



TESIS DE GRADO
EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

SIMULACIÓN SOBRE LA VARIABILIDAD DEL
PRECIO DEL ETILENO

Autor: Lucas Leonardo Parisi

Director de Tesis: Jorge Abreu

2005

RESUMEN EJECUTIVO

El etileno es el químico orgánico con mayor producción en el mundo. Es la materia prima más importante de la industria petroquímica; se convierte en una gran cantidad de productos intermedios y en productos terminados de alto consumo, principalmente polímeros como plásticos, resinas, fibras y elastómeros. Otros productos importantes son los solventes, los tensioactivos (detergentes), las pinturas, los plastificantes y los anticongelantes.

La evolución del precio del etileno es altamente cíclica. Su variabilidad influye en la economía mundial y puede llevar a países a devaluar su moneda o a un estado de recesión. Además, las inversiones realizadas en proyectos de etileno serán frustradas ya que inevitablemente llevarán a quiebras a algunas de las plantas. Esto representa dinero y mano de obra desperdiciada. Esto causa no sólo un daño económico sino también un daño desde el enfoque de responsabilidad social.

Desde el punto de vista productivo, las oscilaciones disminuyen la utilización de la capacidad promedio. También, aumentan el riesgo de toda la industria provocando temporalmente menos proyectos y menor desarrollo tecnológico.

Por lo tanto, el objetivo es conseguir una evolución continua y no caótica del etileno que permita desarrollar un crecimiento sostenido de la industria petroquímica.

El problema a resolver consiste en una gran cantidad de variables relacionadas entre sí. La no linealidad de las variables, la retroalimentación y los delays determinan que se trata de un sistema complejo. El comportamiento del sistema es inesperado, antiintuitivo e incluye varios aspectos humanos que se deberán incluir para resolverlo. Mediante una simulación se podrá modelizar la realidad y descubrir la estructura detrás del comportamiento para entender el sistema. De esta manera, podrán realizarse cambios de políticas para mejorar el futuro de la proyección. La teoría que permite encarar el problema con estas características se llama Dinámica de Sistemas.

El primer paso consiste en modelizar el sistema y descubrir su estructura. Luego, se ajustan las variables del modelo para que simule la realidad. Por último, se plantean diversas propuestas y se analizan los resultados.

Al finalizar el análisis se concluye que es necesario que la industria se maneje como un todo y que todos los productores estén ligados entre sí. Si cada uno actuara individualmente todos ampliarían sus capacidades en el momento en que invertir es rentable, pero luego al bajar el precio del etileno un gran número de productores quiebran.

Este mercado requiere una institución que regule las ampliaciones de capacidad para que la capacidad total no supere a la demanda. Pero, esta institución, también debe tener en cuenta que la capacidad debe aumentar para poder satisfacer la demanda. Otras tareas que llevará a cabo esta institución reguladora son: recopilar información estadística para la realización de proyectos y ayudar a los productores en el cálculo de sus costos. Al no existir una institución que consolide las acciones de todos los productores, el sistema oscila y es improductivo.

DESCRIPTOR BIBLIOGRÁFICO

El etileno es la materia prima más importante de la industria petroquímica. La evolución de su precio es altamente cíclica. Su variabilidad perjudica a la economía mundial. El objetivo es conseguir una evolución continua y no caótica del etileno que permita desarrollar un crecimiento sostenido de la industria petroquímica.

La no linealidad de las variables, la retroalimentación y los delays determinan que se trata de un sistema complejo. Basado en la teoría de Dinámica de Sistemas se modelizó la realidad para analizarla a través de una simulación.

Se concluyó que este mercado requiere una institución que regule las ampliaciones de capacidad para que la capacidad instalada no supere a la demanda.

Índice

1. Introducción	1
1.1. Procesos y usos	2
1.2. Materias primas	5
1.3. Logística	6
1.4. Información económica	7
1.5. Fluctuaciones en el precio	9
1.6. Consecuencias de las fluctuaciones	10
1.7. Método de resolución	11
2. Variables principales	12
3. Diagrama de causalidad	14
4. Diagrama de stocks y flujos	18
4.1. Introducción	
4.2. Ciclos de un commodity	20
5. Dinámicas	22
5.1. Producción y stocks	22
5.2. Utilización de la capacidad	24
5.3. Capacidad instalada y capital deseado	26
5.4. Demanda	31
5.5. Determinación del precio	33
6. Ajuste de las variables	36
6.1. Datos históricos	39
6.2. Cálculo de las variables	41
7. Bondad de ajuste	49
8. Análisis gráfico de las dinámicas	51
9. Proyección de las variables	54
10. Indicadores de proyecto	55
11. Propuesta	56
12. Bibliografía	58
13. Anexo	60

1. INTRODUCCIÓN

El etileno es el químico orgánico con mayor producción del mundo. Es la materia prima más importante de la industria petroquímica; se convierte en una gran cantidad de productos intermedios y en productos terminados de alto consumo, principalmente polímeros como plásticos, resinas, fibras y elastómeros. Otros productos importantes son los solventes, los tensioactivos (detergentes), las pinturas, los plastificantes y los anticongelantes.

Propiedades

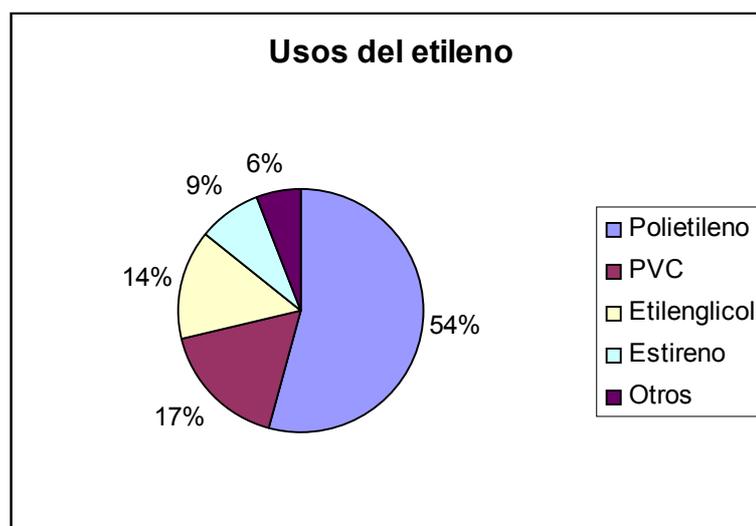
El etileno, el hidrocarburo oleofínico (oleofina) menos pesado, es un gas incoloro e inflamable y tiene un olor levemente dulce.

La composición química del etileno es la siguiente: $H_2C=CH_2$. Su doble enlace lo convierte en altamente reactivo y por adición se obtienen hidrocarburos saturados, sus derivados y polímeros.

El etileno es un commodity. Un commodity es un producto indiferenciable, generalmente proveído por muchos productores independientes pequeños de manera que el mercado es aproximadamente competitivo. Sin embargo, inestabilidades cíclicas crónicas se encuentran también en industrias dominadas por una pequeña cantidad de grandes productores y en industrias que ofrecen productos altamente diferenciados, como por ejemplo aviones, inmobiliarias, construcción de barcos, semiconductores y seguros. El etileno es un producto indiferenciable en el que el mercado está repartido por algunos grandes productores.

1.1. Procesos y usos

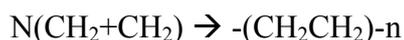
Los productos derivados del etileno son de alto consumo. El siguiente gráfico muestra los usos principales a nivel mundial.



Fuente: SRI consulting Mayo 2004

Las reacciones químicas del etileno se clasifican según su fin: comercial o académico. Es probable que algunas reacciones de la segunda categoría estén en la primera categoría en el futuro. Las reacciones industriales ordenadas por orden de importancia son: polimerización, oxidación y reacciones de adición.

Polimerización: representa el segmento más grande de la industria petroquímica. Además el polietileno es el más alto consumidor de etileno. Etileno de 99,9+% de pureza se polimeriza bajo condiciones específicas de presión y temperatura y en presencia de un catalizador.



La reacción es exotérmica y puede involucrar iniciación homogénea (radical o catiónica) o iniciación heterogénea (catalizador sólido). El rango de peso molecular de los productos varían desde menos de 1000 hasta más de 5 millones (etileno de ultra alto peso molecular).

Existen dos sistemas comerciales importantes para la producción de polietileno: polimerización de alta presión y polimerización de baja presión. Los procesos de alta

presión producen polietileno de baja densidad (LDPE) con densidad de 0,910-0,940 g/ml. El LDPE se usa principalmente en la manufactura de películas para moldeo por inyección, como cable y como coberturas para papel.

Los procesos convencionales de baja presión producen polietileno de alta densidad (HDPE) con una densidad de 0,941-0,970 g/ml, usado principalmente para productos moldeados por soplado e inyección. Algunos procesos muy modernos de baja presión utilizan catalizadores avanzados para la producción de LPDE.

Oxidación: A partir de ella se obtiene óxido de etileno – glicol rankeado segundo, acetaldehído rankeado sexto y acetato de vinilo rankeado octavo en la lista de consumidores de etileno en Estados Unidos. La oxidación directa es el proceso utilizado en la actualidad porque es más económico que los procesos de varias etapas.

Aproximadamente dos tercios del óxido de etileno producido se destina a la producción de etilenglicol mediante hidrólisis no catalítica a alta presión y a alta temperatura. Se obtienen como subproductos glicoles de orden superior como di- y trietilenglicol. Recientemente se empezó a comercializar un proceso que evita la producción de óxido de etileno como producto intermedio.

La oxidación directa del etileno es el camino más conveniente para obtener acetaldehído. Antes de 1960 se obtenía a partir de etanol, de acetileno o de hidrocarburos saturados.

En la actualidad, para obtener acetato de vinilo se utiliza un proceso basado en el etileno en la fase vapor.

Adición: Las aplicaciones están ordenadas en consumo decreciente:

Reacción	Para la producción de
Halogenación-hidrohalogenación	Dicloruro de etileno, cloruro de etileno, dibromuro de etileno, cloruro de etilo.
Alquilación	Etilbenceno, etiltolueno, alquils de aluminio
Oligomerización	Alfa olefinas, alcoholes lineales primarios.
Hidratación	Etanol
Hidroformilación	Propionaldehído

El producto intermedio más importante producido por adición es el cloruro de etileno $\text{ClCH}_2\text{CH}_2\text{Cl}$, que es el tercer consumidor de etileno en Estados Unidos. El derivado esencial del cloruro de etileno (EDC) es el monómero de cloruro de vinilo (VCM) usado para producir resinas de cloruro de polivinilo (PVC) e hidrocarburos clorados.

El cloruro de etilo y el dibromuro de etileno, usados en la nafta como aditivo antidetonante, también son manufacturados mediante halogenación-hidrogenación del etileno.

El etilbenceno, que es el precursor del estireno, rankea cuarto en el consumo de etileno de Estados Unidos y se produce a partir del benceno y del etileno con rendimientos por encima del 98% bajo 4 procesos diferentes.

El etiltolueno se utiliza para fabricar viniltolueno.

1.2 Materias primas (feedstocks)

Como materia prima se utilizan componentes simples, como el etano o el propano o hidrocarburos multicomponentes, como el gas natural licuado (GNL), las naftas y el gasoil obtenidos del petróleo crudo.

En Europa se utilizan naftas pesadas (kerosene) obtenidas directamente del crudo porque hay escasez de gas natural. En EEUU el GNL se usa lo máximo posible. Sin embargo, debido a su escasez en ascenso cada vez se utilizan más las naftas pesadas, parafinas y gasoils.

Hoy el etileno se produce casi exclusivamente a través de la pirolisis de hidrocarburos en reactores tubulares instalados sobre calentadores. Existen otras tecnologías pero todavía están en proceso de desarrollo.

La transformación de hidrocarburos parafínicos y nafténicos en olefinas es un proceso altamente endotérmico. El etano es el Feedstock preferido para el etileno y su mecanismo ya está muy desarrollado.

Refinerías petroquímicas: La tendencia de hoy es usar feedstocks más pesados y líquidos para la producción de olefinas, principalmente para el etileno y el propileno, porque su demanda de mercado crece más rápidamente. Una planta de etileno de 450.000 ton/año basada en feedstocks líquidos requiere aproximadamente 1.500.000 ton/año de feedstocks que equivale a la producción de una gran refinería. Para eliminar el costo de transporte, se construyeron grandes polos petroquímicos cerca de refinerías de petróleo. (en Argentina, por ejemplo, el polo petroquímico de Bahía Blanca).

Otras formas de obtención muy poco utilizadas:

- Deshidratación del etanol
- A partir del carbón
- A partir del propileno

1.3. Logística

Las entregas se realizan en tres formas de transporte:

- ✓ Camiones con tanques criogénicos por tierra
- ✓ En buque
- ✓ Sistema de tuberías por tierra. Para volúmenes muy grandes (USA y Europa)

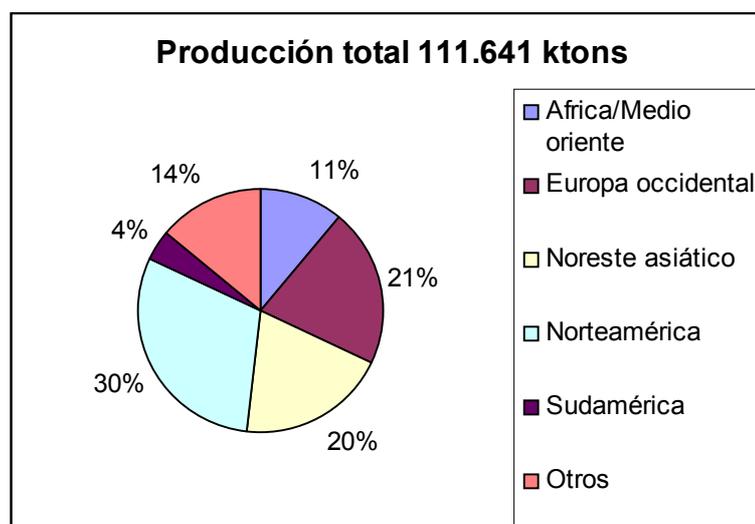
En las plantas el almacenamiento operacional se realiza en tanques de presión (4hs de producción de almacenaje). El almacenamiento del producto terminado se realiza en tanques a presión atmosférica diseñados para soportar condiciones criogénicas:

- Almacenamiento criogénico: Se puede almacenar por varios años. Se construyeron tanques con una capacidad de 24.000 m³. En una planta de producción de etileno que produce 300.000 ton/año se tiene una reserva de producción de 16 días.
- Domos de sal: Se almacenan grandes cantidades a alta presión en cavidades creadas en las profundidades de los domos de sal. En EEUU está conectado directamente con la tubería para abastecer a los consumidores.
- Cavernas: En algunas áreas del mundo la sal se encuentra en capas estratificadas a diferentes profundidades separadas por capas de rocas sedimentarias. Dow Chemical Co. Opera con éxito un sistema de almacenamiento en cavernas en Midland, Michigan desde el fin de la década del 50.

Los domos de sal y las cavernas son las formas más económicas y efectivas de almacenamiento, junto con los sistemas de transporte con tuberías que conectan a productores y consumidores. El depósito en tierra más grande tiene una capacidad de 530.000 m³ de etileno (su tamaño real es mayor a 3 millones de m³, incluyendo las instalaciones).

1.4. Información económica

La capacidad mundial del etileno es de 111.641 ktons (2004). Se espera que para 2009 la capacidad instalada ascienda a 140.000 ktons. Según los productores actuales la industria está en crecimiento. Norteamérica es el mayor productor seguido por el noreste asiático y por el noreste asiático. Sudamérica participa solamente con el 4% de la capacidad. Sin embargo, a nivel regional el impacto económico es importante.



El etileno es la materia prima principal de la industria petroquímica. Según la Cámara de la Industria Química y Petroquímica de Argentina (CIQyP), a comienzos del siglo XXI el consumo mundial de productos petroquímicos finales representa un valor cercano a los 200.000 millones de dólares. De este valor total las dos terceras partes corresponden a los polímeros termoplásticos. La porción restante se distribuye entre elastómeros, fertilizantes, fibras sintéticas y otros productos finales demandados por un conjunto de sectores de la industria:

- ✓ Packaging para la industria alimenticia y de bebidas
- ✓ Packaging para la comercialización de producto de consumo masivo
- ✓ Industria de la construcción
- ✓ Industrias automotriz y de autopartes
- ✓ La industria textil sintética

- ✓ Electrodomésticos
- ✓ Piezas industriales

Por lo tanto la evolución de la demanda de la industria petroquímica estará relacionada con la del ciclo económico general y particularmente con la marcha de los principales bloques regionales de la economía mundial.

La demanda se concentra principalmente en América del Norte, Europa Occidental y Asia. La capacidad instalada se relocalizó en los últimos años y está distribuida más uniformemente en el mundo debido a la búsqueda de materias primas.

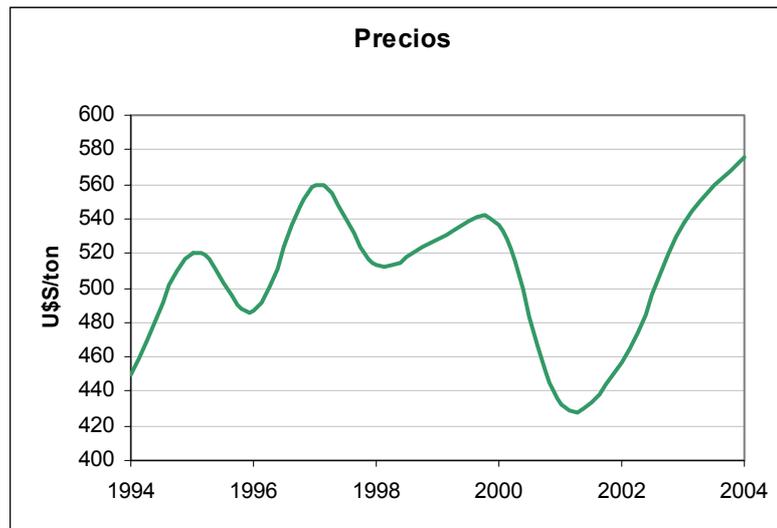
En la Argentina, por ejemplo, el polo petroquímico de Bahía Blanca reúne alrededor del 60% de la producción nacional del sector. La presente configuración productiva de este polo es el resultado de dos etapas de inversión: la primera fue el inicio con la instalación del cracker de etileno de Petroquímica Bahía Blanca (PBB) en 1981, junto con la planta flotante swing (PED y PEBDL) y la planta PEBD convencional. La segunda etapa fue entre 1986 y 1987 cuando se pusieron en marcha las plantas PEAD, VCM, PVC y cloro-soda del Grupo Indupa. El cracker inicial de PBB se alimenta de etano proveniente de la planta de separación de gases de la empresa Transportadora de Gas del Sur.

Entre 1991 y 1996 se privatizó la participación accionaria de las plantas del polo bahiense. Tres empresas internacionales consolidaron los activos: Dow Chemical, YPF (luego Repsol YPF) y Solvay.

En 2001 el cracker de PBB aumentó su capacidad de 275.000 ton/año a 700.000 ton/año. El nuevo cracker también se alimenta con etano, pero cuenta con una flexibilidad de 20% para el empleo de propano. Luego de esta ampliación, el resto de las plantas aumentaron sus capacidades para aprovechar el aumento de producción de etileno a nivel local.

1.5. Fluctuaciones en el precio

La evolución del precio del etileno en los últimos años fue claramente fluctuante. Con una media en los 500 U\$\$ por tonelada el precio mostró fuertes oscilaciones. La amplitud de las oscilaciones es de 200 U\$\$/ton que equivale a un 20% por encima y por debajo de la media. Además, la evolución contiene una tendencia creciente.



Año	Precio (U\$\$/ton)
1994	450
1995	520
1996	487
1997	559
1998	513
1999	528
2000	536
2001	432
2002	457
2003	538
2004	576

Las variaciones son aun mayores que las vistas anteriormente, ya que a medida que transcurren los meses las variaciones cambian notoriamente y los picos son más altos.

Por ejemplo en octubre de 2003 el precio era de 495 U\$\$/ton y ascendió para febrero de 2004 a 800U\$\$/ton.

1.6. Consecuencias de las fluctuaciones

Los productos del etileno se distribuyen a todo el mundo y a la mayoría de los productos de consumo masivo. Así como el petróleo, su variabilidad es altamente influyente en la economía mundial. Sus fluctuaciones pueden llevar a devaluaciones y a recesiones.

Las inversiones realizadas en proyectos de etileno serán frustradas ya que inevitablemente llevarán a quiebras a algunas de las plantas. Esto representa dinero y mano de obra desperdiciada. Esto causa no sólo un daño económico sino también un daño desde el enfoque de responsabilidad social.

Desde el punto de vista productivo, las oscilaciones disminuyen la utilización de la capacidad promedio. Esto se debe a que el aumento de producción está limitado por la capacidad instalada mientras que en los períodos recesivos la utilización disminuye enormemente. La baja utilización lleva a costos productivos más altos porque los costos fijos se prorratan en una menor cantidad de productos. Por lo tanto, la productividad desciende.

Estas oscilaciones también aumentan el riesgo de toda la industria. Aunque luego será compensado provocará temporalmente menos proyectos y menos desarrollo tecnológico. El desarrollo tecnológico permite mayor seguridad, mayor productividad y menor necesidad de mano de obra.

Por lo tanto, el objetivo es conseguir una evolución continua y no caótica del etileno que permita desarrollar un crecimiento sostenido de la industria petroquímica.

1.7. Método de resolución

El problema a resolver consiste en una gran cantidad de variables relacionadas entre sí. La no linealidad de las variables, la retroalimentación y los delays determinan que se trata de un sistema complejo. El comportamiento del sistema es inesperado, antiintuitivo e incluye varios aspectos humanos que se deberán incluir para resolverlo.

Mediante una simulación se podrá modelizar la realidad y descubrir la estructura detrás del comportamiento para entender el sistema. De esta manera podrán realizarse cambios de políticas para cambiar el futuro de la proyección. La simulación permite ahorrar dinero y tiempo en experimentaciones físicas.

La teoría que permite encarar el problema con estas características se llama Dinámica de Sistemas.

El objetivo de la simulación es reducir los problemas generados por las fluctuaciones del precio. Los indicadores del modelo intentarán cuantificar esos problemas.

2. VARIABLES PRINCIPALES

Con respecto al modelo, existen dos tipos de variables: las variables endógenas y las variables exógenas. Las variables exógenas no estarán modelizadas sino que simplemente se ingresarán los valores reales históricos y los proyectados hacia el futuro. En el caso en que las variables exógenas no presenten fluctuaciones y el modelo sí, las oscilaciones son causadas dentro del modelo. Al determinar los límites del modelo se clasifica a las variables en endógenas y en exógenas.

Por ejemplo, una variable exógena del modelo será el precio del crudo (WTI). Su modelización implicaría un trabajo mayor que la simulación del precio del etileno. Claramente el WTI presenta fluctuaciones. Por lo tanto será vital detectar cuáles de esas fluctuaciones del etileno son exógenas y cuáles son endógenas. Sobre la variabilidad causada dentro del modelo es sobre la que se podrá actuar.

Existen diversas formas de acción. Se hallan variables que pueden cambiarse a pesar de que en ciertos casos requiera una inversión. A estas variables se las denomina “Puntos de apalancamiento”. Otra forma de acción se produce cambiando la estructura del modelo, por ejemplo, modificando el método de realización de cierto proceso. Debe tenerse en cuenta que ante los cambios de política siempre se ejerce cierta resistencia.

La variable fundamental del modelo es el precio del etileno. El proyecto se basa principalmente en encontrar el método en el que se determina el precio en la industria. Las variables que influirán en él son la oferta, la demanda, los costos y las expectativas de los jugadores del mercado.

A partir de estas variables se desprenden las principales dinámicas. La oferta estará determinada por la capacidad instalada y también influirá en ella la utilización de esa capacidad. Para la determinación de la demanda influirá el precio mismo del etileno y el precio del propileno, entre otras variables.

Por otro lado, los productores no permitirán que el precio del etileno se mantenga por debajo o muy cerca de los costos de producción.

El aspecto humano está contemplado y es la mayor ventaja del modelo. Enfoca el problema desde el punto de vista del pensamiento sistémico ya que todas las decisiones serán tomadas por seres humanos. La decisión de invertir dependerá de la percepción de los productores. Los compradores estarán dispuestos a pagar por el etileno el valor que ellos consideran justo. Otro ejemplo es que un aumento de producción no llevará exactamente a la capacidad óptima ya que se trata de una gran cantidad de productores individuales dispersos en todo el mundo, teniendo en cuenta que las ampliaciones

demoran un largo período de tiempo. Estos son simplemente unos ejemplos de la importancia del aspecto humano sobre la economía.

Esto conlleva a plantearse que es posible que las fluctuaciones también tengan un origen endógeno y que sea probable una reducción de ellas.

3. DIAGRAMA DE CAUSALIDAD

El feedback es uno de los conceptos principales de Dinámica de sistemas. Nuestros modelos mentales generalmente no logran incluir los feedbacks críticos que determinan la dinámica de los sistemas. En esta teoría se utilizan herramientas para conceptualizar la estructura de los sistemas. Las herramientas más importantes son los diagramas de causalidad (*causal loop diagrams*) y los diagramas de stocks y flujos (*stock and flow maps*).

El diagrama de causalidad es la herramienta fundamental del pensamiento sistémico. Permite entender el sistema y los loops principales. Es la base para realizar el diagrama de stocks y flujos.

Notación

Un diagrama de causalidad consiste en variables conectadas por flechas que denotan relaciones causales entre ellas. Los loops de retroalimentación también están representados en el diagrama.

Cada relación causal tiene asignada una polaridad, positiva (+) o negativa (-), para indicar cómo cambia la variable dependiente ante un cambio de la variable independiente. Los loops importantes están representados por un símbolo que indica si el loop es positivo (reinforcing loop) o negativo (balancing loop). El símbolo circula en el mismo sentido que el loop al cual corresponde.

Las polaridades describen la estructura del sistema y no describen el comportamiento de las variables. Es decir, describen qué pasaría si se produjera algún cambio.

Aclaración: los diagramas de causalidad no distinguen entre stocks y flujos. Tampoco distinguen si una variable se acumula en el tiempo (ej: población) o si es simplemente una tasa de cambio (ej: nacimientos).

Es importante saber que todas las relaciones son causales. No se incluyen correlaciones entre variables. Las correlaciones representan el comportamiento de las variables en el pasado y no alcanza para decir que representan la estructura del sistema.

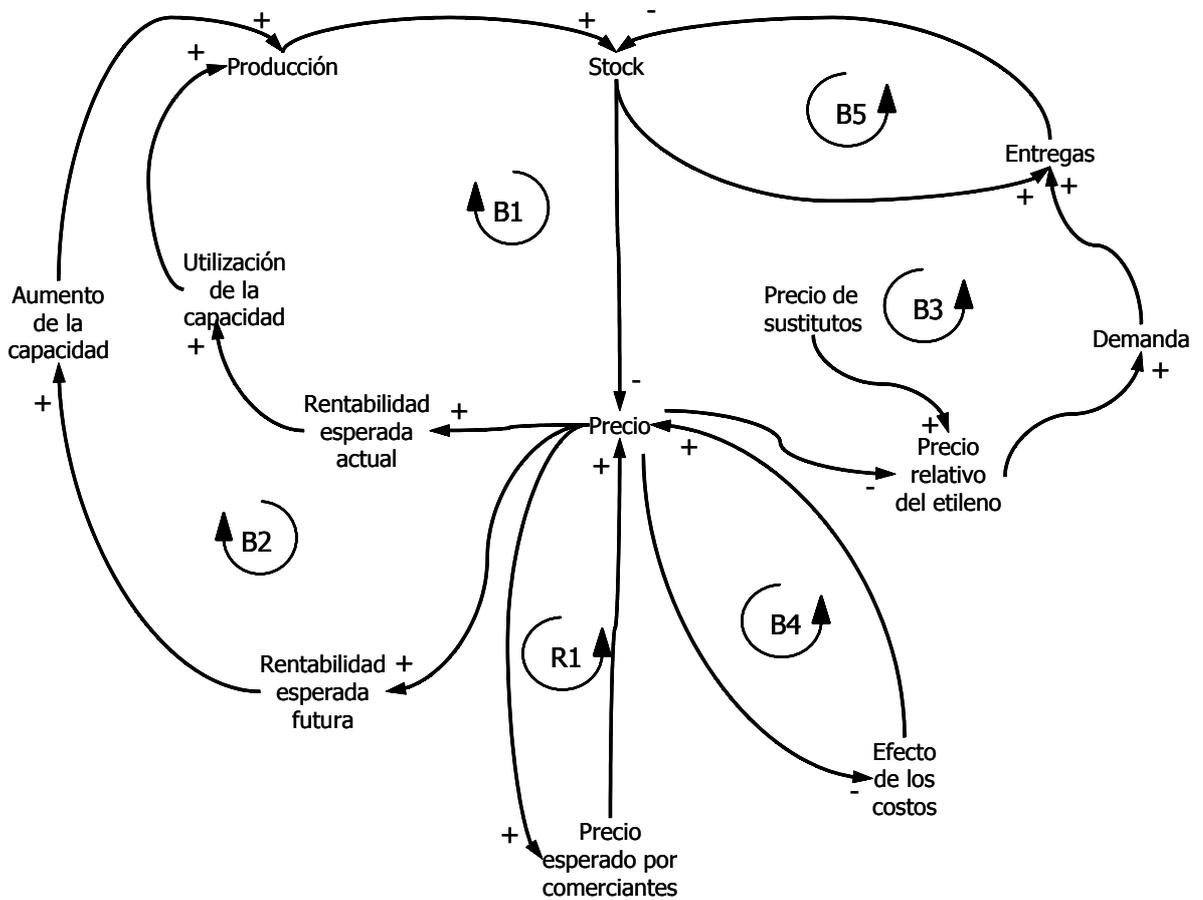
La polaridad de un loop se puede determinar de dos maneras:

1. Contando el número de cambios de signo en el *loop*. Si es par es un reinforcing loop y si es impar es un balancing loop.

2. Rastreado el efecto del cambio en el loop suponiendo que una variable dentro del loop aumenta. Se debe analizar relación por relación hasta llegar a esa variable inicial. Si aumenta es un reinforcing loop y si disminuye es un balancing loop.

Para loops de muchas variables conviene el segundo método para no confundirse.

Diagrama de causalidad del precio del etileno:



El diagrama muestra la estructura del sistema. Los loops principales son los siguientes:

- ✓ Utilización de la capacidad
- ✓ Aumento de la capacidad
- ✓ Sustitución
- ✓ Presión de los costos
- ✓ Disponibilidad
- ✓ Ajuste de precios

Luego, en el análisis mediante el diagrama de stocks y flujos, se agregarán otros loops de menor impacto.

Utilización de la capacidad (B1)

Al aumentar el precio del etileno las empresas aumentan la utilización de la capacidad de la planta. Al haber más producción, habrá más oferta y por lo tanto disminuirá el precio. De esta manera, bajará nuevamente la utilización. Se trata de un *balancing loop*.

El precio debe mantenerse alto durante un determinado periodo para que los productores creen que se mantendrá alto. Además, el aumento de producción tiene una demora operativa. La suma de ambos constituye un *delay* que permite que los valores fluctúen.

El loop también puede analizarse suponiendo un descenso del precio del etileno.

Aumento de la capacidad (B2)

Este loop es similar al anterior. Sin embargo, los *delays* son mucho mayores. Para tener una idea del precio a largo plazo debe mantenerse en un cierto valor durante un largo período de tiempo. Además las construcciones para aumentar la capacidad demoran mucho tiempo.

Si el precio se mantiene bajo durante un largo período de tiempo existirá una gran probabilidad de que muchas plantas no puedan soportarlo y quiebren. Este fenómeno también está contemplado en este *balancing loop*. Este descenso en la oferta aumentaría los precios nuevamente.

Los *delays* para aumentar la capacidad son mucho mayores y producen ciclos más largos que los de aumento de la utilización de la capacidad. Ambos loops incluyen *delays* físicos (adquirir la capacidad y retrasos de producción) y *delays* de información / percepción / toma de decisiones (los *delays* para generar los precios esperados, evaluar la rentabilidad esperada y realizar planes de inversión).

Sustitución (B3)

El etileno será afectado por el precio del propileno porque este último es un producto sustituto. Por lo tanto, si el precio del etileno aumenta con respecto al precio del propileno, la demanda de etileno descenderá. De esta manera se reducirían las entregas, aumentaría la oferta y el precio descendería. Este es otro *balancing loop*.

Presión de los costos (B4)

Cuando el precio está cerca de los costos, el efecto de los costos sobre el precio es muy alto. A medida que aumenta el precio del etileno, este efecto se reduce. De la misma manera si desciende el precio, el efecto de los costos hará que el precio aumente.

Disponibilidad (B5)

Este simple *balancing loop* muestra que al aumentar las entregas el stock disminuye y al aumentar el stock las entregas aumentan. Esto último se debe a que al haber más stock aumenta la capacidad de entrega. En el caso en el que no hay stock tampoco habrá entregas.

Ajuste de precios (R1)

Este es el reinforcing loop más trascendente en este sistema. Cuando aumenta el precio los comerciantes creen que el precio estará más alto de lo que creían antes. Asimismo, el precio se ajusta a lo que los comerciantes están dispuestos a pagar. Por lo tanto, si no existiesen los otros loops el precio ascendería eternamente (o descendería si la situación inicial muestra una baja en los precios).

4. DIAGRAMA DE STOCKS Y FLUJOS

Introducción

Los diagramas de causalidad permiten representar interdependencias y procesos con feedbacks. También son utilizados para comunicar el resultado de una modelización.

Sin embargo, los diagramas de causalidad tienen varias limitaciones. Una de las más importantes es la incapacidad para diferenciar los stocks y los flujos de la estructura de los sistemas. Los stocks y los flujos junto con el feedback son dos conceptos centrales de la Teoría de Dinámica de Sistemas.

Los stocks son acumulaciones que caracterizan al sistema y generan la información sobre la cual se basan las decisiones y las acciones. Los stocks le dan al sistema inercia y memoria. También generan delays debido a la acumulación que provocan. Son la fuente de desequilibrio en la dinámica de los sistemas. Una población o dinero depositado en una cuenta son ejemplos de stocks.

Los stocks varían de acuerdo a los flujos de entrada y de salida. Por ejemplo en el caso del stock Población, el flujo de entrada es los nacimientos, y el flujo de salida, las defunciones.

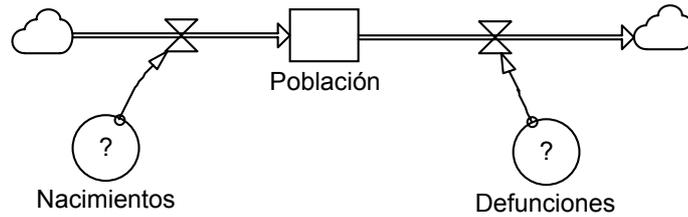
Matemáticamente, el stock es igual al stock inicial más la integral del flujo de entrada menos el flujo de salida.

Stock = stock inicial + integral de flujo de entrada – flujo de salida

Notación

- ✓ Los stocks se representan con rectángulos.
- ✓ Los flujos de entrada se representan con una flecha que apunta al stock y los flujos de salida con una flecha saliente.
- ✓ Las válvulas controlan los flujos.
- ✓ Las nubes representan a las fuentes y a los sumideros de los flujos. Están fuera de los límites del modelo. Se asume que tienen capacidad infinita.

Ejemplo:



La unidad de medida de los stocks es diferente que la de los flujos. La unidad de los flujos es la unidad del stock al cual afectan por unidad de tiempo.

$$[\text{flujo}] = [\text{stock}] / \text{unidad de tiempo}$$

Los stocks además de ser identificados por su unidad se reconocen congelando al sistema en una fotografía. En este caso los flujos no se verían en la fotografía, mientras que los stocks sí. Por esta razón los stocks caracterizan al sistema.

Para la modelización de la evolución del precio del etileno se utilizó el diagrama de stocks y flujos, que se basó en el diagrama de causalidad visto anteriormente.

El diagrama de stocks y flujos se realizó en el programa de simulación Powersim.

4.1 Ciclos de un commodity

El etileno es un commodity y por lo tanto está sujeto a las fuerzas de mercado: oferta y demanda. Estas se caracterizan por generar *feedbacks*. El sistema se complica a causa de dos características propiamente humanas: la tendencia de ver el futuro a través de proyecciones lineales del pasado reciente y la tendencia a seguir al líder entre los que toman las decisiones de invertir (W.W.Rostow 1993).

La mayoría de los commodities experimentan ciclos en los precios y en la producción. El etileno, debido a su largo delay de construcción y a la larga vida de sus plantas, tiene una dinámica fuertemente cíclica. En la industria del etileno los *balancing loops* a través de los cuales el precio trata de equilibrar la oferta y la demanda provocan las oscilaciones.

Los commodities fluctúan mucho más que la economía y tienen ciclos de diferentes períodos. Por lo tanto, las oscilaciones son el resultado de un factor endógeno al sistema y debe ser analizado para intentar disminuirlo. Los precios de los commodities afectan a la sociedad ya que sus derivados se utilizan en una amplia gama de productos de consumo masivo.. Sus fluctuaciones pueden generar devaluaciones, recesión y caos político.

Generalmente el precio de los commodities describe una curva con dos ciclos superpuestos de distintos períodos y amplitudes. Un modelo apropiado debe incluir ciclos, de corto y de largo plazo.

La teoría económica clásica de los ciclos de los commodities es el “modelo tela de araña” (*cobweb model*) que establece que la demanda (D) responde al precio (P) inmediatamente mientras que la oferta (S) responde con un retraso: $D_t = f_D(P_t); S_t = f_S(P_{t-1})$. Este modelo oscila con período igual al doble del intervalo entre los períodos de tiempo. A pesar de que el modelo capte la estructura básica de los ciclos de los commodities (el delay en el *feedback* negativo debido a la respuesta de la oferta al precio), no es adecuado para una modelización precisa.

Los errores del modelo “tela de araña” son los siguientes:

- El modelo no representa la estructura de stocks y flujos de los mercados reales (incluyendo stocks, productos en proceso y capacidad instalada).
- Está formulado en tiempo discreto y no continuo.
- Se asume que el intervalo entre períodos corresponde al tiempo requerido para producir el commodity. Sin embargo, los períodos observados en los

ciclos de commodities son notablemente mayores que el doble del delay de producción.

- No distingue entre la capacidad de producción y la utilización de la capacidad y por lo tanto no puede explicar los múltiples períodos oscilatorios observados en varias industrias.

Un modelo útil debe representar la estructura de stocks y flujos, los delays y los múltiples procesos de decisión del mercado. Los delays deben tener sus valores reales, no múltiplos de un período de tiempo arbitrario, y los modelos deben estar formulados en tiempo continuo. El modelo de stocks y flujos simulado en Powersim cumple con todos estos requerimientos.

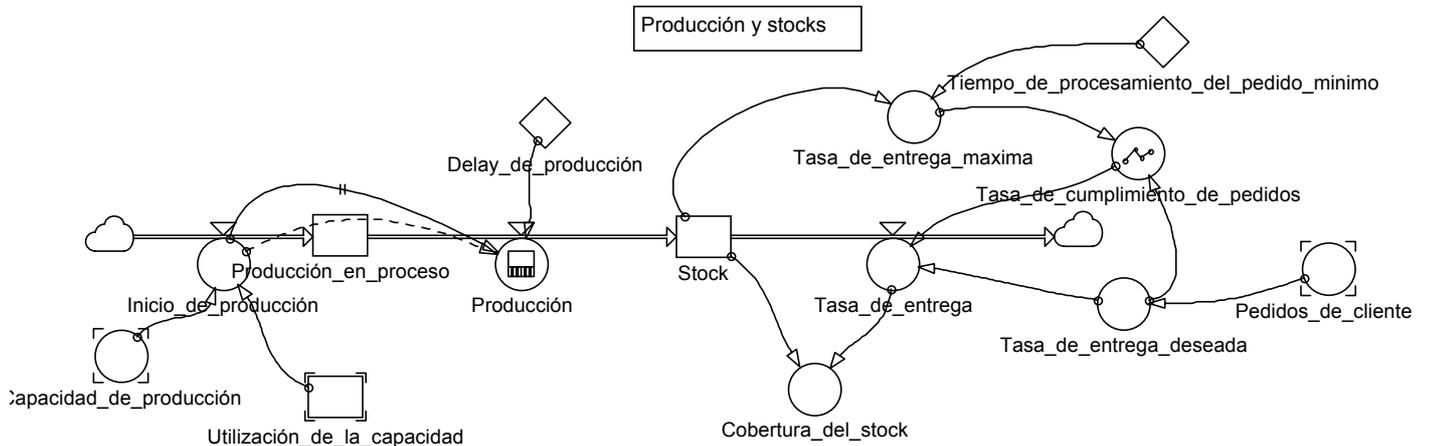
Debido a la extensión del modelo se fraccionará en las dinámicas principales para su explicación:

1. Producción y stocks
2. Utilización de la capacidad
3. Capacidad instalada
4. Demanda
5. Determinación del precio

El modelo completo está en el ANEXO.

4.2. Producción y stocks

El siguiente diagrama de stocks y flujos permite modelar la cadena de abastecimiento del etileno:



El inicio de producción estará determinado por la multiplicación entre la capacidad de producción y la utilización de esa capacidad. Estas dos variables provienen de otras dinámicas que se explicarán más adelante.

La variable “inicio de producción” indica la cantidad de etileno que se agrega a la producción en proceso en un determinado período de tiempo. Ese período de tiempo se denomina “time step” y todas las variables están referidas a él.

La producción finaliza luego de que transcurra el delay de producción. Un ajuste apropiado se logra con un delay de tercer orden en función del inicio de producción. Al salir de producción en proceso, ingresa en el stock y está disponible para ser entregado.

La tasa de entrega deseada es igual a los pedidos de los clientes. Estos pedidos no son una variable exógena al modelo, sino que pertenecen a la dinámica de la demanda que será explicada luego. Generalmente la tasa de entrega es igual a la deseada, pero si el stock no es suficiente, no se podrá entregar la cantidad de etileno pedida por los clientes. Para simular este fenómeno la tasa de entrega se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Tasa de entrega} = \text{Tasa de entrega deseada} * \text{Tasa de cumplimiento de pedidos}$$

La tasa de cumplimiento de pedidos es un factor entre 0 y 1 que se determina de la siguiente manera:

$$\text{Tasa de entrega máxima} = \text{Stock} / \text{Tiempo de procesamiento de pedido mínimo}$$

Tasa de cumplimiento de pedidos = f (tasa de entrega máxima / tasa de entrega deseada)

La tasa de cumplimiento de pedidos es una función creciente que se obtendrá en el ajuste del modelo.

A partir de la tasa de entrega se calcula la cobertura del stock que equivale al tiempo que se puede continuar entregando la tasa de entrega actual hasta terminar el stock. Se calcula como el stock dividido la tasa de entrega. Este índice es una de las variables que influye en la determinación del precio del etileno.

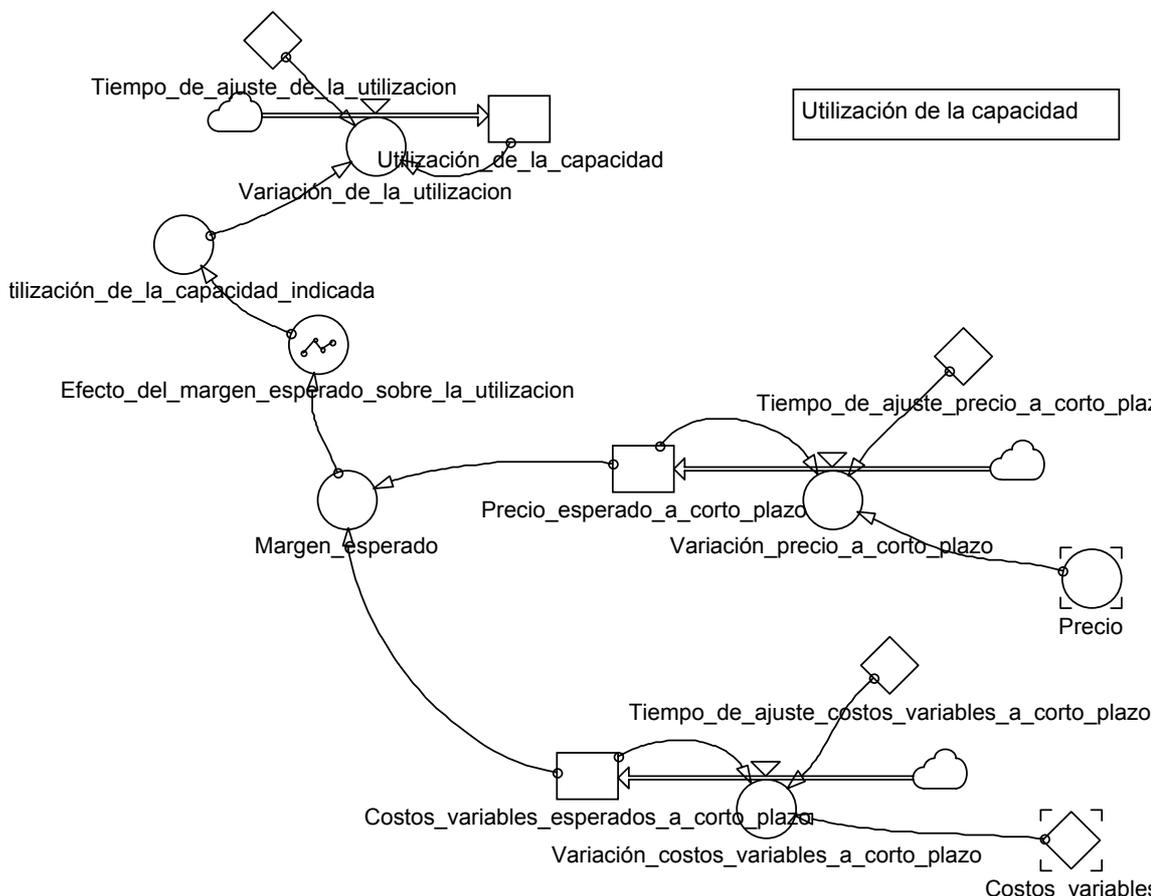
Variables a ajustar:

1. Delay de producción
2. Tiempo mínimo de procesamiento del pedido
3. Tasa de cumplimiento de pedidos

Además deben ajustarse los valores iniciales de los stocks.

4.3. Utilización de la capacidad

La dinámica “utilización de la capacidad” simula la variación de la utilización de la capacidad instalada debido a cambios en la rentabilidad esperada.



El “margen esperado” depende del “precio esperado a corto plazo” y de los “costos variables esperados a corto plazo”. El precio esperado es la variable “precio” suavizada por el tiempo de ajuste. A mayor tiempo de ajuste, habrá mayor suavización y menor será la reacción del empresario a la variación de los precios. De la misma manera se suavizan los costos variables. En matemática este tipo de suavización se denomina exponencial (exponential smoothing).

Los costos fijos no son una variable que interviene en la decisión de aumentar o disminuir la utilización de la capacidad. No depende de ellos la decisión, solamente depende de los costos variables.

El margen esperado se calcula como la división del precio esperado sobre los costos variables. Sin embargo la utilización de la capacidad instalada no será de 100% si el margen es mayor que 1, ni será de 0% si el margen es menor que 1. Cada planta de etileno trabaja con costos diferentes y la decisión variará en cada una. Por lo tanto se

generó una variable gráfica que indica el efecto del margen esperado sobre la utilización de la capacidad. Será una función creciente continua y levemente escalonada en los costos de cada planta. Dependiendo de la materia prima utilizada para la planta de etileno los costos varían. En general, la materia prima utilizada depende de la ubicación geográfica de la planta. Otra razón por la cual la curva es continua, es que algunos productores serán más optimistas y otros más pesimistas. Cuando el margen esperado es bajo, solamente los productores optimistas de plantas eficientes creen que es redituable operar.

En una situación crítica, esta curva dependería de los costos fijos. Si los costos fijos son demasiado altos, las plantas solamente operarán a un nivel de utilización alto y por lo tanto con un margen esperado alto.

La utilización generalmente no puede ser cambiada inmediatamente. Esto se debe a que hay que cambiar, por ejemplo, el número de operarios necesarios. Por lo tanto también se suavizó exponencialmente la utilización de la capacidad.

VARIABLES A AJUSTAR:

1. Tiempo de ajuste precio a corto plazo
2. Tiempo de ajuste costos variables a corto plazo
3. Efecto del margen esperado sobre la utilización
4. Tiempo de ajuste de la utilización

El tiempo de ajuste de precios a corto plazo está relacionado con la longitud de la cadena de abastecimiento y con la volatilidad de la demanda. A mayor delay de producción, más se incrementará el tiempo de espera de los productores para decidir si un determinado cambio en el precio es suficiente para cambiar la utilización. Además, cuánto más ruido tiene el precio, mayor tiempo demoran los productores para discernir entre un cambio duradero y las variaciones temporarias.

Sin pérdida de generalidad, la capacidad es medida en una unidad arbitraria denominada unidad de capacidad y se define la productividad de la capacidad como 1. Por lo tanto cada unidad de capacidad corresponde a la cantidad de planta y de equipamiento necesarios para producir una unidad de etileno por año¹. La productividad de la capacidad se asume constante.

$$\text{Capacidad de producción} = \text{Capital} * \text{Productividad del capital}$$

La productividad del capital indica cuánto aumenta la capacidad por cada dólar invertido. En el modelo se asumió que la duración de la capacidad es un sistema de primer orden y su media se denominó “vida media” de la capacidad. Una vez que se decidió el ingreso de nuevos capitales, se demora cierto tiempo hasta que efectivamente ingresan. Esta demora se llamó “delay para el ingreso de capitales”. Durante este tiempo se construye las ampliaciones o la nueva planta de producción de etileno. Este delay es mucho mayor que el delay para aumentar la utilización de la capacidad.

Los stocks serán inicializados en sus valores de equilibrio. El capital inicial será el necesario para que la capacidad cubra con la demanda de referencia. Por otro lado los capitales en espera serán igual a la cantidad de capitales que se pierden durante el período de tiempo que se tarda en adquirir la nueva capacidad.

No se permiten en el modelo cancelaciones de pedidos. Por lo tanto el pedido de capitales debe ser siempre positivo. Para ello:

$$\text{Pedido de capitales} = \text{MAX}(0; \text{Pedido de capitales indicado})$$

La variable “pedido de capitales indicado” es la suma del “ingreso de capitales deseado” y “un ajuste para los pedidos en espera” (Supply Line). Los productores buscan corregir la brecha entre los pedidos en espera deseados y los reales a través del tiempo de ajuste para la Supply Line.

$$\text{Ajuste para la supply line} = (\text{supply line deseada} - \text{Pedidos en espera}) / \text{Tiempo de ajuste de la supply line}$$

La supply line deseada es la cantidad de pedidos de capitales y capitales en construcción necesarios para alcanzar el ingreso de capitales deseado. Por la ley de Little, los productores deben mantener una supply line igual al delay para ingreso de capitales esperado por el ingreso de capitales deseado. Por simplicidad, el delay de ingreso esperado es igual al delay de ingreso.

$$\text{Supply Line deseada} = \text{Delay de ingreso esperado} * \text{Ingreso de capitales deseado}$$

¹ La unidad del etileno se definirá en el análisis del input y ajuste del modelo.

A su vez, el ingreso de capitales es el reemplazo de la capacidad que llega al fin de su vida útil, ajustado por la brecha entre la capacidad deseada y la actual.

Ingreso de capitales deseado = Fin de utilidad esperado + Ajuste de capacidad

Ajuste de capacidad = (capacidad deseada – capacidad) / tiempo de ajuste de capacidad

En conclusión, habrá dos balancing loops, uno correspondiente al control de los pedidos en espera y el otro correspondiente al control del capital.

Capital deseado

En los mercados de commodities, donde los productores individuales son pequeños en relación con la demanda de la industria, la rentabilidad es el mayor determinante de inversiones en nuevas capacidades. Los productores actuales se expandirán y nuevos jugadores entrarán en el mercado cuando la rentabilidad esperada sea alta. La baja rentabilidad sostenida en el tiempo lleva a quiebras. Así como se aumenta la utilización a corto plazo, a largo plazo se amplían las plantas de producción. En el modelo los productores se expanden o se contraen solamente en respuesta a sus creencias a largo plazo sobre la rentabilidad de la nueva capacidad.

Muchos modelos económicos calculan la capacidad óptima basándose en precios y costos esperados y después ajustan la capacidad a ese nivel. Esto implícitamente asume que los productores pueden adquirir la capacidad óptima y que, actuando independientemente, llegan exactamente al nivel de capacidad óptimo. Dichos modelos violan el criterio de Baker. En los mercados de commodities no se sabe cuál será la capacidad de equilibrio a largo plazo. El capital aportado óptimo está altamente relacionado con factores futuros como el crecimiento económico, las preferencias de los consumidores, la elasticidad de la demanda, el desarrollo de la tecnología propia y de sustitutos, la productividad del capital, etc. La teoría de la decisión propone que esos factores inciertos tienen muy poco peso en la decisión de la capacidad. Por lo tanto, cada productor estimará, aunque imperfectamente, si una nueva inversión es redituable.

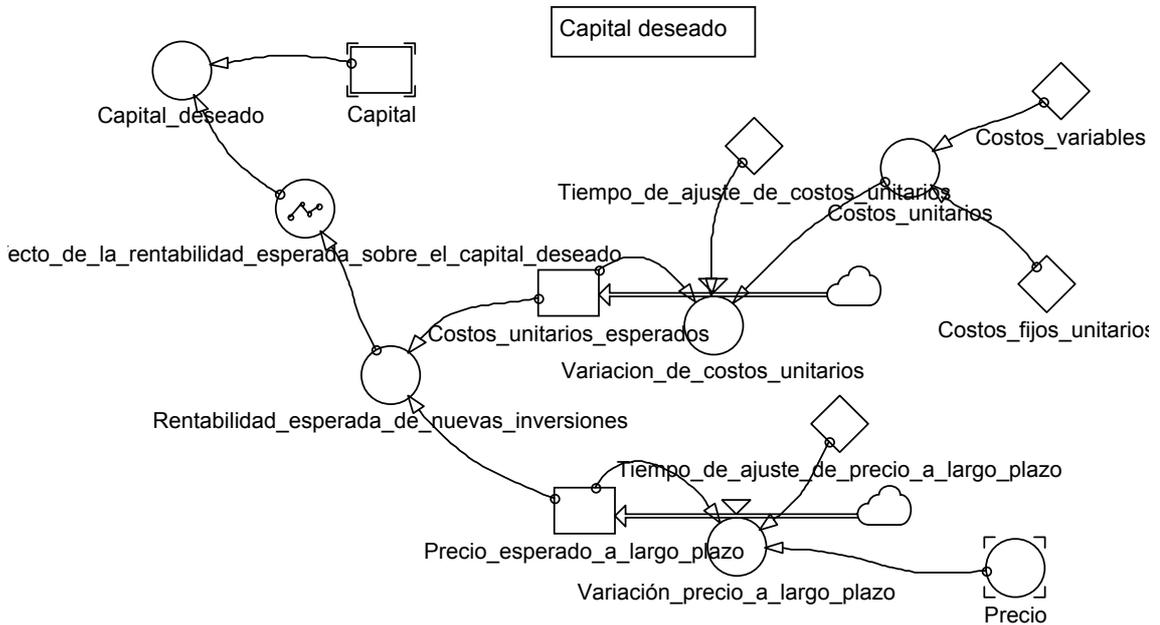
Siempre y cuando sean rentables las nuevas inversiones, se seguirá invirtiendo. Por lo tanto se entra en un loop de retroalimentación positiva. Este loop será detenido cuando la capacidad aumente tanto que la oferta supere a la demanda y el precio aumente. De esta manera, la rentabilidad esperada descende con cierto delay y se deja de invertir.

Capital deseado = Capital * efecto de rentabilidad esperada sobre capital deseado

Efecto de rentabilidad... = f(rentabilidad esperada de nuevas inversiones)

$$Rentabilidad\ esperada = \frac{precio.esperado.l\ arg\ o.plazo - cos\ tos.esperados}{Pr\ ecio.esperado.l\ arg\ o.plazo}$$

Los costos de producción incluyen a los costos variables y a los costos fijos porque ambos intervienen en la decisión.



El “efecto de la rentabilidad esperada sobre la capacidad deseada” es una función creciente y continua. Como cada productor tiene una expectativa de precios y de costos distinta la función no será escalonada.

Cuanto más pendiente tenga la curva, más responderá el capital deseado a la rentabilidad esperada. Esta respuesta depende de dos factores principales. En primer lugar, depende de la respuesta de cada productor y de cada productor potencial a la rentabilidad esperada. El otro factor es la distribución de los costos y de los precios entre los productores y los posibles productores.

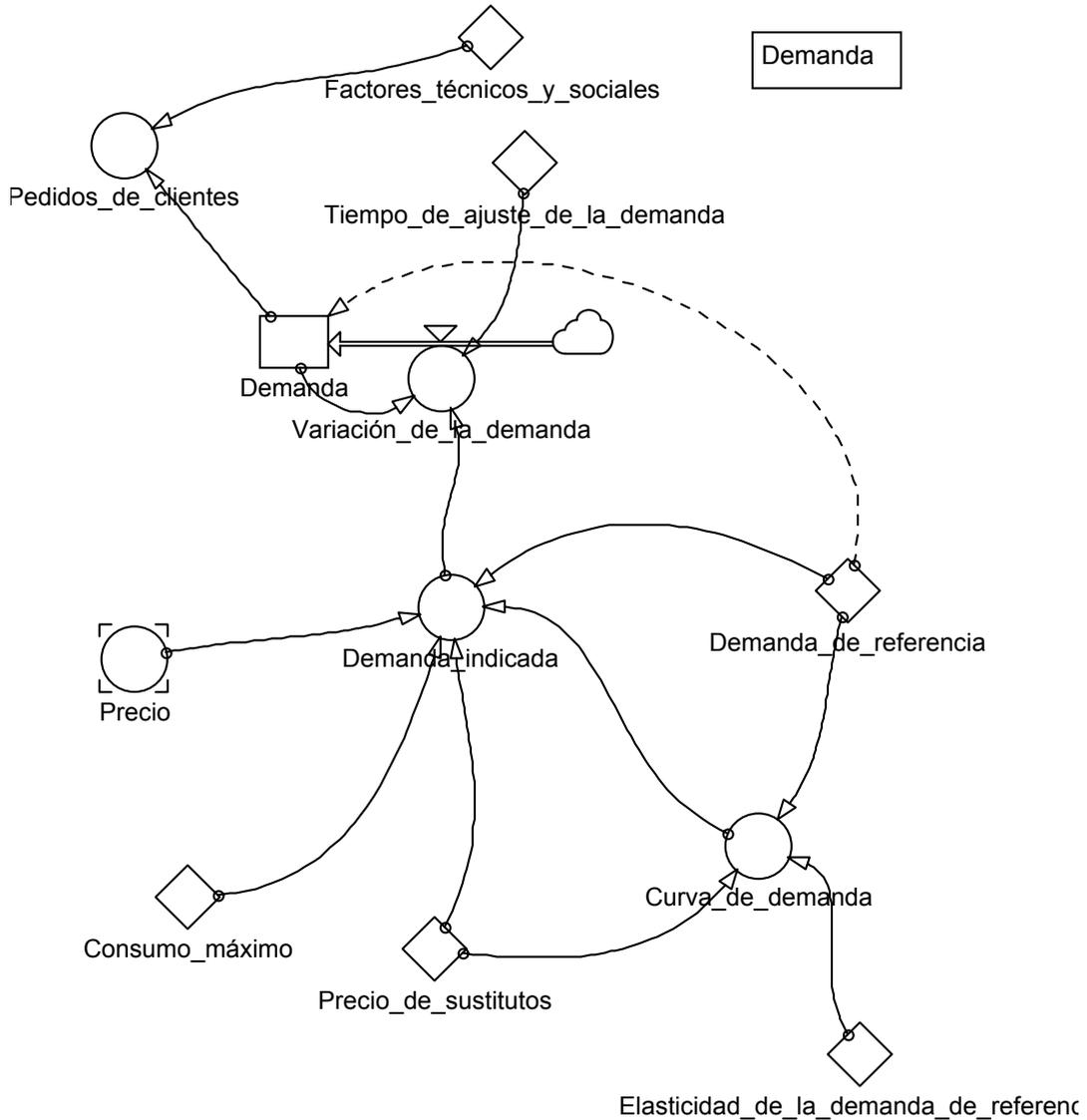
En el equilibrio, el capital deseado iguala al capital y simplemente se invierte para mantener la capacidad actual. Es un equilibrio dinámico. Nuevos jugadores con más optimismo que otros ingresarán al mercado, incluso sin esperar mucha rentabilidad. Sin embargo, estos ingresos son balanceados por la salida de jugadores cuyas expectativas son más pesimistas.

VARIABLES A AJUSTAR:

- ✓ Vida media de la capacidad
- ✓ Productividad del capital
- ✓ Tiempo de ajuste de la capacidad
- ✓ Delay para el ingreso de capitales
- ✓ Tiempo de ajuste de la supply line
- ✓ Tiempo de ajuste de costos unitarios
- ✓ Costos variables
- ✓ Costos fijos unitarios
- ✓ Tiempo de ajuste del precio a largo plazo
- ✓ Efecto de la rentabilidad esperada sobre el capital deseado

4.5. Demanda

La dinámica esencial es que la demanda baja cuando el precio aumenta, generalmente con cierto retraso. El tiempo de ajuste contempla el tiempo requerido para que los clientes formen sus expectativas de precios (encontrando sustitutos, rediseñando productos y procesos para utilizar sustitutos, reubicando capitales, etc.). El sustituto principal del etileno es el propileno.



Los “pedidos de los clientes” están modelados como el producto de la “demanda de la industria” y “otros factores que afectan la demanda”. Debido a la gran cantidad de usos del etileno, la demanda de la industria se modelizará como un todo y no se realizará el análisis particular de cada rama de aplicación del etileno.

La demanda se ajusta con un retraso a la demanda indicada por el precio del etileno mediante suavización exponencial. La suavización exponencial equivale a un delay de

primer orden. En este caso no se utiliza un delay de orden superior porque no agregaría demasiado detalle.

La demanda indicada responde al precio relativo del etileno en relación con el propileno. Por simplicidad se asume una curva lineal de demanda. Si luego esta hipótesis no permite que el modelo ajuste a la realidad se reemplazará a una curva más compleja. La curva de la demanda está normalizada para generar la demanda de referencia cuando el precio es el de referencia.

$$Demanda_indicada = MIN(\text{consumo_m\u00e1ximo}; Demanda_de_referencia * MAX(0; 1 + elasticidad_demanda * (\frac{\text{Precio} - \text{precio_de_referencia}}{Demanda_de_referencia})))$$

La función MAX asegura que la demanda no sea menor que cero independientemente del precio. De la misma manera, la función MIN asegura que la demanda no supere un máximo ya especificado. Dentro de estos límites la curva es lineal. La pendiente se ajustará al valor de la elasticidad de la demanda en el punto de equilibrio inicial.

$$Pendiente_curva_demanda = (\frac{-demanda_referencia * elasticidad_demanda}{precio_referencia})$$

La variable “pedidos de clientes” se utiliza en la dinámica Producción y stock.

VARIABLES A AJUSTAR EN EL MODELO:

1. Elasticidad de la demanda de referencia
2. Demanda de referencia
3. Precio de sustitutos
4. Consumo máximo
5. Tiempo de ajuste de la demanda
6. Factores técnicos y sociales

4.6. Determinación del precio

La determinación del precio es uno de los mayores desafíos de la modelización económica. Los precios de algunos bienes son estables mientras que otros cambian constantemente. Incluso hay varias instituciones que se encargan de fijar precios. Existen, además, diversas formas de fijación de precios:

- ✓ Precio fijado por el vendedor (retail)
- ✓ Precio fijado por el comprador (algunas ventas por Internet)
- ✓ Negociación a partir de un precio sugerido (venta de autos y de inmuebles)
- ✓ Distintos tipos de remates
- ✓ Precio por rentabilidad (markup pricing): los costos directos se aumentan por un factor standard (retail y productos industriales)

El precio en el caso de los commodities se estima con la multiplicación de tres factores:

1. Precio esperado por los comerciantes: Es el precio indicado suavizado exponencialmente. El precio indicado es simplemente el máximo entre el precio actual y los costos variables. Esto se debe a que los productores nunca esperarán que el precio se mantenga por debajo de los costos variables.

De esta manera, los precios se ajustan a los precios esperados y los precios gradualmente ajustan a los precios esperados por los comerciantes. Así se cierra un loop de retroalimentación positiva (reinforcing loop).

2. Factor dependiente de la oferta y la demanda: Para que los precios no suban o disminuyan eternamente (es decir, para simular la realidad), se debe agregar este factor. Los precios suben siempre y cuando la demanda supere a la oferta y bajan siempre que haya capacidad en exceso.

En cada industria en particular, los participantes del mercado perciben de distinta manera a la oferta y a la demanda. En el caso de los commodities, los productores se preocupan principalmente por el nivel de stock que tienen que almacenar y financiar. Desde el punto de vista de la demanda, los productores analizan la capacidad

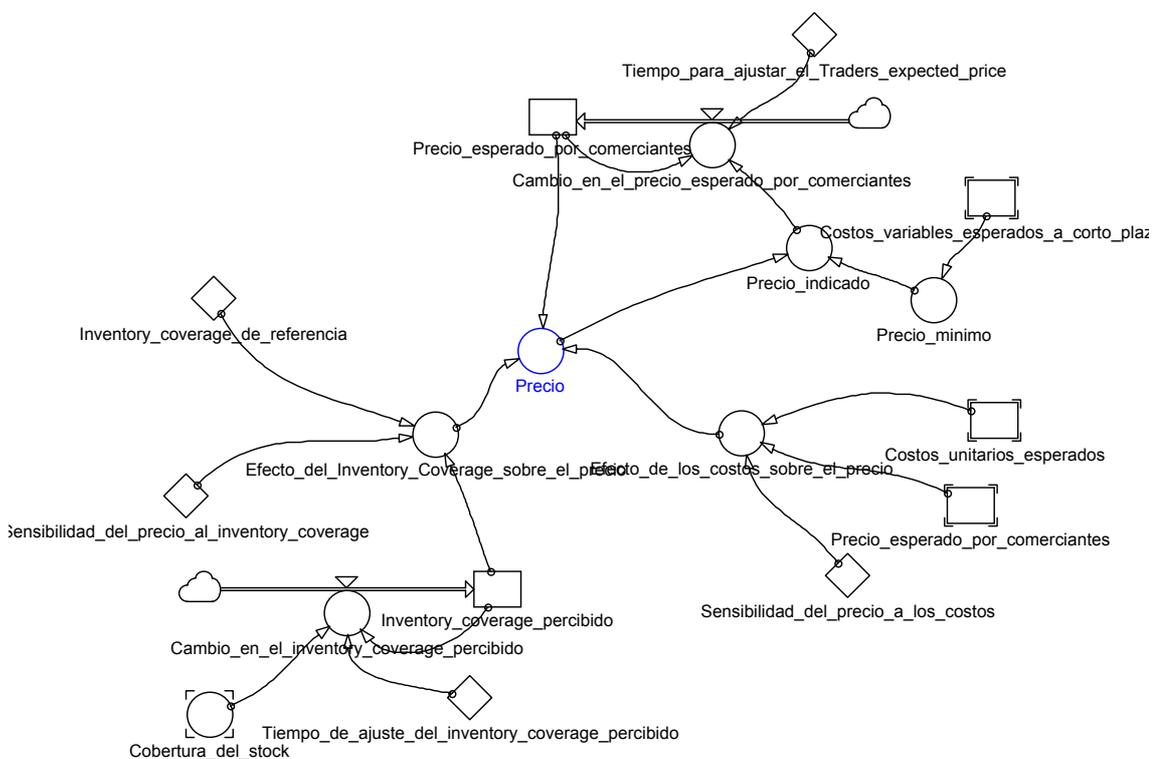
de los productores de entregar el producto en tiempo y forma. La cobertura del stock es un indicador excelente ya que reúne a ambos fenómenos.

$$\text{efecto_cobertura_stock_sobre_precio} = f\left(\frac{\text{cobertura_stock_percibida}}{\text{cobertura_stock_referencia}}\right)$$

Varias funciones modelizan el efecto. Una función simple y flexible es $y = x^a$ donde el exponente a , la sensibilidad del precio a la cobertura de stock (inventory coverage), debe ser negativo.

El precio depende de la cobertura percibida, y no de la instantánea, porque la tasa de entrega instantánea no es conocida. Toma tiempo para reunir información sobre los stocks y las entregas. El tiempo de ajuste del inventory coverage percibido será corto para mercados con mucha información o con alta sensibilidad de los costos de almacenamiento a los niveles de stock.

Este modelo tiene en cuenta la influencia del precio del propileno, ya que la demanda esta influida por él (ver dinámica de demanda).



3. Factor que depende de los costos: La influencia de los costos sobre el precio está determinada por la sensibilidad del precio a los costos.

$$\text{efecto_de_costos_en_precio} = 1 + \text{sensibilidad_p-c} * \left[\frac{\text{costos_de_producción_esperado}}{\text{precio_esperado_por_comerciantes}} \right]$$

Si la sensibilidad es nula los costos son ignorados en la fijación de precios. Si la sensibilidad es 1, las expectativas de los negociantes sobre el precio de equilibrio son ignoradas y los precios se fijan según los costos de producción esperados.

Los costos varían según el productor. Incluso para un mismo productor la información sobre sus costos de producción no es confiable. La teoría de la decisión sugiere que es muy probable que los factores no confiables tengan menor peso que los factores más confiables. Por lo tanto, en el mercado del etileno, la respuesta del precio a los costos es probable que sea débil. Además, los costos esperados de producción se ajustarán muy lentamente a nueva información.

VARIABLES A AJUSTAR:

- ✓ Tiempo para ajustar el precio esperado por los comerciantes
- ✓ Sensibilidad del precio a los costos
- ✓ Inventory coverage de referencia
- ✓ Sensibilidad del precio al inventory coverage
- ✓ Tiempo de ajuste del inventory coverage percibido

5. AJUSTE DE LAS VARIABLES

Existen diversos tipos de variables a ajustar:

- ✓ Constante
- ✓ Delay
- ✓ Gráfico
- ✓ Datos + proyecciones
- ✓ Stocks iniciales

El ajuste del modelo se realizará en dos etapas. En la primera etapa se calculan los valores de las variables a ajustar para aproximarse al modelo que simula la realidad. En la segunda etapa se reemplazan a todas las variables principales (que no necesitan ser ajustadas) por los datos históricos excepto una de ellas. Luego se modifican las variables a ajustar para que esa variable que no fue reemplazada se ajuste a los valores históricos. De la misma manera, se analizan todas las variables principales.

Constante

El valor de este tipo de variable no cambia durante el transcurso de la simulación.. En el modelo se representa con un rombo. Su cálculo será aproximado con datos reales.

Delay

El delay también es una variable constante pero pertenece a una categoría diferente porque su método de cálculo es distinto. El delay interviene entre una variable de entrada y una de salida. Para obtener el valor del delay se realiza una regresión exponencial entre ellas con distintos retrasos. El retraso que permite obtener el mayor coeficiente de correlación es el valor que obtendrá la variable a ajustar.

Al no tener información suficiente sobre la variable de entrada ni sobre la variable de salida, el delay deberá ser ajustado como si fuese una variable de tipo constante.

Gráfico

Esta variable representa la relación existente entre la variable de entrada y la variable de salida. Se ajustará de acuerdo a la información que se posee sobre la industria del

etileno. Por ejemplo, para la determinación de la función “efecto del margen esperado sobre la utilización” influirá la dispersión que existe entre los costos de todas las plantas de etileno del mundo.

Datos + proyecciones

Las variables de este tipo son exógenas. Al no encontrarse dentro de los límites del modelo se deben ingresar datos históricos. Hay que tener en cuenta que uno de los pilares de la Dinámica de Sistemas es no confiar en las proyecciones de las series de tiempo. Sin embargo, en estos casos, no existe otra alternativa. Se intentará obtener proyecciones realizadas por expertos y de lo contrario se realizarán las proyecciones de las series de tiempo (no necesariamente lineales).

VARIABLES A AJUSTAR, IDENTIFICADAS POR TIPO Y POR DINÁMICA A LA QUE PERTENECEN:

Variables a ajustar

Variable	Tipo	Dinámica
Delay de producción	Delay	Producción y stocks
Tiempo mínimo de procesamiento del pedido	Constante	Producción y stocks
Tasa de cumplimiento de pedidos	Gráfico	Producción y stocks
Tiempo de ajuste de precio a corto plazo	Delay	Utilización de la capacidad
Tiempo de ajuste costos variable a corto plazo	Delay	Utilización de la capacidad
Efecto del margen esperado sobre la utilización	Gráfico	Utilización de la capacidad
Tiempo de ajuste de la utilización	Delay	Utilización de la capacidad
Vida media de la capacidad	Delay	Capacidad instalada y capital deseado
Productividad del capital	Constante	Capacidad instalada y capital deseado
Tiempo de ajuste de la capacidad	Delay	Capacidad instalada y capital deseado
Delay para el ingreso de capitales	Delay	Capacidad instalada y capital deseado
Tiempo de ajuste de la supply line	Delay	Capacidad instalada y capital deseado
Tiempo de ajuste de costos unitarios	Delay	Capacidad instalada y capital deseado
Costos variables	Datos + proyecciones	Capacidad instalada y capital deseado
Costos fijos unitarios	Datos + proyecciones	Capacidad instalada y capital deseado
Tiempo de ajuste del precio a largo plazo	Delay	Capacidad instalada y capital deseado
Efecto de la rentabilidad esperada sobre el capital deseado	Gráfico	Capacidad instalada y capital deseado
Elasticidad de la demanda de referencia	Constante	Demanda
Demanda de referencia	Constante	Demanda
Precio de sustitutos	Datos + proyecciones	Demanda
Consumo máximo	Datos + proyecciones	Demanda
Tiempo de ajuste de la demanda	Delay	Demanda
Factores técnicos y sociales	Datos + proyecciones	Demanda
Tiempo para ajustar el precio esperado por los comerciantes	Delay	Determinación del precio
Sensibilidad del precio a los costos	Constante	Determinación del precio
Inventory coverage de referencia	Constante	Determinación del precio
Sensibilidad del precio al inventory coverage	Constante	Determinación del precio
Tiempo de ajuste del inventory coverage percibido	Delay	Determinación del precio

Stocks iniciales

Se supondrá que el sistema inicialmente está en equilibrio. Bajo esta hipótesis se calcularán los stocks iniciales. Los stocks serán modelizados con fórmulas fijas basadas en los valores históricos y otras variables. No será necesario ajustarlos.

Stocks iniciales

Stock	Dinámica
Producción en proceso	Producción y stocks
Stock	Producción y stocks
Precio esperado a corto plazo	Utilización de la capacidad
Costos variables esperados a corto plazo	Utilización de la capacidad
Utilización de la capacidad	Utilización de la capacidad
Capitales en espera	Capacidad instalada y capital deseado
Capital	Capacidad instalada y capital deseado
Precio esperado a largo plazo	Capacidad instalada y capital deseado
Costos unitarios esperados	Capacidad instalada y capital deseado
Demanda	Demanda
Precio esperado por los comerciantes	Determinación del precio
Inventory coverage percibido	Determinación del precio

Es posible que el ajuste de las variables no permita modelizar los datos históricos y que también se necesite modificar su estructura.

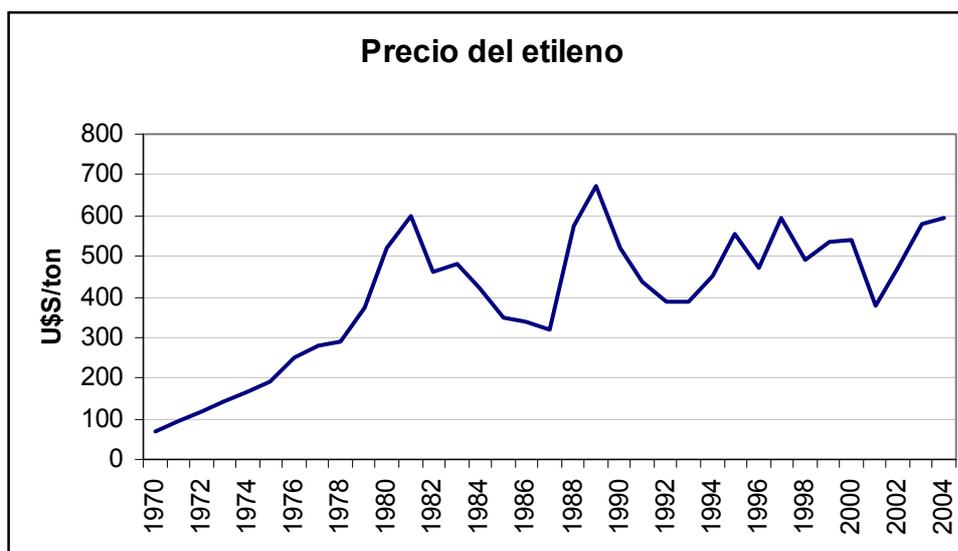
5.1. Datos históricos

Es complicado recopilar información acerca del mercado del etileno. Sin embargo, existe bastante información sobre la industria en Norte América. Esta región presenta el mismo comportamiento y corresponde al 30% de la industria a nivel mundial. Para trabajar sobre información más confiable se analizará el mercado de Norte América que incluye a Estados Unidos, a Canadá y a México.

Se utilizará un horizonte de tiempo de 1994 a 2004 por la dificultad de obtener información más extensa en todas las variables necesarias.

Precio del etileno

La curva del precio del etileno en Norte América es la siguiente:



Fuente: CMAI

Los datos que se utilizarán para el ajuste del modelo son presentados en la tabla a continuación:

Datos históricos							
Año	Precio (U\$S/ton)	Demanda (MMton)	Capacidad instalada (MMton/año)	Utilización	Precio propileno (U\$S/ton)	WTI (U\$S/bbl)	PBI USA constante (MMMU\$S)
1994	450	24.462	26.274	97%	350	17,21	7.836
1995	520	25.368	27.482	96%	490	18,42	8.032
1996	487	26.274	28.036	97%	420	22,16	8.329
1997	559	27.482	28.371	99%	450	20,61	8.704
1998	513	27.885	29.691	97%	310	14,39	9.067
1999	528	29.227	31.037	98%	325	19,31	9.470
2000	536	29.674	32.090	97%	370	30,37	9.817
2001	432	28.615	33.649	89%	350	25,93	9.891
2002	457	28.866	34.924	87%	480	26,16	10.075
2003	538	28.648	34.895	86%	510	31,06	10.381
2004	576	30.085	34.735	85%	470	41,38	10.842

El WTI es el factor principal en la determinación de los costos variables ya que el etano se obtiene de él. El PBI de Estados Unidos representa la industria de Norte América. Su crecimiento genera un aumento en la demanda porque los derivados del etilenos se utilizan en productos de consumo masivo.

5.2. Cálculo de las variables

Costos:

Los costos variables están relacionados con el precio del petróleo por una constante. El WTI es el petróleo West Texas Intermediate y es el indicador del precio del crudo más utilizado en el mundo. Según CMAI (Informe: World Ethylene Cost Study) el costo del etileno fue de 212 U\$S/ton en 1998 y de 299 U\$S/ton en 2002. Mediante una regresión lineal con el WTI como variable explicativa, se determinaron los costos fijos unitarios y la constante antes mencionada.

La regresión arroja los siguientes resultados:

- Costos fijos unitarios = 105.63 U\$S/ton
- Constante WTI a costos = 7.39 bbl/ton

La variable constante WTI a costos indica la cantidad de barriles de crudo necesaria para producir una tonelada de etileno (utilizándose como producto intermedio al etano).

En el caso de un aumento de capacidad, los productores tienen en cuenta el retorno de las inversiones por tonelada producida. Es decir, el precio debe ser superior a la suma de los costos más un margen necesario para invertir. Este margen fue determinado al realizar el ajuste. Finalmente resultó ser un 88% de los costos totales esperados. El valor obtenido es lógico ya que las inversiones en esta industria son millonarias.

Según Kirk-Othmer, el retorno de inversiones es aproximadamente el mismo valor que los costos (es decir, aproximadamente 100%) para plantas de etano. Esta información corresponde al año 1980, por lo tanto en el período desde 1994 a 2004 el promedio de margen necesario fue inferior.

Demanda

Tres factores principales que influyen la determinación de la demanda:

- La relación entre el precio del etileno y el precio del propileno
- El crecimiento del PBI
- Las exportaciones

A partir de la curva de la demanda es posible determinar cuánto cambiará el consumo de etileno ante una variación del precio relativo. Es necesario conocer la elasticidad de la curva para realizar los cálculos.

$$\eta = \frac{\frac{Q - Q_o}{Q_o}}{\frac{P - P_o}{P_o}}$$

Como la curva no es exactamente lineal, la elasticidad depende de cada punto. Por eso se debe tomar un punto de referencia. Q representa el consumo y P el precio. Los subíndices cero se agregaron para diferenciar los valores de referencia. La “demanda de referencia” es la “demanda histórica inicial” multiplicada por el “factor por exportaciones”.

La industria petroquímica no reacciona muy rápidamente ante un cambio de precio como podría ocurrir por ejemplo en la industria del entretenimiento. Este es un caso de “demanda inelástica” y por lo tanto el valor de la elasticidad debe estar comprendido entre 0 y 1. Cuánto su valor más cercano este a cero, más inelástica será la demanda. Luego del ajuste se obtuvo un valor de 0,65 para la elasticidad.

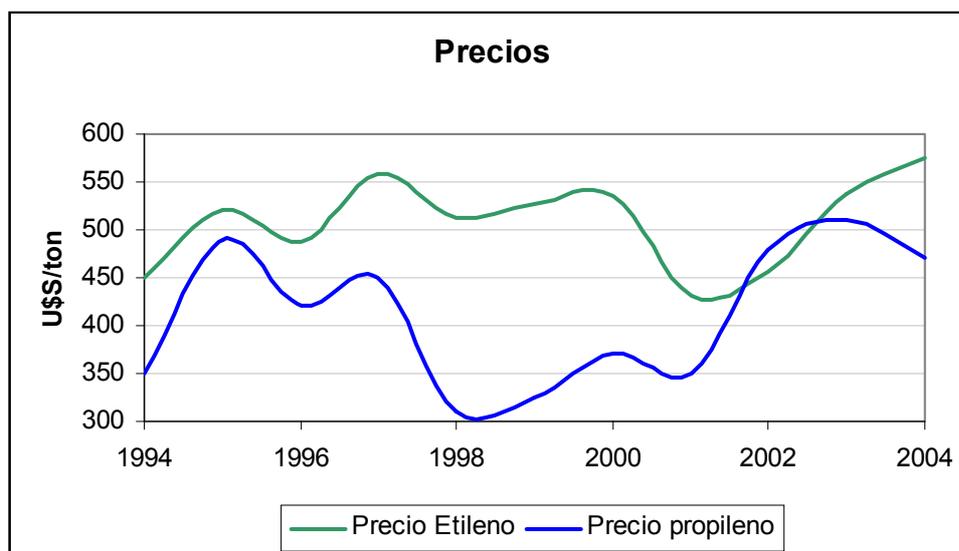
Al despejar el consumo a partir de la fórmula de la elasticidad se obtiene la siguiente fórmula:

$$Q = Q_o \left[1 - \eta \left(\frac{P - P_o}{P_o} \right) \right]$$

El precio con el que se querrá comparar es el precio del etileno a partir del cual será conveniente adquirir propileno. Claramente este precio estará directamente relacionado con el precio del propileno. Se utilizó la siguiente fórmula como método de modelización:

$$P_o = k.P_{propileno}$$

La constante se denominó “constante para relacionar sustitutos”. En la industria petroquímica se prefiere al etileno ante el propileno. Existen usos del etileno en los cuales no puede ser reemplazado por el propileno. Por estas dos razones la constante debe ser mayor que uno. El valor que se obtuvo fue de 2,5. En la siguiente figura se observa la evolución de los precios de las olefinas.



A partir de las fórmulas vistas anteriormente se obtiene:

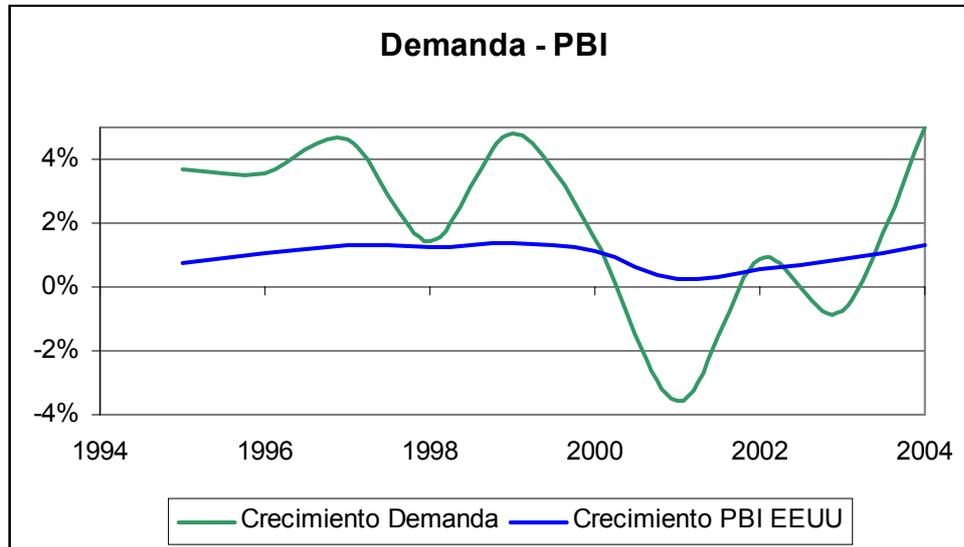
$$D = f.Q = f.Q_o \left[1 - \eta \left(\frac{P - k.P_{propileno}}{k.P_{propileno}} \right) \right]$$

Esta fórmula calcula la demanda indicada a partir de ambos precios. Se agregó el factor por exportación ya que la exportación forma parte de la demanda. Este valor es de 1,09.

Luego, se suaviza la demanda indicada con el tiempo de ajuste de la demanda. Este tiempo de ajuste es muy alto porque las plantas que utilizan etileno no tienen flexibilidad para cambiar de materia prima fácilmente. Algunas, ni siquiera pueden cambiar de materia prima. Luego del ajuste se obtuvo un valor de 20 años que es cercano a la vida media de la capacidad. El modelo utiliza este valor como media y no significa estrictamente que se demore 20 años, sino que es un indicador de la magnitud de la suavización.

Al utilizarse los productos finales del etileno en productos de consumo masivo su demanda estará altamente relacionada con el Producto Bruto Interno (PBI o GDP). Se usó como referencia el PBI en moneda constante ya que muestra el crecimiento real de la industria.

En la siguiente figura podemos ver el crecimiento porcentual anual de la demanda y del PBI. No existe una relación entre ambos mediante regresión lineal porque la demanda también depende de los precios. Aquí se pone en evidencia una de las ventajas de la simulación: se puede utilizar la cantidad de variables que uno desee y complicar el sistema tanto como uno quiera.



En el modelo se calculó el crecimiento mediante un coeficiente. Este coeficiente se llama “Pendiente GDP USA”. En el ajuste se obtuvo que el valor de esta constante es igual a 2. Dado el caso que el PBI aumentara 1%, el crecimiento de la demanda (debido al PBI) sería de 2%. Este valor no está suavizado porque la suavización no ajustó.

Para poder simular se asignó como valor inicial de la demanda indicada al producto del consumo obtenido por la fórmula de elasticidad y el factor por exportación.

No se tuvo en cuenta un consumo máximo para la industria. Todas las limitaciones para el crecimiento están contempladas en el modelo.

Precio

A partir de la fórmula de determinación del precio se observan tres fenómenos:

- Las expectativas de los productores y compradores
- El inventory coverage
- La presión de los costos

El precio esperado por los comerciantes es el precio suavizado. Esto es así siempre y cuando sea superior a los costos más el margen necesario. La constante de suavización (“tiempo para ajustar el Traders expected price”) tiene un valor de medio año. El valor obtenido es razonable. El precio esperado fue inicializado con el precio histórico del año 1994.

El IC (inventory coverage) indica el nivel de stocks en relación a la demanda. Si el IC es muy alto en relación a un “inventory coverage de referencia”, los precios bajarán por sobreoferta. En cambio, si es bajo, los precios aumentarán por desabastecimiento. La determinación del “inventory coverage de referencia” es compleja porque el modelo es muy sensible al “IC percibido por los comerciantes”. Éste último se obtiene a partir de una suavización del IC. El delay utilizado se denomina “tiempo de ajuste del inventory coverage percibido”. La sensibilidad del precio a los costos también se ajusta.

El ajuste se logró con los siguientes valores:

- IC de referencia = 0,145 años (53 días)
- Tiempo de ajuste del IC percibido = 1 año
- Sensibilidad del precio al IC = 1

La sensibilidad del precio a la presión que ejercen los costos sobre el precio se ajusta con una constante. Ésta indica cuánto se pondera la relación precio – costo.

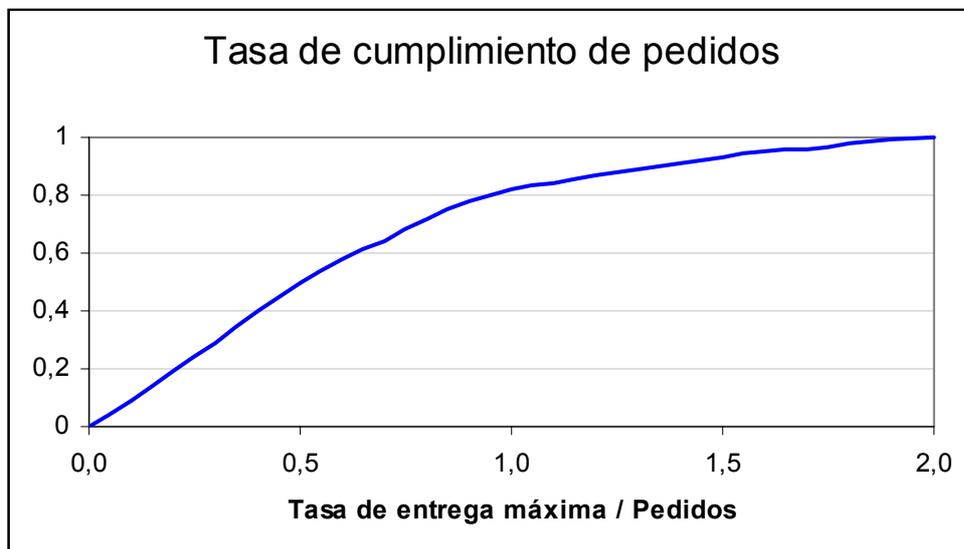
El efecto del IC y el efecto de los costos se compensan entre sí. Ambos forman un *balancing loop*.

Producción y stocks

Las variables de producción influyen poco en la dinámica del sistema. El tiempo de producción del etileno es de medio año y el stock inicial de productos en proceso es igual al tiempo de producción por la demanda de referencia. El stock inicial se calcula como el producto del IC de referencia por la demanda de referencia.

La tasa de entrega se calcula a partir de la tasa de cumplimiento de pedidos. Esta tasa es una variable gráfica que debe ser ajustada. La variable se basa en la relación entre la tasa de entrega máxima y los pedidos de los clientes. En un mercado ideal cuando la relación es igual a 1 la tasa de cumplimiento debe ser del 100%. Sin embargo, esto no se cumplirá porque existen varias plantas con distintas tasas de entrega máxima.

La variable se ajustó de la siguiente manera:

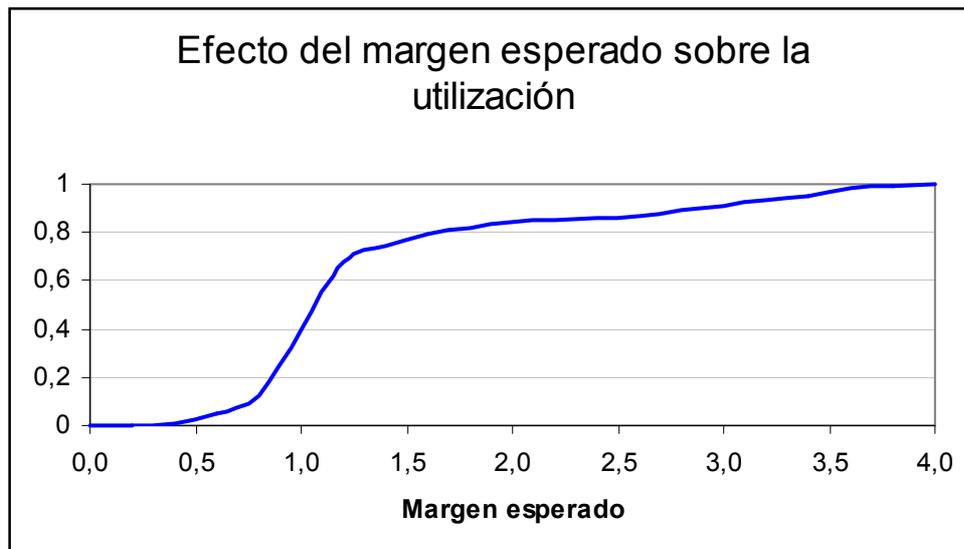


Como antes se mencionó, el stock máximo se determina a partir del tiempo de procesamiento de pedido mínimo. El valor al que mejor se ajustó este tiempo es de 0,1 años que equivale a 36 días. El valor es razonable ya que es un promedio entre la rapidez de entrega dentro de Estados Unidos y los largos tiempos de entrega de México, de Canadá y de las exportaciones.

Utilización de la capacidad

Esta dinámica es simple: Se suaviza el precio y los costos con una constante a corto plazo. Luego, el rendimiento obtenido a partir de su relación se utiliza para obtener el efecto sobre la utilización mediante una variable gráfica. La utilización indicada también se suaviza debido a demoras en la reacción de los productores y en la implementación.

Luego del ajuste, el tiempo resultó ser de 1 año de delay para la suavización del precio y de los costos variables. El tiempo de ajuste de la utilización es de medio año.



La curva tiene mayor pendiente cuando los precios son iguales a los costos. En una planta individual la curva sería una función escalón que aumentaría cuando el margen iguala a 1. Se puede ver que cuando el margen esperado del mercado es de 0,5 algunas plantas continúan produciendo, esto se debe a que su productividad es mayor.

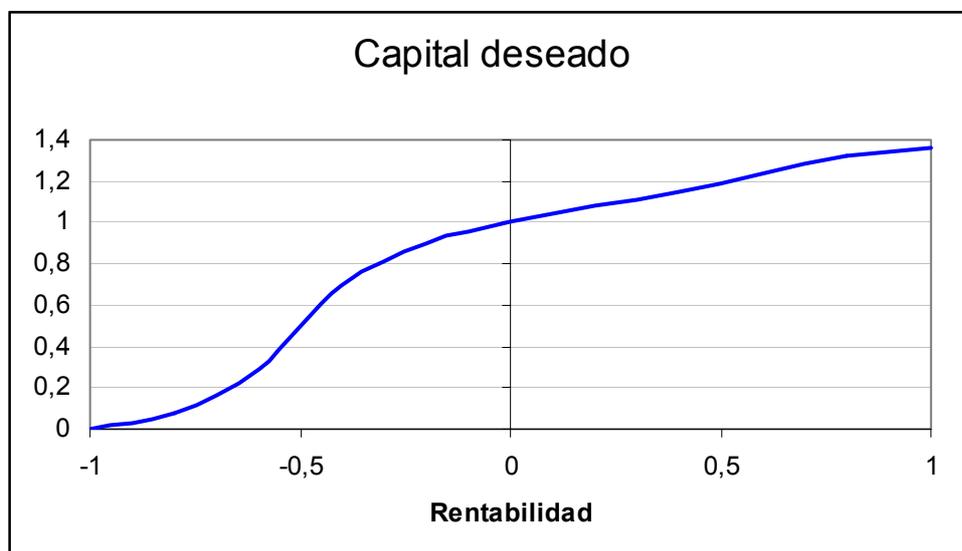
Capital deseado y capacidad instalada

Como fue indicado anteriormente, la productividad del capital se fijó en 1 porque la unidad del capital es una unidad arbitraria que equivale al capital necesario para producir una tonelada etileno por año. De esta manera se simplifican las unidades.

En esta dinámica hay muchos delays y tiempos de ajuste. A partir del ajuste se obtuvieron los siguientes resultados:

- Delay para el ingreso de capitales = 4 años
- Vida media de la capacidad = 25 años
- Tiempo de ajuste de costos unitarios = 2 años
- Tiempo de ajuste de precio a largo plazo = 2 años
- Tiempo de ajuste de la capacidad = 1 año
- Tiempo de ajuste de la supply line = 1 año

En esta dinámica se utiliza una variable gráfica para obtener el capital deseado a partir de la rentabilidad de la nueva capacidad, al igual que en la utilización de la capacidad. La rentabilidad en este caso está medida a nivel porcentual.



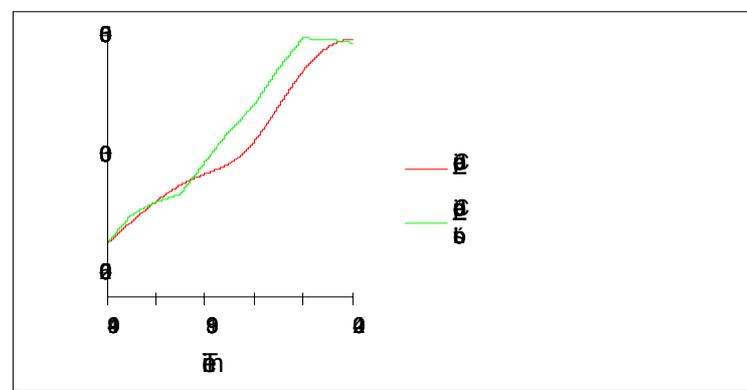
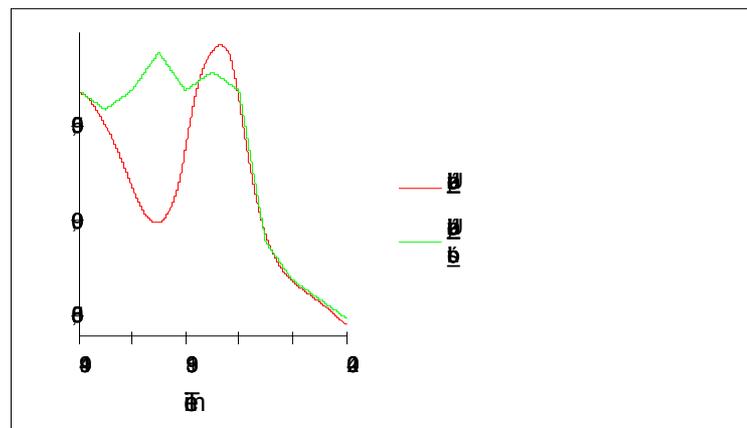
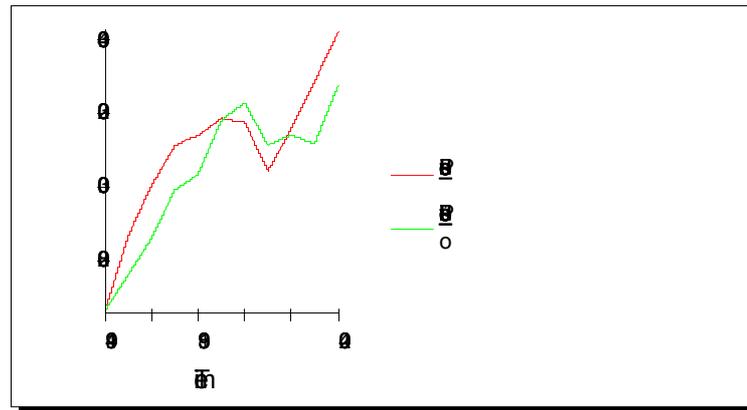
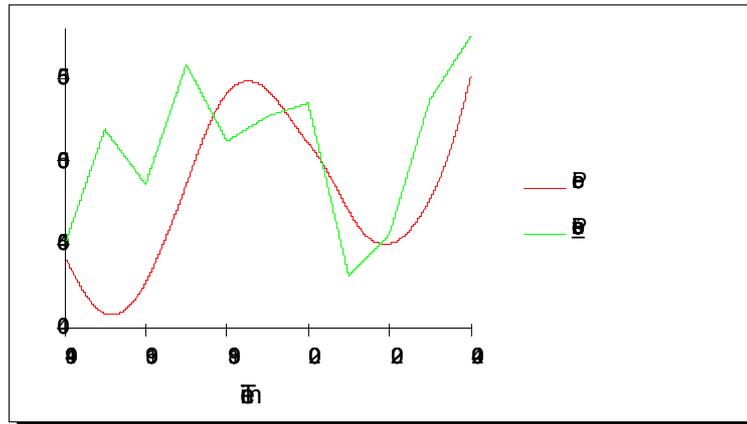
7. BONDAD DE AJUSTE

Los datos disponibles para realizar la simulación son escasos en extensión de tiempo y en cantidad de variables disponibles. Además, la simulación requiere de un período de estabilización que no debe tenerse en cuenta para el análisis. Por lo tanto, el intervalo de tiempo se reduce aun más al descartar los primeros años de simulación.

Luego del período de estabilización, el ajuste es óptimo. Debe tenerse en cuenta que la simulación mediante Dinámica de Sistemas no intenta proyectar el futuro. Es decir, los valores obtenidos no son confiables para basarse en estimaciones o para realizar proyectos, sino que se utilizan para entender el sistema y tomar decisiones. Dinámica de Sistemas es una herramienta para tomar decisiones, no para proyectar variables.

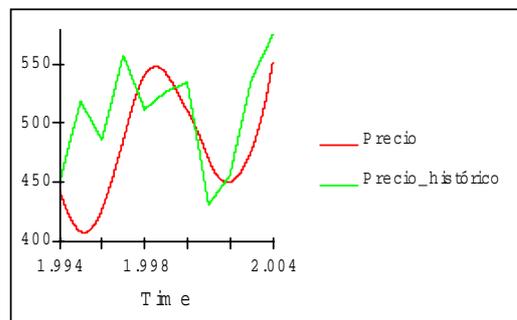
La curva histórica tiene ruido. Esto se debe a una inmensidad de variables que no pueden ser modelizadas. La curva del modelo no debe ser necesariamente igual a la curva histórica, sino que debe aproximarse a la curva histórica suavizada porque el ruido está filtrado.

En la siguiente página se muestran las curvas histórica y modelizada de las principales variables. En las curvas del precio y de utilización de la capacidad se ve claramente que es necesario un tiempo de estabilización.

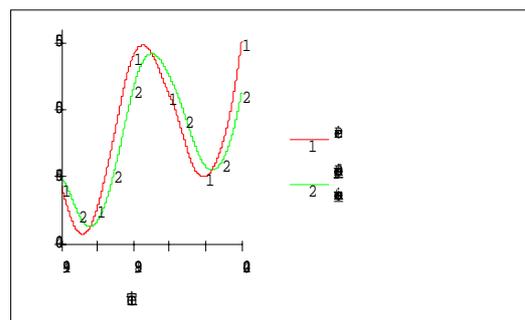


8. ANÁLISIS GRÁFICO DE LAS DINÁMICAS

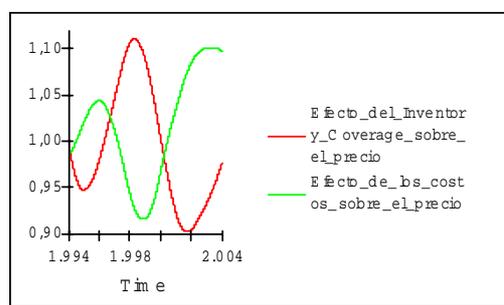
Las fluctuaciones del precio están determinadas por el precio esperado por los comerciantes, el efecto del IC y la presión de los costos.



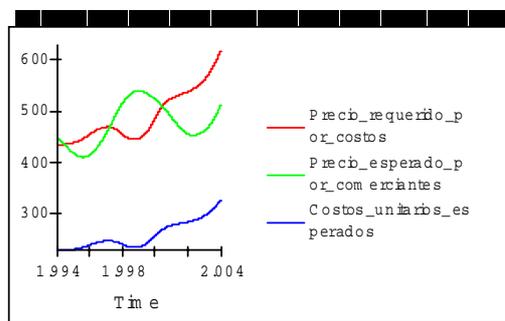
Se verifica que el precio real y el esperado están estrechamente relacionados. El esperado está retrasado.



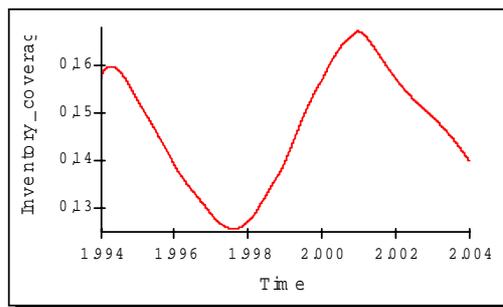
El efecto del IC sobre el precio y el de los costos se compensan. Sin embargo, la sensibilidad del precio al IC es mayor y por lo tanto, más influyente.



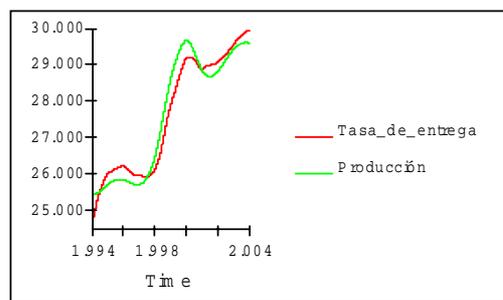
A partir de este gráfico se entiende la evolución del efecto de los costos sobre el precio. Cuando el precio supera al precio requerido, el efecto de los costos es menor que 1. Cuando el precio es inferior, la presión de los costos se hace notar y eleva al precio. Se tiene en cuenta el margen necesario por el retorno de las inversiones.



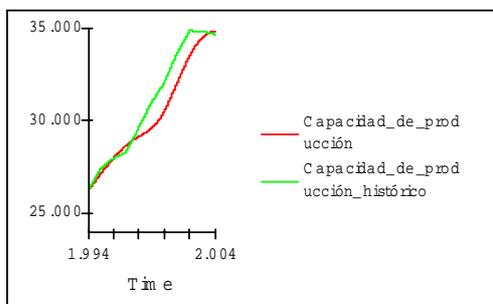
El IC de referencia es 0,145. Se observa que cuando el IC es superior a tal valor el precio descende y cuando es inferior, el precio aumenta. El stock describe aproximadamente la misma curva que el IC. La tasa de entrega también influye sobre el IC.



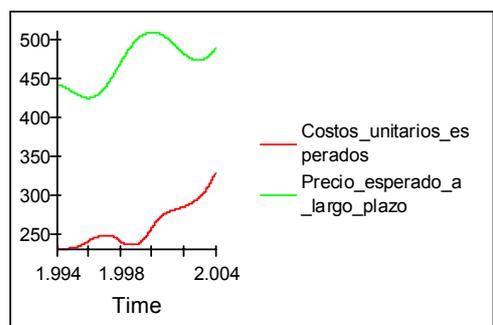
Esta variación de stock se debe a las diferencias entre la tasa de entrega y la producción. La producción es el producto de la capacidad y la utilización con un retraso de medio año (que es el período que se demora en producir el etileno).



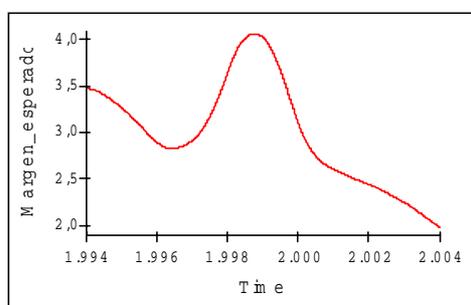
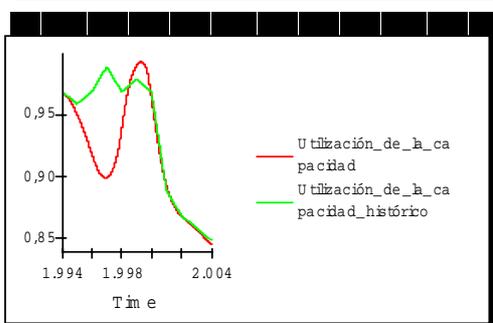
La producción aumenta debido al aumento de la capacidad.



La capacidad aumenta cuando el precio es superior a los costos y al margen necesario.

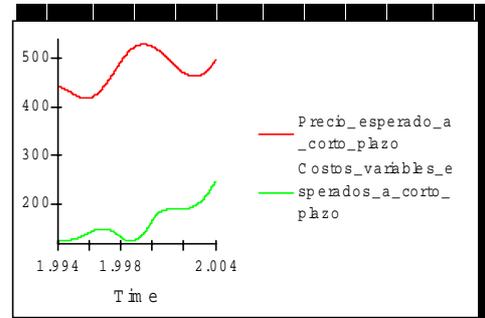


A pesar de que la utilización de la capacidad descende la producción aumenta.

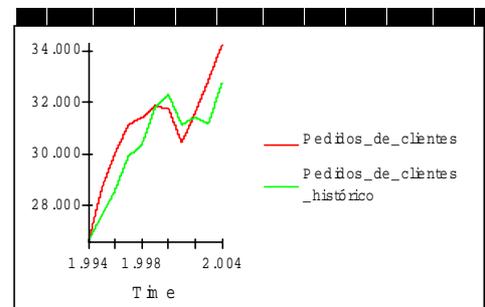


La utilización disminuye porque el margen esperado desciende.

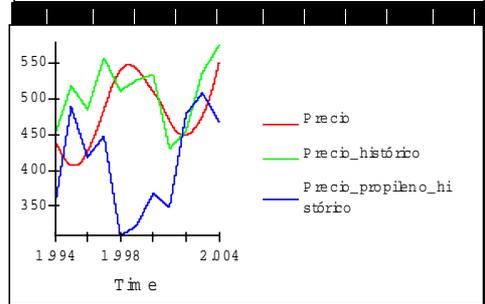
A su vez, el margen esperado depende de la relación entre el precio y los costos esperados. El retorno a las inversiones no entra en juego porque no es una variable de decisión para aumentar la utilización. Los costos aumentan por el aumento del precio del crudo en los últimos años.



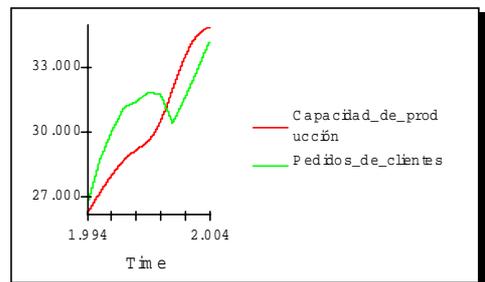
La tasa de entrega depende de la demanda. La demanda aumenta notoriamente entonces el precio se eleva cerca del 2004.



Siempre que el precio del etileno sea menor que 2,5 veces el precio del propileno, la demanda tenderá a aumentar. También influye sobre el precio el crecimiento sostenido del PBI.



En este último gráfico se observa que al principio la capacidad de producción es inferior a la demanda. Luego es superior. Por lo tanto nunca se logra el equilibrio de mercado. Este es uno de los problemas principales para resolver.



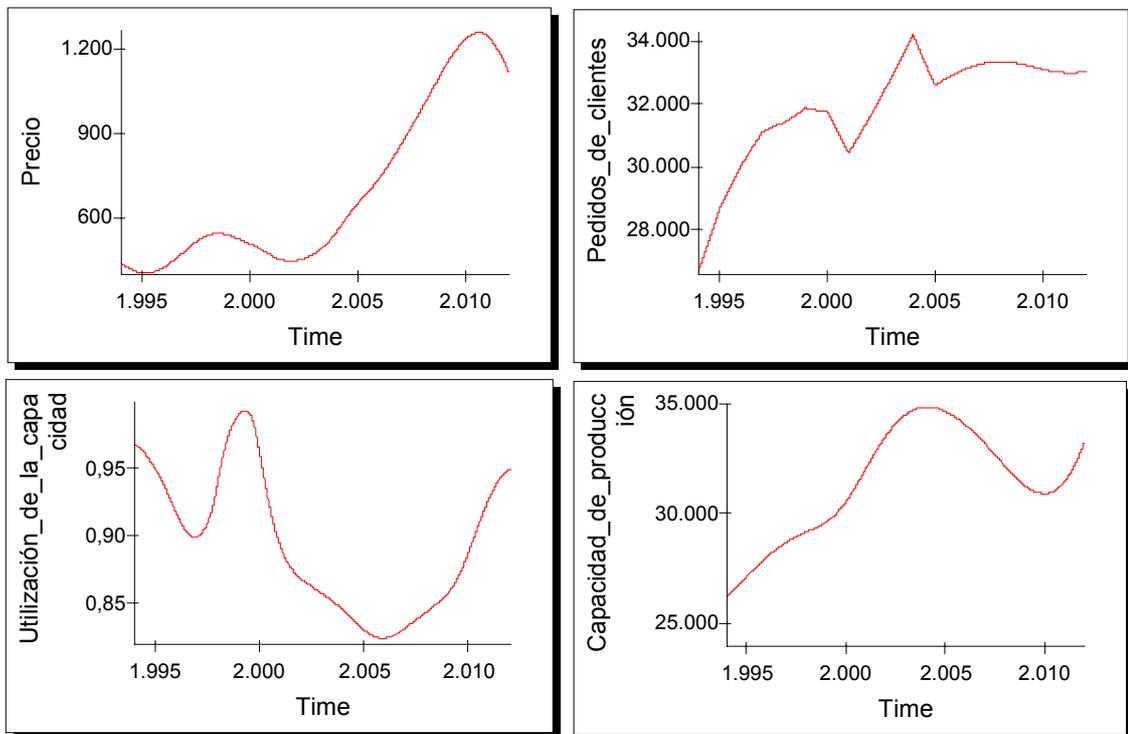
9. PROYECCIÓN DE LAS VARIABLES

Se necesita la proyección de algunos datos para poder continuar con la simulación del modelo hacia el futuro. Para el precio del propileno y el precio del WTI se utilizaron proyecciones de expertos.

Datos históricos			
Año	Precio propileno	WTI	PBI USA
2005	608	50,00	10.977
2006	631	52,00	11.115
2007	552	54,00	11.254
2008	486	55,00	11.394
2009	468	52,00	11.537
2010	496	48,00	11.681
2011	580	47,00	11.827
2012	608	47,00	11.975
Fuente	SRI Consulting	First Energy	

El PBI de USA en moneda constante creció en los últimos años a razón de 1,25% anual, excepto en el período recesivo 2001-2002. Por lo tanto para los años siguientes se supuso un crecimiento de 1,25% anual.

Con estas proyecciones se obtienen las siguientes curvas:



Las variables principales continúan fluctuando en la simulación del futuro.

10. INDICADORES DE PROYECTO

El fin de los indicadores es servir como base para decidir entre las distintas propuestas. Los indicadores surgen de los objetivos del proyecto:

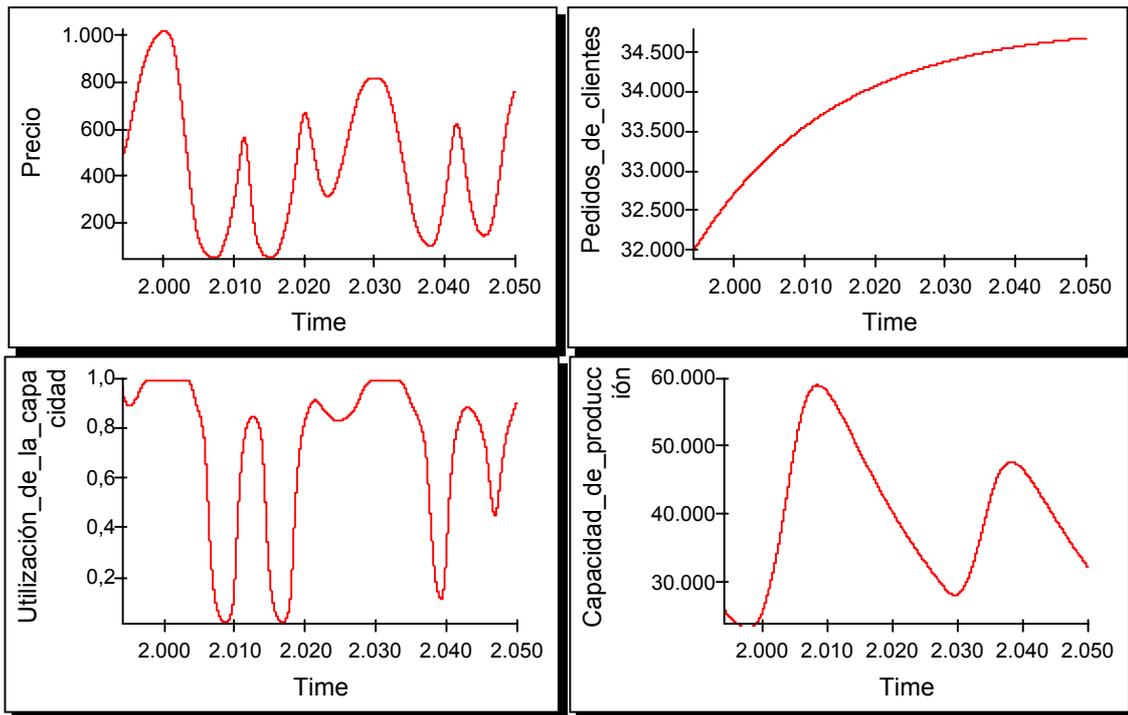
- Oscilaciones del precio
- Utilización promedio de la capacidad
- Disminución deseada de capacidad

Por un lado minimizar la dispersión del precio y la disminución de la capacidad mejorará la economía. Por otro lado, se buscará maximizar la utilización promedio de la capacidad para aumentar la productividad de las plantas en funcionamiento.

11. PROPUESTA

Se utilizará un modelo no perturbado por causas exógenas para analizar las propuestas porque el objetivo es reducir las oscilaciones endógenas al modelo. Para ello se supondrán costos fijos y un crecimiento porcentual constante del PBI. Además, se eliminará el efecto del precio del sustituto igualándolo al precio del etileno dividido 2,5.

En estas condiciones y sin ningún cambio se obtienen los siguientes gráficos:

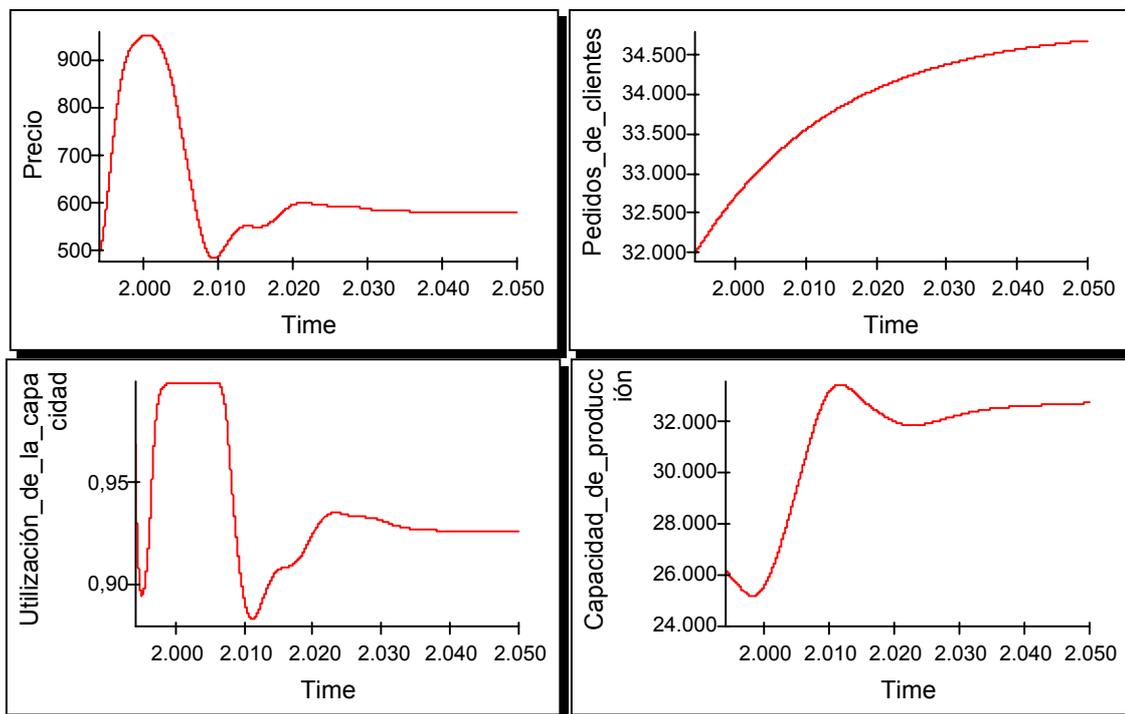


El sistema oscila sin ninguna variación externa. El precio oscila entre 100 y 1000 ton/año. En un intervalo de tiempo la capacidad disminuye de 60000 a 30000 ton/año. La utilización promedio es de 71,2% y la disminución deseada del capital es de 19.195 unidades.

Se puede alterar el comportamiento cambiando algunas variables (puntos de apalancamiento) o cambiando la estructura del sistema. No todas las constantes son puntos de apalancamiento y las que son, no se cambian fácilmente.

La mayoría de las variables no mejoran demasiado las curvas. Otras simplemente retrasan el efecto. Sin embargo, el “tiempo de ajuste de la capacidad” es una variable que al aumentarla mejora notablemente a los indicadores. Cuánto mayor es su valor, más rápido se amortiguan las oscilaciones. Por ejemplo, si su valor es igual a 5 se estabiliza el precio en 600 U\$\$/ton y la utilización en 93% (valor excelente). Además,

la capacidad aumenta en la misma cantidad que la demanda. El sistema se encuentra en equilibrio dinámico.



En promedio, la utilización es de 92,1% y la disminución deseada es igual a 17 unidades de capital / año. No hay descenso de capacidad deseado, prácticamente. Además, se debe sólo a la gran perturbación por los valores iniciales.

El valor inicial de esta variable es de 1 año. El aumento de esta variable indica que el aumento de la capacidad no será muy brusco. Para aumentar esta variable es necesario que la industria se maneje como un todo y que todos los productores estén ligados entre sí. Si cada uno actuara individualmente todos ampliarían sus capacidades en el momento en que invertir es rentable, pero luego al bajar el precio del etileno un gran número de productores quiebran.

Este mercado requiere una institución que regule las ampliaciones de capacidad para que la capacidad total no supere a la demanda. Pero, esta institución, también debe tener en cuenta que la capacidad debe aumentar para poder satisfacer la demanda.

Otras tareas que llevará a cabo esta institución reguladora son: recopilar información estadística para la realización de proyectos y ayudar a los productores en el cálculo de sus costos. Al no existir una institución que consolide las acciones de todos los productores, el sistema oscila y es improductivo.

12. BIBLIOGRAFÍA

- Sterman John D. 2000 Business Dynamics. Systems thinking and modeling for a complex world. 982 páginas. Editorial McGraw Hill. ISBN 0-07-231135-5.
- Kirk-Othmer. 1982. Enciclopedia of chemical technology. Ethylene. Editorial John Wiley & sons. Vol. 9. Páginas 393-427.
- George M. Intille. 2004. Profitability and cyclicalidad in the Chemical Industry. SRI Consulting. Asian petrochemical industry conference. Presentación PDF. Páginas 38.
- Dr. Rina Quijada. 2004. Breve análisis del mercado petroquímico en América Latina. APLA. Intellichem, Inc. Coral Gables. USA. www.intellichem.net; Dr Rina Quijada. 2003. Presentación ante el IPA. Argentina. Impacto de las Materias Primas sobre la Industria Petroquímica rquijada@intellichem.net.
- Pieter Vandermost. 1996. Proceses in organics chemical industries. Bulk Production. Ethylene. Emission Inventory Guidebook.
- Susana Chow Pangtay. 1998. Petroquímica y sociedad. México. Editorial fondo de Cultura Económica. ISBN 968-16-5430-7.
- ABB Lummus Global. Informe sobre procesos del etileno. Advantages. Process Features Client Benefits. Performance Characteristics. Process Description. Block Flow Diagram. <http://www.abb.com/global>.
- Julio José Moreno , UASD. C:\WINDOWS\TEMP\Historia del plastico.htm
- Petroquímica Bahía Blanca. Polisur. 1997-2001. Cronograma de Inversiones. Cifras de Dow, año 2000.
- The QuiMax Report. 2003. www.quimaxlatin.com. Informe. Páginas 1-24.
- Debbie Rhoden. 2000. CMAI News. CMAI. World Light Olefins Análisis; 2003. World Ethylene Cost Study; Kimberly Russell. 2004. CMAI completes 2004 World Light Olefins Análisis; Erika Soechting. 2005. CMAI Outlines Strategic Issues Facing Light Olefins & Derivatives Producers.

Cámara de la Industria Química y Petroquímica (CIQyP). 2003. La Industria Química Argentina. Situación y desafíos. Páginas 13. Anexo 1: Principales subsectores de productos químicos de uso industrial. Páginas 62-86.

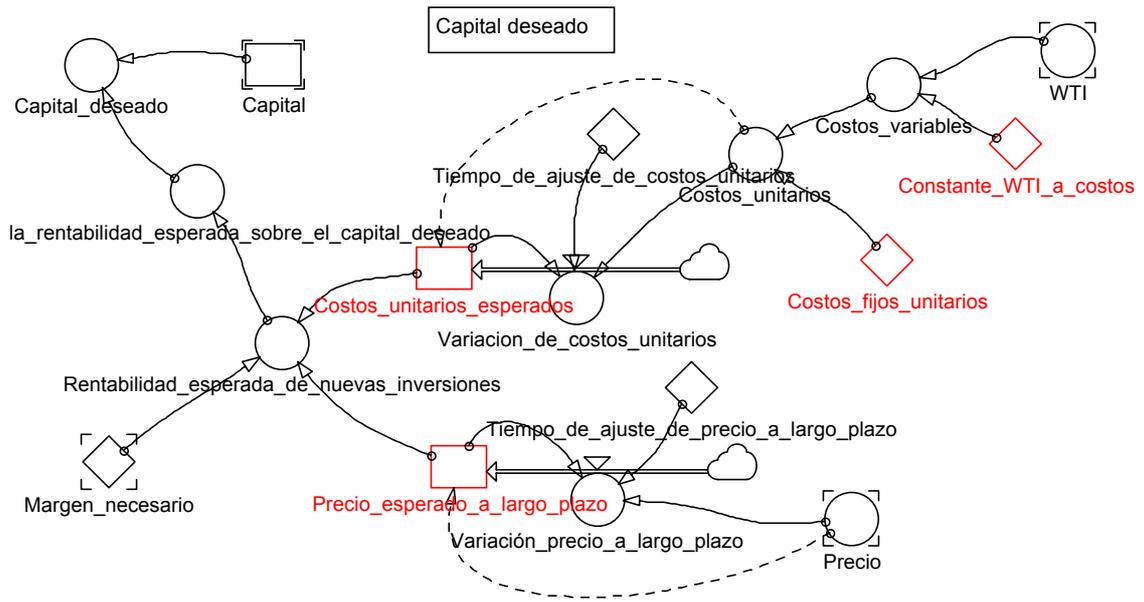
Entrevista a la Ingeniera Cecilia Miani, Industria Petroquímica Argentina, (IPA).

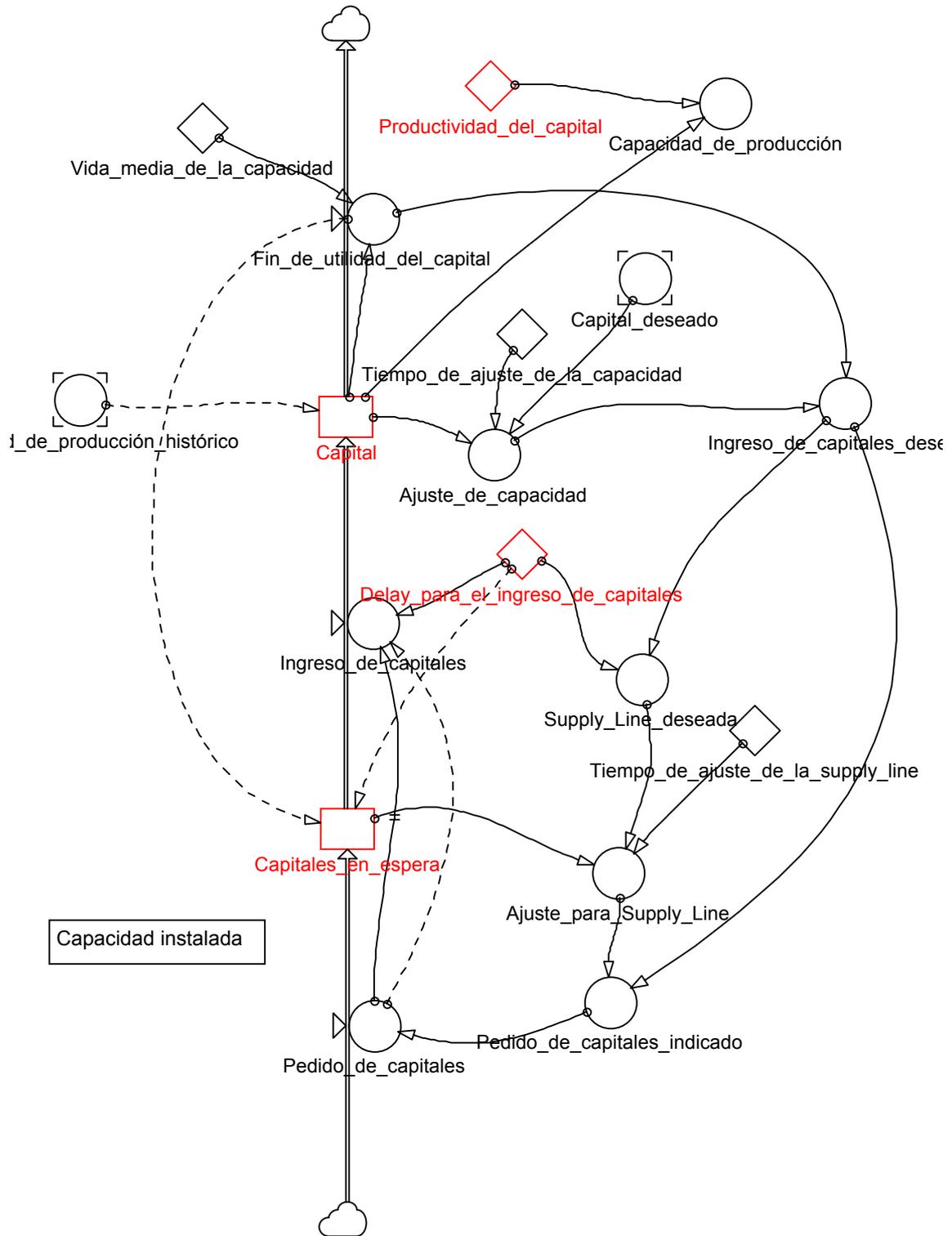
Secretaría de Energía de la República Argentina. 2004. Datos Históricos WTI. http://energia.mechón.ar/precios_informe/WTI_CONS.ASP.

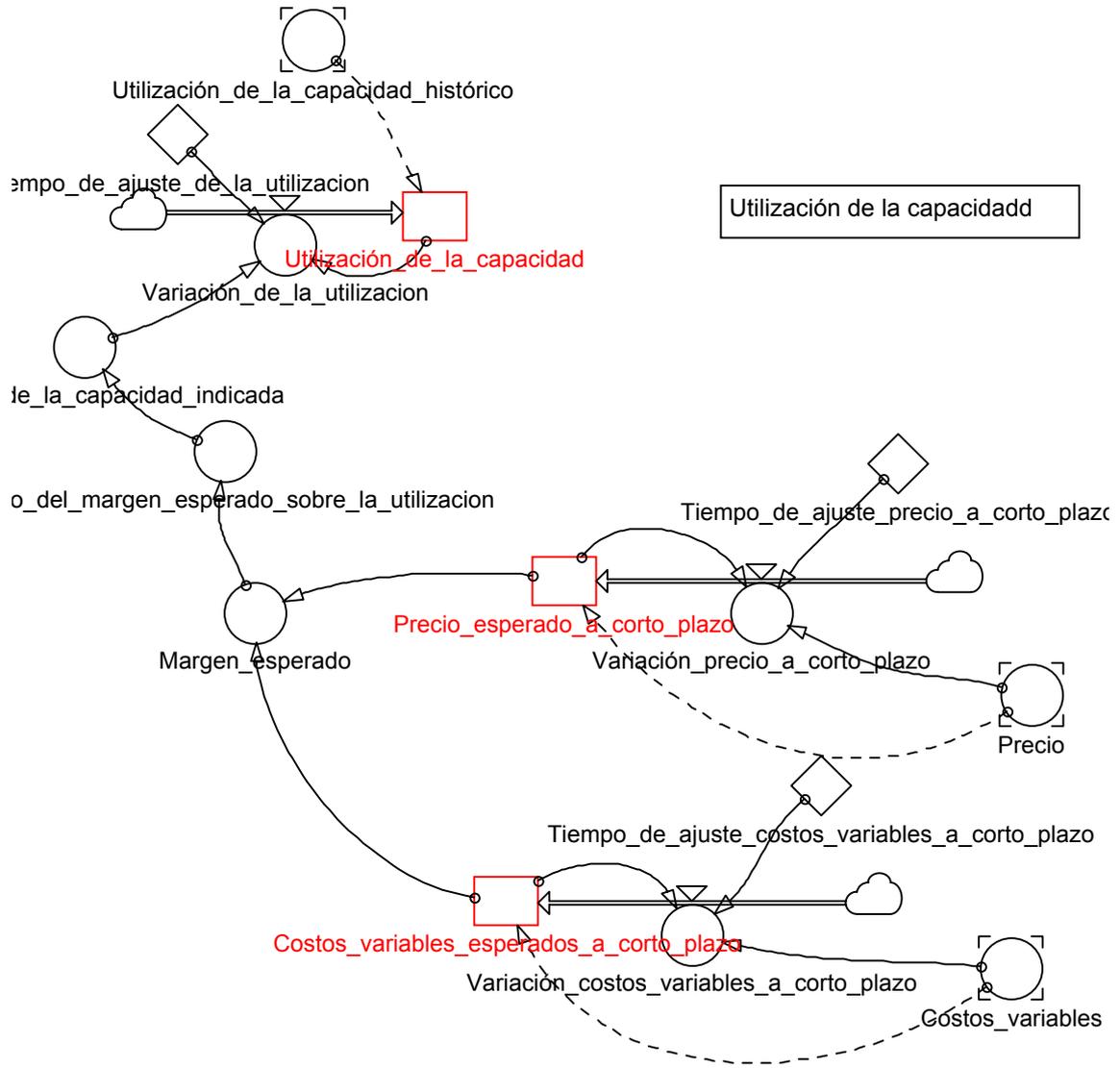
CEPAL. 2000. Serie Recursos naturales e infraestructura, informe n° 14. Resultados de la reestructuración de la industria del gas en la Argentina. Capítulo 5. La formación de precios.

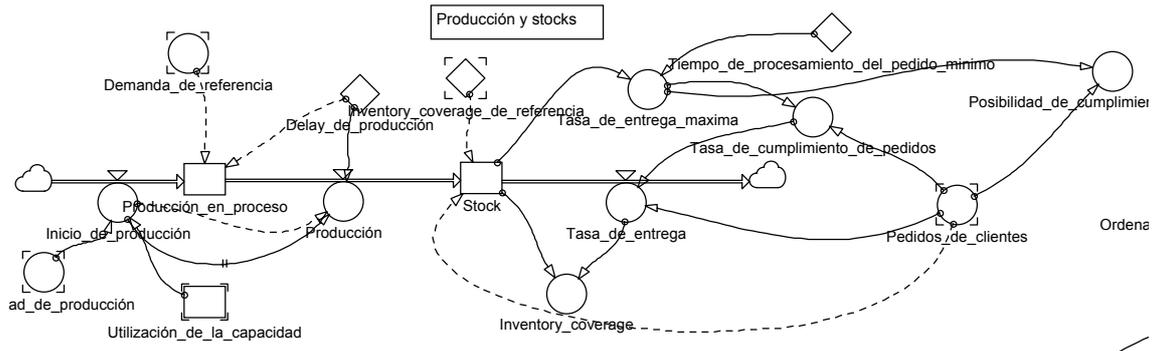
Kevin DeNicola. 2003. CSFB Chemical Conference. LYONDELL.

13. ANEXO

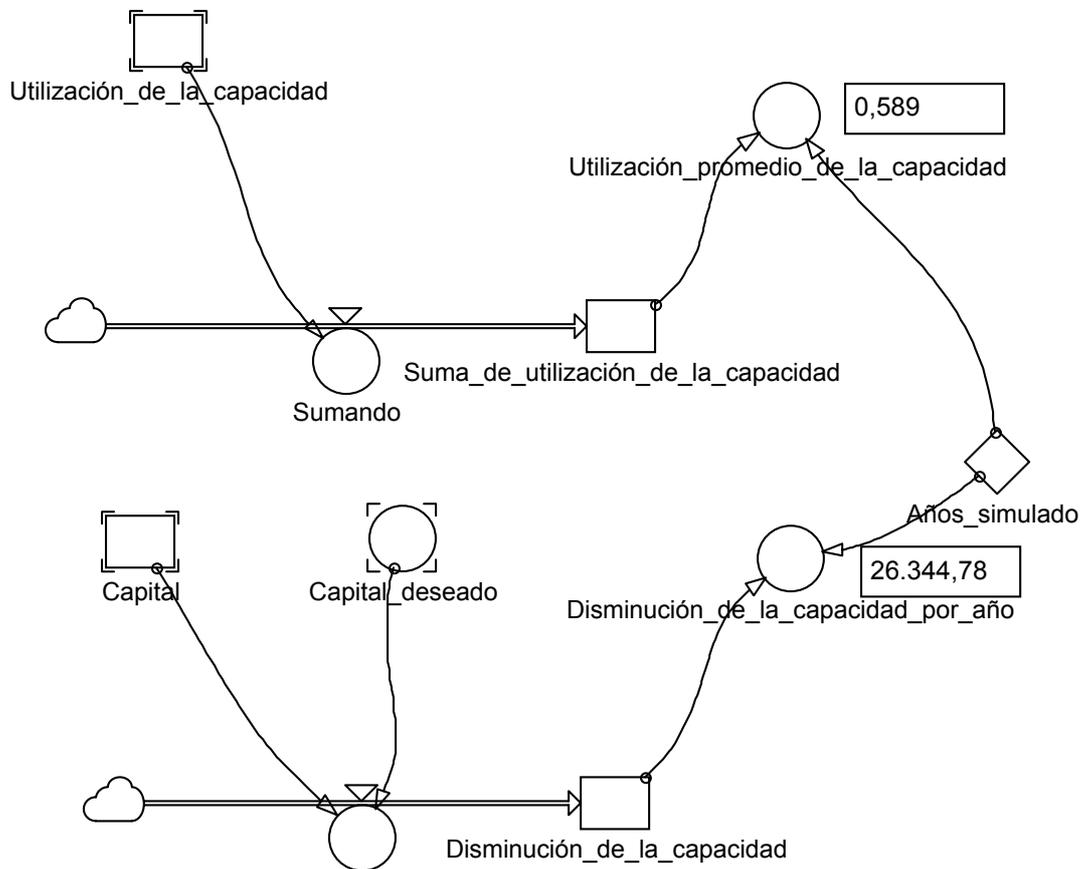








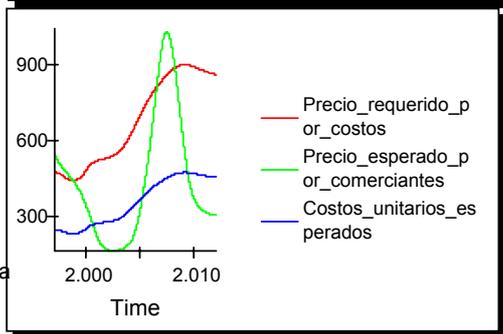
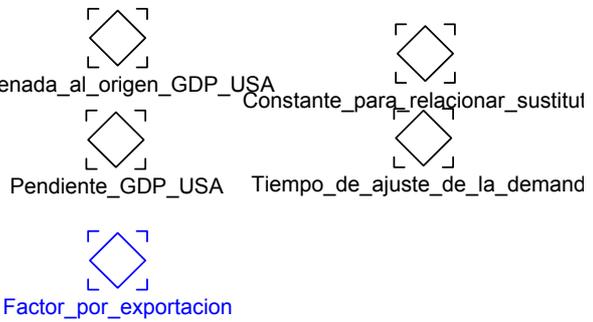
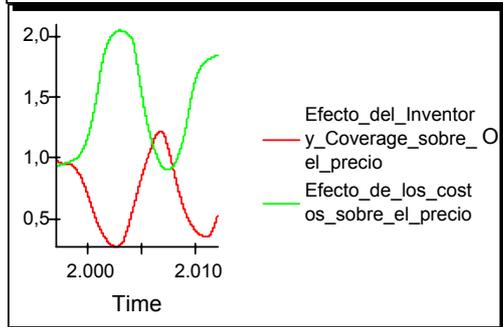
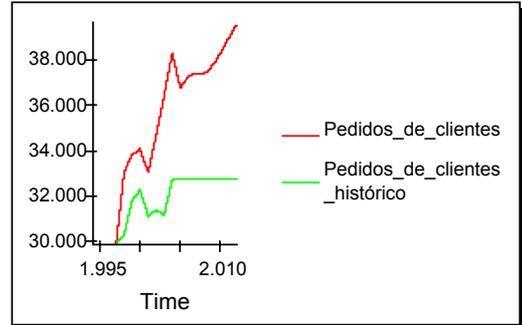
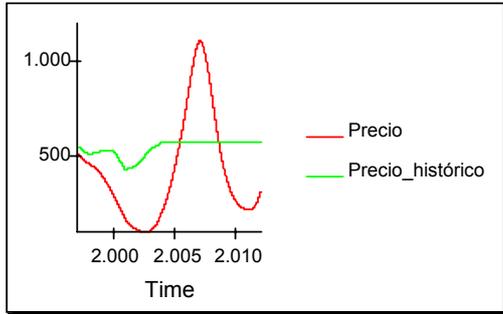
INDICADORES



PRECIO

DEMANDA

e_cumplimiento_de_pedidos



órica



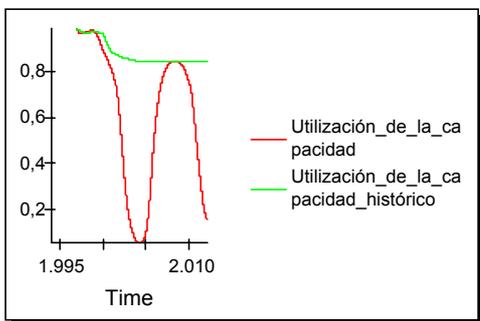
1

Tiem

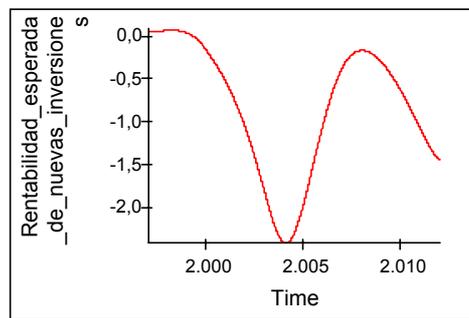
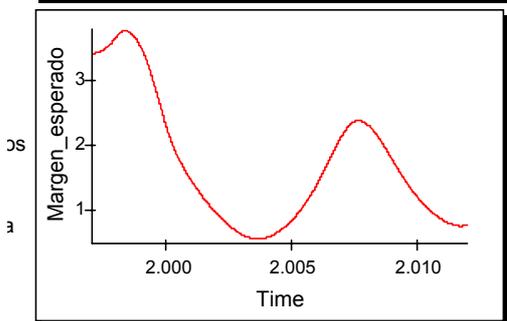
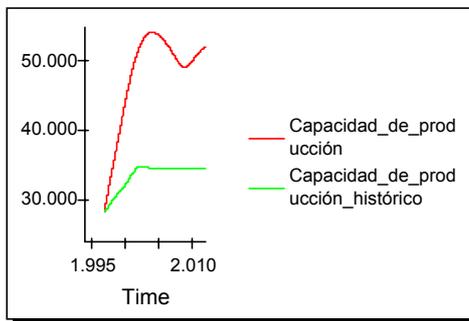


STE

UTILIZACION



CAPACIDAD



Variables del modelo

```

init   Capital = Capacidad_de_producción_histórico
flow   Capital = -dt*Fin_de_utilidad_del_capital
        +dt*Ingreso_de_capitales
init   Capitales_en_espera =
Delay_para_el_ingreso_de_capitales*Fin_de_utilidad_del_capital
flow   Capitales_en_espera = -dt*Ingreso_de_capitales
        +dt*Pedido_de_capitales
init   Costos_unitarios_esperados = Costos_unitarios
flow   Costos_unitarios_esperados = +dt*Variación_de_costos_unitarios
init   Costos_variables_esperados_a_corto_plazo = Costos_variables
flow   Costos_variables_esperados_a_corto_plazo =
+dt*Variación_costos_variables_a_corto_plazo
init   Demanda = Demanda_de_referencia
flow   Demanda = +dt*Variación_de_la_demanda
init   Demanda_historica_inicial = Demanda_histórica
flow   Demanda_historica_inicial =
init   Disminución_de_la_capacidad = 0
flow   Disminución_de_la_capacidad = +dt*Restando_capac
init   Inventory_coverage_percibido = Inventory_coverage_de_referencia
flow   Inventory_coverage_percibido =
+dt*Cambio_en_el_inventory_coverage_percibido
init   Precio_esperado_a_corto_plazo = Precio
flow   Precio_esperado_a_corto_plazo = +dt*Variación_precio_a_corto_plazo
init   Precio_esperado_a_largo_plazo = Precio
flow   Precio_esperado_a_largo_plazo = +dt*Variación_precio_a_largo_plazo
init   Precio_esperado_por_comerciantes = Precio_histórico
flow   Precio_esperado_por_comerciantes =
+dt*Cambio_en_el_precio_esperado_por_comerciantes
init   Producción_en_proceso = Demanda_de_referencia*Delay_de_producción
flow   Producción_en_proceso = -dt*Producción
        +dt*Inicio_de_producción
init   Stock = Pedidos_de_clientes*Inventory_coverage_de_referencia
flow   Stock = +dt*Producción
        -dt*Tasa_de_entrega
init   Suma_de_utilización_de_la_capacidad = 0
flow   Suma_de_utilización_de_la_capacidad = +dt*Sumando
init   Utilización_de_la_capacidad = Utilización_de_la_capacidad_histórico
flow   Utilización_de_la_capacidad = +dt*Variación_de_la_utilizacion
aux    Cambio_en_el_inventory_coverage_percibido = (Inventory_coverage-
Inventory_coverage_percibido)/Tiempo_de_ajuste_del_inventory_coverage_percibido
aux    Cambio_en_el_precio_esperado_por_comerciantes = (Precio_indicado-
Precio_esperado_por_comerciantes)/Tiempo_para_ajustar_el_Traders_expected_price
aux    Fin_de_utilidad_del_capital = Capital/Vida_media_de_la_capacidad
aux    Ingreso_de_capitales =
DELAYINF(Pedido_de_capitales,Delay_para_el_ingreso_de_capitales,3)
aux    Inicio_de_producción =
(Capacidad_de_producción)*(Utilización_de_la_capacidad)
aux    Pedido_de_capitales = MAX(Pedido_de_capitales_indicado,0)

```

aux Producción = DELAYINF(Inicio_de_producción,Delay_de_producción,3)
 aux Restando_capac = IF(Capital>Capital_deseado, Capital-Capital_deseado, 0)
 aux Sumando = Utilización_de_la_capacidad
 aux Tasa_de_entrega = Pedidos_de_clientes*Tasa_de_cumplimiento_de_pedidos
 aux Variación_costos_variables_a_corto_plazo = (Costos_variables-
 Costos_variables_esperados_a_corto_plazo)/Tiempo_de_ajuste_costos_variables_a_cor
 to_plazo
 aux Variacion_de_costos_unitarios = (Costos_unitarios-
 Costos_unitarios_esperados)/Tiempo_de_ajuste_de_costos_unitarios
 aux Variación_de_la_demanda = (Demanda_indicada-
 Demanda)/Tiempo_de_ajuste_de_la_demanda
 aux Variación_de_la_utilización = (Utilización_de_la_capacidad_indicada-
 Utilización_de_la_capacidad)/Tiempo_de_ajuste_de_la_utilizacion
 aux Variación_precio_a_corto_plazo = (Precio-
 Precio_esperado_a_corto_plazo)/Tiempo_de_ajuste_precio_a_corto_plazo
 aux Variación_precio_a_largo_plazo = (Precio-
 Precio_esperado_a_largo_plazo)/Tiempo_de_ajuste_de_precio_a_largo_plazo
 aux Ajuste_de_capacidad = (Capital_deseado-
 Capital)/Tiempo_de_ajuste_de_la_capacidad
 aux Ajuste_para_Supply_Line = (Supply_Line_deseada-
 Capitales_en_espera)/Tiempo_de_ajuste_de_la_supply_line
 aux Capacidad_de_producción = Capital*Productividad_del_capital
 aux Capacidad_de_producción_histórico =
 GRAPH(TIME,1994,1,[26274,27482,28036,28371,29691,31037,32090,33649,34924,3
 4895,34735"Min:25000;Max:40000;Zoom"])
 aux Capital_deseado =
 Capital*Efecto_de_la_rentabilidad_esperada_sobre_el_capital_deseado
 aux Costos_unitarios = Costos_fijos_unitarios+Costos_variables
 aux Costos_variables = Constante_WTI_a_costos*WTI
 aux Crecimiento_porcentual_GDP_USA = (GDP_USA-
 GDP_USA_anterior)/GDP_USA_anterior
 aux Curva_de_demanda = -
 Demanda_de_referencia*elasticidad_de_la_demanda_de_referencia/Precio_de_sustituto
 s
 aux Demanda_de_referencia = Demanda_historica_inicial*Factor_por_exportacion
 aux Demanda_histórica =
 GRAPH(TIME,1994,1,[24462,25368,26274,27482,27885,29227,29674,28615,28866,2
 8648,30085"Min:20000;Max:35000;Zoom"])
 aux Demanda_indicada =
 MIN(Consumo_máximo, Demanda_de_referencia*MAX(0,1+Curva_de_demanda*((Pre
 cio-Precio_de_sustitutos)/Demanda_de_referencia))*Factor_por_exportacion
 aux Disminución_de_la_capacidad_por_año =
 Disminución_de_la_capacidad/Años_simulados
 aux Efecto_de_la_rentabilidad_esperada_sobre_el_capital_deseado =
 GRAPH(Rentabilidad_esperada_de_nuevas_inversiones,-
 1,0.2,[0,0.08,0.29,0.76,0.96,1,1.1,1.22,1.26,1.32,1.36"Min:0;Max:2;Zoom"])
 aux Efecto_de_los_costos_sobre_el_precio =
 1+(Sensibilidad_del_precio_a_los_costos*((Precio_requerido_por_costos/Precio_esper
 ado_por_comerciantes)-1))

```

aux Efecto_del_Inventory_Coverage_sobre_el_precio =
1/((Inventory_coverage_percibido/Inventory_coverage_de_referencia)^Sensibilidad_del
_precio_al_inventory_coverage)
aux Efecto_del_margen_esperado_sobre_la_utilizacion =
GRAPH(Margen_esperado,0,0.2,[0,0,0.01,0.05,0.12,0.4,0.68,0.74,0.79,0.82,0.84,0.85,0
.86,0.87,0.89,0.91,0.93,0.95,0.98,0.99,1"Min:0;Max:1;Zoom"])
aux Factores_técnicos_y_sociales =
Ordenada_al_origen_GDP_USA+Crecimiento_porcentual_GDP_USA*Pendiente_GDP
_USA
aux GDP_USA =
GRAPH(TIME,1994,1,[7835.5,8031.7,8328.9,8703.5,9066.9,9470.3,9817,9890.7,1007
4.8,10381.3,10841.9,10977,11115,11254,11394,11537,11681,11827,11975"Min:7000;
Max:12000;Zoom"])
aux GDP_USA_anterior = DELAYPPL(GDP_USA,1)
aux Ingreso_de_capitales_deseado =
Fin_de_utilidad_del_capital+Ajuste_de_capacidad
aux Inventory_coverage = Stock/Tasa_de_entrega
aux Margen_esperado =
Precio_esperado_a_corto_plazo/Costos_variables_esperados_a_corto_plazo
aux Pedido_de_capitales_indicado =
Ingreso_de_capitales_deseado+Ajuste_para_Supply_Line
aux Pedidos_de_clientes = Demanda*Factores_técnicos_y_sociales
aux Pedidos_de_clientes_histórico = Demanda_histórica*Factor_por_exportacion
aux Posibilidad_de_cumplimiento_de_pedidos =
Tasa_de_entrega_maxima/Pedidos_de_clientes
aux Precio =
(Precio_esperado_por_comerciantes*Efecto_del_Inventory_Coverage_sobre_el_precio
*Efecto_de_los_costos_sobre_el_precio)
aux Precio_de_sustitutos =
Precio_propileno_histórico*Constante_para_relacionar_sustitutos
aux Precio_histórico =
GRAPH(TIME,1994,1,[450,520,487,559,513,528,536,432,457,538,576"Min:350;Max:
600"])
aux Precio_indicado = MAX(Precio,Precio_minimo)
aux Precio_minimo =
Costos_variables_esperados_a_corto_plazo*Margen_necesario
aux Precio_propileno_histórico =
GRAPH(TIME,1994,1,[350,490,420,450,310,325,370,350,480,510,470,608,631,552,48
6,468,496,580,608"Min:300;Max:640;Zoom"])
aux Precio_requerido_por_costos =
Costos_unitarios_esperados*(1+Margen_necesario)
aux Rentabilidad_esperada_de_nuevas_inversiones =
(Precio_esperado_a_largo_plazo-
Costos_unitarios_esperados*(1+Margen_necesario))/Precio_esperado_a_largo_plazo
aux Supply_Line_deseada =
Ingreso_de_capitales_deseado*Delay_para_el_ingreso_de_capitales
aux Tasa_de_cumplimiento_de_pedidos =
GRAPH(Tasa_de_entrega_maxima/Pedidos_de_clientes,0,0.1,[0,0.09,0.19,0.29,0.4,0.5,
0.58,0.64,0.72,0.78,0.82,0.84,0.87,0.89,0.91,0.93,0.95,0.96,0.98,0.99,1"Min:0;Max:1;Z
oom"])

```

```

aux Tasa_de_entrega_maxima =
Stock/Tiempo_de_procesamiento_del_pedido_minimo
aux Utilización_de_la_capacidad_histórico =
GRAPH(TIME,1994,1,[0.97,0.96,0.97,0.99,0.97,0.98,0.97,0.89,0.87,0.86,0.85"Min:0.6;
Max:1"])
aux Utilización_de_la_capacidad_indicada =
Efecto_del_margen_esperado_sobre_la_utilizacion
aux Utilización_promedio_de_la_capacidad =
Suma_de_utilización_de_la_capacidad/Años_simulados
aux WTI =
GRAPH(TIME,1994,1,[17.21,18.42,22.16,20.61,14.39,19.31,30.37,25.93,26.16,31.06,4
1.38,50,52,54,55,52,48,47,47"Min:10;Max:55;Zoom"])
const Años_simulados = 16
const Constante_para_relacionar_sustitutos = 2.5
const Constante_WTI_a_costos = 7.39167374681393
const Consumo_máximo = 10000000000
const Costos_fijos_unitarios = 105.633814783347
const Delay_de_producción = 0.5
const Delay_para_el_ingreso_de_capitales = 4
const elasticidad_de_la_demanda_de_referencia = 0.65
const Factor_por_exportacion = 1.09
const Inventory_coverage_de_referencia = 0.145
const Margen_necesario = 0.88
const Ordenada_al_origen_GDP_USA = 1
const Pendiente_GDP_USA = 2
const Productividad_del_capital = 1
const Sensibilidad_del_precio_a_los_costos = 0.48
const Sensibilidad_del_precio_al_inventory_coverage = 1
const Tiempo_de_ajuste_costos_variables_a_corto_plazo = 1
const Tiempo_de_ajuste_de_costos_unitarios = 2
const Tiempo_de_ajuste_de_la_capacidad = 1
const Tiempo_de_ajuste_de_la_demanda = 20
const Tiempo_de_ajuste_de_la_supply_line = 1
const Tiempo_de_ajuste_de_la_utilizacion = 0.5
const Tiempo_de_ajuste_de_precio_a_largo_plazo = 2
const Tiempo_de_ajuste_del_inventory_coverage_percibido = 1
const Tiempo_de_ajuste_precio_a_corto_plazo = 1
const Tiempo_de_procesamiento_del_pedido_minimo = 0.1
const Tiempo_para_ajustar_el_Traders_expected_price = 0.5
const Vida_media_de_la_capacidad = 25

```