo y del parámetro crecimiento.

$$\text{Consumo Aux AN} = \text{Consumo de referencia AN} * \text{crecimiento AN}$$

Units: MBD

Consumo de referencia AN: es una constante que indica el valor inicial del consumo para el inicio de la simulación.

$$\text{Consumo de referencia AN} = 21.232$$

Units: MBD

Crecimiento AN: es una variable dependiente del tiempo que marca el crecimiento del consumo de referencia.

$$\text{crecimiento AN} = \exp(\text{Time} * 4.055e-005)$$

Units: Dmnl

La Figura 4.8 muestra como fue el comportamiento de la demanda en los últimos 10 años, según el consumo de referencia calculado en la ecuación 007.

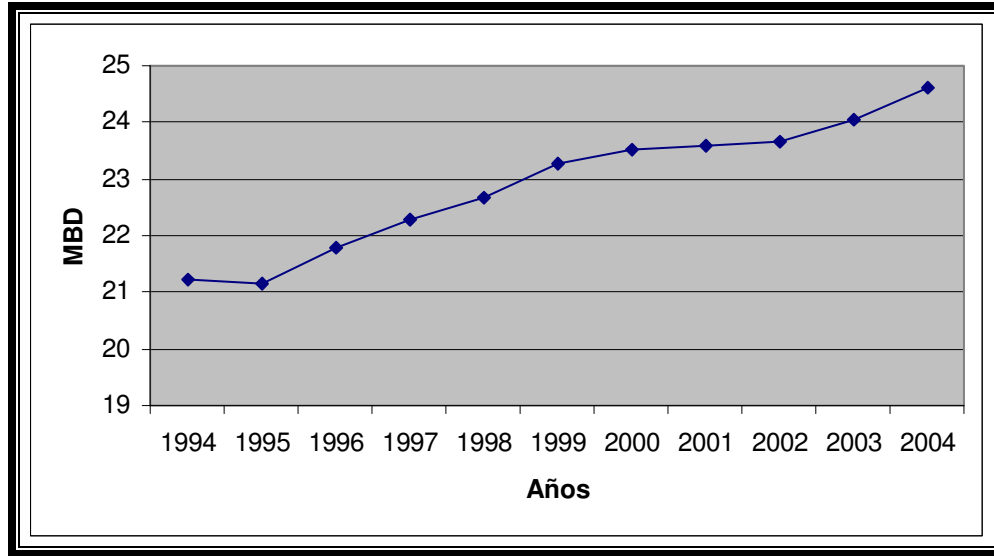


Figura 4.8 Consumo de referencia (América del norte) Fuente: BP Statistical 2004

El valor de crecimiento permite que el consumo de referencia alcance el consumo histórico de los últimos años, que es calculado en base a los datos históricos tomados de BP Statistical 2004. Por ejemplo, para el caso de la región de América del Norte, la demanda de petróleo en el año 1994 fue de 21.232 millones de barriles diarios (MBD). Con este valor, la demanda del 2004 y el tiempo de corrida correspondiente se calcula el parámetro.

$$D_{inicial} = 21.232 \text{ mbd}$$

$$D_{final} = 24.619 \text{ mbd}$$

$$T_{final} = 3650 \text{ días (10 años).}$$

$$D_{inicial} * e^{(constante \text{ de crecimiento}) * T_{final}} = D_{final}$$

De la ecuación anterior se obtiene que la constante de crecimiento es $4.055e-005$

La tabla 4.1 muestra como están conformadas las regiones, su consumo para 1994 y 2004, y la constante de crecimiento.

Región	Demanda 1994 (MBD)	Demanda 2004 (MBD)	Crecimiento
América del Norte	21.232	24.619	4.055e-5
China	3.145	6.684	2.0655e-4
OECD	22.687	24.158	1.7212e-5
NO OECD	19.39	28.251	-6.5147e-5
EX_URSS	4.73	3.729	1.0311e-4

Tabla 4.1 Consumo por región Fuente: *BP Statistical 2004*

Retraso en consumo AN: es una variable auxiliar en la que se emplea una función de retraso de primer orden⁷, la cual indica el retraso de información que ocurre para que se consuma el petróleo, es decir, el retraso que existe desde que se pide, teniendo en cuenta el consumo de referencia, hasta que finalmente se consume. Para este caso se eligió un retraso de 60 días.

$$\text{retraso consumo AN} = \text{SMOOTH}(\text{Consumo Aux AN}, 60)$$

Units: MBD

Insatisfecho AN: Como ya se ha explicado, el **consumo aux AN** sirve como un patrón, mientras que el flujo de consumo muestra como se comportará la demanda dependiendo de los inventarios, es por ello que se hace necesaria otra variable que sirva para ver la diferencia entre ambas y así saber en que momento hay fallas en el suministro, es decir, el nivel de consumo insatisfecho para la región en estudio.

$$\text{Insatisfecho AN} = \text{Consumo Aux AN} - \text{consumo AN}$$

Units: MBD

⁷ La explicación sobre funciones de retraso se encuentra en el Capítulo 2

Tal como se explicó en la variable anterior, los países consumidores necesitan tener información sobre la demanda insatisfecha, para así tomar las medidas necesarias y evitar la falla en los suministros. Es por ello que en esta región se incluye la parte de reservas estratégicas que se explica con más detalle a continuación.

Producción reservas estratégicas AN: es un flujo que muestra el comportamiento de la parte de la producción que es destinada para ser almacenado en las reservas estratégicas. Para este modelo se toma un 20% de la producción esperada⁸.

Producción reservas estratégicas AN=IF THEN ELSE(Reservas Estratégicas AN>=800, 0, Prod esperada RE AN)

Units: MBD

Prod esperada RE AN: es la producción esperada que se destina para las reservas estratégicas, y se expresa como una función del tiempo. Como se ve en la Figura 4.9.

Producción Esperada AN=LookupProduccion Esperada AN (Time)

Units: MBD

⁸ Por simplificaciones del modelo se decidió dividir la producción en 80% para los inventarios y el otro 20% para almacenar en las reservas estratégicas, esto en base a los datos observados en *P Statistical*.

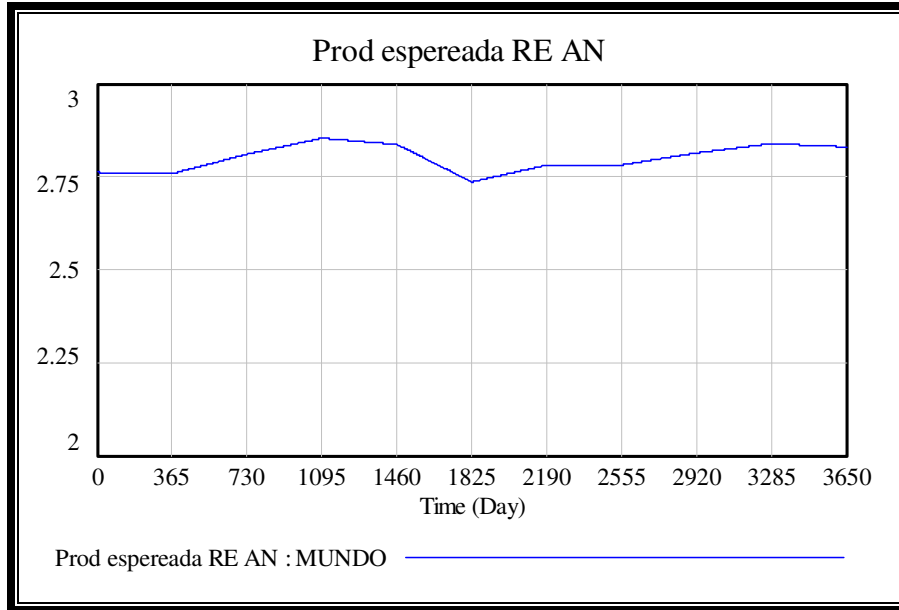


Figura 4.9 Producción esperada para reservas estratégicas AN

Lookup PRE AN: es una variable lookup que muestra la producción esperada para las reservas estratégicas en el tiempo. Los pares de valores están graficados en la Figura 4.10, con datos históricos de la producción en los últimos 10 años. Se tomó el 20% de la producción para almacenar en las reservas estratégicas.

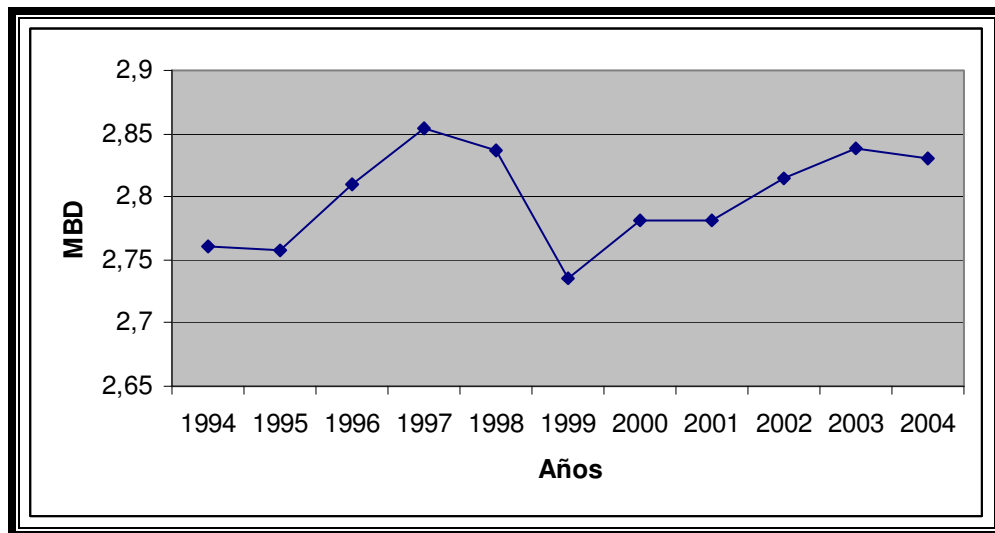


Figura 4.10 Producción Esperada para reservas estratégicas (América del norte) Fuente: BP Statistical 2004

Producción Total AN: es una variable auxiliar que da información sobre la producción total esperada, ya que es la adición de la producción para inventarios y de las reservas estratégicas.

$$\text{Producción Total AN} = \text{Producción AN} + \text{Producción reservas estratégicas AN}$$

Units: MBD

Reservas estratégicas AN: es una variable auxiliar que muestra las cantidades de petróleo que los países almacenan con el fin de usarlo solo en situaciones extremas en los que no pueda ser satisfecha la demanda o que algún shock haga disminuir la producción normal de petróleo. Estas reservas se abastecen con los flujos de producción e importación.

$$\text{Reservas Estratégicas AN} = \text{INTEG}(+\text{Importación RE AN} + \text{Producción reservas estratégicas AN} - \text{consumo de reservas AN}, 50)$$

Units: MBD

RE imp AN: una constante que se refiere a las importaciones que han sido tomadas para las reservas estratégicas.

$$\text{RE imp AN} = 5$$

Units: MBD

Importación RE AN: es un flujo que indica la cantidad que es apartada de las importaciones para ser usadas en las reservas estratégicas. Depende de la cantidad de reservas mínimas. En la ecuación se muestra que si las reservas estratégicas sobrepasan los 50 MBD se deja de importar petróleo para las reservas estratégicas.

$$\text{Importacion RE AN} = \text{IF THEN ELSE}(\text{Reservas Estrategicas AN} \geq 50, 0, \text{RE imp AN})$$

Units: MBD

Reservas mínimas AN: constante que indica la cantidad mínima que deben ser almacenadas en las reservas estratégicas.

$$\text{reservas mínimas AN} = 20$$

Units: MBD

Consumo de reservas AN: es un flujo que muestra el consumo de las reservas estratégicas, las cuales son usadas en situaciones en las que haya falla en suministros. Esta variable depende de otras tal como se ve en la siguiente ecuación.

$$\text{consumo de reservas AN} = (\text{IF THEN ELSE}(\text{retraso de reservas AN} > 0, \\ \text{IF THEN ELSE}(\text{Reservas Estratégicas AN} > \text{reservas mínimas AN}, \\ \text{retraso de reservas AN}, \text{Reservas Estratégicas AN} - \text{reservas mínimas AN}), 0)) * b \text{ AN}$$

Units: MBD

Esta ecuación cumple con dos condiciones, la primera es que solo puede haber consumo si las reservas estratégicas son mayores que las reservas mínimas que pueden almacenarse. La otra condición es que la variable retraso en reservas debe ser mayor que cero, ya que ésta indica si hay falla en la oferta y, por tanto, la necesidad de echar mano a las reservas estratégicas. Si se cumplen ambas condiciones se consumirá de las reservas la cantidad que informe el retraso en consumo.

Retraso en reservas: es una variable auxiliar que muestra la demora que existe para tomar la decisión de hacer uso de las reservas estratégicas luego de conocer que existe un nivel de insatisfacción en el consumo. Se eligió un retraso de primer orden en el que se muestra que la demora en tomar una decisión es de diez días. Dicho valor fue escogido sabiendo que estas decisiones deben tomarse a la brevedad para evitar fallas en el consumo.

$$\text{retraso de reservas AN} = \text{SMOOTH}(\text{Insatisfecho AN}, 10)$$

Units: MBD

Consumo total AN: esta es una variable auxiliar que da información sobre el consumo total de cada región, ya que en ella está la suma de lo consumido de los inventarios y de las reservas estratégicas.

$$\text{Consumo total AN} = \text{consumo AN} + \text{consumo de reservas AN}$$

Units: MBD

- Países Productores

En este subsistema se encuentran 2 regiones mundiales en las que se concentra la mayor parte de la producción mundial: países NO OECD, o no industrializados y la EX_URSS. En la región NO OECD se encuentran los países miembros de la OPEP y otros NO OPEP. En la literatura clásica se agrupan la producción mundial en OPEP y NO OPEP, sin embargo, en este proyecto no se ha hecho de esta manera, ya que en las estructuras propuestas no se manejan cuotas de producción, las cuales son impuestas por la OPEP a sus países miembros, lo cual los distingue de los países NO OPEP, ya que estos no tienen que cumplir con dichas cuotas.

Los países productores se muestran en la parte superior y a la derecha de la Figura 4.3. La estructura que define el comportamiento de los países productores de petróleo de cada región se muestra en la Figura 4.11. Dicha estructura deja ver la relación entre consumo, producción y la manera en que distribuyen sus reservas con el fin de mantener su nivel de consumo.

Se explica a continuación solo las variables que son diferentes del subsistema anterior, para de esa manera destacar como los países productores manejan de forma diferente sus inventarios de petróleo.

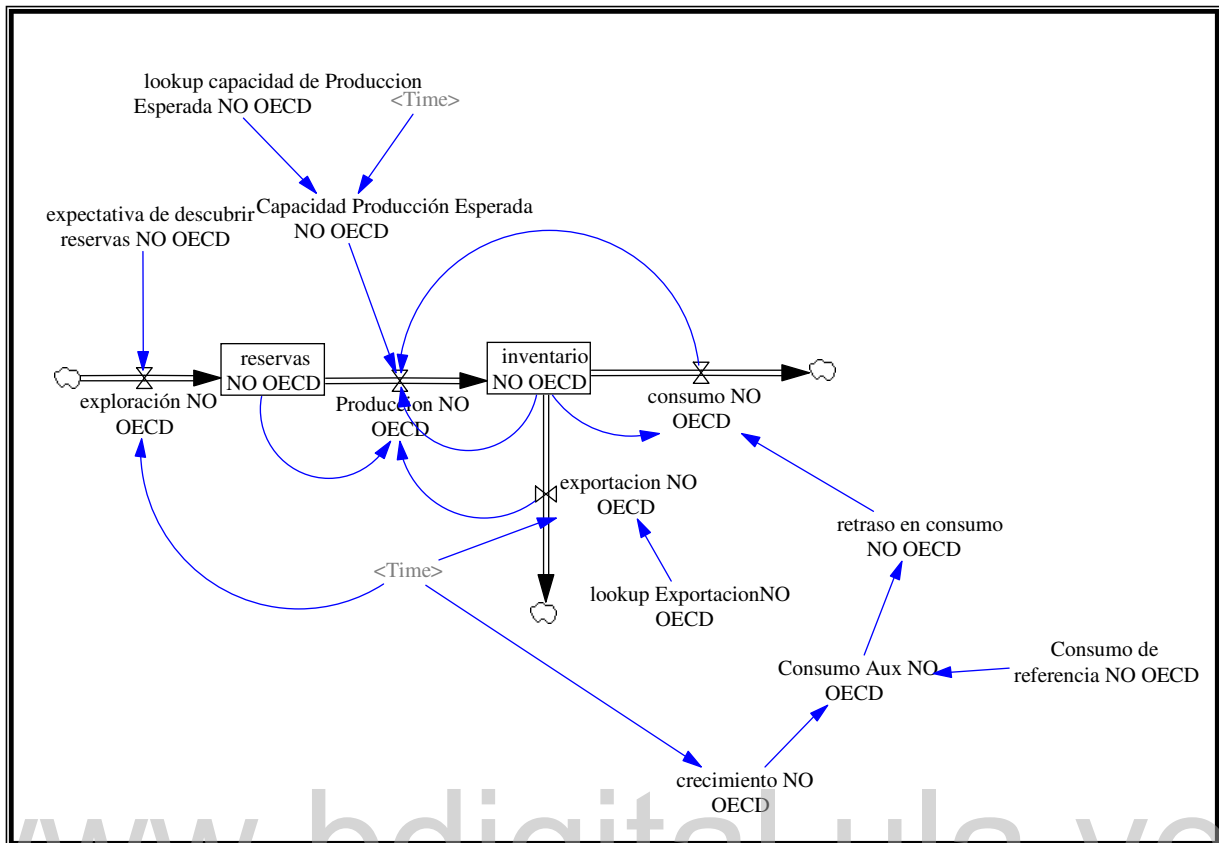


Figura 4.11 Diagrama de flujo de países productores (NO OECD)

La diferencia de un subsistema a otro radica en que los países productores no manejan reservas estratégicas y por simplificaciones del modelo tampoco hacen importaciones, más bien estos países exportan buena parte de su producción, debido a sus altos volúmenes de producción y debido a que concentran la mayor cantidad de reservas probadas del mundo.

Lookup capacidad de producción esperada NO OECD: esta es una variable lookup que muestra la relación entre la producción esperada en el tiempo. Los pares de valores están graficados en la Figura 4.12, con datos históricos de la producción en los últimos 10 años.

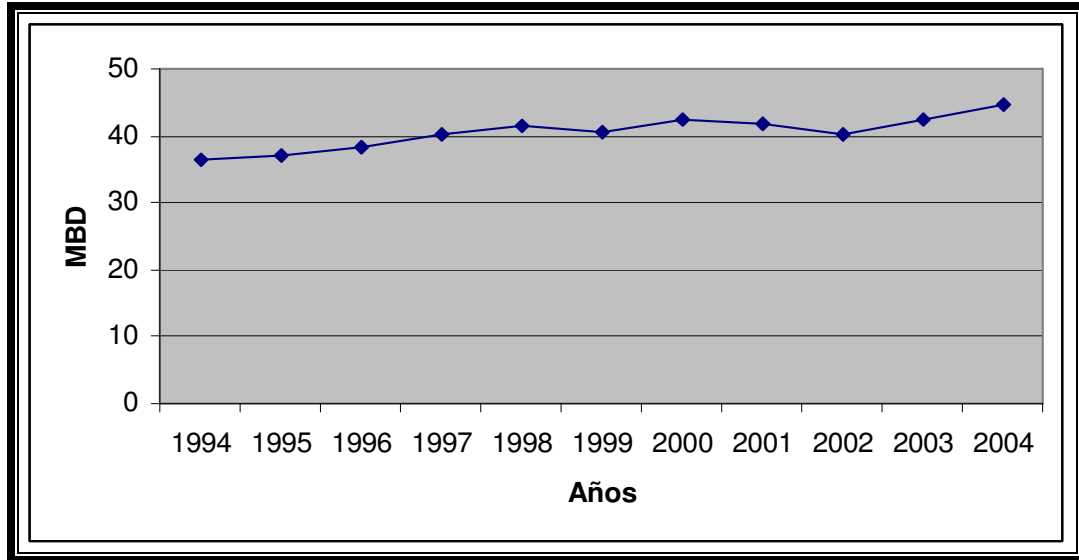


Figura 4.12 Capacidad de Producción Esperada (NO OECD)

Fuente: BP Statistical 2004

Capacidad de producción esperada NO OECD: es una función dependiente del tiempo que afecta la producción de la región. La Figura 4.13 muestra el comportamiento de esta función.

Capacidad de Producción Esperada NO OECD=lookup Producción Esperada NO OECD(Time)

Units: MBD

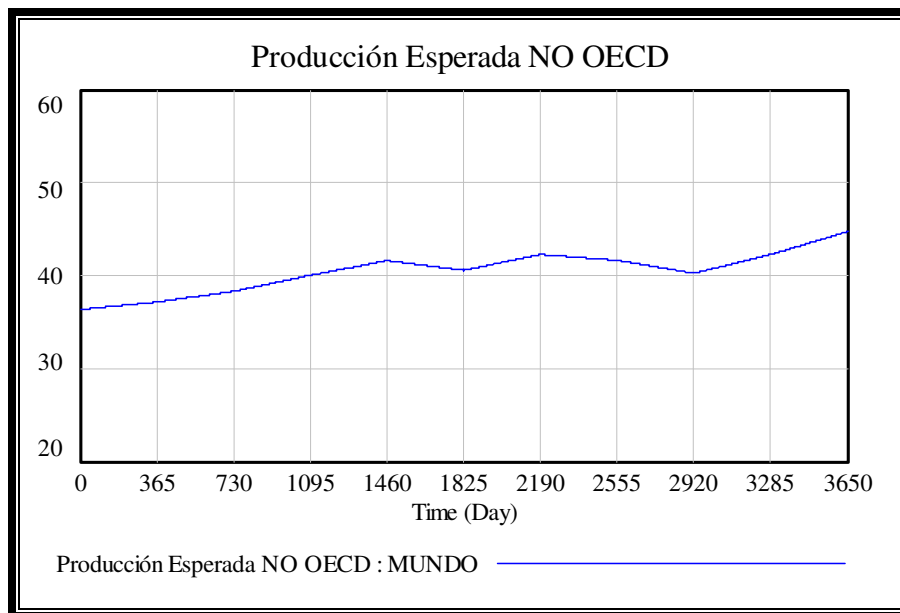


Figura 4.13 Capacidad de Producción Esperada

Producción NO OECD: es un flujo que la producción en el tiempo y que depende del nivel de reservas probadas y de los inventarios.

*Producción NO OECD=IF THEN ELSE(consumo NO OECD
+exportación NO OECD<=Capacidad de Producción Esperada NO OECD
, IF THEN ELSE(Capacidad de Producción Esperada NO OECD<=reservas NO
OECD, consumo NO OECD+exportación NO OECD, inventario NO OECD),
inventario NO OECD)*

Units: MBD

La ecuación anterior muestra la realimentación que existe entre las reservas, la producción y los inventarios. En dicha ecuación deben cumplirse dos condiciones para asegurar la producción. Una de estas es que la capacidad de producción esperada debe ser mayor que las reservas, ya que de lo contrario solo puede producirse lo que esté en inventarios.

La siguiente condición es que la suma de los flujos de consumo y exportación deben ser menores que la capacidad de producción esperada, si esto se cumple se produce la capacidad esperada, si no se producen las cantidades que puedan ser almacenadas en los inventarios.

Lookup Exportación NO OECD: es una variable lookup que muestra la relación entre las exportaciones en el tiempo.

Exportación NO OECD: este flujo indica las cantidades de petróleo que son llevadas a otros países, ya que la producción supera al consumo o demanda interna. Esta variable envía información a la producción con el fin de que la demanda de otros países sea satisfecha. La Figura 4.14 muestra el comportamiento de este flujo.

exportación NO OECD=lookup Exportación NO OECD(Time)

Units: MBD

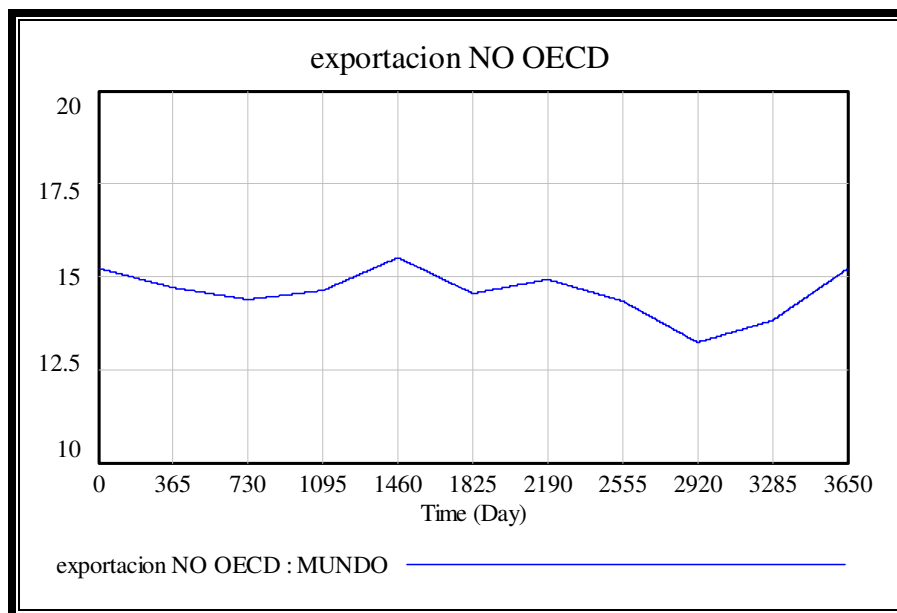


Figura 4.14 Exportaciones de la NO OECD

- Oferta mundial

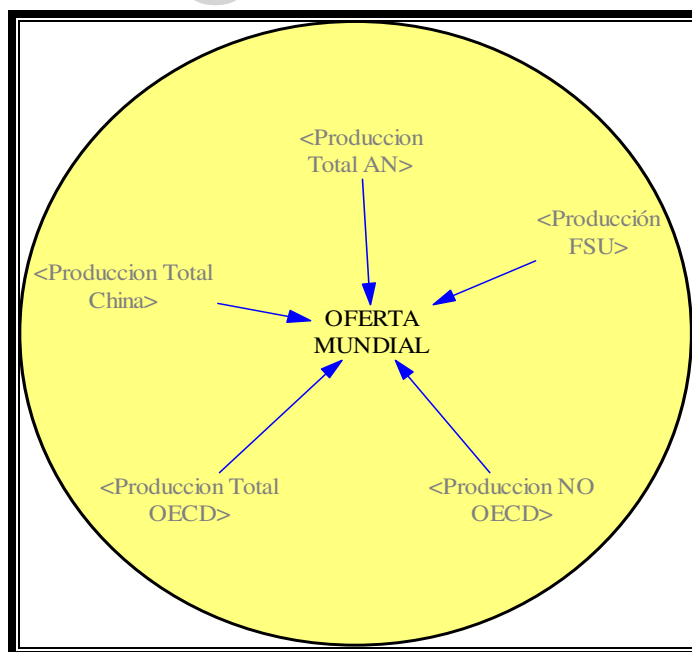


Figura 4.15 Oferta Mundial

Tal como se muestra en la Figura 4.15 este subsistema concentra la producción de todas las regiones del mundo.

OFERTA MUNDIAL=Producción FSU+Producción NO OECD

+Producción Total AN+Producción Total China+Producción Total OECD

Units: MBD

- Demanda mundial

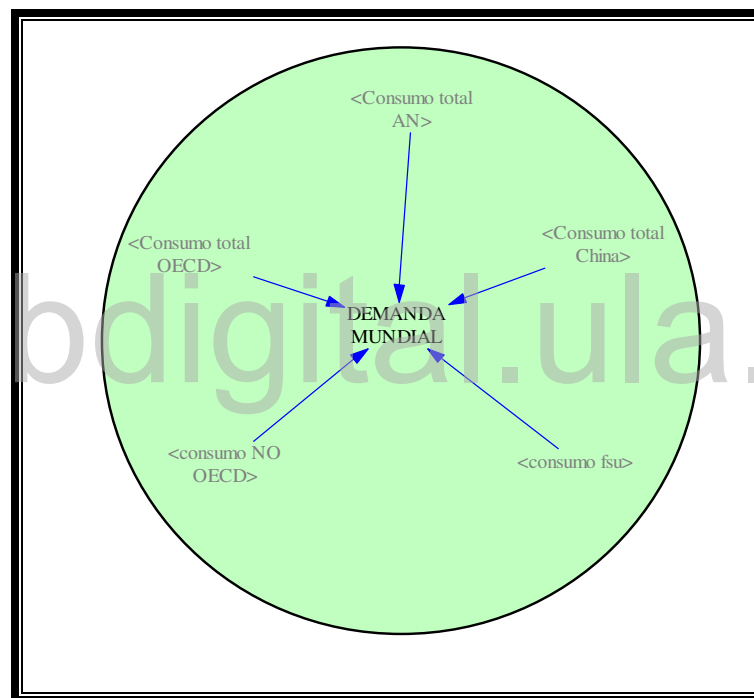


Figura 4.16 Demanda Mundial

Este subsistema es la suma de todas las tasas de consumo de cada región del mundo explicada en el modelo, esto se nota en la Figura 4.16.

DEMANDA MUNDIAL=consumo fsu+consumo NO OECD+

Consumo total AN+Consumo total China+Consumo total OECD

Units: MBD

4.4 Conclusiones

En este capítulo se desarrollaron las fases de conceptualización y formulación de un modelo de dinámica de sistemas para representar la estructura de producción del mercado petrolero mundial, en el que se da principal atención al consumo, producción y manejo de inventarios, dejando a un lado los precios por razones de tiempo y alcance del proyecto. Ello se logró mediante el desarrollo del diagrama causal y el diagrama de flujo. Luego se mostraron las ecuaciones matemáticas del modelo en el formato de Vensim, para los diferentes subsistemas en las que se dividió la estructura de producción mundial.

El modelo desarrollado se basa en la interacción de elementos como la producción, consumo y manejo de inventarios en distintas regiones, que fueron divididas en países consumidores y productores, con el objetivo de observar la importancia de estos elementos en el mercado petrolero y generar estructuras que reflejen la dinámica de la producción y consumo petrolero.

En el capítulo siguiente se lleva a cabo la fase de análisis y evaluación en donde se estudia, a través de la simulación, el comportamiento del modelo propuesto.

Capítulo 5

Análisis y evaluación de resultados

5.1 Introducción

En este capítulo se procede al análisis y evaluación de algunos resultados obtenidos con el modelo de simulación propuesto en el capítulo anterior. En la sección 5.2 se presentan algunos resultados obtenidos de corridas del modelo general. Se muestran las trayectorias de las variables relevantes del sistema generadas por la corrida de la simulación, lo cual permite realizar una evaluación del modelo. Luego, en la sección 5.3, se presentan distintos escenarios de prueba, con sus respectivas justificaciones, en donde se incluyen las principales trayectorias producidas por la simulación, así como también las conclusiones de cada prueba.

En los escenarios de prueba también se muestran algunas políticas alternativas que se hacen con el objetivo de evaluar la sensibilidad del modelo.

5.2 Análisis de resultados

En esta sección se presentan las trayectorias obtenidas con la simulación de estructuras genéricas de producción y consumo petrolero. Mediante estas trayectorias pueden verse la interacción entre las diferentes variables y además permiten tener una visión del comportamiento de los elementos fundamentales del sistema.

Se presenta una corrida para cada subsistema¹ del modelo, mostrando la dinámica de las variables relevantes y se explican cada una de ellas.

¹Los subsistemas que forman parte del modelo fueron explicados en el Capítulo 4

5.2.1 Países consumidores

El análisis y evaluación de las estructuras genéricas se presentan en esta sección. En primer lugar se presenta la validación del modelo, en donde se realiza la simulación base y comparamos el comportamiento de los resultados obtenidos con los datos históricos obtenidos de *BP Statistical 2004*.

En la Tabla 5.1 se muestra los parámetros para las diferentes regiones consumidoras, las cuales tienen la misma estructura genérica.

Parámetros	Regiones		
	América del Norte	China	OECD
Reservas Probadas (MB)	101.9	16.3	118.7
Inventarios (MB)	270	200	400
Reservas Estratégicas (MB)	50	10	40
Consumo de referencia (MBD)	21.232	3.145	22.687
Importación máxima (MBD)	10	2.5	13

Tabla 5.1 Parámetros para diferentes regiones consumidoras

En la Figura 5.2 se muestra el diagrama de flujo de los países consumidores, en el se encuentran las 3 regiones mundiales con mayores niveles de consumo.

En la Figura 5.3 se muestra el comportamiento de las *reservas probadas* de la región consumidora de América del Norte, para la simulación base.

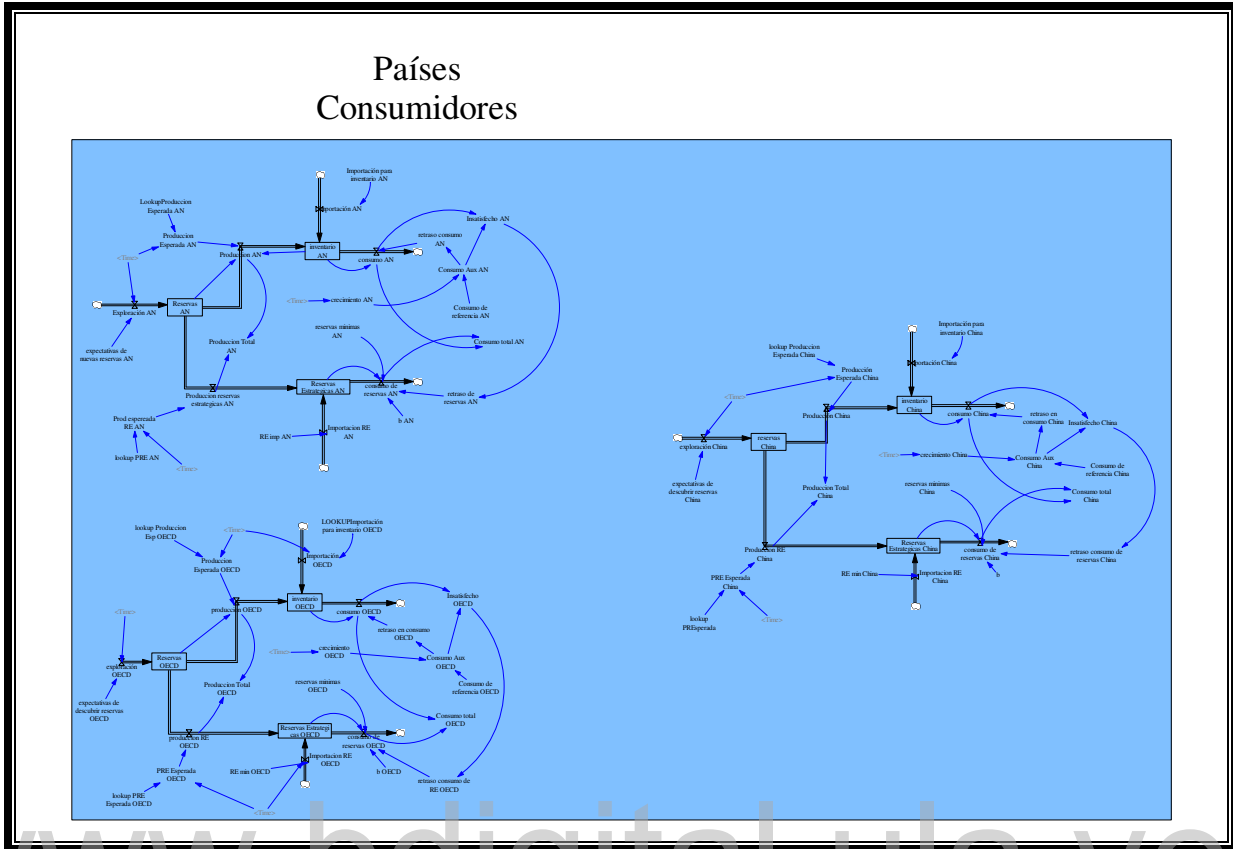


Figura 5.2 Diagrama de flujo de regiones consumidoras

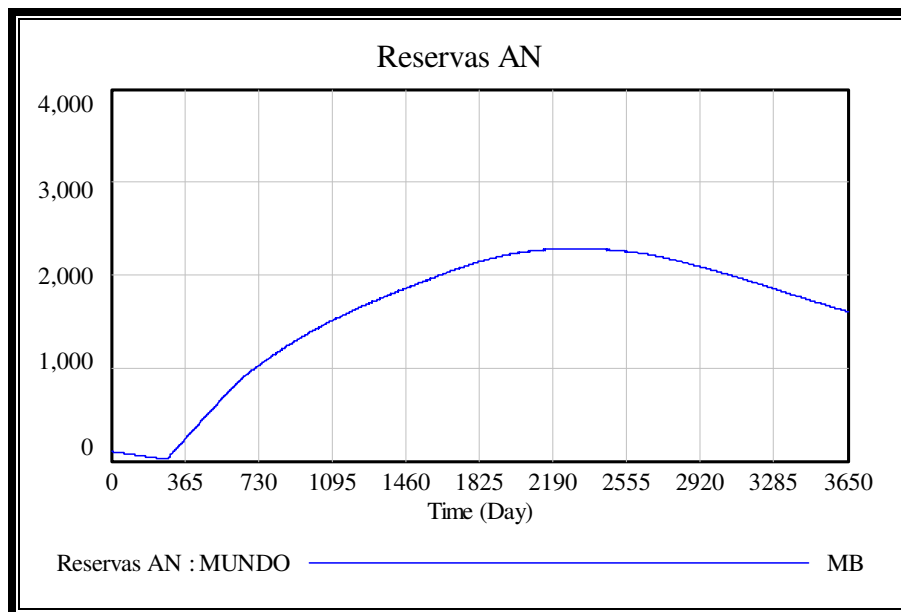


Figura 5.3 Dinámica de reservas probadas de América del Norte

Como se observa en la Figura 5.3 las *reservas probadas* tienden a crecer. Sin embargo, luego comienzan disminuir, esto debido a los cambios en la producción. Sin embargo, se mantienen dentro de ciertos niveles debido a las exploraciones para conseguir nuevas reservas.

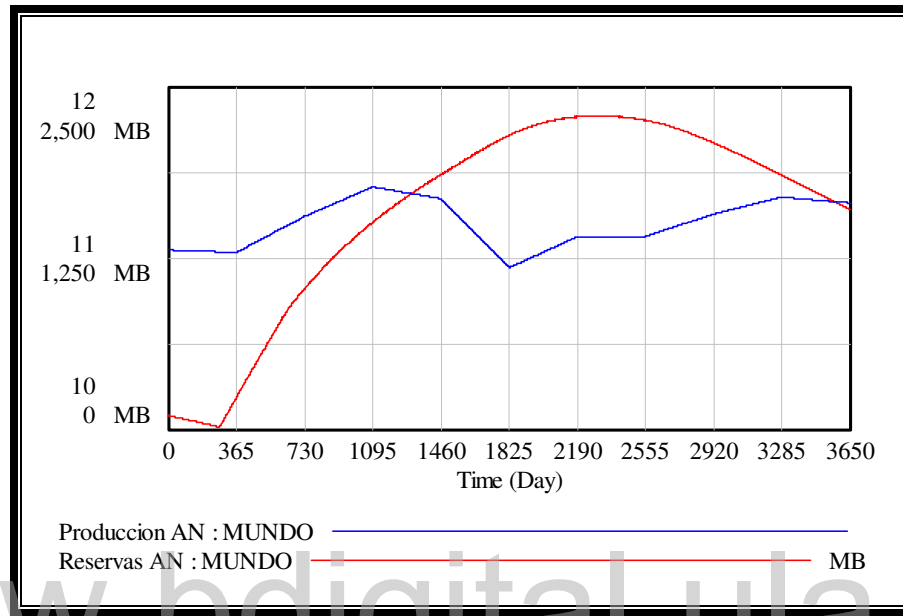


Figura 5.4 Relación entre reservas y producción

En la Figura 5.4 se muestra la relación entre las *reservas probadas* y la *producción*. Allí puede notarse como la producción sube cuando los niveles de *reservas probadas* aumentan. También se cumple lo contrario, si las reservas disminuyen la producción también, y es en esos momentos en que los países consumidores recurren a las importaciones con el fin de satisfacer el consumo interno.

En la Figura 5.5 se muestra como evolucionan las cantidades de petróleo que son almacenados en los *inventarios*, en la que puede notarse que la acumulación en los *inventarios* es alta, pero disminuye debido a los aumentos del *consumo* en la región.

Sin embargo, a pesar de la disminución que ocurren en los inventarios, estos se mantienen en un cierto nivel mínimo², el cual es suficiente para tratar de satisfacer al menos la demanda.

² Véase el Capítulo 4

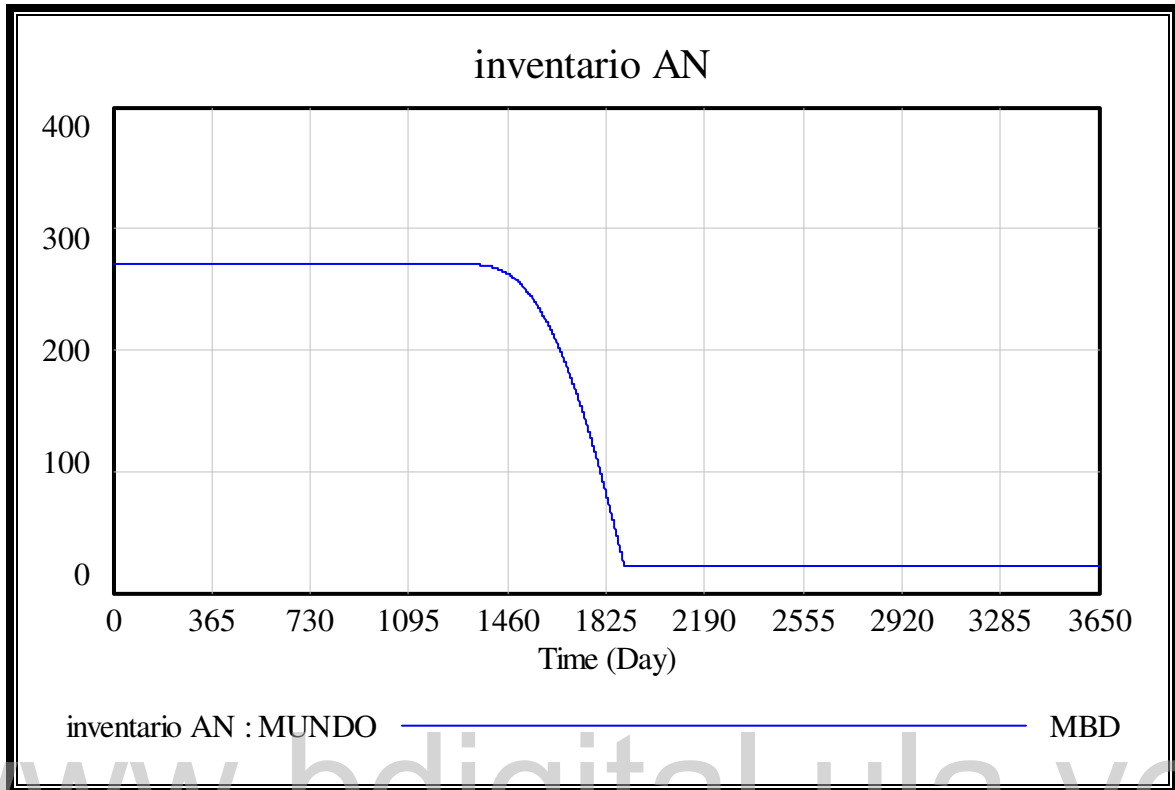


Figura 5.5 Inventarios de América del Norte

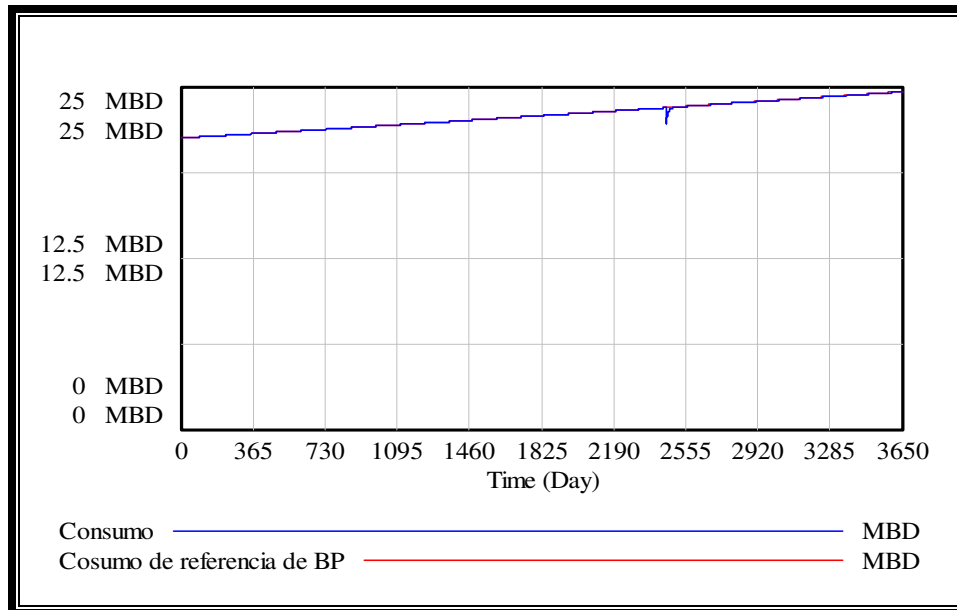


Figura 5.6 Comparación de consumo

En la Figura 5.6 se hace la comparación del consumo de referencia, el cual es tomado de datos históricos de *BP Statistical*, con el consumo que es obtenido al hacer la corrida del modelo general. Puede observarse un pico en la trayectoria del consumo generado por el modelo, esto es debido a que en ese momento hay demanda insatisfecha, además está actuando una función de retraso³ que considera las previsiones que toman los países para satisfacer su consumo.

La Figura 5.7 muestra la evolución temporal del consumo insatisfecho de la región consumidora de América del norte.

Según el modelo propuesto, hay dos fuentes para satisfacer el consumo, primeramente con el petróleo almacenado en los inventarios, y en caso de que este no sea suficiente, se recurre a las reservas estratégicas. Es por ello, que tal y como se muestra en la Figura 5.6, se toma de las reservas estratégicas las cantidades insatisfechas. La pequeña diferencia que puede observarse es debido al retraso que existe en tomar la decisión de consumir las reservas estratégicas.

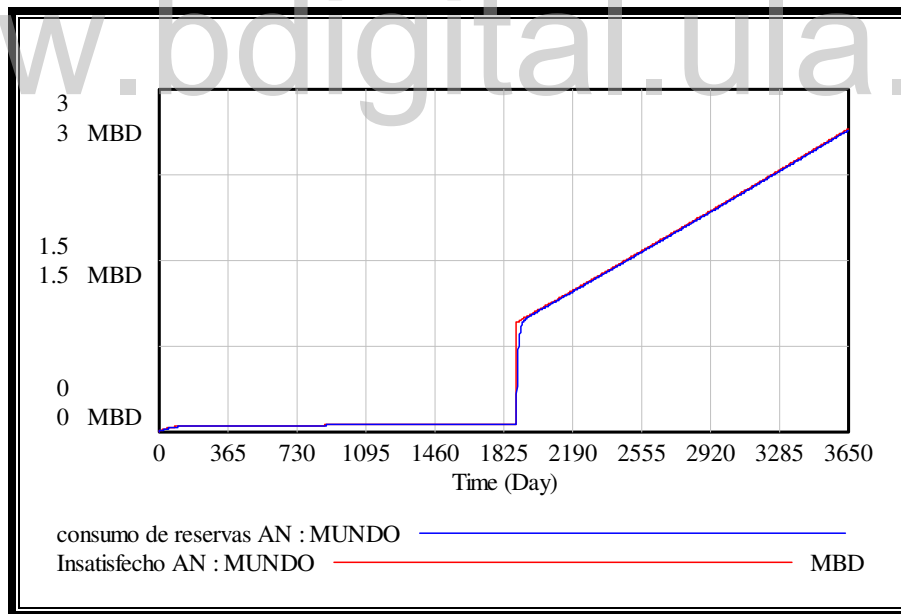


Figura 5.7 Consumo Insatisfecho de América del Norte

³ Función de retraso implementada en el programa Vensim. La justificación de este retraso se encuentra en el Capítulo 4.

En la Figura 5.8 puede verse el comportamiento del nivel de reservas estratégicas en comparación con el consumo de dichas reservas. En ella se puede notar que cuando no hay consumo de reservas estratégicas, éstas tienden a crecer considerablemente. Pero cuando hay consumo insatisfecho, lo cual genera el consumo de las reservas, entonces comienzan a mantenerse en su nivel mínimo de almacenamiento.

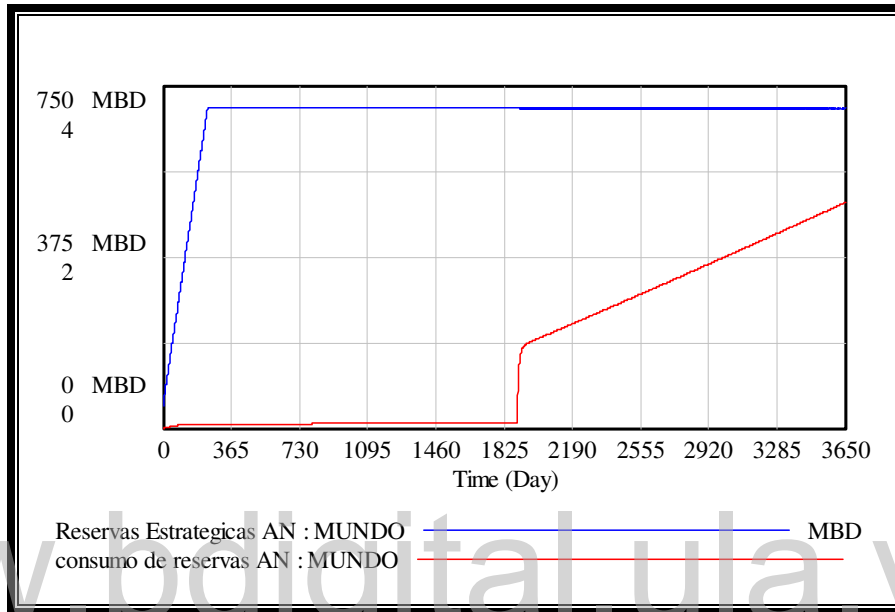


Figura 5.8 Relación entre el nivel de reservas estratégicas y su consumo

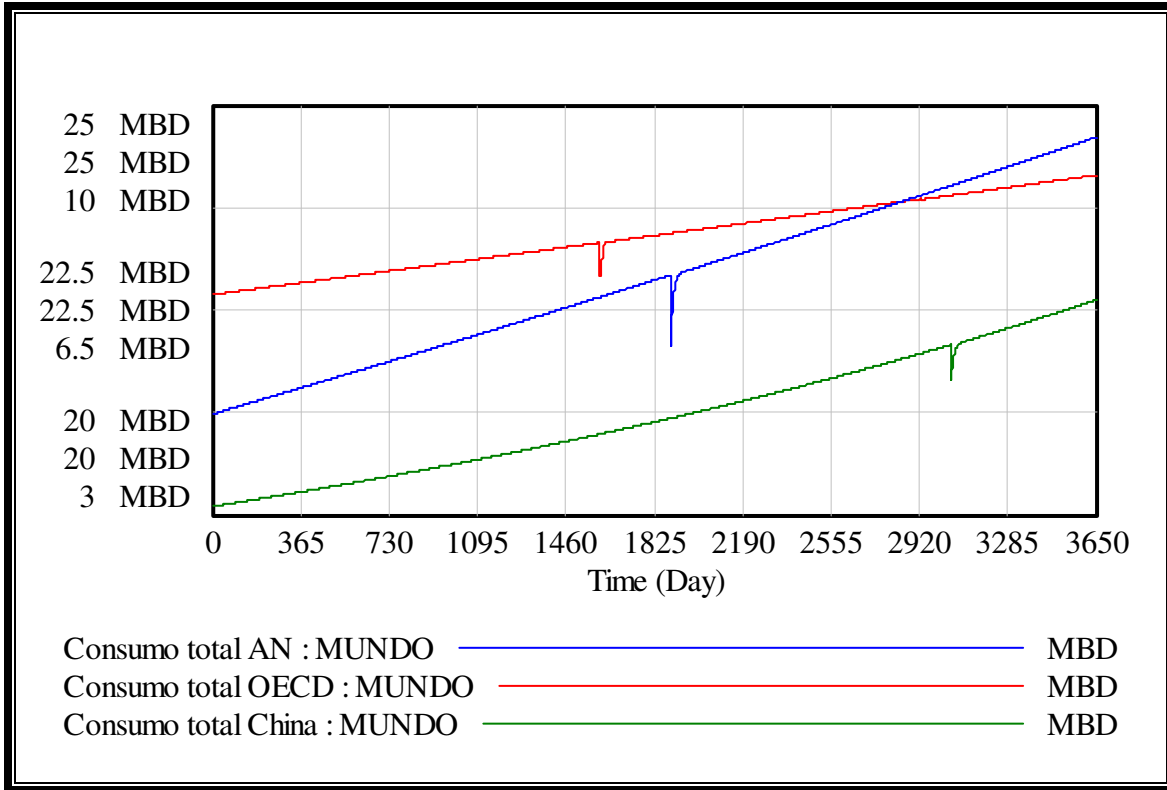


Figura 5.9 Comparación de las regiones consumidoras

En la Figura 5.9 se muestra la dinámica del consumo en las distintas regiones consumidoras propuestas en el modelo. Puede observarse que la demanda en estas regiones tiene una tendencia a crecer en los últimos años. Los picos que se ven en las trayectorias nos indica el instante de tiempo en que hay consumo insatisfecho.

5.2.2 Países productores

En esta sección se presenta la dinámica de los países productores⁴ y las distintas trayectorias de las variables más importantes y las que se diferencian del subsistema analizado en la sección anterior.

⁴ Se usa la región productora NO OECD con el fin de explicar las diferentes trayectorias de esta sección

Parámetros	Regiones	
	NO OECD	FSU
Reservas Probadas (MB)	500	81
Inventarios (MB)	29	10
Exportación (MBD)	15.23	2.531
Consumo de referencia (MBD)	19.39	4.73
Producción (MBD)	34.616	7.261

Tabla 5.10 Parámetros para diferentes regiones productoras

La Tabla 5.10 muestra el valor de los distintos parámetros de las regiones productoras de petróleo.

En la Figura 5.11 se muestra el diagrama de flujo de este subsistema, en el cual se encuentran los países con mayor producción petrolera a nivel mundial.

En este subsistema se le da mayor importancia a la producción y al manejo de los inventarios, que a diferencia del subsistema anterior, solo son abastecidos por la producción, y para este subsistema, los niveles de inventario se distribuyen para el consumo interno y las exportaciones del crudo.

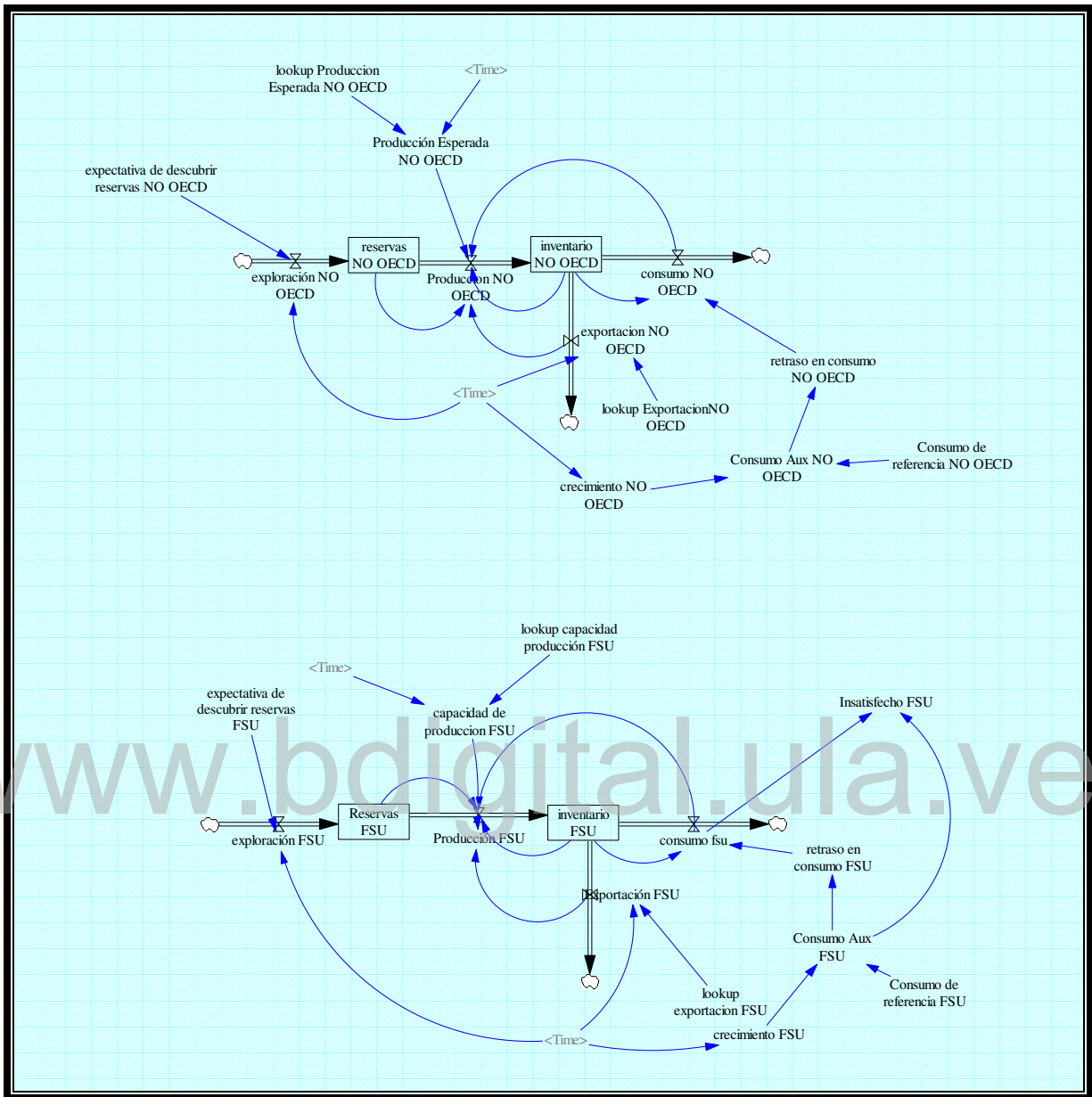


Figura 5.11 Diagrama de flujo de regiones productoras

La Figura 5.10 muestra el comportamiento de las reservas probadas de la región NO OECD, es decir, los países no industrializados, entre los cuales están incluidos todos los países miembros de la OPEP, por tanto la concentración de reservas y el nivel de producción es mayor en esta región en comparación con las demás que forman parte de la estructura general del modelo.

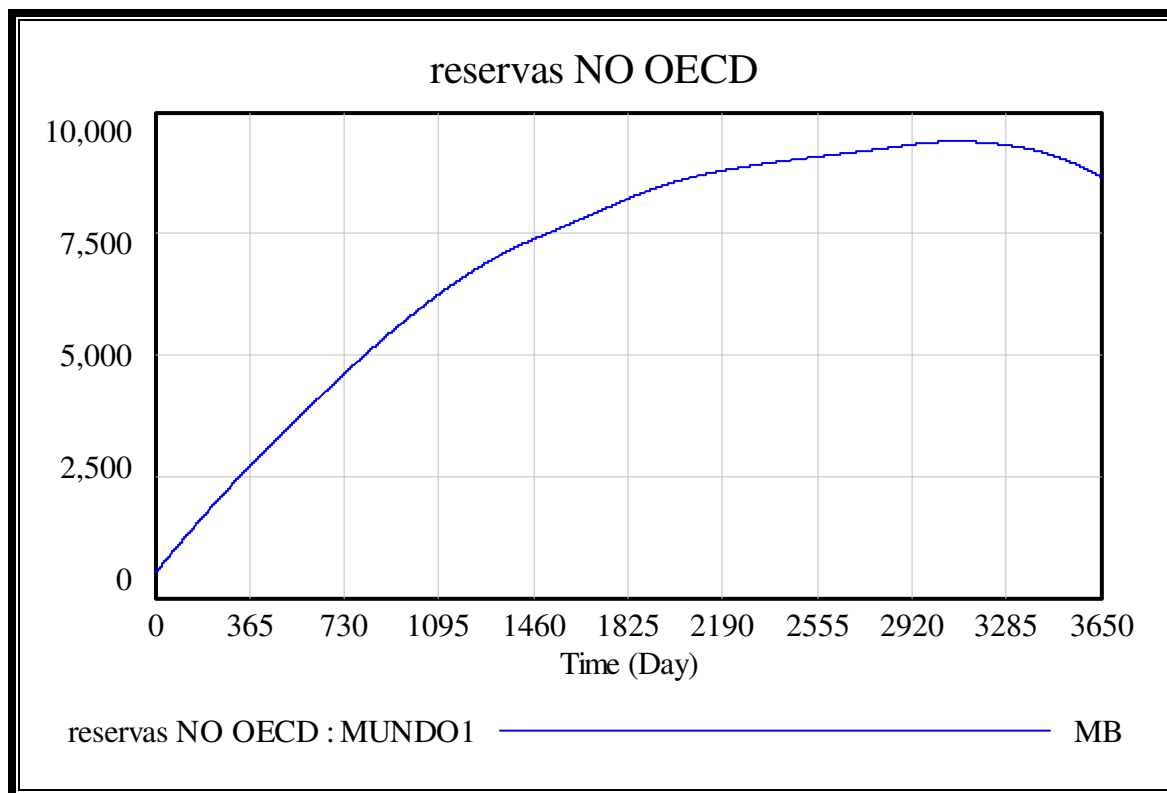


Figura 5.10 Reservas Probadas de NO OECD

A través del gráfico puede notarse como el nivel de reservas es bastante alto, su tendencia es a crecer, ello como ya se ha explicado debido a la mayor concentración y expectativas de encontrar nuevas reservas en esta región.

La Figura 5.11 muestra la relación entre las reservas y la producción.

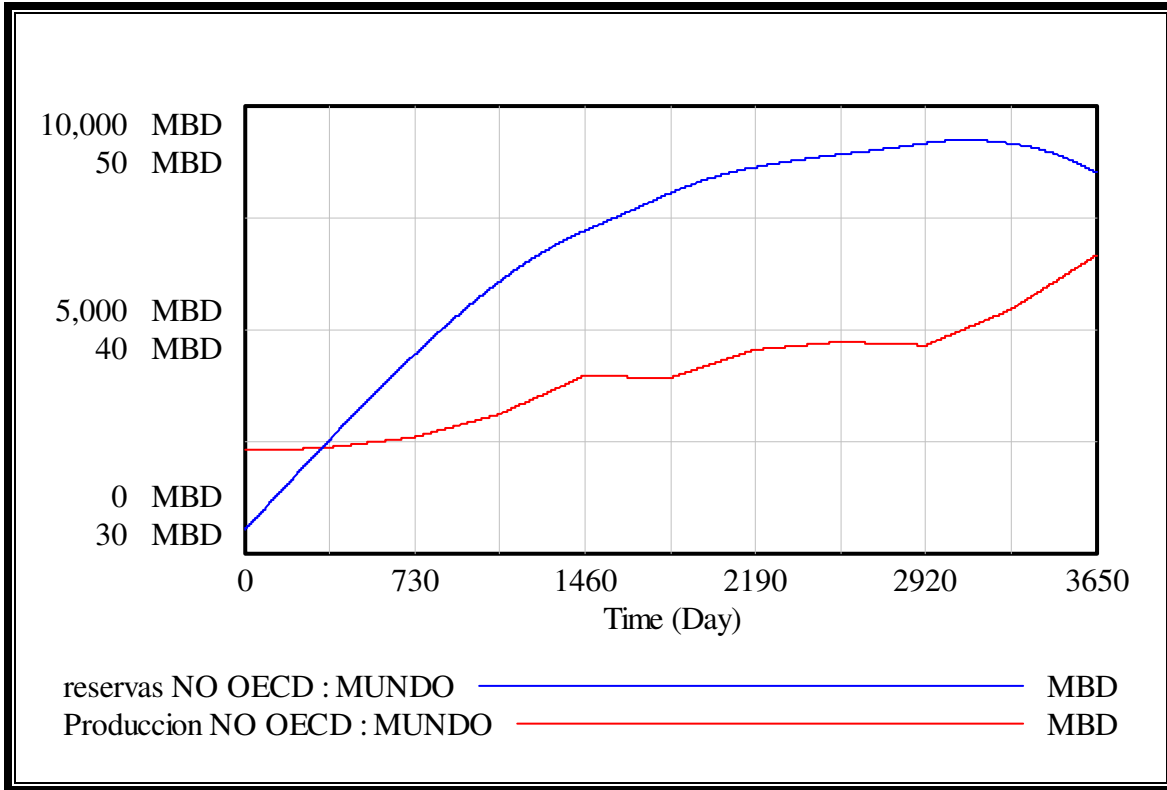


Figura 5.11 Relación entre reservas probadas y producción

Este gráfico muestra que el crecimiento de las reservas es no depende de los cambios en la producción, ya que a pesar de los aumentos de producción en distintos instantes de tiempo, las reservas mantiene su ritmo creciente.

En la Figura 5.12 se observa algo interesante sobre la producción de esta región. En ésta se muestra la diferencia existente entre la capacidad de producción y la producción de la región.

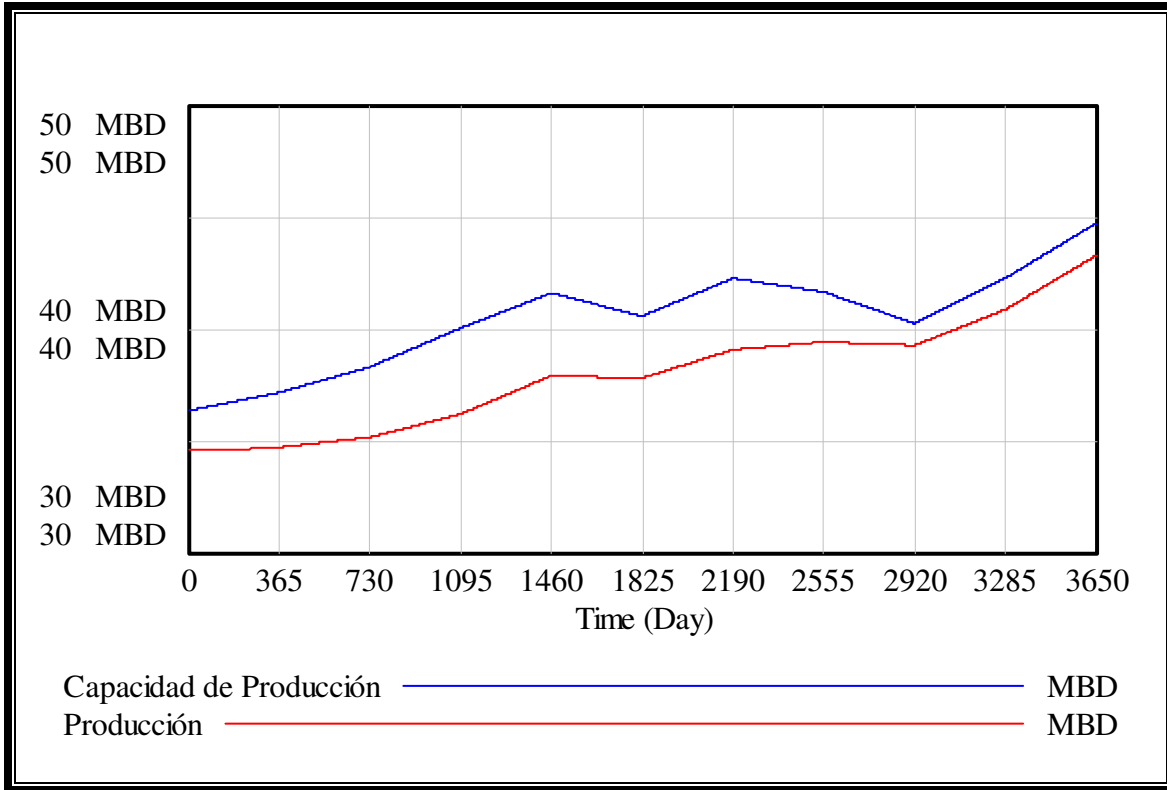


Figura 5.12 Diferencia entre capacidad de producción y producción

La diferencia de las trayectorias radica en que la región en general no produce al máximo su capacidad de producción. Sin embargo, es bien sabido que la mayoría de los países están alcanzando su pico de producción, pero países del Oriente Medio como Arabia Saudita tienen una capacidad de producción mayor que su oferta, y ya que ésta forma parte de la región que ejemplifica los países productores, es de esperarse que la diferencia que se nota en la Figura 5.12 sea proveniente de la producción excedente de Arabia Saudita.

En vista de lo antes mencionado en la Figura 5.13 se muestra el excedente en producción (también llamada producción ociosa) de la región NO OECD. De esto podemos concluir que se dispone de una cantidad de millones de barriles que pueden ser usados para satisfacer futuros aumentos de la capacidad de producción o para calmar al mercado en alguna situación en las que pueda haber fallas de suministro importantes causadas por algún *shock*.

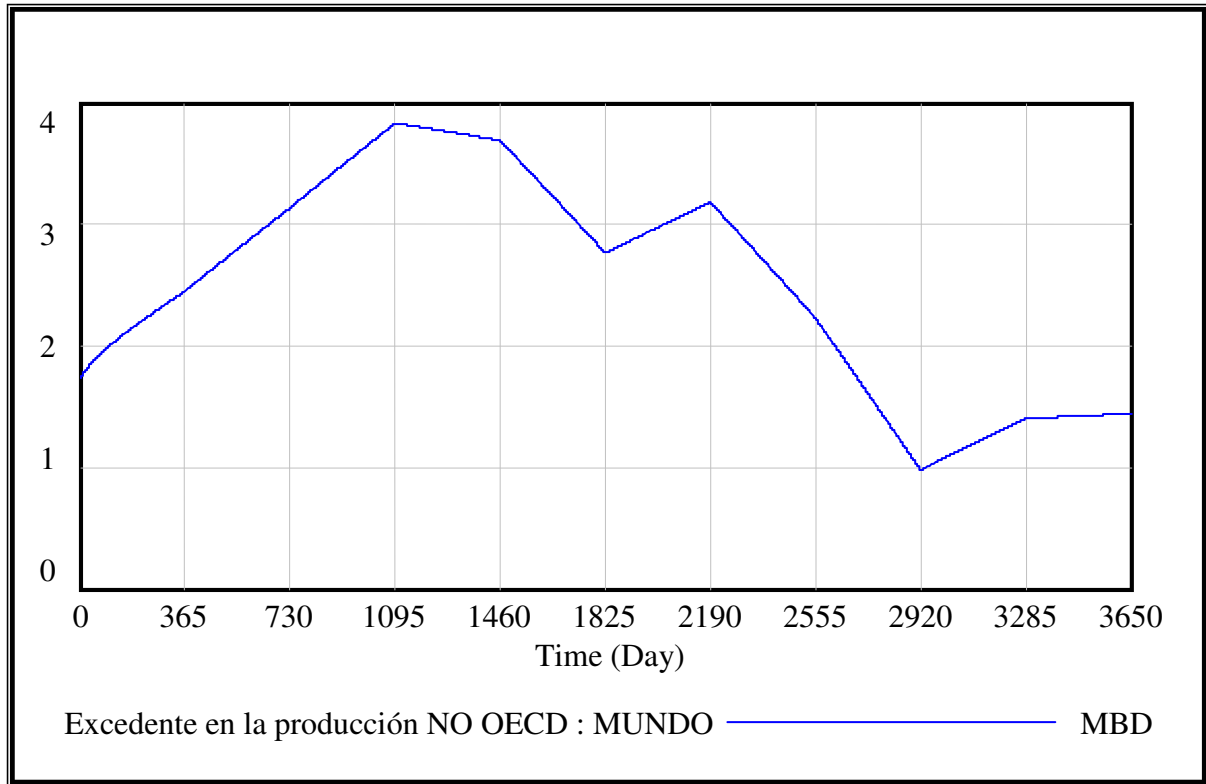


Figura 5.13 Excedente en producción NO OECD

En los países productores se toma parte de las cantidades de crudo que son almacenadas en los inventarios para exportar el petróleo que requieran los países con los cuales se mantengan relaciones comerciales.

Como se muestra en la Figura 5.14 la exportación de la región se mantiene en un rango de valores, lo cual parece indicar que no ha habido grandes cambios en la política de exportación en los últimos 10 años.

Las exportaciones son generadas debido a los altos niveles de producción de los países netamente productores. En la Figura 5.15 se hace una comparación entre el consumo y la producción de los países industrializados, y se muestra como la producción supera notablemente al consumo interno.

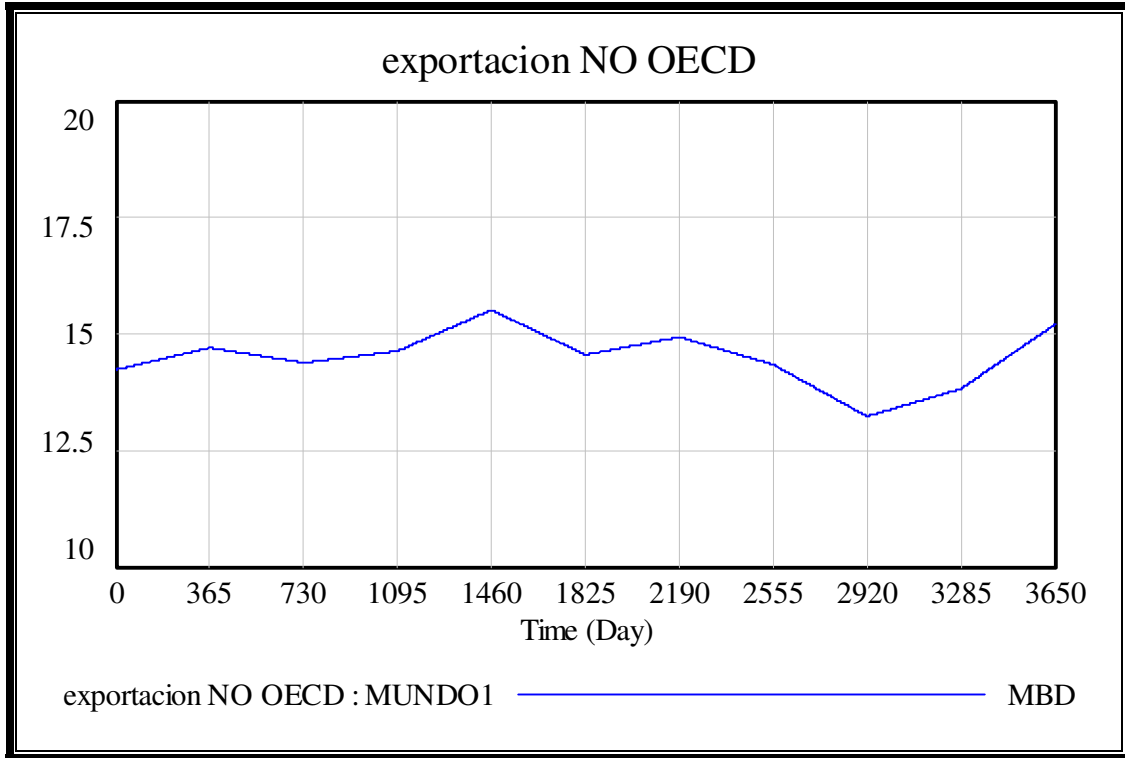


Figura 5.14 Exportación de la región NO OECD

www.bdigital.ula.ve

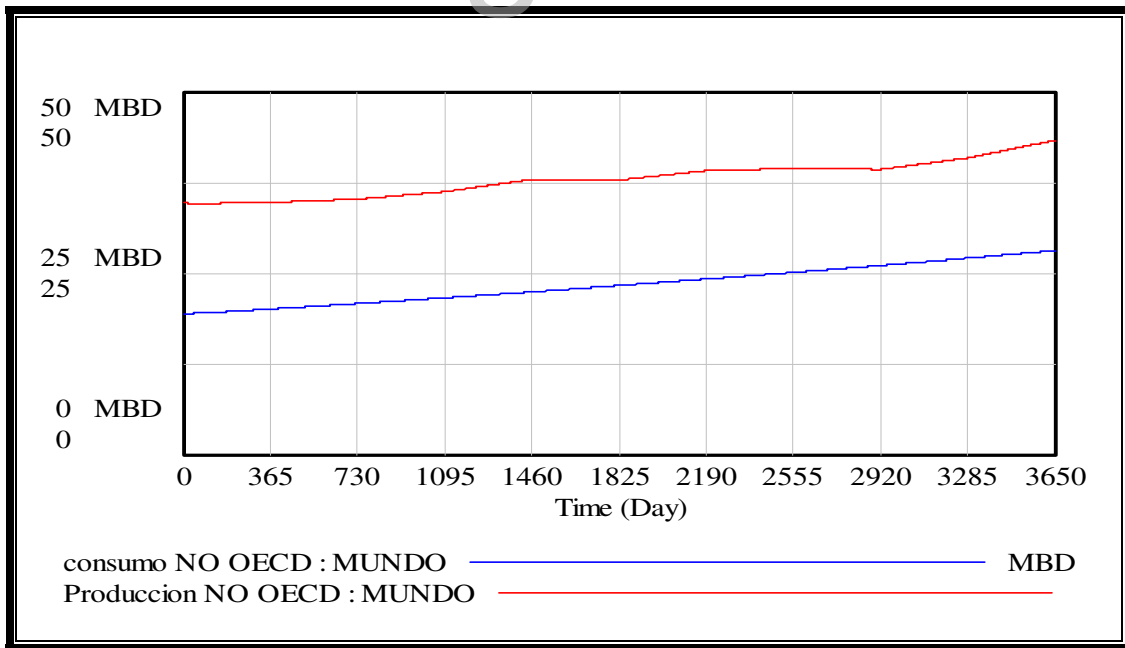


Figura 5.15 Diferencia entre producción y consumo

Como se nota en el gráfico anterior, la diferencia notable entre lo que se produce y el consumo interno, es lo que genera la exportación de crudo a otros países. Sin embargo, no todo es exportado, ya que es necesario mantener un cierto nivel de inventarios.

Es de destacar que en esta región, por todo lo que ya se ha explicado, no hay consumo insatisfecho como en el subsistema explicado en la sección anterior. Esto se evidencia en la Figura 5.16.

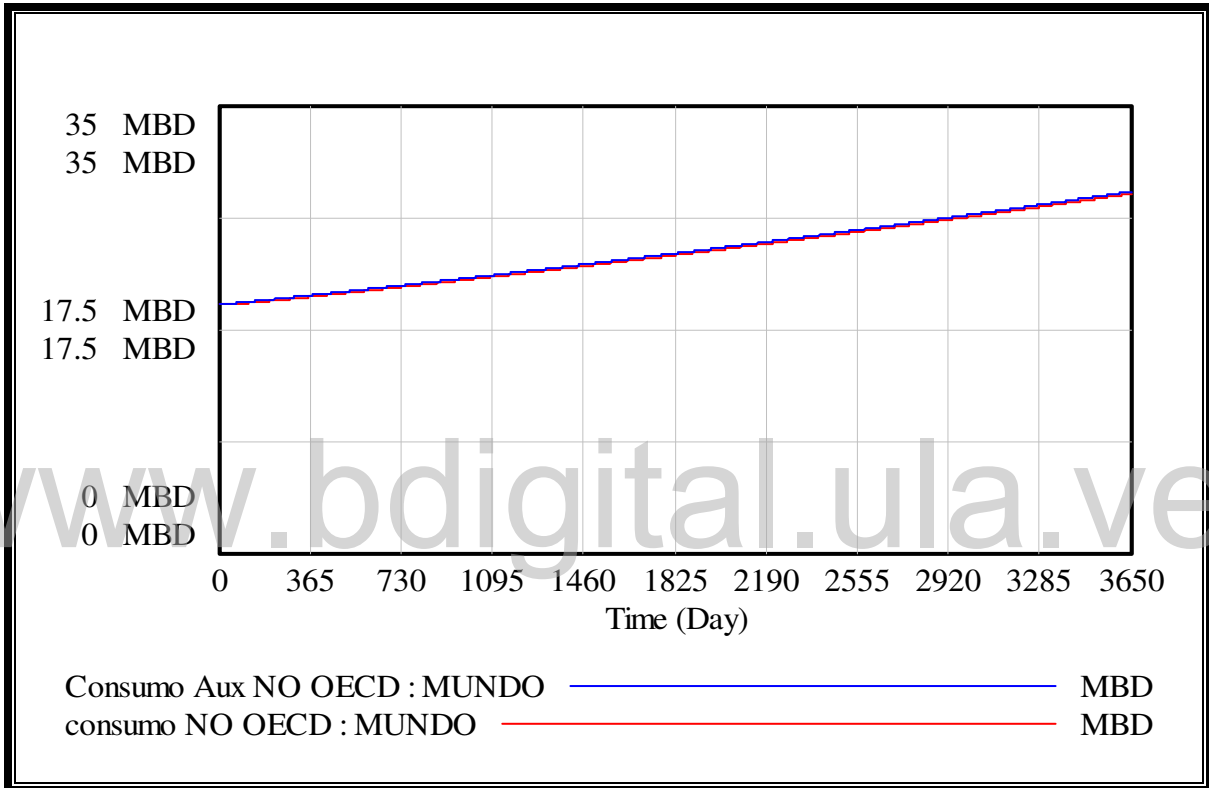


Figura 5.16 Semejanza entre consumo simulado y consumo de referencia

El gráfico anterior permite hacer una validación del modelo propuesto, ya que se ajusta a la dinámica del sistema real, reproduciendo de esta manera la trayectoria del consumo de crudo en los países productores.

La Figura 5.17 muestra el crecimiento en la producción en las regiones con mayores niveles de producción, ello es de gran importancia ya que mantienen el equilibrio entre la oferta y la demanda.

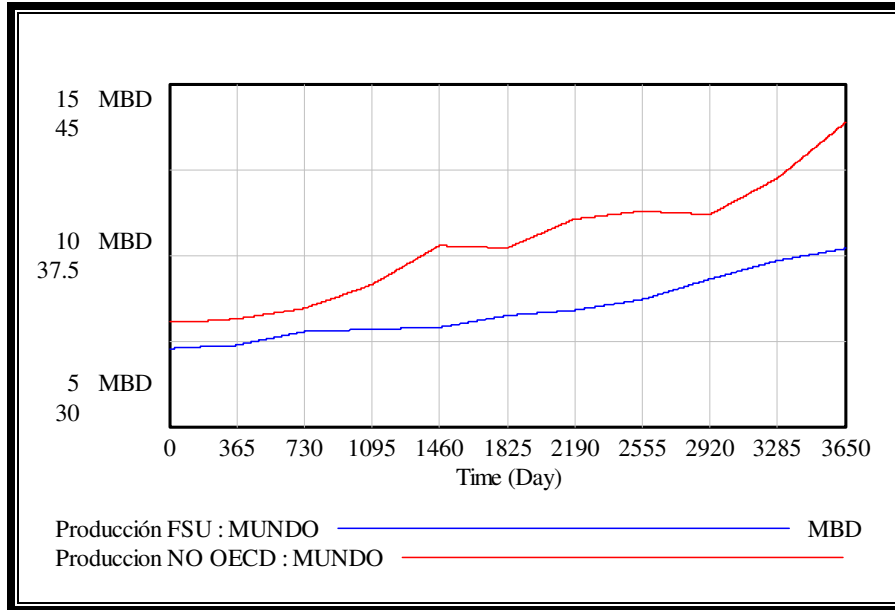


Figura 5.17 Comparación de oferta en las regiones productoras

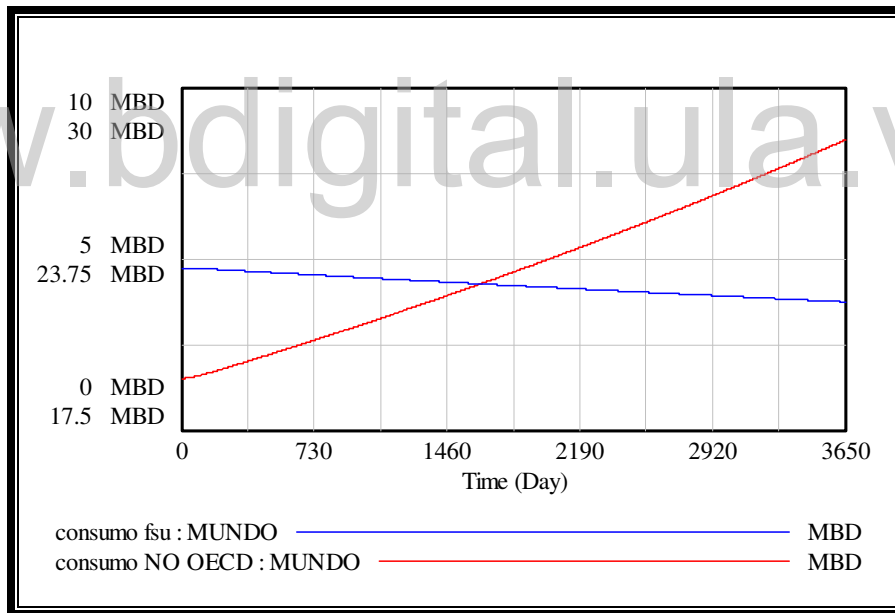


Figura 5.18 Consumo de las regiones productoras

La Figura 5.18 muestra una comparación del consume en las regiones productoras, observándose una tendencia a la baja en la región FSU o Ex Unión Soviética. Mientras la demanda en los países NO OECD ha seguido creciendo en los últimos tiempos.

5.2.3 Oferta mundial

En esta sección se presenta el comportamiento de la oferta mundial en los últimos años. en este subsistema se agrupan todas las regiones, tanto productoras como consumidoras. En la Figura 5.19 se muestra el diagrama de flujo de la oferta mundial.

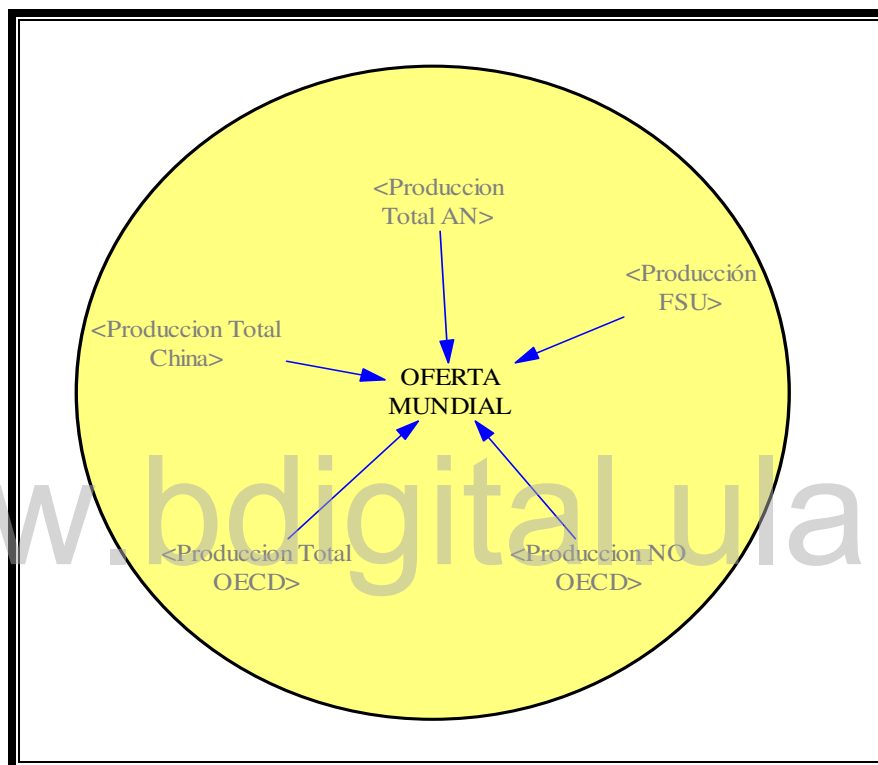


Figura 5.19 Diagrama de flujo de oferta mundial

En la Figura 5.20 se observa la dinámica de la oferta mundial petrolera. Puede notarse que la producción ha seguido aumentando en los últimos tiempos, ello debido a el crecimiento de la demanda mundial.

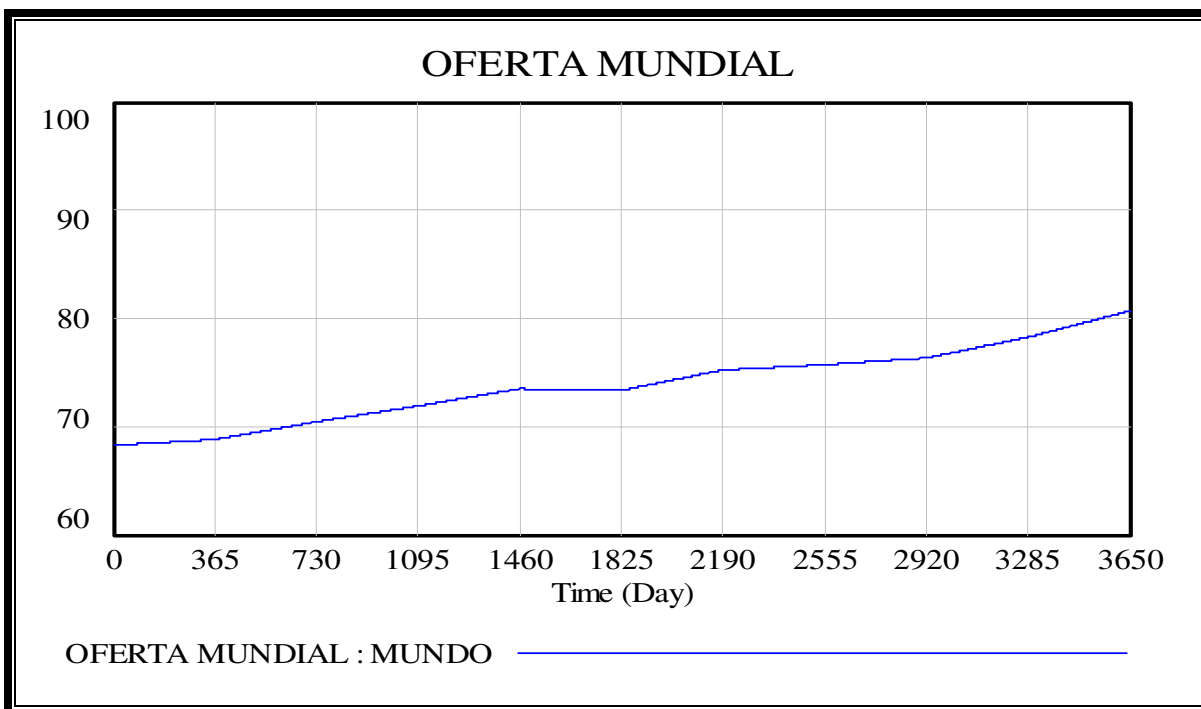


Figura 5.20 Oferta mundial

5.2.4 Demanda mundial

Este subsistema agrupa el consumo de todas las regiones mundiales. En la Figura 5.21 se muestra el diagrama de flujo de este subsistema.

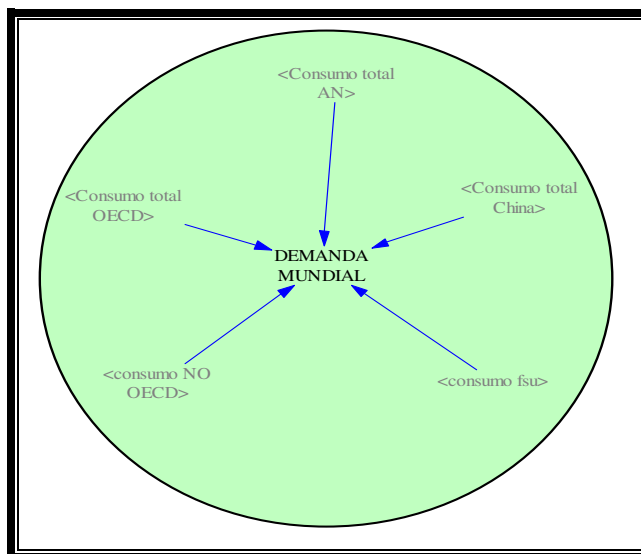


Figura 5.21 Diagrama de flujo de la demanda mundial

En la Figura 5.22 se observa la evolución de la demanda petrolera, puede verse que tiende a aumentar. Esto en los últimos años ha sido producto del crecimiento económico de China y otros países, aunado a la creciente demanda de USA.

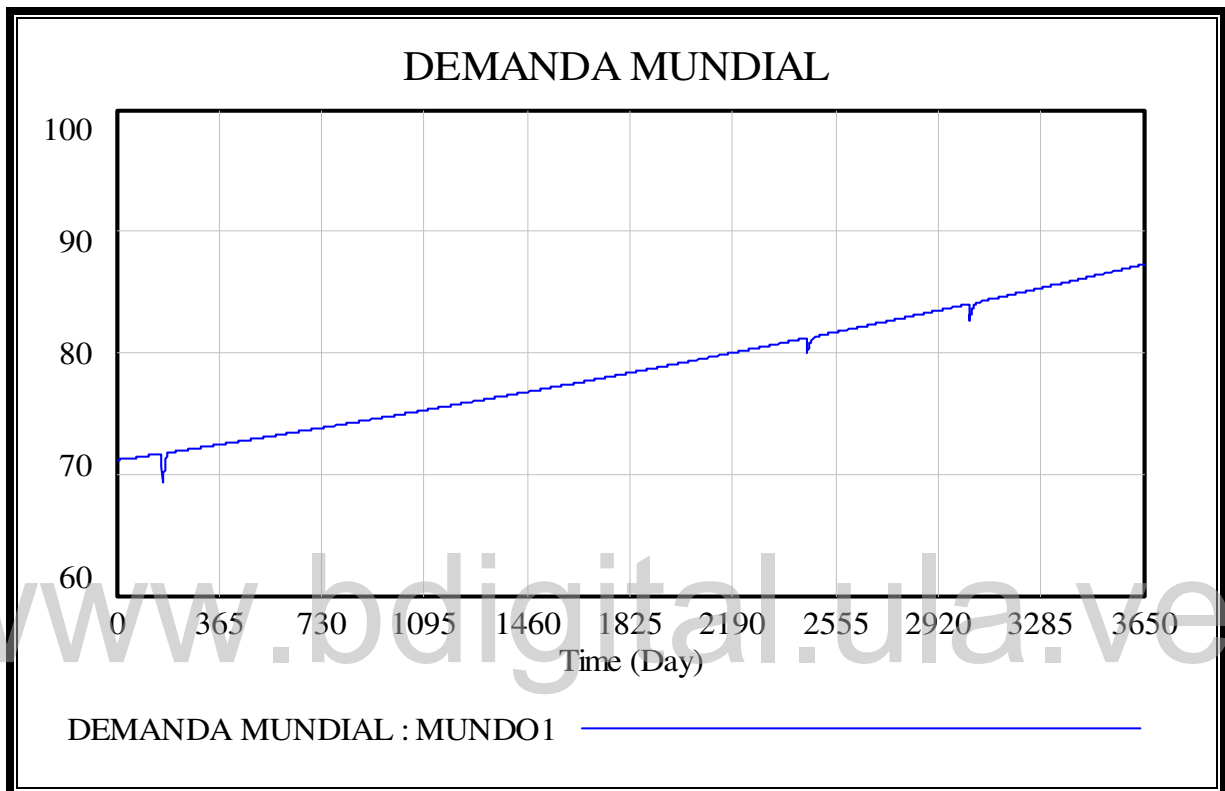


Figura 5.22 Demanda mundial

5.3 Escenarios de prueba

En estos escenarios se realizan cambios en algunos parámetros del modelo con el fin de conocer la sensibilidad ante ajustes en los parámetros de las variables y ver que cambios se producen en la dinámica del sistema.

Escenario 1: Aumento del consumo en América del Norte

En este caso se aumenta el consumo de referencia de la región consumidora de América del Norte, ello con el objetivo de ver que cambios ocurren en el consumo y los inventarios. El aumento es de un 4%, esto según la Agencia de Información de Energía de USA (2004), que han previsto que la demanda en dicha región seguirá aumentando en el futuro. A continuación se presenta la ecuación⁵ que indica el cambio realizado en el consumo de referencia.

$$\text{Consumo Aux AN} = \text{Consumo de referencia AN} * \text{crecimiento AN} * (1 + 0.04)$$

Units: MBD

Ahora se presentan los cambios ocurridos en la dinámica de algunas variables del modelo, para ello cada gráfico contiene la corrida general del modelo y la corrida con el cambio en el parámetro. En la Figura 5.23 se muestra la evolución de los inventarios.

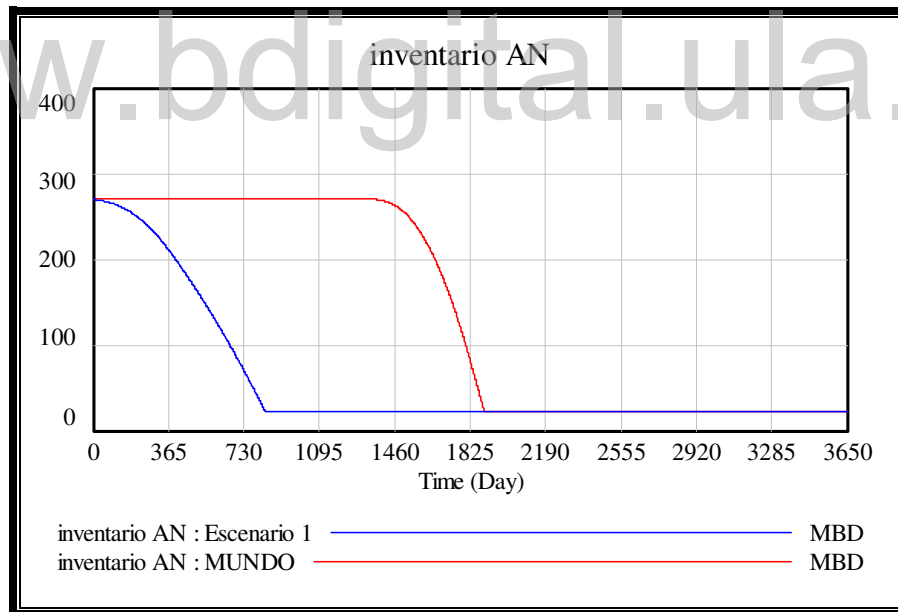


Figura 5.23 Inventarios América del Norte

En la Figura 5.23 puede notarse que, debido al aumento del consumo, los niveles de inventario tienden a bajar drásticamente y mantenerse en el nivel mínimo establecido en el modelo propuesto.

⁵ Las ecuaciones mostradas en este capítulo están en el formato generado por Vensim.

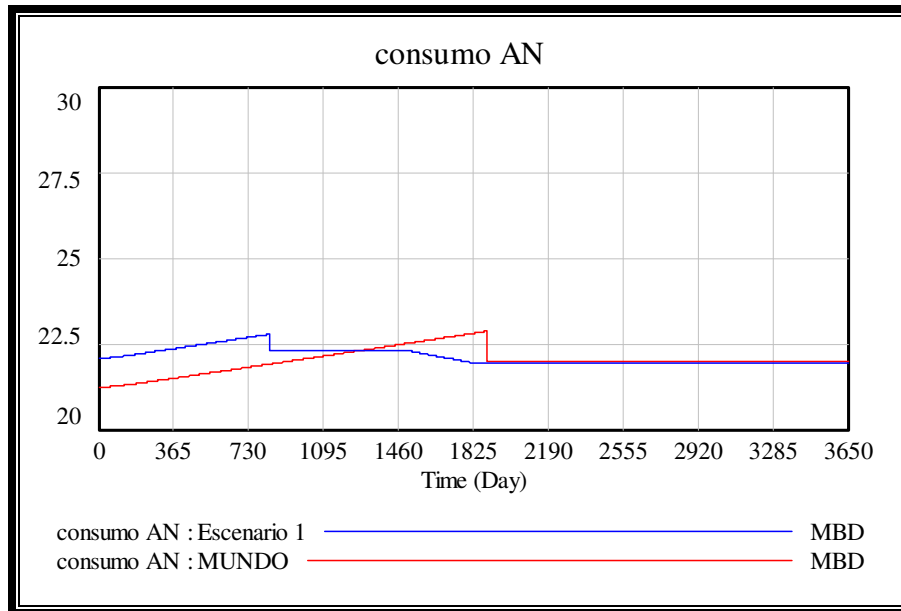


Figura 5.24 Cambios en el consumo

La Figura 5.24 muestra el cambio que ocurre en el consumo de crudo proveniente de los inventarios. Puede notarse que en el Escenario 1, este consumo cae debido a que hay demanda insatisfecha.

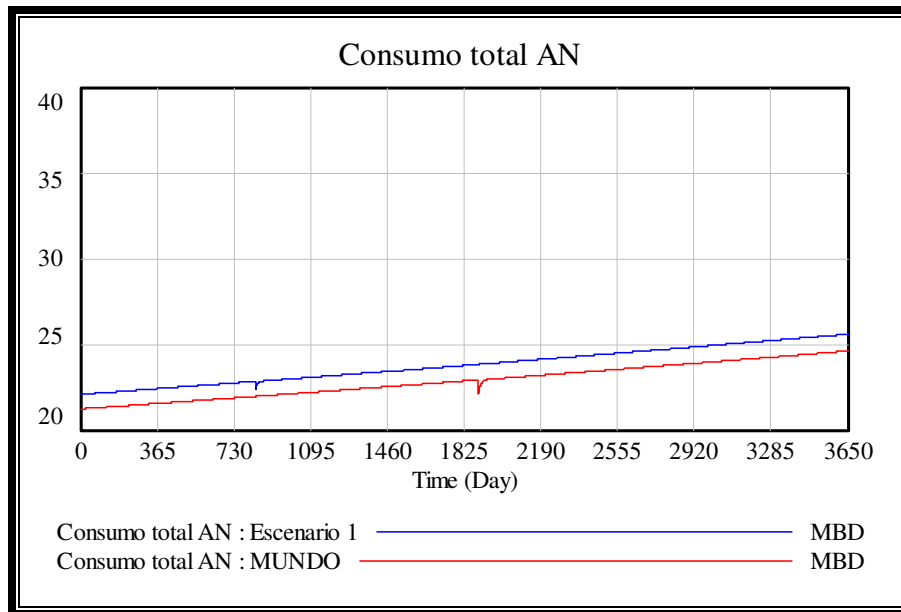


Figura 5.25 Cambios en el consumo total

La Figura 5.25 muestra el aumento en el consumo total del crudo, lo cual incluye el consumo de crudo provenientes de los inventarios y también el de las reservas estratégicas. Los picos que se observan en las trayectorias muestran el instante en que comienza a haber demanda insatisfecha.

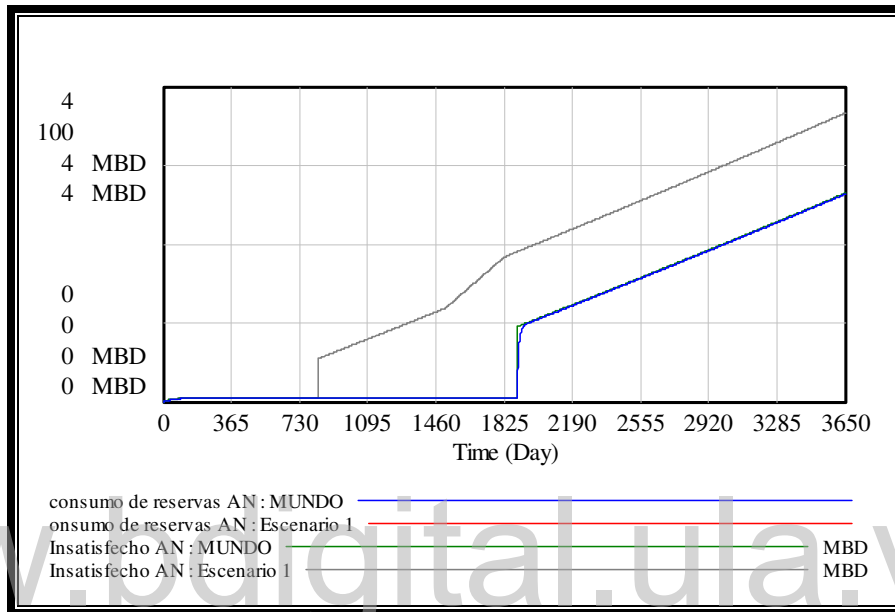


Figura 5.26 Consumo Insatisfecho

En la Figura 5.26 se muestra como aumenta la demanda insatisfecha del crudo, y, por tanto, genera el crecimiento del consumo de las reservas estratégicas con el fin de satisfacer la demanda y evitar la falla de suministro. Este comportamiento genera que los países consumidores tomen políticas alternativas para satisfacer su demanda, lo cual implicaría aumentar sus importaciones de crudo y tratar de mantener sus niveles de inventarios y reservas estratégicas en el mínimo, no permitiendo que estos disminuyan ya que podría afectar la satisfacción de sus necesidades energéticas.

La Figura 5.27 muestra como los niveles de reservas estratégicas disminuyen de manera considerable, ya que se extraen barriles de petróleo con el fin de satisfacer el consumo interno en su totalidad. Puede notarse que dichas reservas no se consumen completamente, esto es debido a que en el modelo propuesto se le ha colocado un mínimo nivel de almacenamiento.

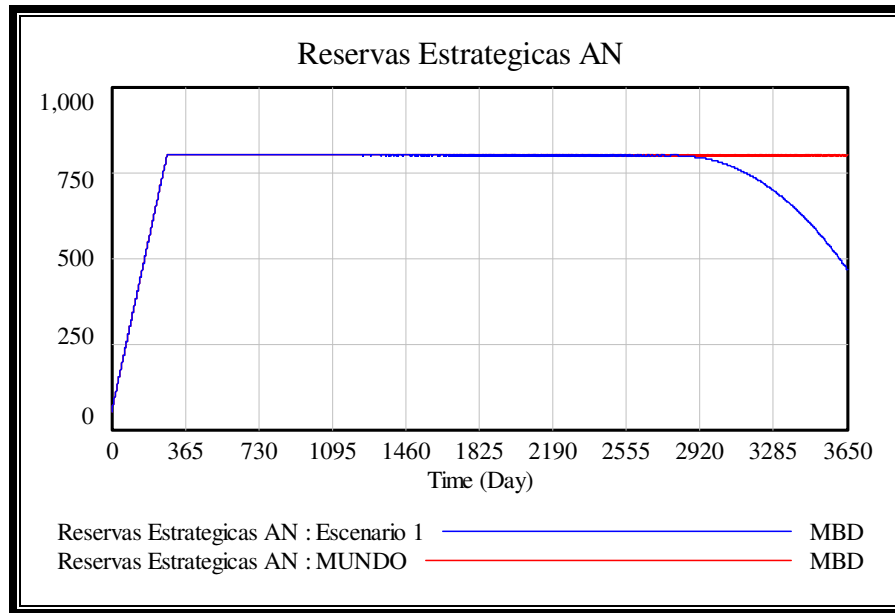


Figura 5.27 Reservas Estratégicas

De este escenario de prueba se concluye que el manejo de reservas estratégicas es de gran importancia en los países consumidores, porque les permite mantener satisfecho su nivel de demanda.

Escenario 2: Disminución de Reservas en la región NO OECD

En este experimento se plantea la disminución de las reservas probadas en la región consumidora neta de los países industrializados, es decir, los OECD. Se plantea este escenario teniendo en cuenta que las reservas probadas de estos países han tendido a disminuir en los últimos años, según datos de *BP Statistical (2005)*. Para ello, se modifica el parámetro de la variable que afecta al flujo de exploración que genera las reservas probadas, dicha variable auxiliar es *expectativas de descubrir nuevas reservas*, se disminuye dicho parámetro según la ecuación

$$\text{expectativas de descubrir reservas OECD}=10$$

Units: MBD

Luego de realizar este cambio el nivel de reservas probadas empieza a disminuir notablemente, tal como se deja ver en la Figura 5.28.

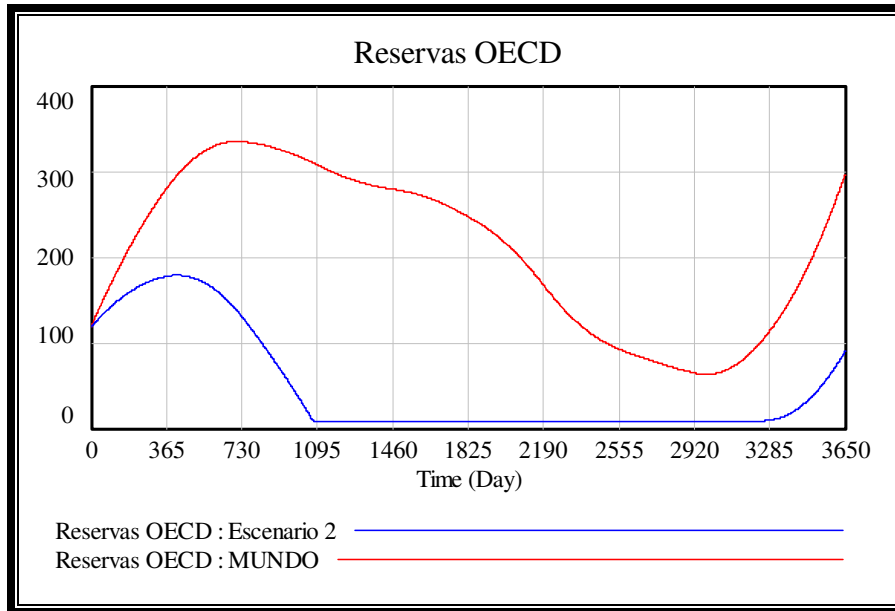


Figura 5.28 Reservas Probadas.

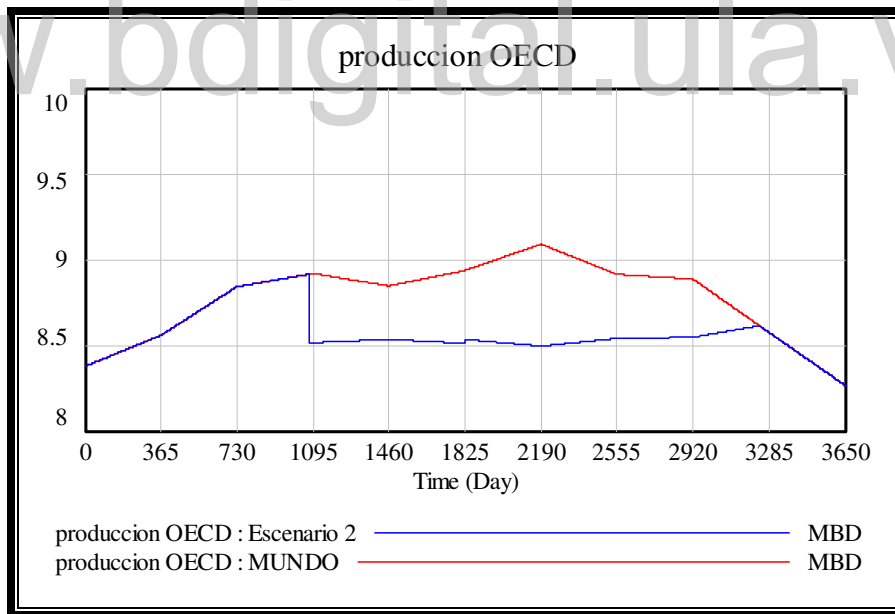


Figura 5.29 Producción OECD

Puede verse que las reservas disminuyen a niveles muy bajos. En la Figura 5.29 se nota de que manera se ve afectada la producción debido a la falta de reservas. Sin embargo, para contrarrestar el efecto de esta disminución en las expectativas de descubrir nuevas reservas se

plantea un cambio en la estructura del modelo. Dicho cambio en la estructura implica agregarle al modelo una variable en donde se reúnan las exportaciones provenientes de los países productores, con el objetivo de que se tome de ese pote común alguna cantidad que sea demandada por los países con mayor índice de consumo petrolero.

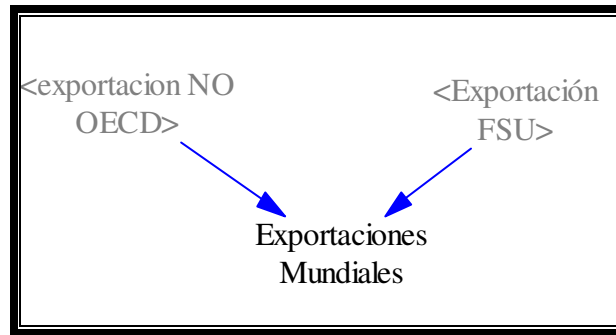


Figura 5.30 Diagrama de flujo de exportaciones mundiales

En la Figura 5.30 se muestra el diagrama de flujo de las exportaciones mundiales, algo que podría llamarse “un pote” común de las exportaciones.

$$\text{Exportaciones Mundiales} = \text{Exportación FSU} + \text{exportación NO OECD}$$

Units: MBD

Teniendo en cuenta el cambio explicado anteriormente, se toma de las exportaciones mundiales un porcentaje del 5% con el fin de solventar el problema de las reservas generadas por la disminución en las expectativas de descubrir nuevas reservas. Este porcentaje se toma en base a los datos de exportación de la *BP Statistical (2005)*, tal y como se deja ver en la siguiente ecuación.

$$\text{expectativas de descubrir reservas OECD} = 10 + \text{Exportaciones Mundiales} * 0.05$$

Units: MBD

Después de agregar esta modificación al modelo las trayectorias cambian significativamente respecto a la corrida anterior.

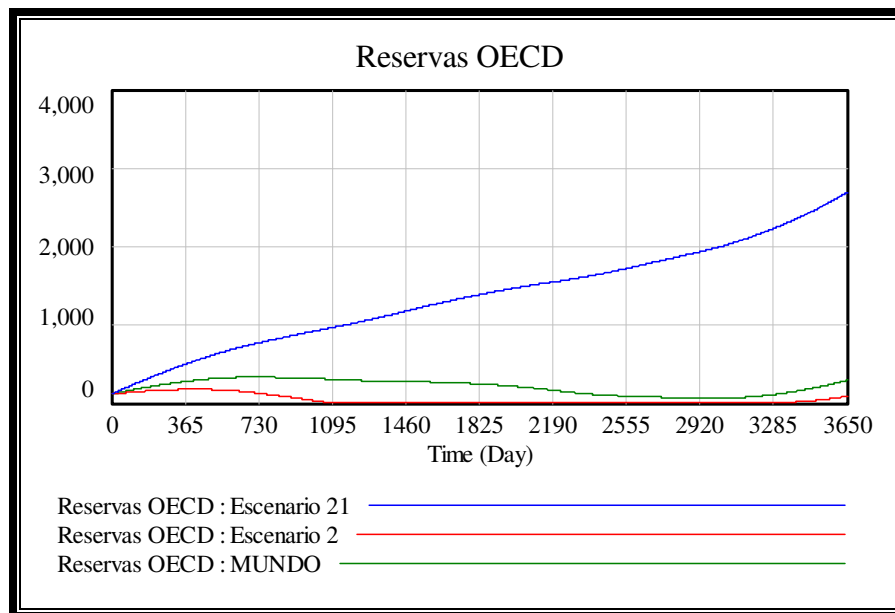


Figura 5.31 Reservas probadas OECD

La Figura 5.31 muestra la manera en que las reservas comienzan a aumentar debido a las nuevas importaciones realizadas para solventar el problema en la producción, y así disponer de las cantidades de crudo necesarias para satisfacer el consumo interno. Dicho aumento se nota en la trayectoria azul de la gráfica.⁶

⁶ Cada corrida de la simulación genera un gráfico y cuando se comparan con otras corridas en el gráfico se muestra el nombre de la corrida y el color respectivo para la trayectoria.

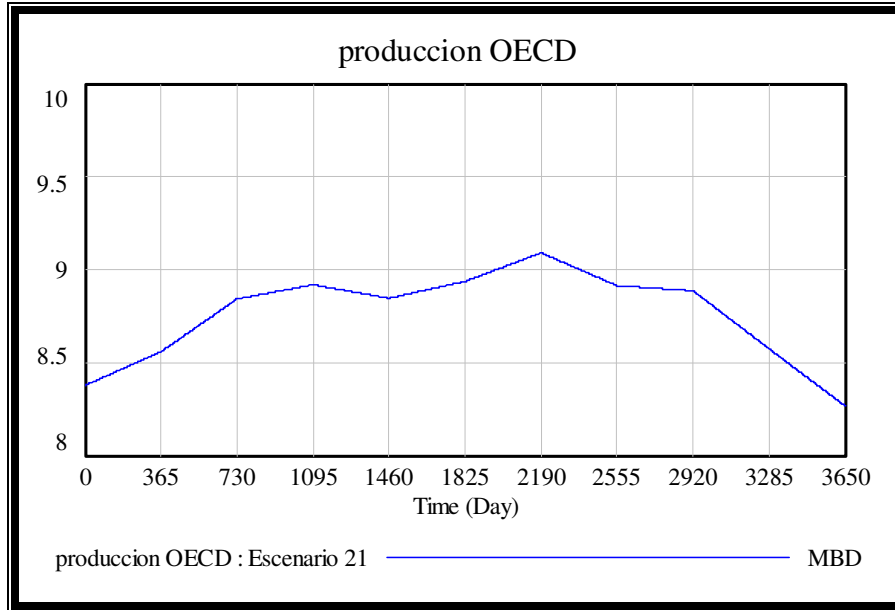


Figura 5.32 Producción OECD

La otra variable de interés para este escenario es la producción. En la Figura 5.32 se muestra como la producción aumenta debido a la política alternativa.

En la Figura 5.33 se observa como varió el consumo del crudo provenientes de los inventarios en las diferentes corridas de este escenario de prueba.

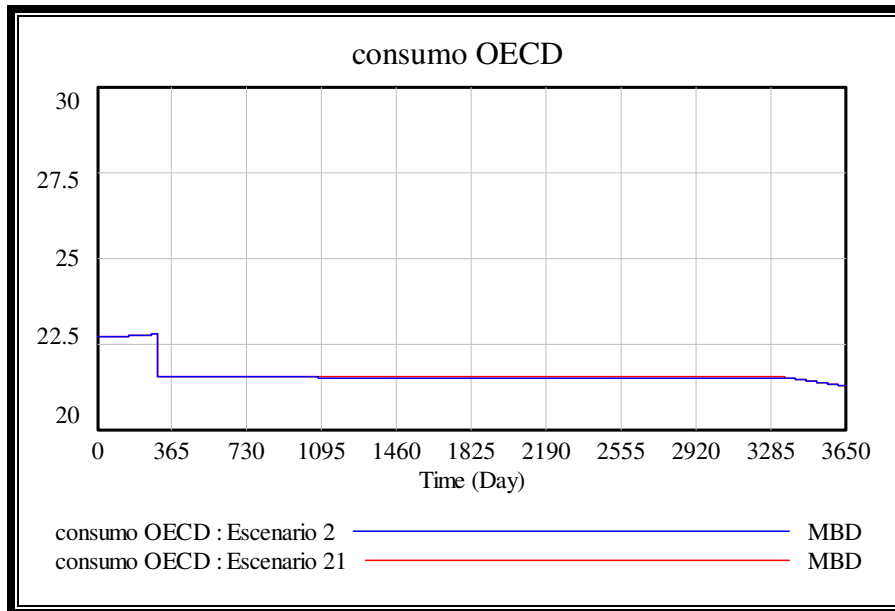


Figura 5.33 Consumo OECD

La Figura 5.34 deja ver que el consumo insatisfecho era mayor antes de modificar la estructura del modelo, lo cual es lógico, ya que al no haber suficiente producción, hay demanda insatisfecha, lo cual genera el consumo de reservas estratégicas.

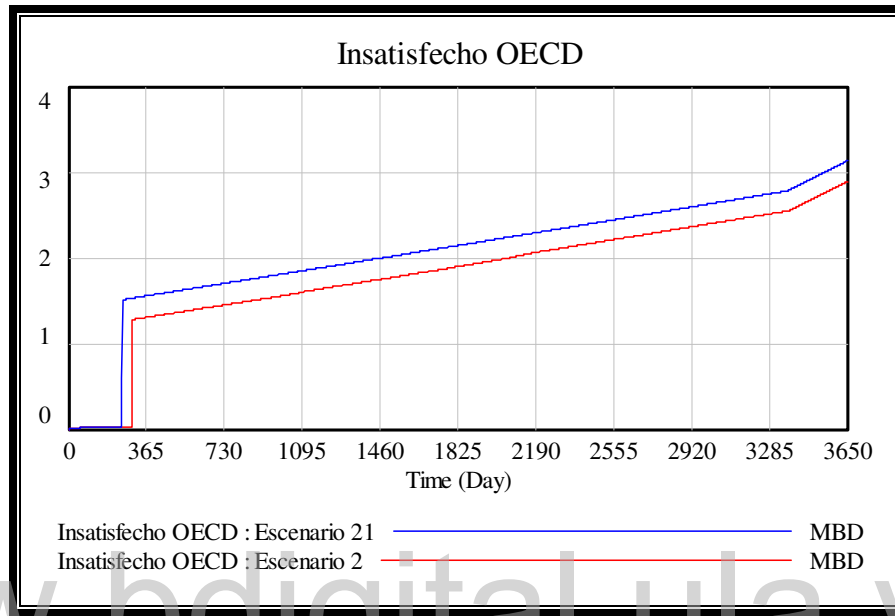


Figura 5.34 Consumo Insatisfecho OECD

De este escenario puede concluirse que es necesario mantener un buen nivel de reservas para mantener una producción que permita satisfacer el consumo.

Escenario 3: Aumento de la demanda en la región OECD

En este escenario se propone el aumento de la demanda en la región consumidora de la OECD, con el fin de ver su efecto sobre la demanda. La siguiente ecuación deja ver el cambio que sufre el consumo.

$$\text{Consumo Aux OECD} = (\text{Consumo de referencia OECD} * \text{crecimiento OECD}) * 1.025$$

Units: MBD

El aumento propuesto es de un 2.5%, tomando en cuenta las proyecciones de la AIE.. Ahora se presentan los cambios que sufre el sistema ante este cambio en el parámetro antes mencionado. La Figura 5.35 muestra el aumento que sufre el consumo de referencia.

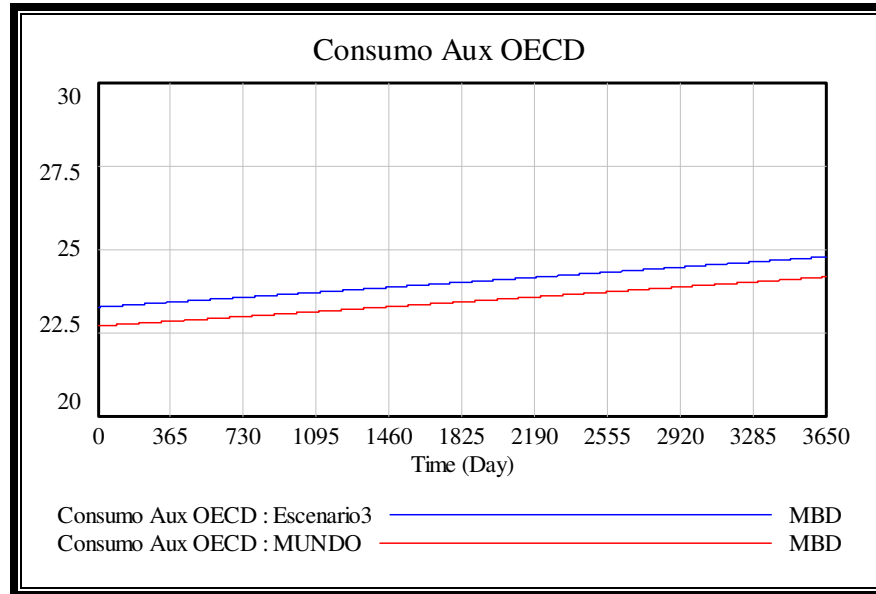


Figura 5.35 Consumo de referencia OECD

La Figura 5.36 muestra el aumento de consumo insatisfecho de la región ante el aumento del consumo de referencia, debido a que los inventarios no satisfacen las cantidades de petróleo requeridas.

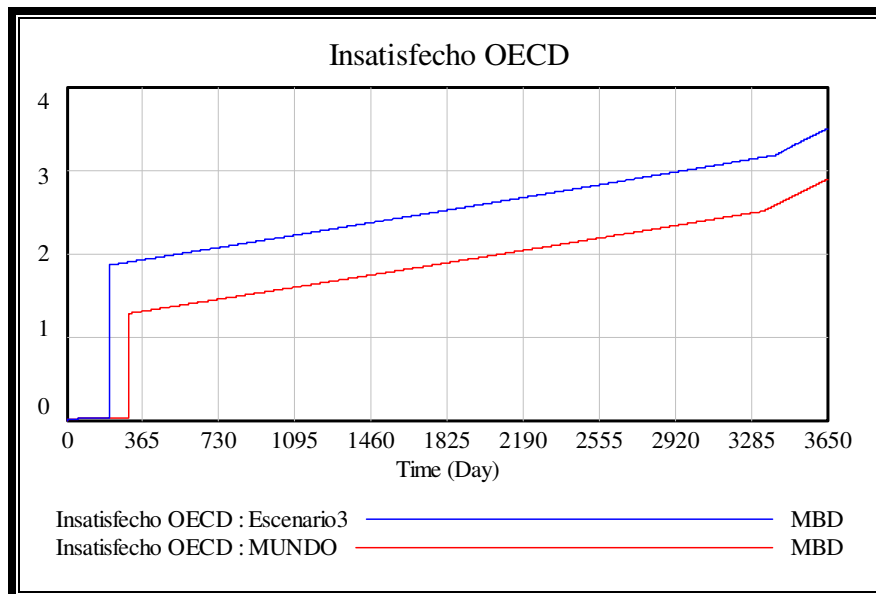


Figura 5.36 Consumo Insatisfecho OECD

Como ya se mencionó, es necesario el consumo de las reservas estratégicas, esto se ve en la Figura 5.37. En ella se puede notar que el consumo es bastante, e incluso llega hasta su tope, o nivel máximo permitido de extracción de las reservas.

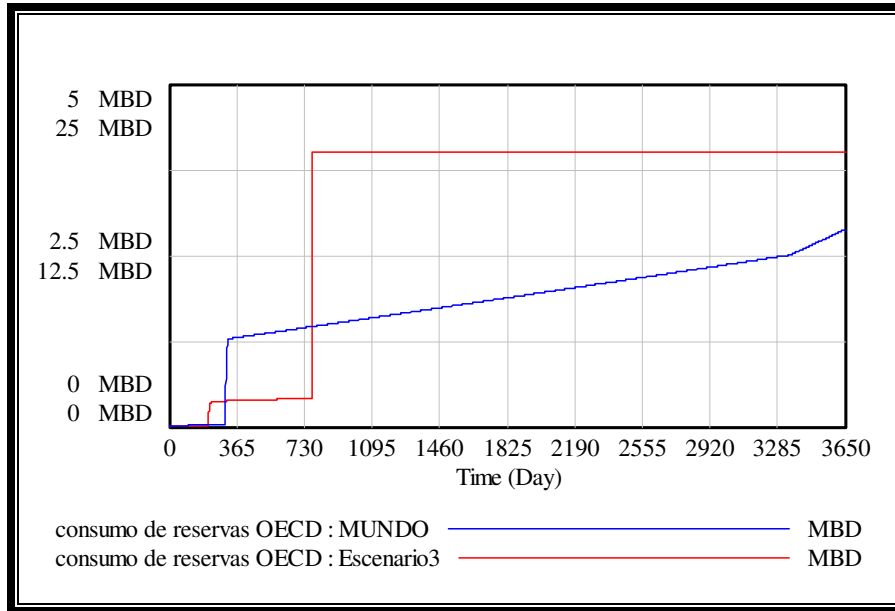


Figura 5.37 Consumo de reservas estratégicas OECD

Ahora bien el hecho de llegar hasta el tope de extracción de reservas hace creer que en el nivel de reservas se produzca una fuerte disminución. Ello se ve reflejado en la Figura 5.38.

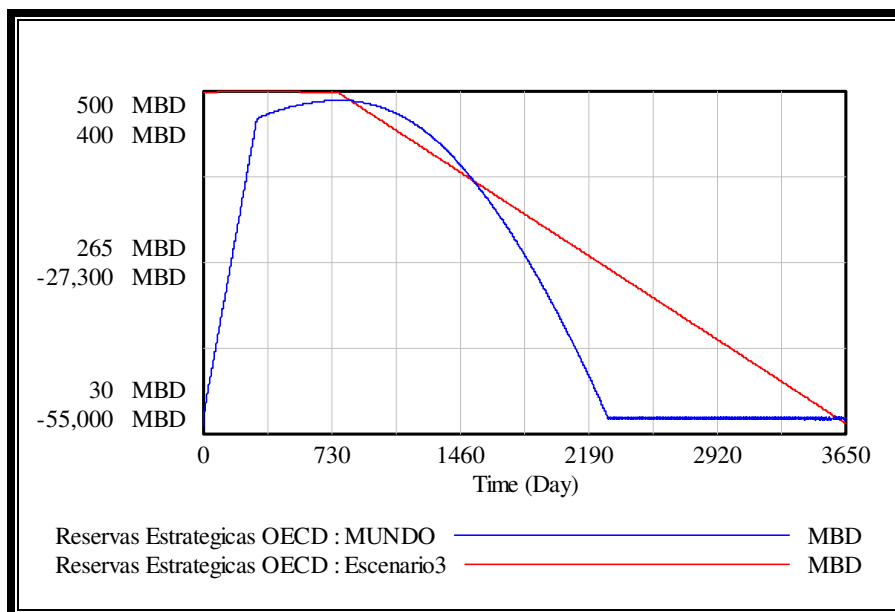


Figura 5.38 Reservas estratégicas OECD

Debido a la severa disminución que ocurren en las reservas estratégicas se hace necesario una política alternativa con el fin de mantener la estabilidad en el mercado. La política alternativa que se hace en este escenario es la de aumentar la importación, ello se hace extrayendo un porcentaje de las exportaciones de la región NO OECD, para ser utilizados en el consumo insatisfecho de la región, tal como se muestra en la siguiente ecuación.

$$\begin{aligned}
 \text{Insatisfecho OECD} = & \text{IF THEN ELSE(Consumo Aux OECD} \\
 & \text{-consumo OECD} < 1, \text{ Consumo Aux OECD - consumo OECD,} \\
 & \text{Consumo Aux OECD - consumo OECD - exportación NO OECD} * 0.11) \\
 \text{Units: MBD}
 \end{aligned}$$

Puede observarse que si la diferencia entre el consumo de referencia y el simulado es menor que uno, se coloca en la variable *insatisfecho* esa diferencia, en caso contrario se resta además un 11%⁷ proveniente de la región NO OECD. Esto se hace con el fin de disminuir el consumo insatisfecho. La Figura 5.39 muestra como se alcanza dicho objetivo

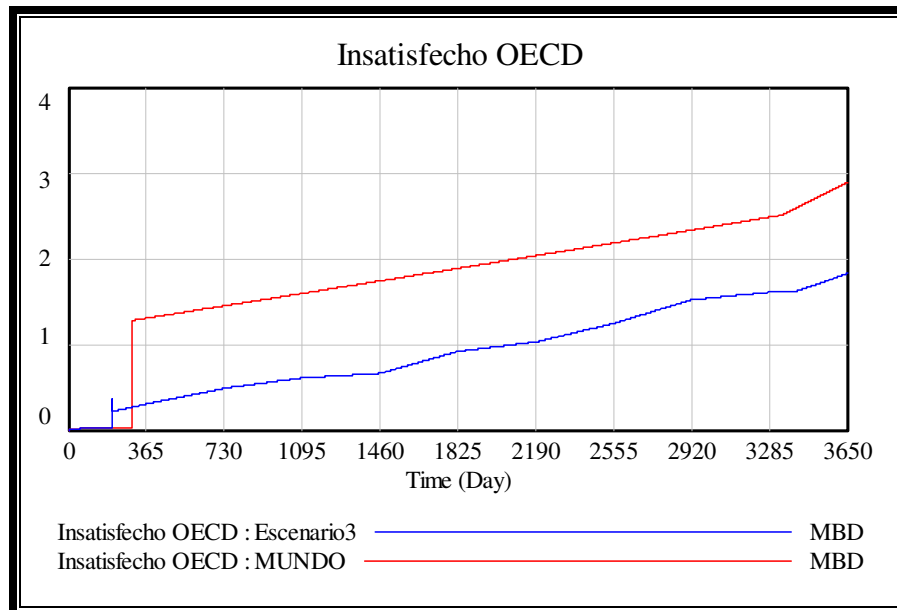


Figura 5.39 Consumo Insatisfecho OECD

⁷ El porcentaje se saca de las estimaciones de la *BP Statistical* (2005)

En la Figura 5.40 se muestra la disminución en el consumo de reservas estratégicas como consecuencia de la política alternativa planteada.

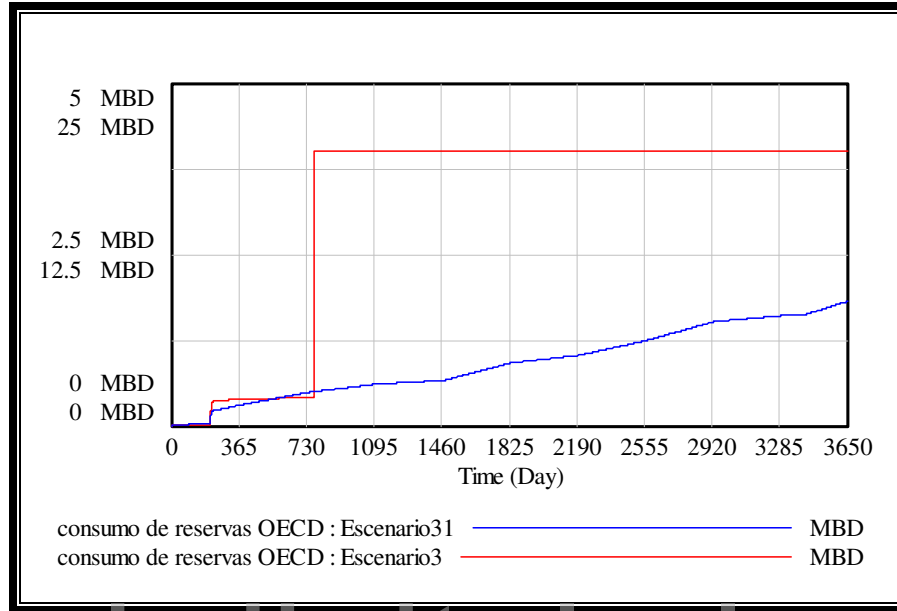


Figura 5.40 Consumo de reservas estratégicas

Debido a que ya no se está llegando al tope del consumo de las reservas estratégicas, es de esperarse que el nivel se modifique, es decir, que no disminuya drásticamente como estaba sucediendo debido al aumento del consumo.

En la Figura 5.41 se observa que las reservas estratégicas tienden a aumentar, ya que no se explotan a un ritmo acelerado. Más bien, se consumen de tal manera que permite continuar almacenando petróleo para cualquier problema que surja con la producción en el futuro.

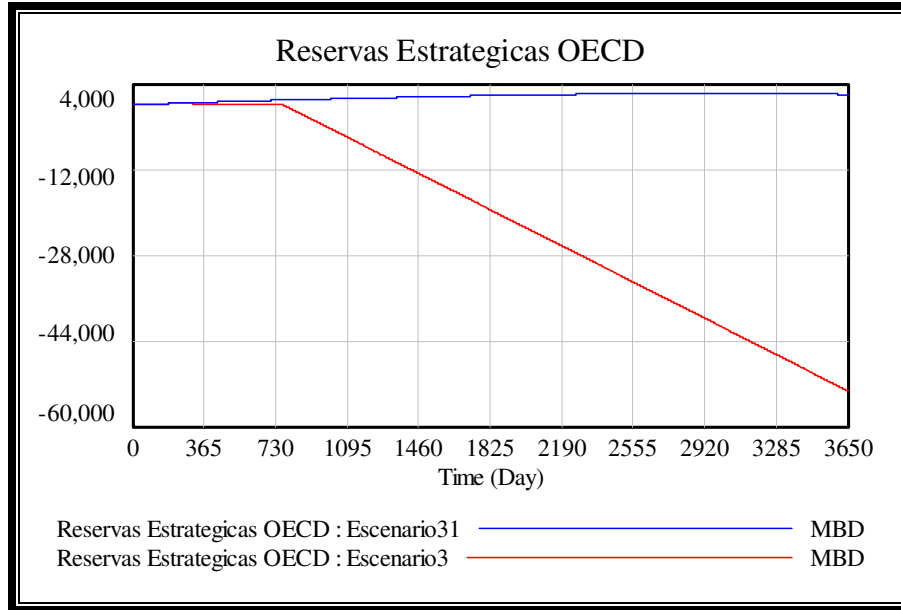


Figura 5.41 Reservas estratégicas OECD

Escenario 4: Aumento de consumo de la región NO OECD

En los escenarios anteriores solo se había intervenido o modificado parámetros de las regiones pertenecientes a los países consumidores. En este escenario se plantea aumentos del consumo en una región productora con el fin de ver su efecto sobre la producción, principalmente se quiere ver en que momento se llega al máximo de la capacidad de producción y como responde el modelo propuesto ante tal prueba.

La región a la cual se le hace el aumento del consumo es la región NO OECD. El incremento que se realiza es de un 7%⁸, valor propuesto en base a pruebas para ver el instante en que se llega a la máxima producción. El aumento en el consumo de referencia se ve reflejado en la siguiente ecuación.

$$\text{Consumo Aux NO OECD} = (\text{Consumo de referencia NO OECD} * \text{crecimiento NO OECD}) * 1.07$$

Units: MBD

⁸ Este aumento es sugerido por el autor para realizar pruebas de validación al modelo

La Figura 5.42 se muestra en aumento que sufre el consumo.

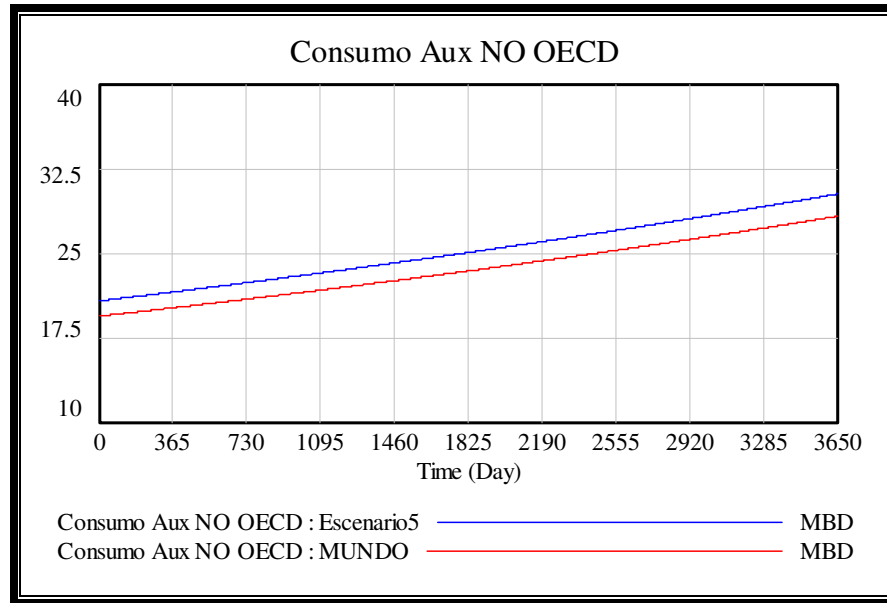


Figura 5.42 Consumo de referencia de NO OECD

La Figura 5.43 muestra como, ante este aumento del consumo, la producción llega a estar muy cerca, e incluso llega a igualarla en un punto, de su capacidad máxima de producción.

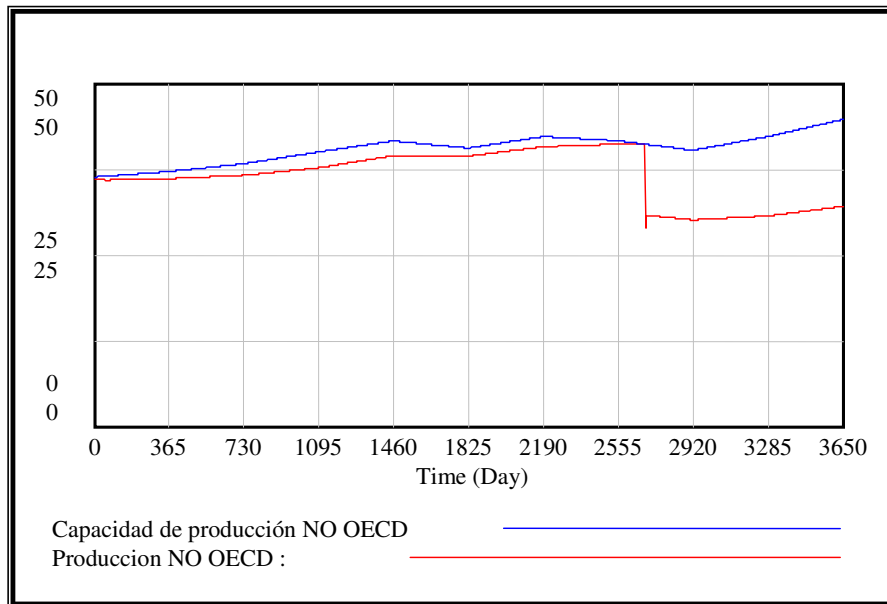


Figura 5.43 Capacidad de producción y producción NO OECD

En la Figura 5.43 puede notarse que la producción se acerca bastante a su máxima capacidad. Sin embargo, se ve un punto de inflexión en donde la producción se iguala a la capacidad de producción, esto se debe a que la función de producción está limitada por los inventarios, consumo y exportación. Cuando la suma del consumo y la exportación son mayores que la capacidad de producción, entonces se pone a disposición solo lo que haya en inventario. Esta relación se refleja en la siguiente ecuación

$$\begin{aligned}
 & \text{Producción NO OECD} = \text{IF THEN ELSE}(\text{consumo NO OECD} \\
 & + \text{exportación NO OECD} \leq \text{Producción Esperada NO OECD} \\
 & , \text{IF THEN ELSE}(\text{Producción Esperada NO OECD} \leq \text{reservas NO OECD}, \\
 & \text{consumo NO OECD} + \text{exportación NO OECD}, \text{inventario NO OECD}), \\
 & \text{inventario NO OECD})
 \end{aligned}$$

Units: MBD

Entonces según lo que ya se ha explicado, el punto de inflexión en la trayectoria mostrada arriba nos indica que a partir de ese punto se produce lo que se puede almacenar en inventarios. La Figura 5.44 muestra el cambio en el nivel de inventarios a partir del punto de inflexión.

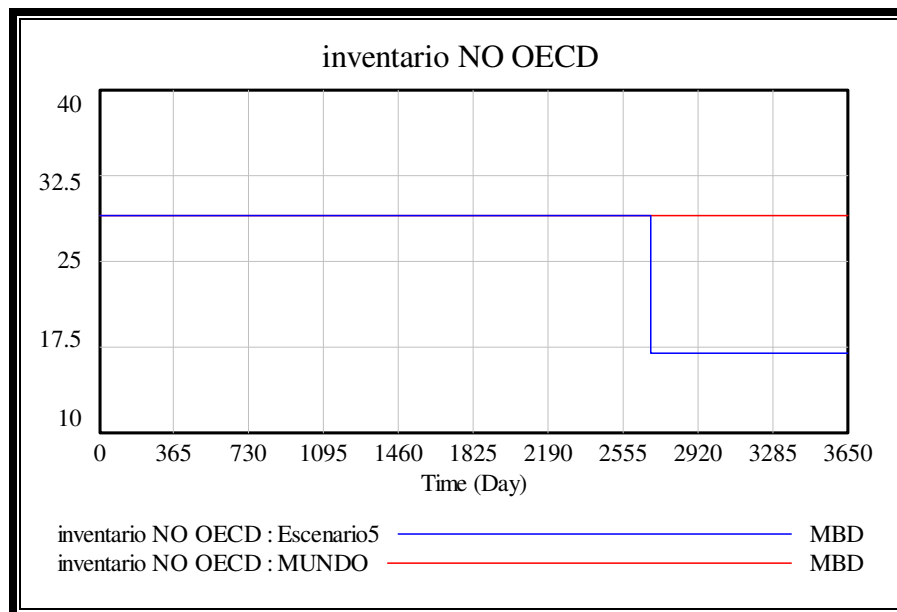


Figura 5.44 Inventarios NO OECD

La Figura 5.45 muestra como varía el nivel de las reservas probadas ante las variaciones propuestas en este escenario.

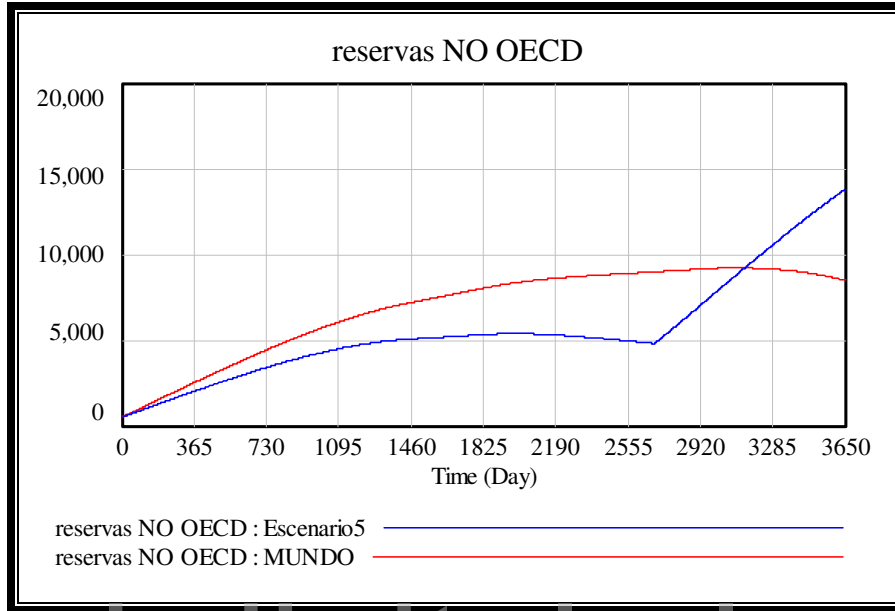


Figura 5.45 Reservas probadas NO OECD

En principio las reservas disminuyen como consecuencia del aumento de producción para suplir la demanda. Sin embargo, cuando la producción se acerca a su máximo las reservas empiezan a aumentar ya que se comienza a producir según la capacidad de almacenamiento en los inventarios.

Escenario 5: Disminución de capacidad de producción en la FSU

Se plantea disminuir la capacidad de producción de la región productora de FSU, es decir, los países que formaron parte de la antigua Unión Soviética. Se hace una baja del 11% en la capacidad de producción, de esta manera se ve el efecto que ello trae sobre el sistema. En la ecuación que se muestra ahora puede verse la manera en que se hizo la disminución.

$$capacidad\ de\ producción\ FSU = 0.89 * lookup\ capacidad\ producción\ FSU(Time)$$

Units: MBD

La Figura 5.46 muestra la disminución en la capacidad de producción, esto se logra haciendo una comparación con la corrida de la simulación base.

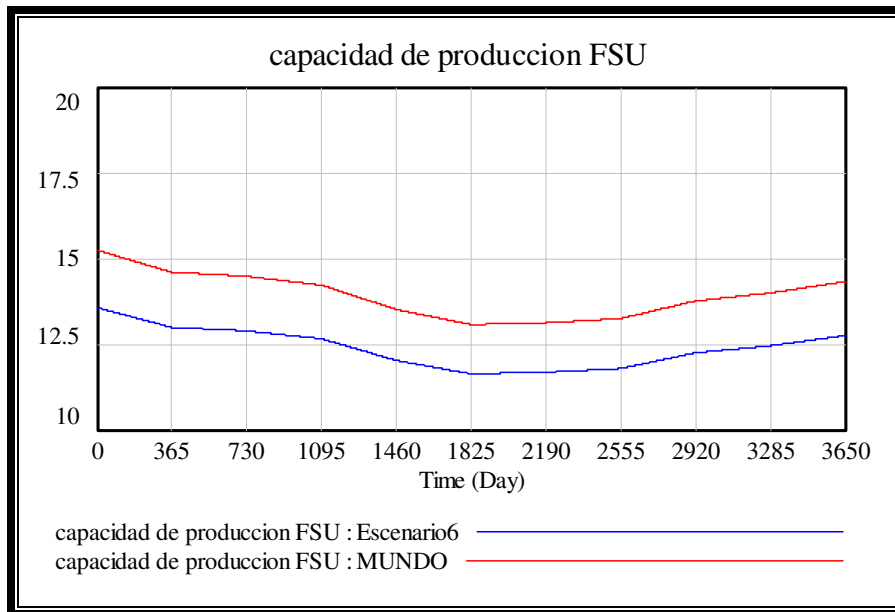


Figura 5.46 Capacidad de producción NO OECD

La Figura 5.47 muestra que, luego de llegar a su capacidad de producción, la producción comienza a disminuir notablemente.

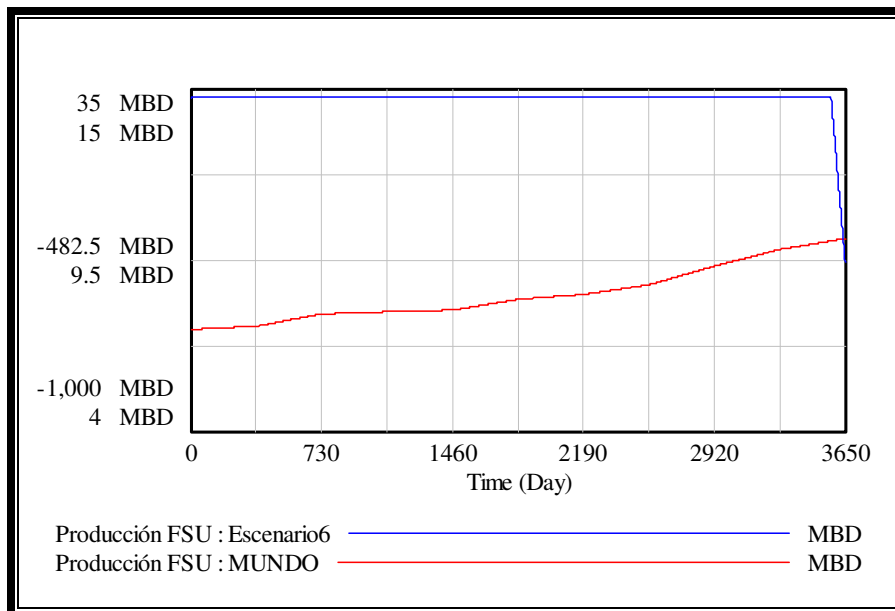


Figura 5.47 Producción FSU

Ante este problema en la producción debe emplearse una política alternativa. En este caso, debido a la disminución en la capacidad de producción se plantea bajar la cantidad de petróleo destinado a la exportación, esta disminución será de un 10%, porcentaje apropiado en vista de la disminución de la capacidad de producción. A continuación se muestra la ecuación que refleja este cambio en el modelo.

$$\text{Exportación FSU} = 0.9 * \text{lookup exportación FSU}(\text{Time})$$

Units: MBD

La Figura 5.48 se refleja la disminución que ocurre en las exportaciones.

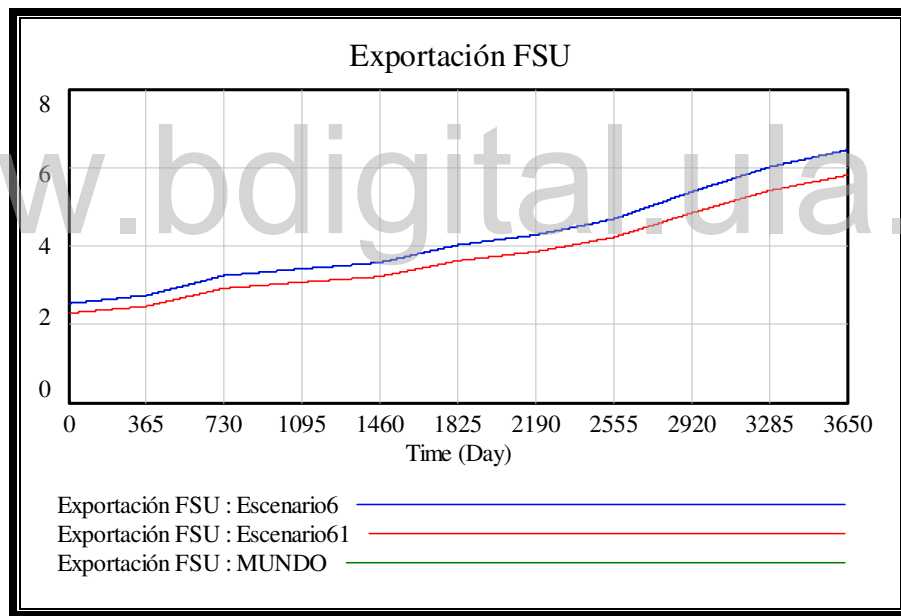


Figura 5.48 Exportación FSU

En la Figura 5.49 se observa el efecto que tiene la nueva modificación en el parámetro de exportaciones en la producción. A pesar de que es menor que en la simulación base, ésta vuelve a recuperar un nivel que satisface tanto el consumo interno como las exportaciones.

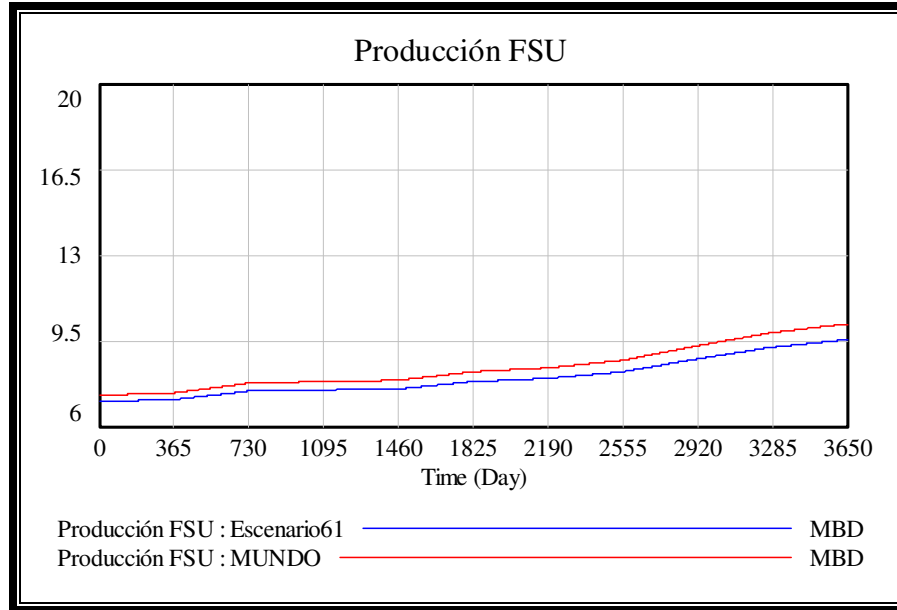


Figura 5.49 Producción FSU

De este escenario puede concluirse que es necesario mantener un nivel de producción adecuado en los países productores para poder satisfacer las necesidades de consumo tanto internas como externas. También se observa que cuando se llega a la máxima capacidad de producción es necesario aplicar políticas alternativas, las cuales han servido para analizar la sensibilidad del modelo propuesto.

5.4 Conclusiones

El capítulo 5 presentó algunos resultados obtenidos con la simulación base y algunos escenarios de prueba que sirvieron para la validación y análisis de sensibilidad del modelo. En base a los resultados se concluye que:

- Las estructuras genéricas propuestas son resistentes ante cambios en los parámetros tal como se observó en el escenario de prueba uno, en donde se cambió el parámetro de consumo de referencia y el modelo siguió funcionando, arrojando resultados apropiados sobre cual sería la tendencia en el sistema real.
- En el primer escenario planteado se ha mostrado que el modelo se asemeja al sistema real, esto pudo notarse en las figuras en que se mostró la tendencia

histórica del consumo y producción según datos del *BP Statistical2004* y los resultados arrojados por la simulación base para las estructuras genéricas de producción y consumo.

- Las estructuras genéricas propuestas son capaces de responder ante cambios en sus parámetros, aunque en ocasiones, esto requirió hacer cambios en la estructura del modelo y la implementación de políticas alternativas.
- La implementación del subsistema en que se reúnen las exportaciones mundiales es necesaria para tener una óptica sobre el intercambio comercial del crudo, aunque esto es una simplificación del modelo, el tener un “pote común” permite que los países consumidores importen petróleo de las regiones en las que se concentran la mayor parte de las reservas probadas y la producción mundial.
- Las estructuras propuestas muestran como cada elemento del sistema interactúa con los demás, con el fin de producir la dinámica de producción y consumo.
- Además se observa la importancia en el manejo de inventarios por parte de las distintas regiones agregadas del modelo, ya que un buen uso de las reservas permitiría mantener el equilibrio entre la oferta y la demanda.

Capítulo 6

Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

El principal producto de este proyecto es un modelo de simulación de dinámica de sistemas que da una descripción macro de la estructura y comportamiento de la producción y el consumo petrolero en distintas regiones mundiales.

La metodología de dinámica de sistemas ha sido muy útil para estudiar y comprender este sistema complejo, ha permitido hacer una aproximación de las estructuras que generan el consumo y la producción del petróleo. Para ello, se ha conceptualizado y formulado un modelo de consumo, producción, manejo de inventarios y reservas estratégicas, para algunas regiones agregadas, usando algunas de las variables relevantes que interactúan en el sistema en diferentes estructuras a los países consumidores y a los productores, con el fin de generar una estructura que se asemejará al sistema real.

El modelo propuesto no incluye los precios como elemento del sistema. Ello se hizo como una de las simplificaciones del sistema y debido a que el interés ha sido estudiar una manera de representar la estructura de producción, consumo e inventarios de diferentes regiones, a través del uso de una estructura genérica utilizando la dinámica de sistemas. El modelo ha permitido analizar y ensayar diferentes políticas en base a los escenarios de prueba planteados y observar el efecto que sobre él producen los cambios en los parámetros de las variables fundamentales del sistema.

Además, este modelo permite sentar algunas bases para continuar el estudio del mercado petrolero a través de la dinámica de sistemas.

El modelo propuesto tiene un alto nivel de agregación y simplificación. Los resultados obtenidos no pueden ser considerados en ningún caso como predictivos. No obstante algunos de los resultados son muy interesantes:

- El escenario donde se modificaron las expectativas de encontrar nuevas reservas en los países consumidores nos permite ver su dependencia de las importaciones, ya que estas regiones necesitan satisfacer su demanda debido a su alto nivel de industrialización.

También pudo verse la representación sobre el manejo de las reservas estratégicas, éstas fueron utilizadas al haber bajos niveles de producción en los inventarios, con el fin de suplir el consumo insatisfecho.

- En el escenario donde se incrementó el consumo de referencia en la región de América del Norte pudo notarse el impacto que ello genera en los inventarios y el consumo de reservas estratégicas, ello nos permite ver la importancia que tienen las reservas estratégicas en los países con altos niveles de consumo, ya que mediante éstas se permite satisfacer la demanda en cada instante de tiempo.

- En el análisis de políticas alternativas sobre el modelo se notó la importancia que tienen la región de los NO OECD (en donde se encuentran los países pertenecientes a la OPEP), en la producción mundial. Ya que al aumentar el consumo de los países industrializados, se planteó la política alternativa de importar petróleo de otros países productores. Otra razón por la que se aplicaría dicha política es no permitir que las reservas estratégicas se agoten o disminuyan del nivel mínimo establecido, lo cual muestra la relación entre los diferentes subsistemas del modelo.

- El escenario en que se aumentó el consumo en los países NO OECD nos permite notar que para satisfacer su consumo interno, la producción se acercó significativamente a su máxima capacidad, lo cual hace que las reservas probadas disminuyeran debido al incremento en la producción.

- En el modelo también se mostró las consecuencias que trae la disminución en la capacidad de producción en una región consumidora, como lo es la región de países que formaron parte de la antigua Unión Soviética. En ese escenario se planteó una disminución importante que trajo como consecuencia la caída de la producción, y, que,

por lo tanto se plantea la política alternativa de bajar las exportaciones con el fin de mantener el ritmo de producción adecuado de acuerdo a su capacidad de producción.

6.2 Recomendaciones

Creemos oportuno indicar algunas recomendaciones de cómo mejorar el modelo propuesto en futuros trabajos:

- Incluir en un modelo futuro una estructura que modele el efecto de los precios del petróleo en el mercado.
- Mejorar el nivel de detalles de algunas variables y el nivel de abstracción de las relaciones causales del modelo, con el fin de aproximar aún más el modelo al sistema real.
- La opinión de expertos es absolutamente crucial si se desea tener una mayor comprensión con relación a como se producen las interacciones en el seno del sistema real. El ejercicio de modelado realizado en este proyecto es, fundamentalmente, la abstracción que hacemos personas no expertas en materia petrolera, más bien expresan las inquietudes y la limitada manera como observamos el funcionamiento de dicho sistema.
- Incluir otras variables en la estructura de consumo, entre ellas el efecto de los precios y las demandas estacionales para ir ajustando el modelo al sistema real.

Bibliografía

Aracil, J. y Gordillo, F. (1997) *Dinámica de Sistemas*, Madrid: Alianza Editorial

Azcona, J. (2002) Reservas de Petróleo y Gas Natural, Sitio web:
<http://www.monografias.com/trabajos11/cuados/cuados.shtml>

Barberii, E. (2001) *El Pozo Ilustrado*, Caracas: FONCIED.

Bastidas, E (2003) *Una representación de la estructura de producción y la dinámica del comercio internacional de petróleo*, Mérida: Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes

BP (2005) British Petroleum, Sitio web: <http://www.bp.com>

Catunesco, Cátedra UNESCO (2002) Área Dinámica de Sistemas, Sitio web:
<http://www.catunesco.upc.es/ads/ads2.htm>

Cinco días (2005) EE UU libera las reservas estratégicas de petróleo, Sitio web:
http://www.cinco dias.com/articulo.html?xref=20050901cdscdieco_7&type=Tes&anchor=cdscdi&date=20050901

ECOPEPETROL (2005), Carta petrolera, Sitio web:
http://www.ecopetrol.com.co/especiales/carta_petrolera108/rev_pulso.htm

EIA (2005) Energy Information Administration, Sitio web: <http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/>

Encarta Premium Consulta (2005), Sitio web:
http://es.encarta.msn.com/encyclopedia_961533984/Gas%C3%B3leo.html

Energy Intelligence Group, Inc (2003) *The Crude Oils and Their Key Characteristics*, Sitio web: http://www.piwpubs.com/print_me.asp?document_id=86640&pID=18

Finanzas (2005) Las reservas estratégicas de petróleo de EEUU Sitio web:
<http://www.finanzas.com/id.8623002/noticias/noticia.htm>

García, J.M (2003) *Teoría y ejercicios prácticos de Dinámica de Sistemas*, Barcelona

- Instituto Mexicano del Petróleo (2005), Tipos de petróleo, Sitio web: <http://www.imp.mx/petroleo/apuntes/tipos.htm>
- Instituto Tecnológico de Sonora (2002), Introducción a la Dinámica de Sistemas, Sitio web: <http://www.itson.mx/dii/elagarda/apagina2001/Dinamica/intro.htm>
- Martínez, S. (2005) Página de Simulación Dinámica, Sitio web: <http://www.ieg.csic.es/dinamica/>
- Ministerio de Energía y Petróleo (2005), Entra en vigencia nueva cesta de referencia OPEP, Sitio web: <http://www.mem.gob.ve/noticias/recientes/index.php>
- Mogollón, M (2004) Las perspectivas del mercado 2005, Sitio web: <http://www.descifrado.com/articulo.php?idart=8562&columnista=Mery%20Mogoll%C3%B3n&cat=Opini%C3%B3n>
- Oliveros, L. (2005) El “Sencillo” Mercado Petrolero, Sitio web: <http://www.analitica.com/ya/economia/opinion/6787388.asp>
- OPEC (2005) Organization Producers Exporting Crude, Sitio web: <http://www.opec.org>
- Palacios, L.C (2005) El mercado petrolero, según el FMI, Sitio web: http://rionegro.com.ar/suple_energia/05-04-20/nota11.php
- PDVSA (2005) Petróleos de Venezuela S.A., Sitio web: <http://www.pdvs.com/>
- Probst, Oliver (2005) El fin del petróleo barato y las opciones energéticas del futuro, Sitio web: <http://www.mty.itesm.mx/die/ddre/transferencia/Transferencia53/eli2-53.html>
- Roberts, N. et al. (1983) *Introduction to Computer Simulation: The System Dynamics Approach*, Addison-Wesley.
- Río Negro On Line, Mercado petrolero ignora a la OPEP y suma récords, Sitio web: <http://rionegro.com.ar/arch200503/18/i18j07.php>
- Rodríguez, P. et al. (2000) Gestiopolis documentos: Metodología para el análisis de sistemas sociales y económicos, Sitio web: <http://www.gestiopolis.com/recursos/documentos/fulldocs/eco/metodologiadinamica.htm>
- Smith, W.J (2004) El Mercado petrolero internacional, Sitio web:
- Sterman, J. (2000) *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*, Boston: McGRAW-HILL.
- Tecnociencia (2004) Mercado y crisis del petróleo, Sitio web: <http://www.tecnociencia.es/especiales/petroleo/petroleo1.htm>

Torrealba, J. (2000) *Elementos y estructura de un modelo*. Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial

WEPS (2002) The World Energy Projection System, Sitio web:
<http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/weps>

Wikipedia (2005) La enciclopedia libre, Sitio web: <http://es.wikipedia.org/wiki/Gas%C3%B3leo>

Vargas, O.R. (2003) El petróleo y los Estados Unidos, Sitio web:
http://www.lainsignia.org/2003/febrero/int_077.htm

Varo, V *et. al.* (2005) La brusca reaparición del fantasma energético, Sitio web:
<http://www.expansion.com/especiales/petroleo/index.html>

Vensim (2005) Ventanas System Inc, Sitio web: <http://www.vensim.com>

Zanoni, J.R. (2002) *El Mercado petrolero mundial*, Caracas: Facultad de Ciencias Económicas y Sociales, Universidad Central de Venezuela.

www.bdigital.ula.ve