

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y TEXTIL



TESIS

**“MODELO MATEMÁTICO PARA OBTENER TAMAÑOS
ÓPTIMOS EN PLANTAS DE POLIETILENOS, POLICLORURO DE
VINILO Y POLIETILENTEREFTALATO A PARTIR DEL ETANO”**

PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN CIENCIAS
CON MENCIÓN EN INGENIERÍA QUÍMICA

ELABORADO POR

**Sofía Amparo Carrasco Baca
Jorge Benigno Céspedes Morante**

Asesora

M.S. Ing. Julia Victoria Salinas García

Lima - Perú

2019

Agradecimientos

Al Dr. Guy Carvajal, por sus valiosísimas enseñanzas en metodología de investigación y a los Ingenieros y Ms Sc Julia Salinas y Jaime Santillana por su importante aporte en la revisión de esta tesis.

Dedicatoria

A nuestros hijos Jorge Antonio, Fernando, Alejandro y Nataly, a quienes queremos motivar de alguna manera, la superación continua.

RESUMEN

El principal problema en el diseño de un complejo petroquímico es el cálculo del tamaño óptimo de las plantas que lo componen, debido a que las plantas al ser muy grandes o muy pequeñas generarán sobrecostos en el futuro. Este trabajo presenta un modelo matemático diseñado en una hoja de cálculo Excel que permita calcular el tamaño óptimo del complejo, interrelacionando factores como: el mercado, las tecnologías disponibles, tamaños mínimos de planta y otros.

El complejo petroquímico está constituido por 8 plantas, usando como materia prima el etano, para obtener 4 productos finales: Polietileno de alta densidad (PEAD), Polietileno de baja densidad (PEBD), Policloruro de vinilo (PVC) y Polietilenterftalato (PET). Las variables son matrices de dos o tres dimensiones, siendo las más importantes las producciones máximas, rendimientos, producciones anuales de cada planta, capacidades de planta, factor de servicio, inversiones, costos y las demandas del mercado.

Se ha determinado que los tamaños óptimos de las plantas petroquímicas finales son de: 431 509 t/año de PEAD, 336 009 t/año de PEBD (dos plantas en paralelo), 355 998 t/año de PVC y 548 549 t/año de PET; mientras que las plantas petroquímicas básicas e intermedias son de: 1 369 741 t/año de producción de etileno en la planta de pirólisis, 357 066 t/año de cloruro de vinilo monómero (VCM), 185 410 t/año de óxido de etileno (OE) y 185 410 t/año de etilenglicol (EG).

Se concluye que es posible determinar el tamaño óptimo de las plantas de un complejo petroquímico a partir de la interrelación de variables diseñando un modelo matemático.

SUMMARY

The main problem in designing a petrochemical complex is the calculation of the optimum size of the plants that comprise it, because plants to be very large or very small generate overruns in the future. This paper presents a mathematical model designed in an Excel spreadsheet that allows to calculate the optimal size of the complex and interrelated factors: the market, the technologies available, minimum sizes of plant and others.

The petrochemical complex consists of 8 units, using as feedstock ethane to give 4 final products: High density polyethylene (HDPE), low density polyethylene (LDPE), polyvinyl chloride (PVC) and polyethylene terephthalate (PET). The variables are arrays of two or three dimensions, the most important being the maximum production, yields, annual production of each plant, plant capacity factor, service, investment, costs and market demands.

They have determined that the optimal size of the final petrochemical plants are: 431 509 t/year of HDPE, 336 009 t/year of LDPE (two plants in parallel), 355 998 t/year of PVC and 548 549 t / year of PET; while basic and intermediate petrochemical plants are 1 369 741 t/year ethylene production in the pyrolysis plant, 357 066 t/year of vinyl chloride monomer (VCM), 185 410 t/year of ethylene oxide (OE) and 185 410 t/year of ethylene glycol (EG).

We conclude that it is possible to determine the optimal size of a petrochemical plant complex from the interplay of variables designing a mathematical model.

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	iii
CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 2.- MARCO TEÓRICO	7
2.1 Industria Petroquímica	7
2.1.1 <i>Planta de pirolisis</i>	9
2.1.2 <i>Planta de polietileno de alta densidad</i>	10
2.1.3 <i>Planta de polietileno de baja densidad</i>	11
2.1.4 <i>Planta de cloruro de vinilo monómero</i>	12
2.1.5 <i>Planta de policloruro de vinilo</i>	13
2.1.6 <i>Planta de óxido de etileno</i>	14
2.1.7 <i>Planta de etilenglicol</i>	15
2.1.8 <i>Planta de polietilentereftalato</i>	16
2.2 Modelos Matemáticos	18
2.2.1 <i>Tipos de Modelos Matemáticos</i>	19
2.2.2 <i>Modelamiento de sistemas complejos</i>	20
2.2.3 <i>Algoritmos de solución de los modelos matemáticos</i>	21
2.2.4 <i>Modelos matemáticos de optimización</i>	22
2.2.5 <i>Ecuaciones Matemáticas a utilizar</i>	24
CAPÍTULO 3 DISEÑO METODOLÓGICO	27
3.1 Descripción Modelo	27
3.2 Nomenclatura del Modelo Matemático	29
3.2.1 <i>Nomenclatura de las Plantas</i>	29
3.2.2 <i>Nomenclatura de materias primas, insumos y productos</i>	29
3.3 Estructura del Complejo Petroquímico	31
3.4 Módulos del Complejo Petroquímico	32
3.4.1 <i>Modulo de Producciones de productos petroquímicos finales</i>	32
3.4.2 <i>Módulo de rendimientos de las Plantas Petroquímicas</i>	33
3.4.3 <i>Módulo de Balance de Materiales</i>	34
3.4.3.1 <i>Planta de Pirólisis</i>	35
3.4.3.2 <i>Planta de PEAD</i>	35
3.4.3.3 <i>Planta de PEBD</i>	35
3.4.3.4 <i>Planta de VCM</i>	36

3.4.3.5 <i>Planta de PVC</i>	36
3.4.3.6 <i>Planta de OE</i>	36
3.4.3.7 <i>Planta de EG</i>	37
3.4.3.8 <i>Planta de PET</i>	37
3.4.4 <i>Módulo de Capacidades de Planta</i>	38
3.4.5 <i>Módulo de Inversiones</i>	39
3.4.6 <i>Módulo de ingresos</i>	40
3.4.7 <i>Módulo de egresos</i>	41
3.4.8 <i>Módulo de evaluación económica</i>	43
CAPÍTULO 4 RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	45
4.1 Resultados	45
4.1.1 <i>Producciones máximas de productos petroquímicos finales</i>	45
4.1.2 <i>Balance de materiales de las plantas petroquímicas</i>	46
4.1.3 <i>Capacidades de planta</i>	57
4.1.4 <i>Inversiones del complejo petroquímico</i>	59
4.1.5 <i>Ingresos del complejo petroquímico</i>	60
4.1.6 <i>Egresos</i>	61
4.1.7 <i>Evaluación económica</i>	62
4.1.8 <i>Verificación de capacidad de planta</i>	62
4.2 Análisis y Discusión	74
4.2.1 <i>Análisis de resultados</i>	74
4.2.2 <i>Análisis de evaluación económica final</i>	76
CAPITULO 5 CONCLUSIONES	78
CAPITULO 6 RECOMENDACIONES	79
CAPITULO 7 LITERATURA CITADA	80
ANEXOS	83
Anexo 1: Glosario	84
Anexo 2: CD con corridas del Modelo Matemático	99

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene el objetivo de formular un modelo matemático que sirva para el cálculo de tamaños óptimos de plantas industriales componentes de un complejo petroquímico. La determinación del tamaño óptimo tiene gran importancia debido a que al estar sub dimensionadas se incrementan los costos de operación por el tamaño de escala y que en poco tiempo sería necesario hacer nuevas inversiones para ampliar la capacidad; por otro lado, al estar sobre dimensionadas generará altas inversiones y costos de operación de capacidad ociosas por varios años.

El diseño óptimo de las capacidades es un elemento fundamental en los proyectos de ingeniería, pues implica optimización de los recursos que hacen viable la ejecución del proyecto de desarrollo, sin embargo, en las investigaciones precedentes revisadas (Alfaro G. Gonzales F. 2000 ⁽¹⁾, Poveda G.2006 y otros⁽²⁾) muy poco se sabe de diseño de tamaños óptimos, vacío que se pretende cubrir con este estudio.

El hito más importante en el tema de la industrialización del gas natural en el país, lo constituye el descubrimiento de los yacimientos de Camisea en la década de los 90, el mismo que cuenta con $4,79 \times 10^{12} \text{ m}^3$ de gas natural, del cual $8,09 \times 10^7 \text{ m}^3$ corresponden a los condensados y $2,43 \times 10^8 \text{ m}^3$ al gas natural seco (metano más etano) ⁽³⁾

Desde el 2004 se viene explotando en el Perú el gas natural de Camisea, con importantes indicadores de producción actual y de reservas, lo que hace viable la instalación de plantas petroquímicas que den valor agregado al gas natural producido y por el otro puedan cubrir la demanda interna de productos petroquímicos, como los plásticos.

En el mundo, el gas natural constituye la tercera fuente de energía después del petróleo y el carbón. Durante los últimos 20 años, las reservas de gas natural han crecido a un ritmo de 5% anual aproximadamente, estimándose las reservas totales mundiales de estos hidrocarburos en $150 \times 10^9 \text{ m}^3$, lo cual, además del gran crecimiento como industria, demuestra la gran importancia que ha adquirido como combustible e insumo industrial para el desarrollo de las naciones.

Para el desarrollo de esta tesis se ha revisado información relacionada al tema, teniendo como aspecto central, la formulación de un modelo matemático para el cálculo de tamaño óptimo de un complejo petroquímico.

Con respecto al cálculo del tamaño óptimo de una planta, Alfaro G. y González F. (2000)⁽¹⁾ presentan una metodología para la determinación del tamaño mínimo

económico de una planta, partiendo de un análisis de los elementos del producto que se va a fabricar, costeando los procesos seleccionados, y así elegir el proceso que determine el tamaño mínimo económico, con el cual se satisfaga la demanda y se logre costos unitarios mínimos y una máxima utilidad, conjugando como en todo proyecto, varios factores tales como la demanda, las inversiones y la tecnología. En ese estudio se presenta un ejemplo de aplicación al sector forestal para el uso de dicha metodología, en el cual diseña un modelo matemático para la evaluación económica de una planta industrial, con la limitante de ser solo para una planta y para un producto, en el que plantea tres escenarios sobre la decisión de la capacidad de producción: la capacidad varía con la demanda, la capacidad es igual a la demanda promedio y la capacidad es igual a la demanda mínima. Asimismo, plantea porcentajes constantes de utilización de la capacidad durante la vida del proyecto.

Asimismo, Poveda, G. (2000) ⁽⁴⁾, intenta llenar un vacío en la literatura referente a la evaluación económica y financiera de plantas industriales, referente al procedimiento para calcular de modo racional el tamaño o capacidad de la planta del proyecto, para lo que presenta un método para traducir las características técnicas y financieras de la presunta planta en expresiones matemáticas y en funciones, para definir la rentabilidad como función del tamaño que se le calcule; y determinar por métodos matemáticos el tamaño óptimo a fin de lograr la planta más rentable. Sin embargo, el autor considera que no hay en la literatura ningún tratamiento matemático de esta cuestión, presentando como aplicación práctica, una planta de producción de anhídrido ftálico a partir de orto xileno, quedando la necesidad de una aplicación para un complejo petroquímico, constituido por varias plantas como el que se piensa desarrollar en la tesis.

Luego, en relación al análisis económico en el diseño de plantas, Restrepo J. y Uribe G., (2001) ⁽⁵⁾ amplían las ideas expuestas por Poveda G., profundizando el concepto de la evaluación económica de un proyecto y deduce las ecuaciones que maximizan un criterio económico, en función de la capacidad o tamaño de planta, teniendo en cuenta que para el crecimiento de la producción se considera dos casos: un crecimiento exponencial anual y un crecimiento lineal anual. El modelo considera un criterio económico determinado, estableciendo el tamaño de planta a partir de la evaluación económica; sin embargo, el modelo es aplicable únicamente para una planta con un solo producto, diferente a lo que se busca en la presente tesis.

En línea con el cálculo de tamaño óptimo, en el 2003, Poveda G. ⁽⁶⁾ expone un método matemático creado por él mismo, con el fin de determinar la capacidad o tamaño óptimo económico de una planta industrial en una fase inicial del proyecto, utilizando

un modelo matemático derivado de la Ley de Williams, teniendo en consideración conceptos de incremento de la demanda proyectada con una razón de crecimiento geométrico y otras, y calcular finalmente la rentabilidad óptima, estudio que constituye un aporte en una fase inicial; sin embargo no puede aplicarse a un complejo industrial, que se busca en la presente tesis.

Posteriormente, Poveda G.⁽²⁾ en el 2006, evoluciona en la evaluación y propone un modelo matemático para planificar y determinar un tamaño óptimo de una planta de proceso de transformación, para producir 4 productos finales en una misma planta, considerando que la demanda de los cuatro productos crecerá en forma geométrica.

Sin embargo, la investigación está limitada a un planteamiento puntual para una sola planta multi producto, así como solo puede usarse para crecimientos geométricos de la demanda, los cuales difieren de la propuesta de un nuevo modelo aplicable a un complejo petroquímico, que es materia de la tesis que se viene desarrollando.

Por otro lado, respecto al diseño de un modelo de simulación o sistematización de los datos para el cálculo del tamaño óptimo de una planta petroquímica, se observa que Rossouw, R.F. 2007 ⁽⁷⁾ trata del diseño de un modelo de simulación aplicada a una industria petroquímica, en la que puede simular los ingresos y salidas en cada una de las operaciones, realizando balances de materias con el objetivo de optimizar los recursos y que una vez diseñado el modelo de simulación podría ser aplicado a una planta piloto, o para otros casos prácticos, en los cuales se puede prever riesgos y tener herramientas en la toma de decisiones. Sin embargo, este estudio no sería aplicable para buscar tamaños óptimos de plantas petroquímicas, que es lo que se busca en la tesis.

Sobre este mismo punto, Moreira, D. (2007) ⁽⁸⁾ diseña un modelo de simulación a través del uso de ordenadores, con el objetivo de mejorar los criterios de funcionalidad, que puedan acercarse más a la realidad, planteando un modelo para guiar la actividad de diseño en la fase conceptual. Esta investigación, si bien es cierto, es un aporte a la ciencia al aplicar conceptos matemáticos al diseño de instalaciones como oficinas, no es aplicable para un complejo petroquímico, como el que se pretende desarrollar.

Por otro lado, Almansoor, A. (2008)⁽⁹⁾, desarrolla el estudio que consiste en diseñar plantas petroquímicas teniendo como base los aspectos y obligaciones regulatorias ambientales, así como evaluación de riesgos de seguridad industrial, con el objetivo de que durante la operación de la planta, no requiera de grandes cambios para adecuarse a las exigencias ambientales y de seguridad industrial, como actualmente

ocurre. El aporte de este estudio en el diseño de plantas petroquímicas es incluir criterios regulatorios en temas de seguridad y medio ambiente. Sin embargo, a diferencia de otros estudios no considera como factores primordiales, el diseño de capacidades y tamaños óptimos de planta, que es materia de estudio de la tesis que se tiene planeado desarrollar.

Finalmente, en la búsqueda de optimizar los costos, en el 2009, Estepa, L. y Rodríguez, L.⁽¹⁰⁾, presentan los resultados de un trabajo de aplicación de la Teoría de las Restricciones (TOC) de Eliyahu M. Goldratt, en los procesos de manufactura de una empresa dedicada a la producción de alimentos de consumo masivo, en el cual inicialmente se presentaron las condiciones que llevaron a decidir la aplicación de esta teoría. Más adelante y siguiendo la recomendación del Sr. Goldratt, se presentan los pasos seguidos para su aplicación y los resultados que se obtuvieron como un valor agregado al uso de esta teoría en las líneas de manufactura de alimentos lácteos fermentados empacados, en vaso plástico preformado, botella plástica soplada y alimentos lácteos empacados asépticamente en envases Tetra Brik. Sin embargo, si bien es cierto que esta investigación contribuye a buscar minimizar los costos operativos optimizando la producción, éste es sólo uno de los criterios que se considerará en la tesis que se viene desarrollando, como se describirá más adelante.

La presente Tesis tiene como justificación, de que amerita implementar en el Perú la industria petroquímica a partir del etano, al ser un país históricamente importador de productos petroquímicos, sabiendo de que existen demandas actuales y proyectadas de dichos productos en tamaños superiores a las capacidades de plantas mínimas comerciales y más aún al disponer de materias primas obtenidas de la producción del gas natural de Camisea

La instalación de plantas petroquímicas también denominadas como complejo petroquímico, tendrá importantes impactos sociales positivos, como la generación de trabajo directo e indirecto, generación de industrias derivadas, el desarrollo tecnológico que incentive a realizar mayores trabajos de investigación, mejorando los niveles de las universidades y centros tecnológicos.

Se ha elegido el etano como materia prima, debido a que en estudios anteriores que se exponen líneas arriba, se ha determinado que la relación disponibilidad de materia prima versus requerimiento del complejo petroquímico, es mejor que con otras cargas como propano, butano y nafta.

Actualmente en el Perú, al tener potencial de desarrollo de la Industria Petroquímica a partir del Gas Natural de Camisea, se han realizado estudios de diseño de Plantas

Petroquímicas, en los cuales se propusieron determinados tamaños de planta en función a los estimados de la demanda de los productos petroquímicos finales y disponibilidad de la materia prima. Para los tamaños de planta se considera que al quinto año de operación de las plantas petroquímicas las demandas de productos petroquímicos se igualan con las capacidades de planta propuestas.

Sin embargo, los tamaños de planta estimados podrían estar sub dimensionados incrementándose los costos de operación, con el inconveniente que en poco tiempo sería necesario efectuar nuevas inversiones por la ampliación de las plantas o por la construcción de nuevas plantas petroquímicas. Por otro lado, los tamaños de plantas podrían estar sobre dimensionados, con el inconveniente de que, al ser operados por debajo de las capacidades de diseño durante muchos años de operación, generaría altos costos de inversión y sobre costos de operación por la capacidad ociosa.

Los elementos teóricos que permiten suponer que esta investigación será oportuna y eficiente son: que es posible calcular los tamaños de las plantas técnica y económicamente rentable a través de la formulación de un modelo matemático, incluyendo los balances de materia de cada una de las plantas petroquímicas en función a las tecnologías disponibles.

Por lo expuesto, en este trabajo se buscar determinar los tamaños óptimos de las plantas que comprenden el complejo petroquímico, incluyendo las plantas petroquímicas básicas e intermedias requeridas para la producción de los productos petroquímicos finales, de tal manera de conseguir eficiencia en las producciones y en la rentabilidad, e influir directamente en la factibilidad del proyecto.

El Complejo Petroquímico propuesto está constituido por ocho plantas petroquímicas, para obtener cuatro productos finales: polietileno de alta densidad (PEAD), polietileno de baja densidad (PEBD), policloruro de vinilo (PVC) y polietilinterftalato (PET).

Las plantas de PEAD y PEBD tienen como materia prima el etileno, la misma que será producida por una planta de pirólisis cuya materia prima puede ser etano, propano, butano o hidrocarburos más pesados.

La planta de polietilenglicol (PET) utiliza como materias primas el etilenglicol (EG) y ácido tereftálico (ATP). En la planta de producción de EG se requiere como materias primas el óxido de etileno y agua; para la producción de óxido de etileno (OE) se requiere de una planta que tendrá como materias primas el etileno y oxígeno. A las plantas de VCM, EG y OE se les denomina como plantas petroquímicas intermedias.

Al tratarse de un complejo petroquímico constituido por un conjunto de plantas interrelacionadas entre sí, en la que cada planta tiene tecnologías, cargas y productos diferentes, así como demandas específicas de cada producto para cada año de operación del Complejo petroquímico; los cálculos de capacidades de cada una de ellas, requerirá del diseño de un nuevo modelo matemático que interrelacione todas estas variables.

Por consiguiente, el diseño del modelo deberá conjugar variables como materia prima, rendimiento de las plantas, demanda de los productos, inversiones, ingresos por ventas de los productos petroquímicos finales, costos de operación, costos de materias primas, y otros, buscando obtener un rendimiento óptimo que sea satisfactorio para los consumidores y para los inversionistas.

El Glosario de términos utilizados en la Tesis se encuentra en el Anexo 1.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Industria petroquímica

La industria petroquímica está basada principalmente en tres tipos de productos, los cuales son derivados de materias primas: las olefinas livianas (etileno, propileno y butilenos), los hidrocarburos aromáticos (benceno, tolueno y xilenos) y el gas de síntesis (una mezcla de dióxido de carbono e hidrógeno), como se ve en la figura 1.

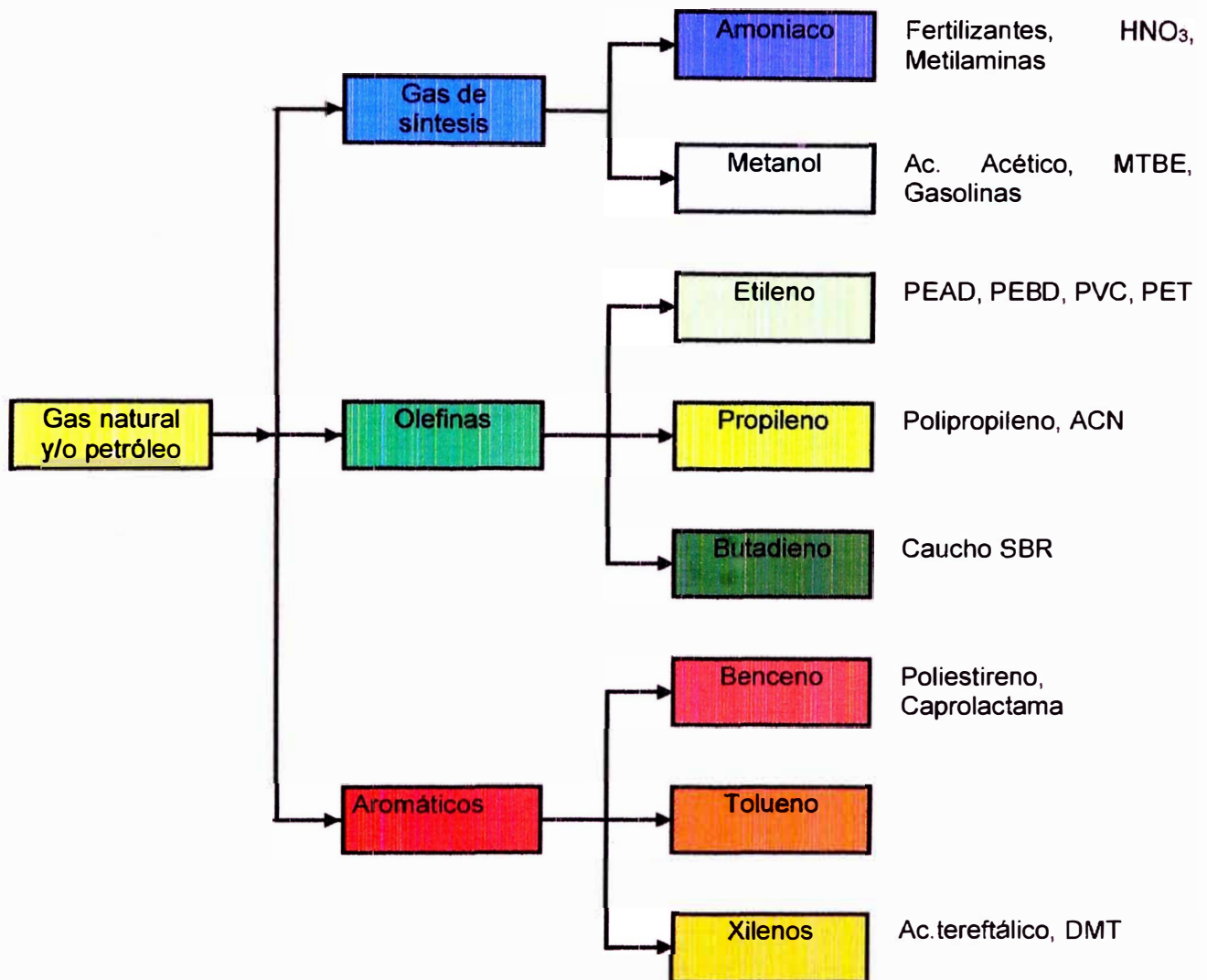


Figura 1: Principales derivados de la industria petroquímica

Los productos petroquímicos en general son compuestos y polímeros derivados directa o indirectamente del gas natural y petróleo y usados en el mercado de productos químicos. Los principales productos petroquímicos son los plásticos, fibras sintéticas, caucho sintético, detergentes y fertilizantes nitrogenados. Muchas otras importantes industrias químicas tales como pinturas, adhesivos, aerosoles,

insecticidas y productos farmacéuticos pueden implicar uno o más productos petroquímicos dentro de sus etapas de manufactura.

La principal ruta para la producción de olefinas ligeras, especialmente el etileno es el craqueo térmico de los hidrocarburos, también denominado pirólisis. Las cargas para las unidades de craqueo térmico están en el rango de gases de hidrocarburos ligeros parafínicos (etano, propano y butano) y algunas fracciones de petróleo (nafta y gasóleos). ⁽¹¹⁾

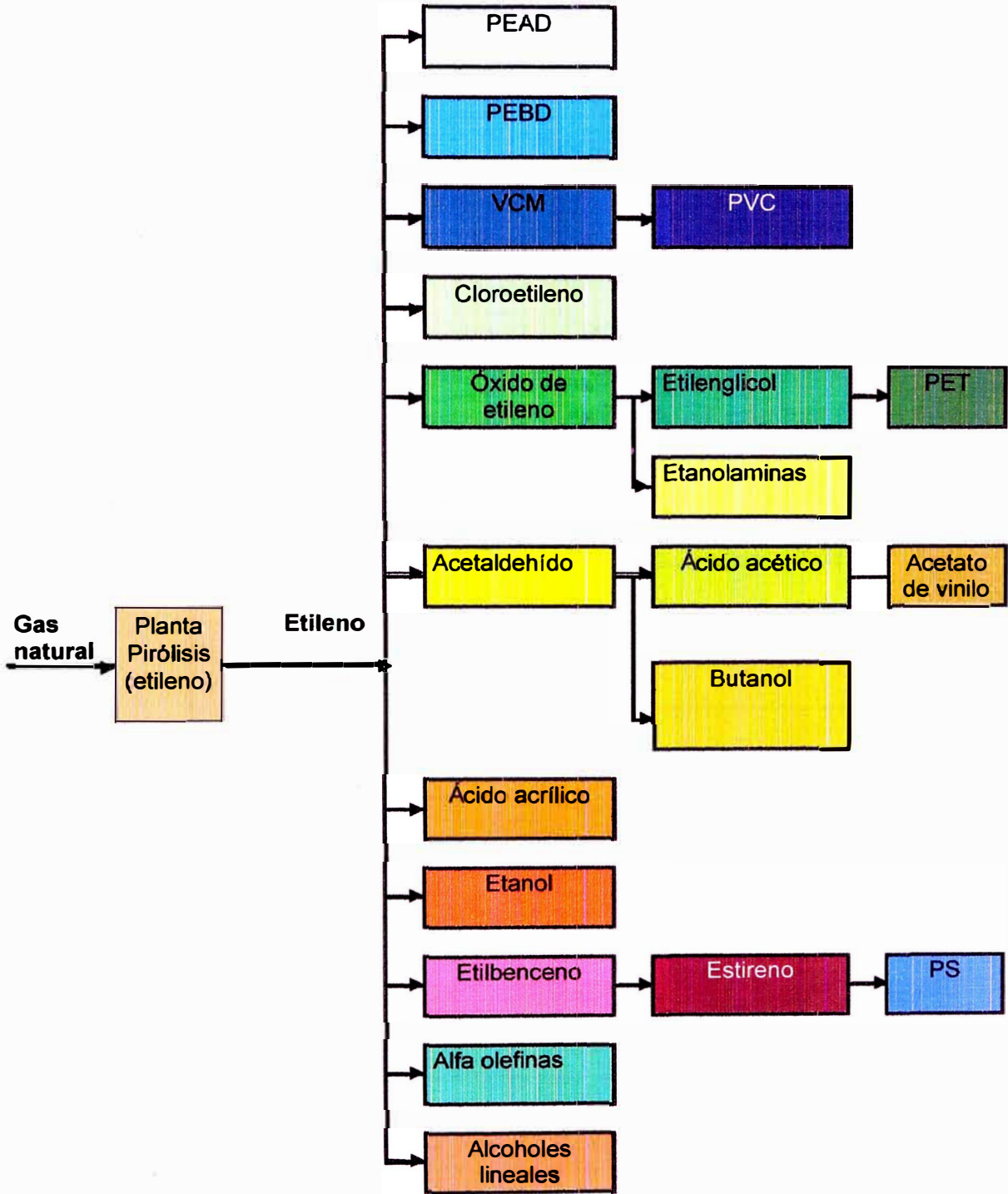


Figura 2: Petroquímica del etileno

2.1.1 Planta de pirólisis

El principal producto petroquímico básico obtenido en esta planta es el etileno, también denominado como eteno (C_2H_4), utilizando como materia prima el etano (C_2H_6).

Las reacciones de craqueo corresponden al rompimiento de los enlaces carbono-carbono, siendo necesarias cantidades importantes de energía para dirigir la reacción a la producción de olefinas. El craqueo del etano puede ser visualizado como una reacción de deshidrogenación por radicales libres, donde el hidrógeno es un coproducto:



La reacción es altamente endotérmica, la cual es favorecida a altas temperaturas y bajas presiones. El vapor sobrecalentado es usado para reducir la presión parcial de los hidrocarburos reactantes. El vapor sobrecalentado también reduce los depósitos de carbón que son formados por la pirólisis de hidrocarburos a altas temperaturas. Adicionalmente la presencia de vapor, como diluyente, reduce el contacto con las paredes de los tubos del reactor, hecho que perjudica la reacción (ver figura 3).

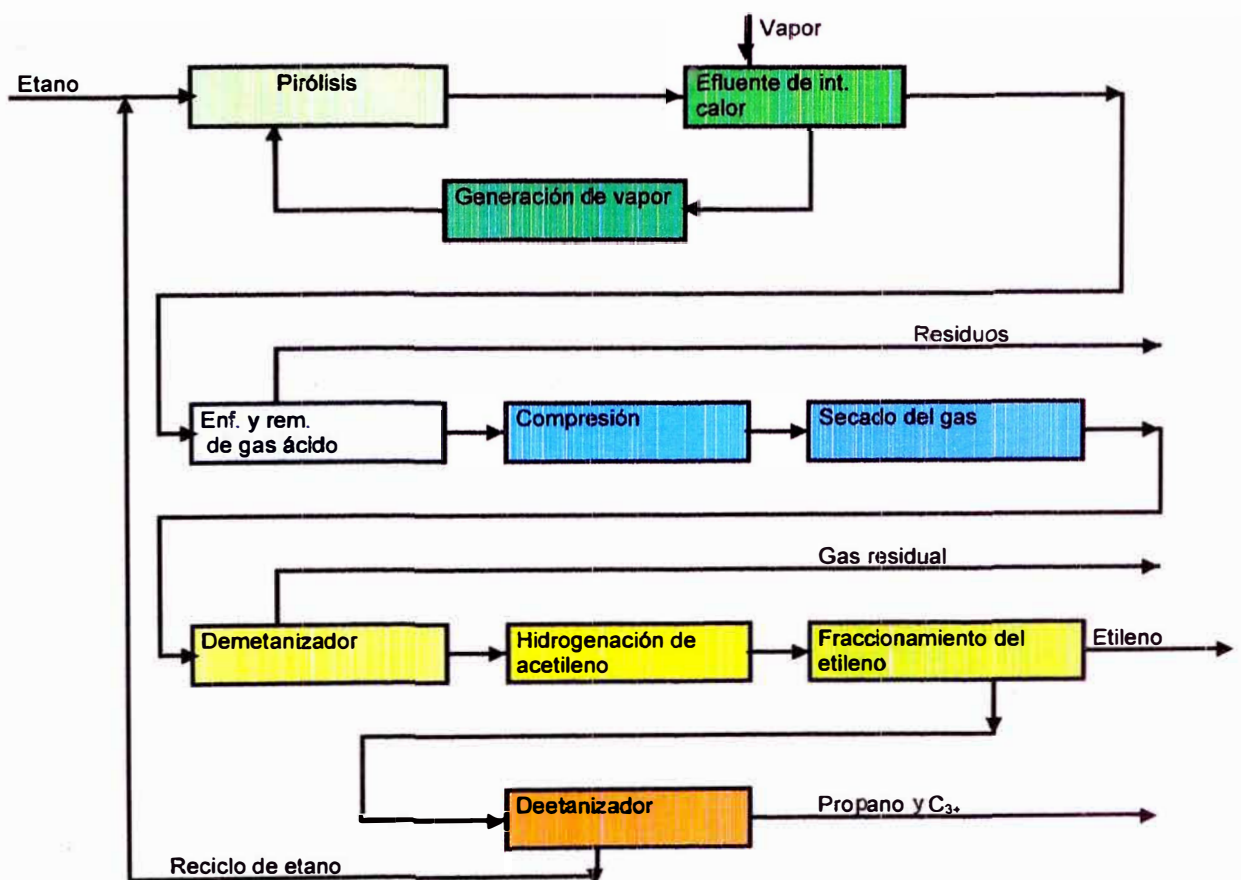


Figura 3: Producción de etileno a partir del etano

2.1.2 Planta de polietileno de alta densidad

El producto petroquímico final obtenido en esta planta es el polietileno de alta densidad (PEAD), utilizando etileno como materia prima. Es generado por un proceso de baja presión en un reactor de lecho fluidizado. El catalizador utilizado para el PEAD es el tipo Ziegler (un complejo de $\text{Al}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$ y TiCl_4) o silica-alumina impregnada con óxido crómico u óxido de molibdeno. Las condiciones de reacción son generalmente moderadas, pero ellos difieren de uno a otro proceso.

El etileno y el comonómero (propeno, 1-buteno, etc.) son alimentados a un reactor que contiene un lecho fluidizado de partículas de polímero en crecimiento. La temperatura y presión de operación son aproximadamente $100\text{ }^\circ\text{C}$ y 20 atmósferas, respectivamente. Un compresor centrífugo de simple etapa recircula el etileno que no ha reaccionado. Dicha circulación de gas remueve calor del reactor, ya que la reacción de polimerización es exotérmica. El producto del reactor es mezclado con aditivos y luego peletizado.

El PEAD es altamente cristalino, lo que le da al polímero buenas características, además no posee ramificaciones, por lo que es más compacto y tiene una mayor temperatura de fusión que el PEBD.

La densidad del polímero es fácilmente controlable desde $0,915$ hasta $0,97\text{ g/cm}^3$, dependiendo del tipo de catalizador y la distribución del peso molecular del polímero.

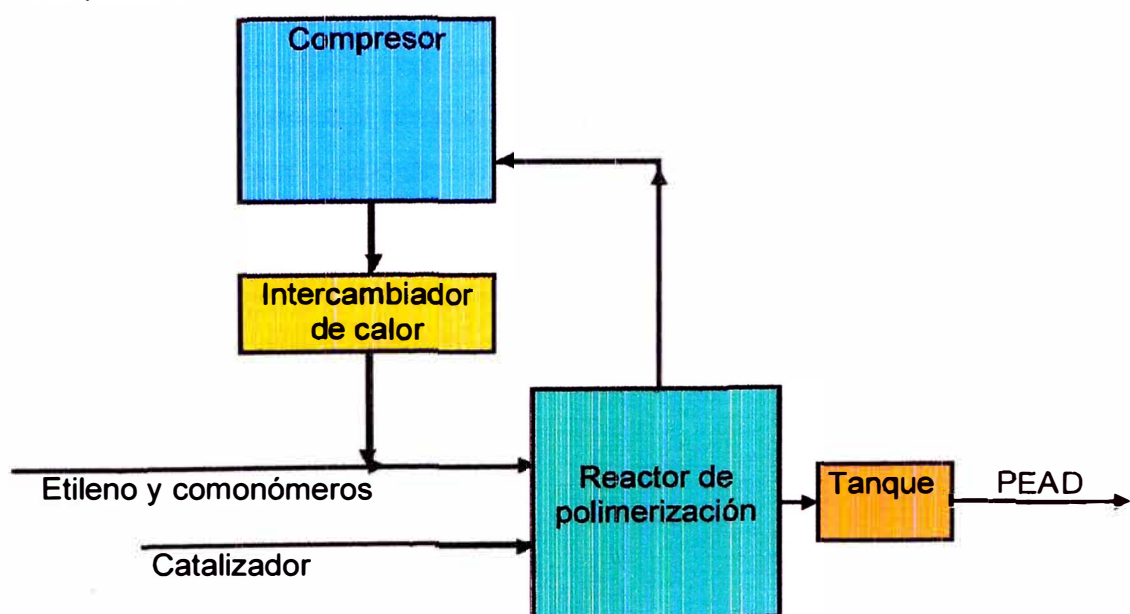


Figura 4: Producción de PEAD

2.1.3 *Planta de polietileno de baja densidad*

El producto petroquímico final obtenido en esta planta es el polietileno de baja densidad (PEBD), utilizando etileno como materia prima. Es producido por un proceso de polimerización de alta presión, cuya densidad está entre 0,910 y 0,940 g/cm³. Una corriente de etileno de gran pureza es tratada a una presión adecuada y se la hace pasar a través de un reactor (tubular o de autoclave), en presencia de un catalizador con radicales libres.

La mezcla de polímero-monómero resultante se separa por reducción de la presión en dos corrientes, una rica en monómero y otra en polímero. La corriente de polímero se concentra por medio de una nueva separación y luego se extruye en forma de cintas o cordones para su moldeo.

La reacción se lleva a cabo en autoclaves provistas de agitador o en reactores tubulares a temperaturas de hasta 350 °C y presiones que se encuentran en el rango de 1 530-3 050 Kg/cm².

El PEBD al ser producido por procesos de alta presión contiene una cantidad significativa de ramificaciones y es parcialmente cristalino, este último es función de la densidad del polímero, es decir, a menor cristalinidad menor densidad. El etileno se comprime en un rango de 255-305 Kg/cm² de presión, en el pre-compresor y hasta 3 000 Kg/m² en el compresor secundario. La presión en el reactor depende del diseño de la planta, del tipo de catalizador y del grado de polietileno manufacturado.

El Etileno comprimido se precalienta y luego se polimeriza en un reactor tubular. El etileno que no ha reaccionado se remueve en dos separadores, de media presión y de baja presión (separadores flash). Este etileno se recicla al pre-compresor por medio de un booster, mezclándose con el etileno fresco y continuando el ciclo de procesamiento en el compresor secundario.

Del separador de baja presión el polietileno es enviado a un extrusor en el cual se agregan los aditivos finales y se produce la granulación del producto (ver figura 5).

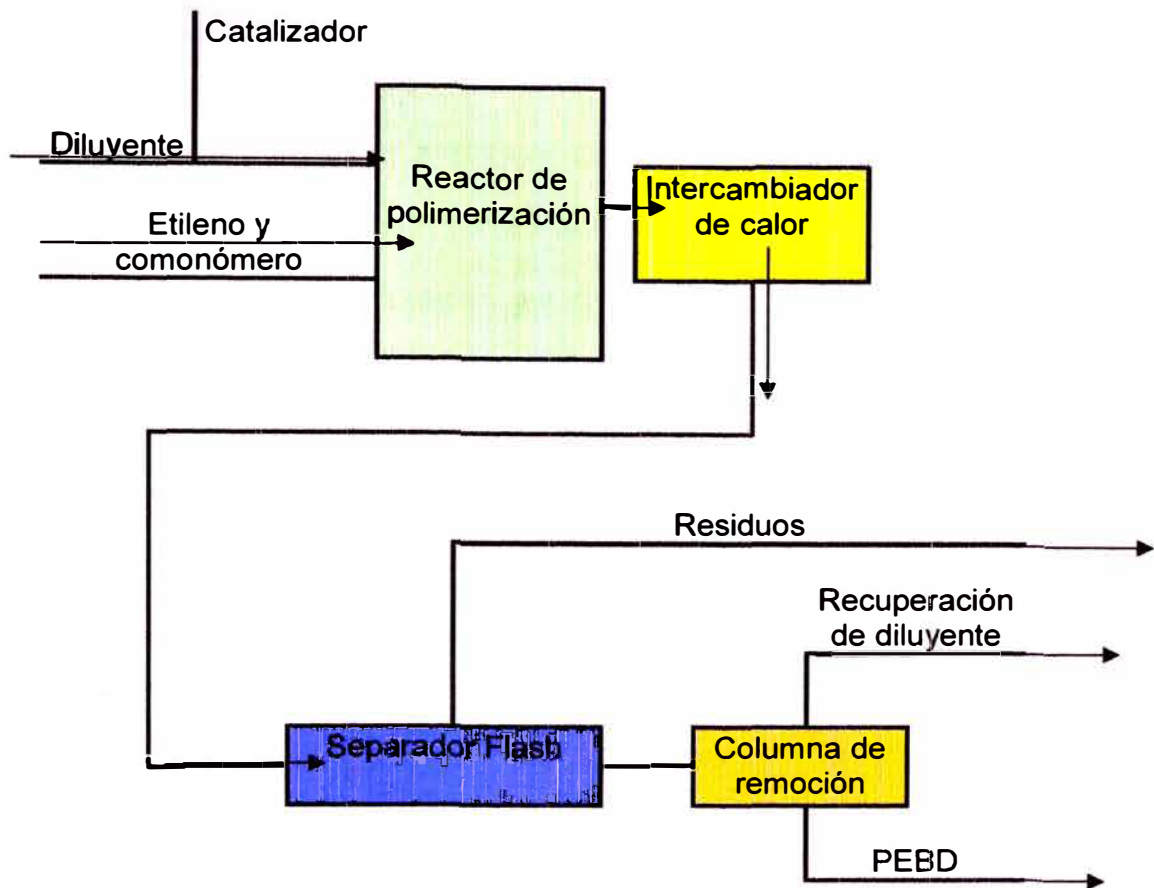


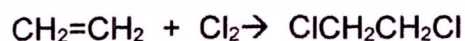
Figura 5: Producción de PEBD

2.1.4 Planta de cloruro de vinilo monómero

El producto petroquímico final obtenido en esta planta es el cloruro de vinilo monómero (VCM), utilizando como materias primas el etileno y cloro, que reaccionan inicialmente juntos para formar un intermedio de proceso importante, el dicloruro de etileno (EDC), también llamado como 1,2-dicloroetano.

Una planta de producción completa del VCM consiste en tres unidades importantes:

- Una unidad directa de cloración del etileno, en la cual el etileno y el cloro se combinan en un proceso continuo para formar EDC, como se ve en la siguiente reacción:



La reacción exotérmica ocurre a aproximadamente 4 atmósferas y 40-50 °C en presencia de catalizadores de FeCl_3 , CuCl_2 o SbCl_3 .

- Una unidad de oxiclорación, en la cual el etileno reacciona con el ácido clorhídrico en la presencia de catalizador y oxígeno. Esto produce otras

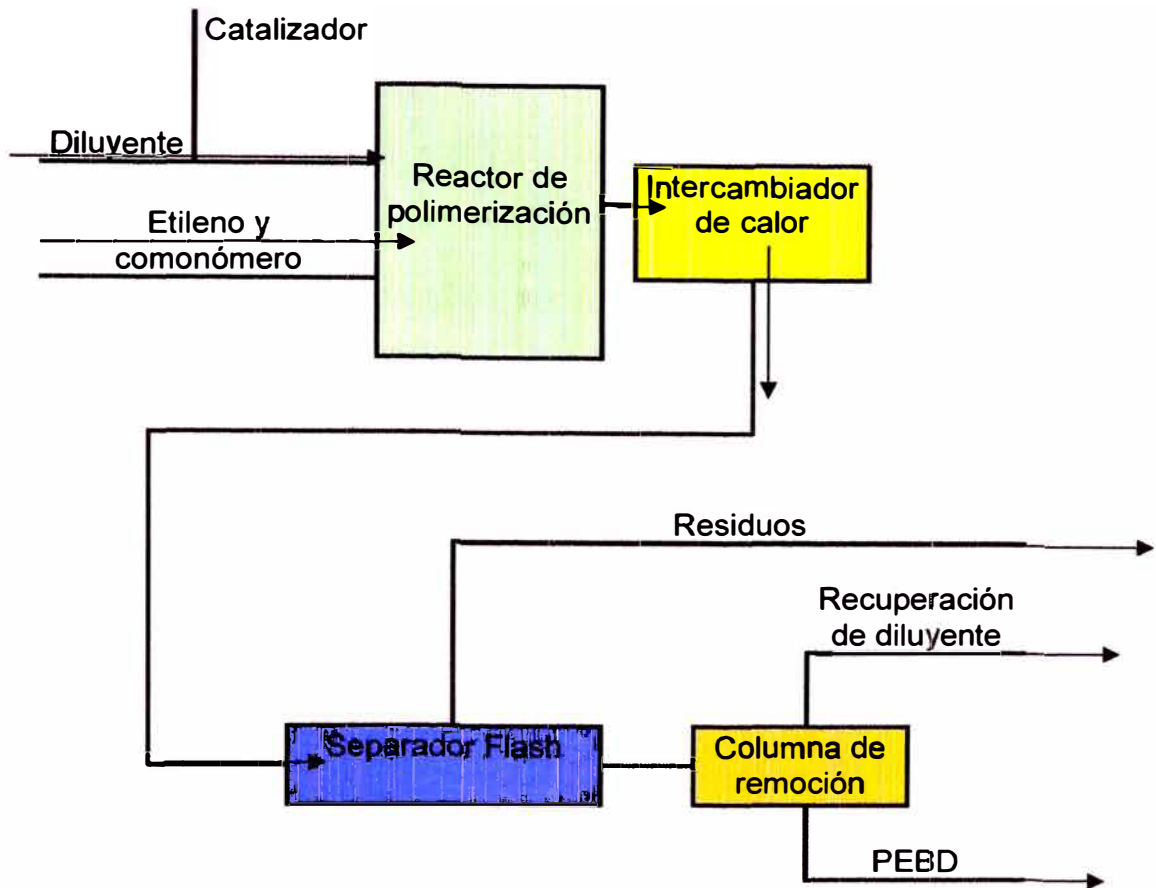


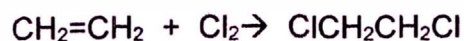
Figura 5: Producción de PEBD

2.1.4 Planta de cloruro de vinilo monómero

El producto petroquímico final obtenido en esta planta es el cloruro de vinilo monómero (VCM), utilizando como materias primas el etileno y cloro, que reaccionan inicialmente juntos para formar un intermedio de proceso importante, el dicloruro de etileno (EDC), también llamado como 1,2-dicloroetano.

Una planta de producción completa del VCM consiste en tres unidades importantes:

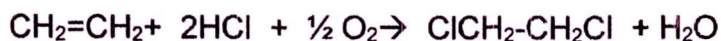
- Una unidad directa de cloración del etileno, en la cual el etileno y el cloro se combinan en un proceso continuo para formar EDC, como se ve en la siguiente reacción:



La reacción exotérmica ocurre a aproximadamente 4 atmósferas y 40-50 °C en presencia de catalizadores de FeCl_3 , CuCl_2 o SbCl_3 .

- Una unidad de oxiclорación, en la cual el etileno reacciona con el ácido clorhídrico en la presencia de catalizador y oxígeno. Esto produce otras

cantidades de EDC, mientras que exceso del hidrógeno se oxida para formar el agua.



Las condiciones de reacción son aproximadamente 225 °C y 2-4 atmósferas.

- Una unidad deshidrocloración del EDC, en la cual EDC se descompone térmicamente en VCM y ácido clorhídrico.

La reacción ocurre a aproximadamente 500 °C y 25 atmósferas.



En la práctica las tres etapas, cloración, deshidrocloración y oxiclación, son integradas en un solo proceso, de manera de evitar las pérdidas de cloro (ver figura 6).

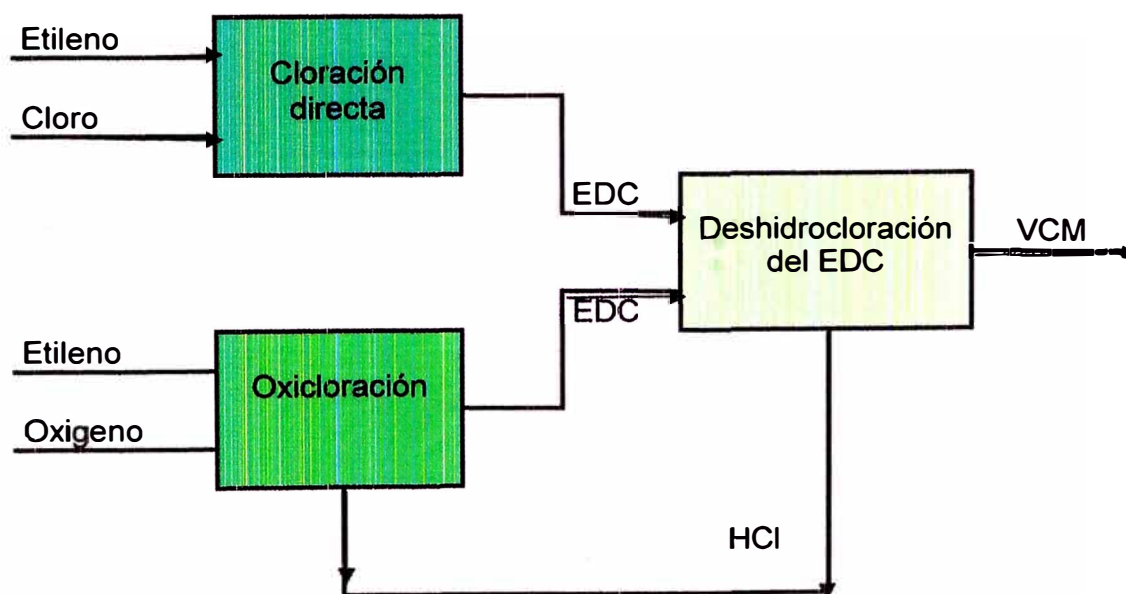


Figura 6: Producción de VCM

2.1.5 Planta de policloruro de vinilo

El policloruro de vinilo o cloruro de polivinilo, conocido como PVC por las siglas en inglés de "polyvinylchloride", es un polímero sintético fabricado a partir del cloruro de vinilo monómero (VCM).

Existen dos tipos de policloruro de vinilo: Suspensión y emulsión.

El proceso PVC suspensión, el cual es el de mayor uso en la industria petroquímica, cuyo producto es materia del presente estudio, es formado por

la polimerización del VCM y corresponde a la fórmula química general $(-CH_2-CHCl-)_n$.

El VCM se polimeriza en grandes reactores tipo "batch" en presencia de agua y catalizadores (iniciadores). Las gotitas suspendidas del monómero líquido son convertidos progresivamente a partículas sólidas o porosas del PVC, dependiendo de grado. El VCM que no ha reaccionado se separa del polímero, y el agua es separada por centrifugado; luego el polímero es secado, típicamente en un equipo de lecho fluidizado (ver figura 7).

El PVC en suspensión se utiliza en los procesos de extrusión, moldeado por inyección y procesos de formación de películas. Los grados individuales son caracterizados por sus propiedades de fusión (derretimiento) y su aplicación final: rígidos o flexibles (plastificados).

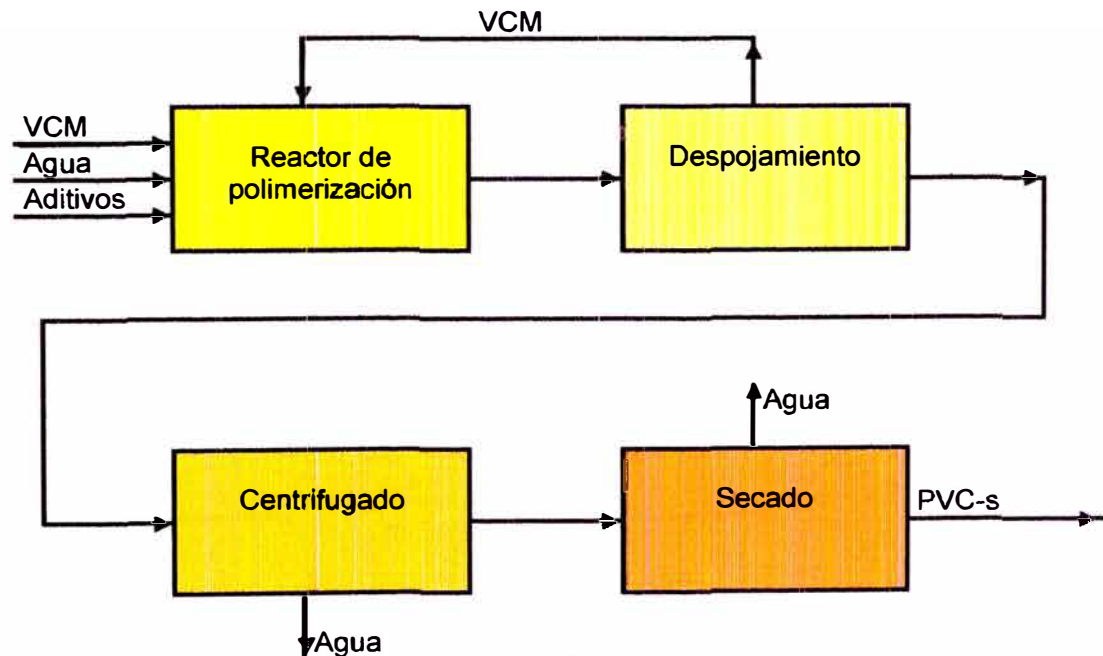
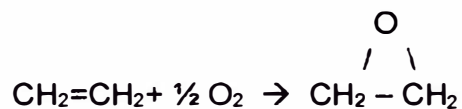


Figura 7: Producción de PVC suspensión

2.1.6 Planta de óxido de etileno

La ruta principal de producción del óxido de etileno es la reacción del etileno con oxígeno o aire sobre un catalizador de plata. La reacción es exotérmica, siendo importante en el proceso el control del calor.



El óxido de etileno es un gas incoloro que se licua cuando es enfriado debajo de 12 °C. Es altamente soluble en agua y en solventes orgánicos. Es el

precursor de muchos productos petroquímicos de importancia comercial, tales como el etilenglicol, etanolaminas, etc.

En el proceso son alimentados a un reactor tubular, etileno, oxígeno comprimido y gas de reciclo. La temperatura de oxidación es controlada por el agua en ebullición en el reactor. Los gases efluentes son enfriados y pasados por un separador donde el óxido de etileno es absorbido como una solución acuosa. Los gases que no reaccionan son reciclados. La reacción ocurre a aproximadamente 200-300 °C, con un tiempo de residencia de un segundo. La relación de moles de óxido de etileno producido por mol de etileno alimentado (selectividad), expresado en forma porcentual se encuentra entre 70 y 75% (ver figura 8).

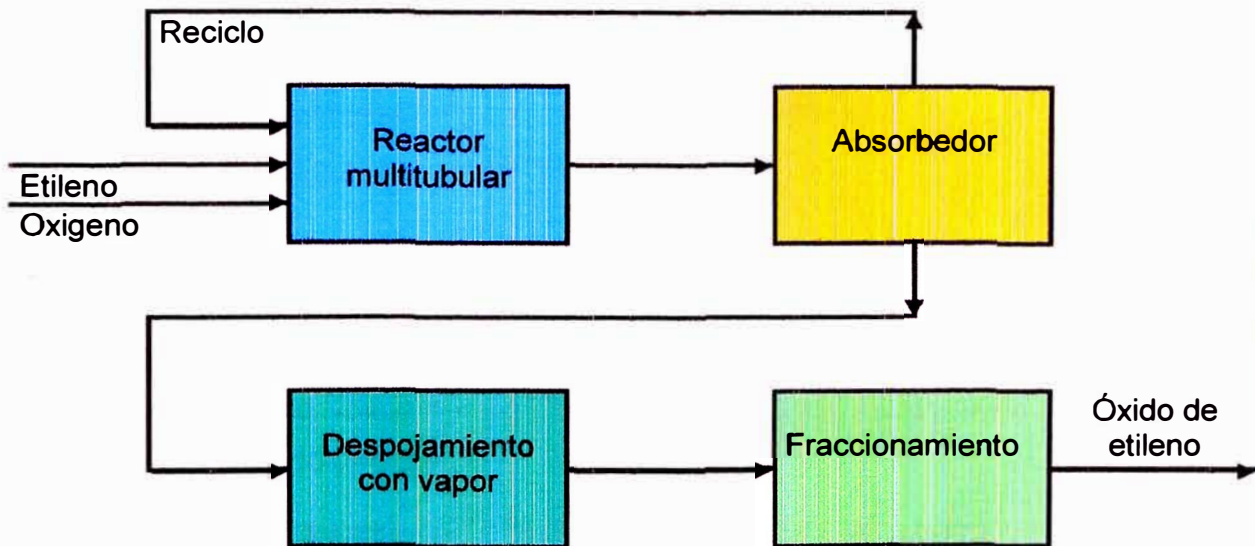
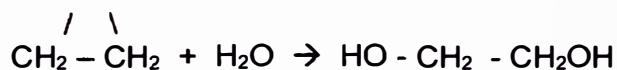


Figura 8: Proceso de producción de óxido de etileno

2.1.7 Planta de etilenglicol

La principal ruta para la producción de etilenglicol es la hidratación del óxido de etileno con agua. La reacción es la siguiente:



El etilenglicol es un líquido incoloro, y muy soluble en agua. Los puntos de ebullición y de congelamiento del etilenglicol son 197 °C y -13 °C, respectivamente.

La reacción de hidrólisis ocurre a un rango de temperaturas de 50 – 100 °C. El tiempo de contacto es aproximadamente 30 minutos. El dietilenglicol y el trietilenglicol son coproducidos con el monoetilenglicol.

Para conseguir un rendimiento aproximado de 90% de monoetilenglicol, la relación de agua / óxido de etileno es de 10 a 1 (ver figura 9).

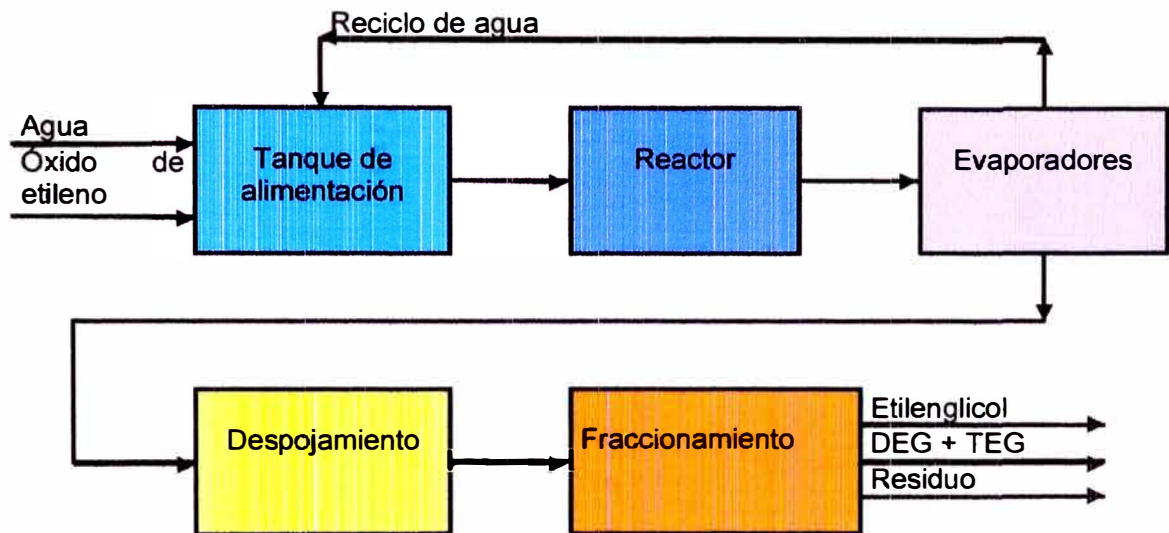


Figura 9: Producción de etilenglicol

2.1.8 Planta de polietilenterftalato

El producto petroquímico final obtenido en esta planta es el polietilenterftalato (PET). También denominado como politerftalato de etileno se obtiene a partir del etilenglicol y ácido tereftálico.

El primer paso del proceso continuo es la polimerización de los monómeros formados entre el etilenglicol y ácido tereftálico los cuales reaccionan en un reactor de polimerización formándose el polímero, cuya fórmula química es la siguiente:



Durante el proceso de formación del PET se forma una película continua. En este punto el material es relativamente grueso, y la película altamente amorfa e isotrópica. La estructura de cadena es enredada y altamente inestable.

Luego pasa por el proceso de estiramiento en la cual se estiran las películas de PET amorfas o con poca orientación. La película se estira primero en la dirección de la máquina y después en la dirección transversal. En este punto

la película es relativamente estable, pero se contraerá si está sujeta a cualquier exposición térmica.

Posteriormente pasa por un proceso de estabilización donde se somete a la película a un tratamiento térmico (calentamiento) para evitar la contracción o fractura de la película en subsecuentes operaciones.

Finalmente pasa por un proceso de acabado para dar las características del uso final que tendrá el PET (ver figura 10)⁽¹¹⁾

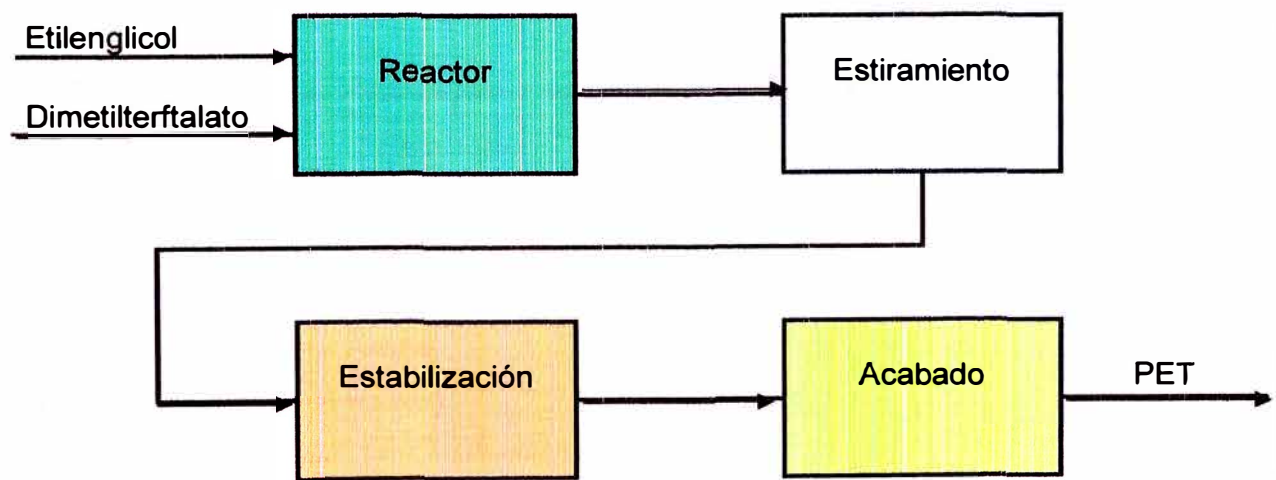


Figura 10: Proceso de producción de PET

2.2 Modelos matemáticos

Un modelo matemático se define como: “Una abstracción de la realidad, una descripción de los sistemas reales”

La forma de describir la realidad es muy diversa, por lo que existen numerosos tipos de modelos para intentar que la representación sea lo más fiable posible. De la bondad de la representación dependerá el éxito del proceso de decisión, esto es, la posterior adecuación de la solución obtenida de la resolución del modelo al sistema real.

Una clasificación tradicional de modelos que representan la realidad es la indicada en la figura 11:

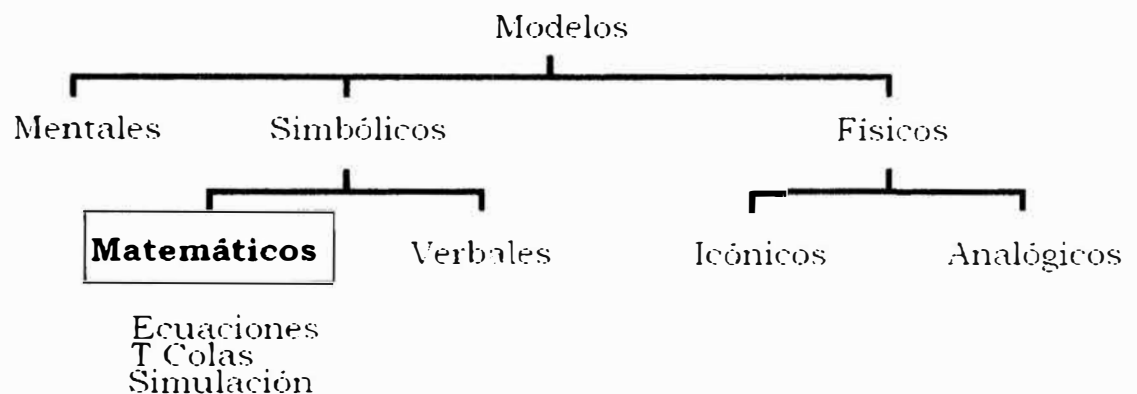


Figura 11: Clasificación de los modelos

Los modelos son:

- **Mentales:** la representación que en la mente se crea un individuo sobre una realidad.
- **Físicos:** la representación del sistema es tangible, y puede ser analógica o mediante iconos.
- **Simbólicos:** la representación se realiza con símbolos, ya sean verbales o matemáticos. Dentro de los matemáticos, se pueden mencionar la programación lineal, la teoría de colas y la simulación de sistemas.

Una de las herramientas para desarrollar modelos matemáticos que ha recibido mayor atención en los 30 últimos años es la simulación de sistemas por ordenador. Su auge en los últimos tiempos se debe a que se dispone de mejores prestaciones informáticas, en especial, en lo referente a la eficiencia, permitiendo el análisis de sistemas más complejos en un tiempo razonable, aún con la inclusión en el estudio de comportamientos aleatorios y de lógica a la representación matemática.⁽¹²⁾

2.2.1 *Tipos de modelos matemáticos*

- **Modelo cuantitativo:** es aquel cuyos principales símbolos representan números. Son los más comunes y útiles en los negocios.
- **Modelo cualitativo:** aquel modelo cuyos símbolos representan en su mayoría a Cualidades no numéricas. Una fuente importante es la teoría de conjuntos.
- **Modelo probabilístico:** aquellos basados en la estadística y probabilidades (donde se incorpora las incertidumbres, que por lo general acompañan nuestras observaciones de eventos reales).
- **Modelo determinístico:** corresponde a aquel modelo cuantitativo que no contiene consideraciones probabilísticas.
- **Modelo descriptivo:** cuando el modelo simplemente describe una situación del mundo real en términos matemáticos, descripción que puede emplearse para exponer una situación con mayor claridad, para indicar como pueden reajustarse o aún para determinar los valores de ciertos aspectos de la situación.
- **Modelo optimizador:** corresponde al modelo ideado para seleccionar entre varias alternativas, de acuerdo a determinados criterios a la más óptima.

Los modelos de cualquier clase, sin importar su refinamiento y exactitud, pueden probar ser poco prácticos si no están respaldados con datos confiables. Si se distorsionan las estimaciones, la solución obtenida, pese a ser óptima en un sentido matemático, en realidad será de calidad inferior desde la perspectiva del sistema real. En consecuencia, la disponibilidad de datos puede tener un efecto directo en la precisión del modelo. La recopilación de datos puede ser la parte más difícil para determinar un modelo y desgraciadamente no se pueden sugerir reglas para este procedimiento.

Por lo común los modelos matemáticos son de índole iterativa, vale decir, se llega a la respuesta final en pasos o iteraciones y cada iteración acerca la solución al nivel óptimo, pero no todos los modelos matemáticos poseen algoritmos de solución que converjan al nivel óptimo por dos razones:

- El algoritmo de solución converge al nivel óptimo solo en teoría. La convergencia teórica señala que hay un límite superior finito, pero

sin indicar cuan alto puede ser ese límite. Por lo tanto, se puede gastar horas y horas de computadora sin alcanzar la iteración final.

- La complejidad del modelo matemático puede hacer imposible idear un algoritmo de solución. Por lo tanto, el modelo puede mantenerse no factible en términos de cálculo.⁽¹³⁾

2.2.2 *Modelamiento de sistemas complejos*

De manera tradicional se ha afirmado que existen dos formas de ciencia: una basada en la inducción y otra fundada en deducciones o, lo que es equivalente, en criterios y principios hipotético-deductivos. Recientemente ha emergido una tercera clase de ciencia, que ya no trabaja con base en la inducción y en la deducción, sino de una manera radicalmente distinta. Esta tercera manera es el modelamiento y la simulación, y la forma más acabada de esta ciencia son las ciencias de la complejidad.

Problemas P y $N-P$

En 1972, S. Cook, R. Karp y L. Levin descubrieron lo que se denomina la teoría matemática de la complejidad. Sucintamente, esta teoría consiste en el estudio de las relaciones entre P y $N-P$.

P designa el conjunto de problemas que se conocen como polinomiales. Se dice que un problema es polinomial cuando puede ser:

- a) Abordado, estudiado o comprendido
- b) Resuelto en términos polinomiales, es decir, descomponiendo el problema en los términos que lo componen. Quizás la mejor expresión de esta clase de problemas es el conjunto de organigramas, flujogramas, cronogramas, histogramas y demás herramientas que son justamente la comprensión de un problema en términos analíticos y de agregados de partes. En una palabra, P designa toda la clase de problemas que implican necesariamente un tiempo polinomial, por ejemplo, un tiempo que es susceptible de ser dividido en lustros, años, meses, semanas u horas. Los problemas P se designan como problemas fáciles en general y, dicho en términos matemáticos, se dice que son irrelevantes, precisamente porque se pueden resolver.

Por su parte, los problemas $N-P$ son todos aquellos problemas no-polinomiales que, por consiguiente, no pueden ser ni abordados ni

resueltos por vía de la fragmentación del problema (en los términos que componen al mismo). Para los problemas $N-P$ no existe ningún tiempo polinomial que pueda resolverlos. Por el contrario, esta clase de problemas remiten a otros tipos de temporalidad, ciertamente no analítica. Esta clase de problemas se conocen como problemas difíciles y se designan como problemas relevantes.

En términos algorítmicos, mientras que un problema de la clase P puede ser resuelto por un algoritmo de tiempo polinomial en una máquina determinista, los problemas de la clase $N-P$ requieren algoritmos no convencionales, o mejor, no deterministas para resolver el problema en tiempos igualmente polinomiales, aunque de forma aproximada.

La teoría matemática de la complejidad estriba exactamente en las relaciones entre P y $N-P$. Los problemas P y $N-P$ constituyen los parámetros, por así decirlo, del trabajo en modelamiento y en simulación de sistemas complejos y, en general, del estudio y la investigación sobre ciencias de la complejidad.

Los problemas que conforman la teoría matemática de la complejidad son igualmente conocidos como problemas de complejidad computacional. Son todos aquellos problemas que consisten en el estudio del tiempo de computación para la resolución de los mismos y, en general, contrastan con los problemas que implican complejidad algorítmica y que son aquellos que demandan la consideración del programa más breve para la resolución de los mismos.⁽¹⁴⁾

2.2.3 *Algoritmos de solución de los modelos matemáticos*

Los modelos matemáticos son el elemento esencial en un simulador de procesos. Los modelos de un proceso químico son todas las relaciones matemáticas derivadas de las leyes de conservación, las leyes de la termodinámica y las restricciones de diseño. Los modelos matemáticos de los equipos de un proceso, en conjunto dan forma al modelo matemático del proceso completo. Este debe ser resuelto por medio de algún algoritmo de solución para producir los resultados requeridos.

En el caso de simulación de procesos en estado estacionario, el modelo matemático del proceso está constituido, en general, por un sistema de ecuaciones algebraicas no lineales para cuya solución existen tres

algoritmos: el método modular secuencial, el método orientado a ecuaciones y el método modular simultáneo.

a. Método modular secuencial

La estructura modular secuencial implica la interpretación del diagrama de flujo del proceso como un grupo de unidades de proceso, para cada una de las cuales existen subrutinas de cálculo o módulos.

En este método, un módulo o subrutina de cálculo para la unidad de proceso dada, calcula las variables de las corrientes de salida de esa unidad de proceso con base en el modelo matemático correspondiente a ese equipo, conocidas las variables de las corrientes de entrada y los parámetros de equipo de esa unidad de proceso.

b. Método orientado a ecuaciones

Consiste básicamente en la solución simultánea de las ecuaciones que describen el diagrama de flujo, es decir, resolver el enorme sistema de ecuaciones algebraicas no lineales que constituye el modelo matemático del proceso completo, por algún procedimiento de solución de sistemas de ecuaciones.

c. Método modular simultáneo

Este método intenta aprovechar algunas ventajas de los dos métodos descritos anteriormente. Se usa la estructura modular tradicional, pero a su vez se resuelve un sistema de ecuaciones simultáneas incluyendo a todas las variables de las corrientes. La diferencia principal consiste en que el sistema de ecuaciones a resolver es un sistema simplificado de más fácil solución que el sistema de ecuaciones que se resolvería en el método orientado a ecuaciones. ⁽¹⁵⁾

2.2.4 Modelos matemáticos de optimización⁽¹⁶⁾

Los problemas de optimización se componen generalmente de estos tres ingredientes:

Función objetivo: Es la medida cuantitativa del funcionamiento del sistema que se desea optimizar (maximizar o minimizar). Como ejemplo de funciones objetivo se pueden mencionar: la minimización de los costes variables de operación de sistema eléctrico, la maximización de los beneficios netos de venta de ciertos productos, etc.

Variables: Representan las decisiones que se pueden tomar para afectar el valor de la función objetivo. Desde un punto de vista funcional se pueden clasificar en variables independientes o principales o de control y variables dependientes o auxiliares o de estado. En el caso de un sistema eléctrico serán los valores de producción de los grupos de generación o los flujos por las líneas. En el caso de la venta, la cantidad de cada producto fabricado y vendido, etc.

Restricciones: Representan el conjunto de relaciones (expresadas mediante ecuaciones e inecuaciones) que ciertas variables están obligadas a satisfacer. Por ejemplo, las potencias máximas y mínimas de operación de un grupo de generación, la capacidad de producción de la fábrica para los diferentes productos, etc.

Resolver un problema de optimización consiste en encontrar el valor que deben tomar las variables para hacer óptima la función objetivo satisfaciendo el conjunto de restricciones.

Los métodos de optimización los podemos clasificar en:

Métodos clásicos: Se encuentran los algoritmos de la optimización lineal, lineal entera mixta, cuadrática, no lineal, etc. Los métodos iterativos, son usados para resolver problemas de programación no lineal.

Métodos Metaheurísticos: Que aparecieron ligados a lo que se denominó inteligencia artificial e imitan fenómenos sencillos observados en la naturaleza. En este grupo se incluyen los algoritmos evolutivos (genéticos entre otros), el método del recocido simulado, las búsquedas heurísticas (método de búsqueda aleatoria, etc.) o los sistemas multiagentes.

De forma muy general y aproximada se puede decir que los métodos clásicos buscan y garantizan un óptimo local mientras que los métodos metaheurísticos tienen mecanismos específicos para alcanzar un óptimo global, aunque no garantizan su alcance.

Existen decisiones que no pueden ser representadas de forma adecuada mediante variables continuas. Por ejemplo, las decisiones de inversión son variables discretas; otro ejemplo, es la planificación de la expansión de la generación eléctrica o de la red. ⁽¹⁶⁾

2.2.5 Ecuaciones Matemáticas a utilizar

a. Método de Williams

Está basado en la relación de costes entre dos plantas o equipos de capacidad, potencia o volumen diferente, sigue la ecuación:

$$(C_a/C_b) = (P_a/P_b)^n$$

Donde:

C_a y C_b = Costos de plantas o equipos respectivamente.

P_a y P_b = Capacidad o parámetros característicos de las plantas o equipos respectivamente.

n = Factor de Williams, generalmente es 0.6 ⁽¹⁷⁾

b. Índices de costos

El costo de compra de un equipamiento de proceso se obtiene generalmente a partir de proyecciones, ecuaciones o cotizaciones de vendedores. Sin embargo, los costos no son estáticos.

Debido a la inflación, generalmente se incrementan con el tiempo, por lo que, las proyecciones y ecuaciones generalmente se aplican a una fecha en particular, usualmente mes y año o para un promedio de un año en particular. Una estimación del costo de compra para una fecha posterior es obtenida de la siguiente manera:

$$\text{Costo} = \text{Costobase} (I / I_{\text{base}})$$

Donde:

Costobase: Costo para una fecha anterior

I: Índice de costos en la fecha posterior

I_{base} : Índice del costo base. ⁽¹⁸⁾

Para el caso de la presente tesis se aplicará los índices Nelson – Farrar utilizado en la industria del petróleo y petroquímica. ⁽¹⁹⁾

c. Valor Actual Neto (VAN)

También conocido como valor actual o valor presente del flujo de beneficios netos (VABN), es un procedimiento que permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros, originados por una inversión. La metodología consiste en descontar al momento actual (actualizándola mediante una tasa para llevarla al año cero del proyecto) todos los flujos de caja futuros del proyecto, restándoles la inversión inicial, de tal forma que el valor obtenido es el valor actual neto del proyecto.

El método de valor presente es uno de los criterios económicos más ampliamente utilizados en la evaluación de proyectos de inversión.

La fórmula que nos permite calcular el Valor Actual Neto es:

$$VAN = \sum_{i=0}^{i=n} \frac{I_i - C_i}{(1 + r)^i}$$

Donde:

I_i = Ingresos en cada periodo i C_i = Egresos en cada periodo i
 r = Tasa de descuento.

Sacando factor común, se obtiene:

$$VAN = \sum_{i=0}^{i=n} \frac{B Ni}{(1 + r)^i}$$

Donde: $B Ni$ es el beneficio neto en el año i ⁽²⁰⁾

El valor actual neto es muy importante para la valoración de inversiones en activos fijos, a pesar de sus limitaciones en considerar circunstancias imprevistas o excepcionales de mercado. Si su valor es mayor a cero, el proyecto es rentable, considerándose el valor mínimo de rendimiento para la inversión.

Una empresa suele comparar diferentes alternativas para comprobar si un proyecto le conviene o no. Normalmente la alternativa con el VAN más alto suele ser la mejor para la empresa.

⁽²⁰⁾

d. Tasa interna de retorno (TIR)

La tasa interna de retorno o tasa interna de rentabilidad (TIR) es aquella tasa de interés “r” que hace igual a cero el valor actual del flujo de beneficios netos. Vale decir es aquella tasa de descuento que aplicada a un flujo de beneficios netos hace que el beneficio al año cero sea exactamente igual a cero.

$$VAN = \sum_{i=0}^{i=n} \frac{BN_i}{(1+r)^i} = 0$$

e. Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI)

También denominado como Payback o Plazo de Recuperación, es un criterio estático de valoración de inversiones que permite seleccionar un determinado proyecto en base a cuánto tiempo se tardará en recuperar la inversión inicial mediante los flujos de caja. Resulta muy útil cuando se quiere realizar una inversión de elevada incertidumbre y de esta forma tenemos una idea del tiempo que tendrá que pasar para recuperar el dinero que se ha invertido.

Así, el PRI significa cuanto tiempo debe transcurrir (ej.: años) para que la acumulación de beneficios netos (BN) alcancen a cubrir la inversión inicial (Inv). En otros términos:

$$\sum_{n=1}^{n=T} BN_n = Inv$$

Donde T es el número de periodos necesarios para recuperar la inversión. (20)

Para la definición de los términos ver el Anexo N°1 Glosario.

CAPÍTULO 3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1 Descripción del Modelo Matemático

El modelo matemático diseñado en una hoja de cálculo de Excel, tiene como finalidad determinar, mediante una serie de iteraciones, la capacidad óptima del complejo petroquímico.

El fundamento del modelo matemático es probar para cada uno de los 20 años, los resultados de las diferentes cantidades de materias primas necesarias, capacidades de plantas, inversiones, ingresos, egresos y la evaluación económica. a partir de las cantidades correspondientes a los productos finales (determinados por las demandas).

Este modelo matemático se describe de la siguiente manera:

En principio, se define la estructura del Complejo Petroquímico constituido por ocho plantas petroquímicas, la demanda de los productos petroquímicos, el tamaño mínimo y máximo de cada planta, los rendimientos de cada proceso y tecnología, la interrelación entre los procesos y productos, costos estimados de materia prima e insumos, precio de los productos y costos de operación.

Por otro lado, se considera la vida del Complejo Petroquímico de 20 años, considerando cada año como un caso.

Con los datos antes mencionados, se hace la simulación (corrida) para los 20 casos, seguidamente se revisa los resultados y el primer filtro que se realiza es en función a la capacidad de planta, es decir, se rechaza aquellos casos en los cuales las capacidades de planta están por debajo de la capacidad mínima de planta, pues al no haber tecnología para ese tamaño no sería posible su implementación.

Los casos cuyas capacidades superan la capacidad máxima, se divide la producción deseada en más de una planta en paralelo, buscando así cubrir la demanda de productos finales.

En todos los casos que quedan se calcula los indicadores de rentabilidad (VAN, TIR y PRI), siendo estos indicadores los que determinen el tamaño o capacidad óptima de las plantas componentes del Complejo Petroquímico.

El Modelo Matemático está constituido por ocho módulos. En la siguiente figura se puede observar la secuencia y los datos con los que se alimenta cada uno:

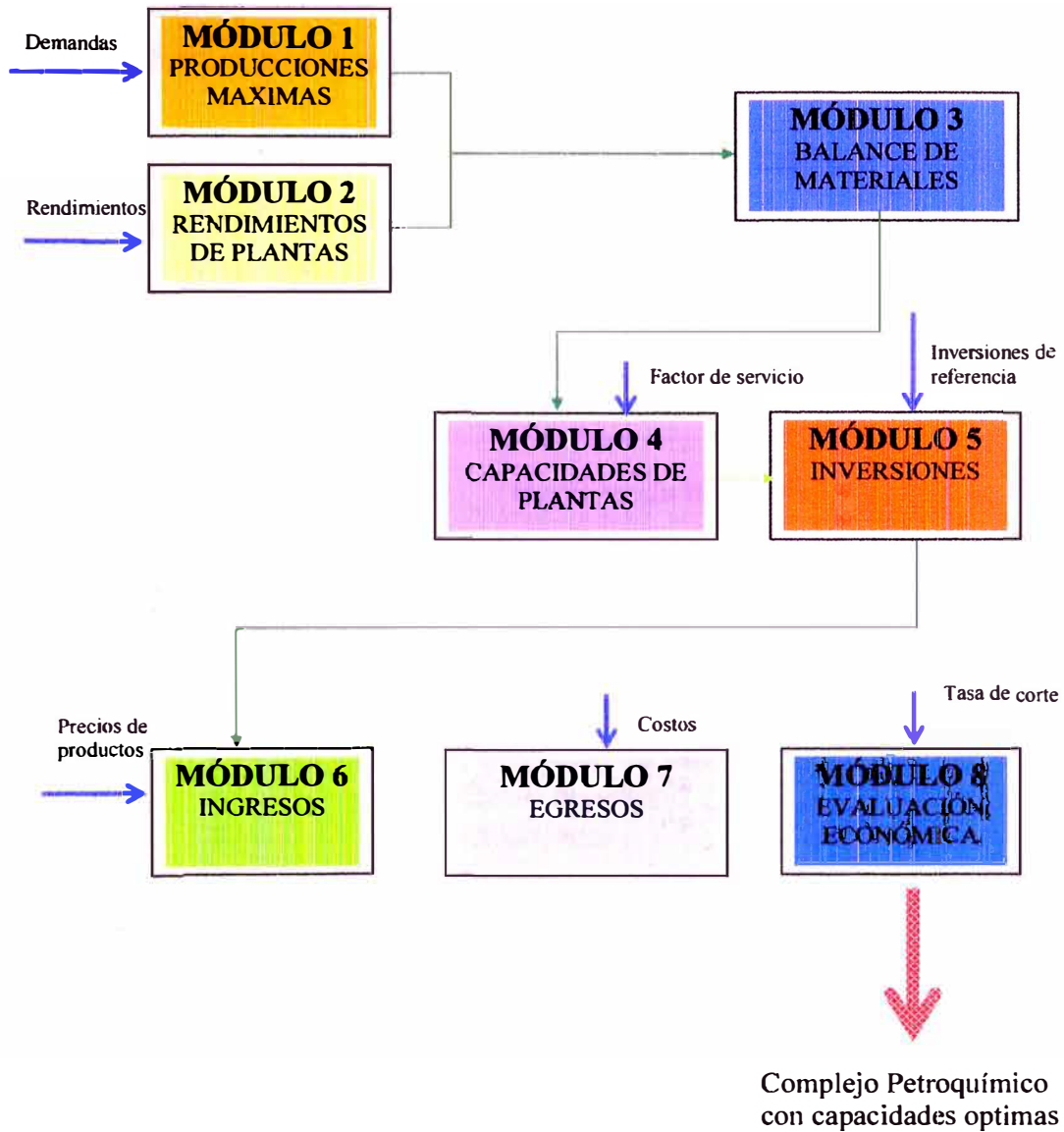


Figura 12. Secuencia de los Módulos del Complejo Petroquímico

3.2 Nomenclatura del Modelo Matemático

3.2.1 Nomenclatura y codificación de la Plantas

Para identificar a cada una de las ocho plantas petroquímicas, se las ha codificado con números del 1 al 8, y se ha asignado las siglas respectivas como se muestra a continuación en la siguiente Tabla 1:

Tabla 1.- Nomenclatura de las plantas

Código de planta (i)	Nombre de la planta	Sigla
1	Pirólisis	PIR
2	Polietileno de alta densidad	PEAD
3	Polietileno de baja densidad	PEBD
4	Cloruro de vinilo monómero	VCM
5	Policloruro de vinilo	PVC
6	Óxido de etileno	OE
7	Etilenglicol	EG
8	Polietilentereftalato	PET

3.2.2 Nomenclatura de materias primas, insumos y productos

De igual manera se ha codificado las materias primas, insumos y productos del Complejo petroquímico con números del 1 al 26, como se muestran en la Tabla 2:

Tabla 2.- Nomenclatura de materias primas, insumos y productos

Código de materias primas, insumos y/o productos (j)	Nombre materias primas, insumos y/o productos	Sigla/Formula
1	Etano	C ₂ H ₆
2	Cloro	Cl
3	Oxígeno	O ₂
4	Agua	H ₂ O
5	Ácido terftálico	ATP
6	Etileno	C ₂ H ₄
7	Propileno	C ₃ H ₆
8	Butadieno	C ₄ H ₆
9	Butenos	C ₄ H ₈
10	Gas combustible	H ₂ + CH ₄
11	Pentanos y más pesados	C ₅₊
12	Cloruro de vinilo monómero	VCM
13	Óxido de etileno	OE
14	Etilenglicol	EG
15	Polietileno de alta densidad	PEAD
16	Polietileno de baja densidad	PEBD
17	Policloruro de vinilo	PVC
18	Polietilentereftalato	PET
19	Comonómeros a planta de PEAD	Com19
20	Comonómeros a planta de PEBD	Com20
21	Residuos de planta de PEAD	Res21
22	Residuos de planta de PEBD	Res22
23	Monómero recuperado de planta de VCM	Mon23
24	Monómero recuperado de planta de PVC	Mon24
25	Residuos de planta de EG	Res25
26	Residuos de planta de PET	Res26

3.3 Estructura del Complejo Petroquímico

El Complejo Petroquímico propuesto está constituido por un conjunto de ocho plantas interrelacionadas entre sí. Cada planta tiene tecnologías, cargas y productos diferentes, en función a la demanda específica de cada producto final para cada uno de los 20 años de operación.

Este complejo tiene cuatro productos finales: polietileno de alta densidad (PEAD), polietileno de baja densidad (PEBD), policloruro de vinilo (PVC) y polietilenterftalato (PET).

Las plantas de PEAD y PEBD tienen como materia prima el etileno, la misma que es producida por una planta de pirólisis cuya materia prima es el etano.

En la planta de PVC se usa como materia prima el monómero cloruro de vinilo (VCM); para cuya producción se requiere una planta cuyas materias primas son etileno y cloro.

La planta PET utiliza como materias primas el etilenglicol (EG) y ácido tereftálico (ATP). En la planta de producción de EG se requiere como materias primas el óxido de etileno y agua; para la producción de óxido de etileno (OE) se requiere de una planta que tiene como materias primas el etileno y oxígeno.

En la siguiente figura se muestra el diagrama de flujo:

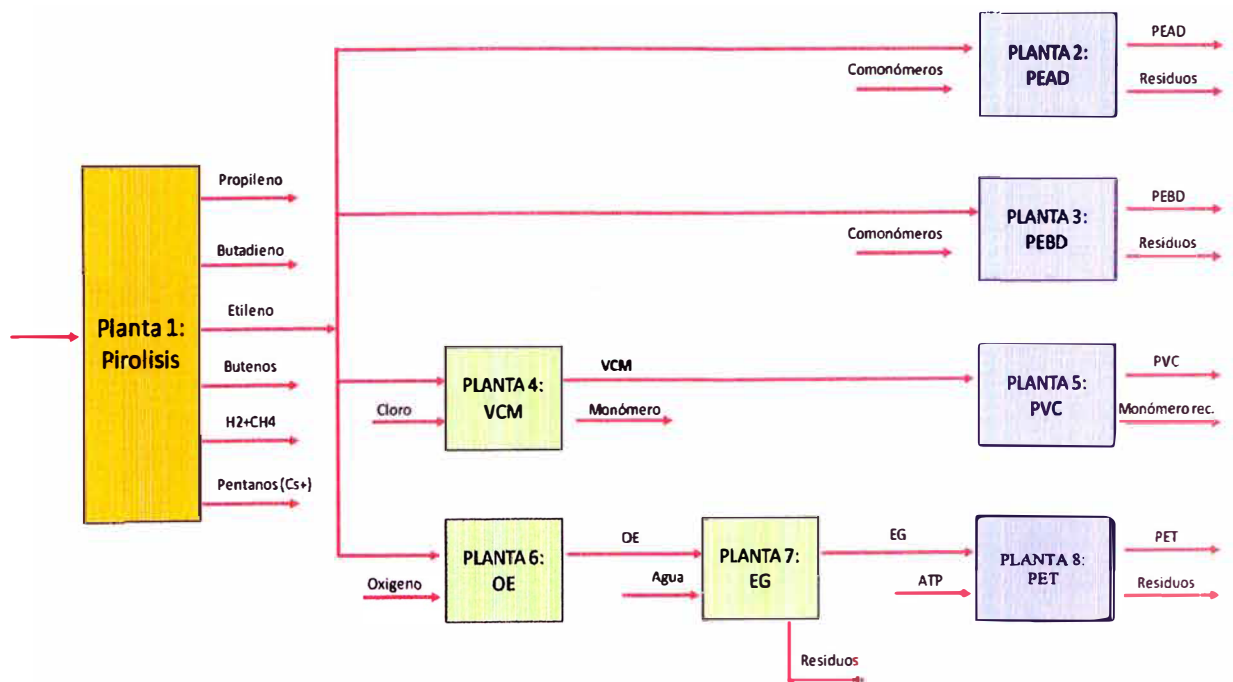


Figura 13. Estructura del Complejo Petroquímico

3.4 Módulos del Complejo Petroquímico

3.4.1 Modulo de Producciones de productos petroquímicos finales

Los cuatro productos determinados como finales son: PEAD, PEBD, PVC y PET. Para el Caso 1 (año 1) se consideró que dichas plantas operarían a su máxima capacidad de operación a partir del primer año de operación del complejo petroquímico. Cabe mencionar que las producciones máximas fueron equivalentes a la demanda de dichos productos del año 1.

Las formulaciones matemáticas de las producciones máximas de los productos petroquímicos finales (expresado en t /año) fueron:

PROD (i, j, k): Producción máxima del producto petroquímico final de la planta "i", correspondiente al producto "j" para el año "k" (1 a 20).

Así, de acuerdo a las nomenclaturas indicadas en las tablas 1 y 2, para los cuatro productos finales se obtuvieron:

PROD (2, 15, k): Corresponde a la producción máxima de la Planta 2 (Planta de PEAD) para el producto 15 (producción de PEAD) para el año "k" determinado.

PROD (3, 16, k): Corresponde a la producción máxima de la Planta 3 (Planta de PEBD) para el producto 16 (producción de PEBD) para el año "k" determinado.

PROD (5, 17, k): Corresponde a la producción máxima de la Planta 5 (Planta de PVC) para el producto 17 (producción de PVC) para el año "k" determinado.

PROD (8, 18, k): Corresponde a la producción máxima de la Planta 8 (Planta de PET) para el producto 18 (producción de PET) para el año "k" determinado.

3.4.2 Módulo de rendimientos de las plantas petroquímicas

Corresponde a los rendimientos típicos de cada una de las ocho plantas integrantes del Complejo Petroquímico. En este módulo se ingresó la cantidad de materias primas en toneladas requeridas para la producción de una tonelada del producto principal de la planta indicada, para cada uno de los 20 casos.

La formulación matemática de los rendimientos por planta, materia prima, insumos y productos es:

REND (i, j): indica el rendimiento de la planta "i" para la materia prima, insumo o producto "j".

Como simbología se estableció que todas las materias primas que ingresaron a una planta fueron consideradas como cantidades negativas (-), mientras que todos los productos obtenidos en la planta específica fueron considerados como cantidades positivas (+).

Los rendimientos fueron validados verificando que la sumatoria de los rendimientos para una planta específica fuera cero (materias primas, insumos y productos).

Los rendimientos fueron datos obtenidos de tecnologías comerciales de procesos petroquímicos, que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3.- Rendimiento de cada planta según materia prima, insumos y productos (ton/ton de producto)

Materia prima, insumos y productos	Pirólisis Etano (i=1)	Produc. PEAD (i=2)	Produc. PEBD (i=3)	Produc. VCM (i=4)	Produc. PVC (i=5)	Produc. OE (i=6)	Produc. EG (i=7)	Produc. PET (i=8)
Etano (j=1)	-1,25							
Cloro (j=2)				-0,624				
Oxígeno (j=3)						-0,29		
Agua (j=4)							-0,01	
ATP (j=5)								-0,864
Etileno (j=6)	1	-0,954	-0,979	-0,472		-0,71		
Propileno (j=7)	0,03							
Butadieno (j=8)	0,0175							
Butanos (j=9)	0,02							
H2 + CH4 (j=10)	0,1625							
Pentanos (j=11)	0,02							
VCM (j=12)				1	-1,003			
OE (j=13)						1	-1	

EG (j=14)							1	-0,338
PEAD (j=15)		1						
PEBD (j=16)			1					
PVC (j=17)					1			
PET (j=18)								1
Otras Cargas:								
Comonomero para PEAD (j=19)		-0,06	-0,03					
Comonomero para PEBD (j=20)		0,014						
Residuo de PEAD (j=21)								
Residuo de PEBD (j=22)			0,09					
Otros productos:								
Monomero Recup de VCM (j=23)				0,096				
Monomero Recup de PVC (j=24)							0,01	
Residuos de EG (j=25)								
Residuos de PET (j=26)					0,003			0,202

Fuente: Elaboración propia en base a citas bibliográficas 11, 27 y 32.

Notas:

Signo (+) cuando es producto

signo (-) cuando es carga

3.4.3 Módulo de balance de materiales

Con los datos correspondientes a las demandas proyectadas de los cuatro productos finales y en función a los rendimientos de cada una de las Plantas se obtuvieron los Balance de materiales del Complejo Petroquímico para cada uno de los 20 casos y para las 8 plantas.

En este caso, el cálculo es en forma retrospectiva, es decir se alimenta al modelo las producciones de los cuatro productos finales, el cual determina las producciones de los productos intermedios, así como los insumos y materias primas requeridas, hasta que finalmente se determina la producción de etileno en la planta de pirólisis y la cantidad de etano (materia prima) que hay que alimentar al complejo petroquímico.

Cabe mencionar que las cargas a una planta específica serán cantidades con signo negativo, mientras que los productos son con signo positivo, de tal manera que la sumatoria de cargas y productos resulte cero.

En la tabla 7 se muestra el resumen de los balances de los 20 casos.

A continuación, se muestra en forma gráfica el balance de cada una de las plantas:

3.4.3.1 Planta de PEAD

El balance de materiales para la Planta de PEAD (expresado en t /año) para el año 1 es:

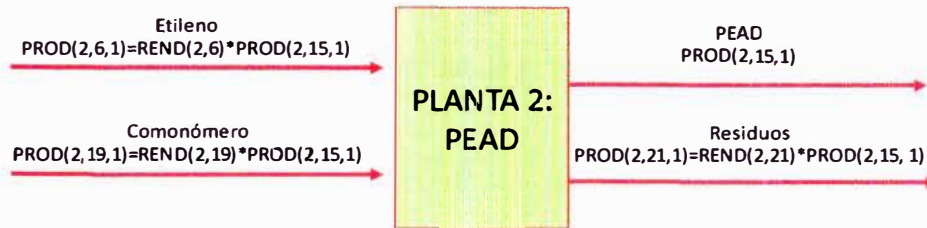


Figura 14. Balance de la Planta de PEAD

3.4.3.2 Planta de PEBD

El balance de materiales para la Planta de PEBD (expresado en t /año) para el año 1 es:

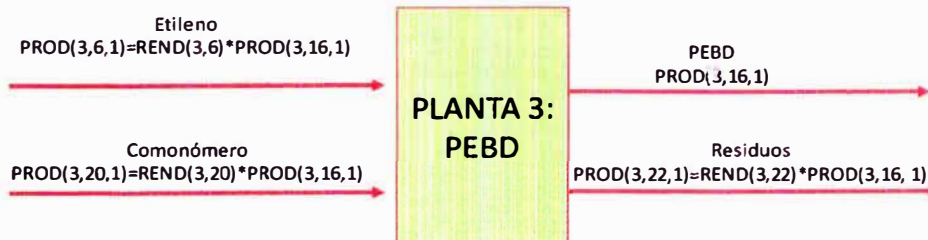


Figura 15. Balance de la Planta de PEBD

3.4.3.3 Planta de PVC

El balance de materiales para la Planta de PVC (expresado en t /año) para el año 1 es:

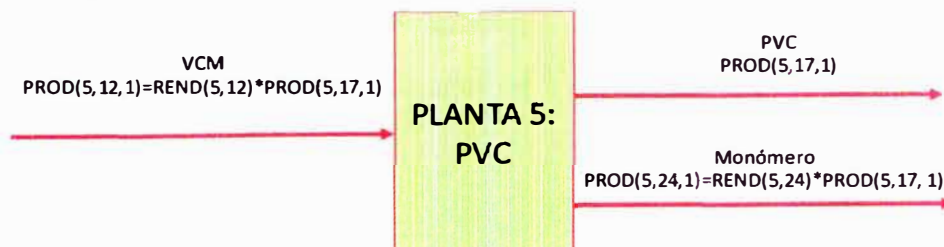


Figura 16. Balance de la Planta de PVC

3.4.3.4 Planta de PET

El balance de materiales para la Planta de PET (expresado en t /año) para el año 1 es:

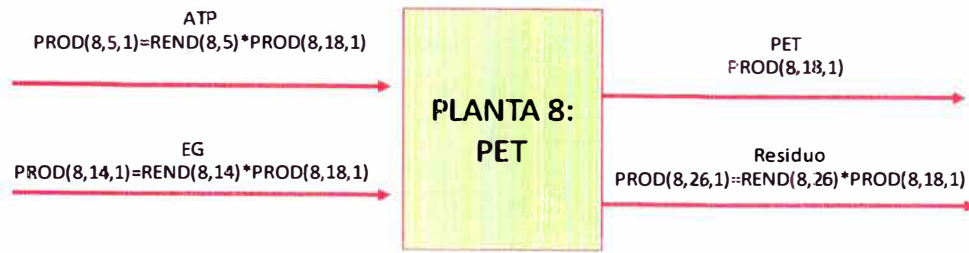


Figura 17. Balance de la Planta de PET

3.4.3.5 Planta de VCM

El balance de materiales para la Planta de VCM (expresado en t /año) para el año 1 es:

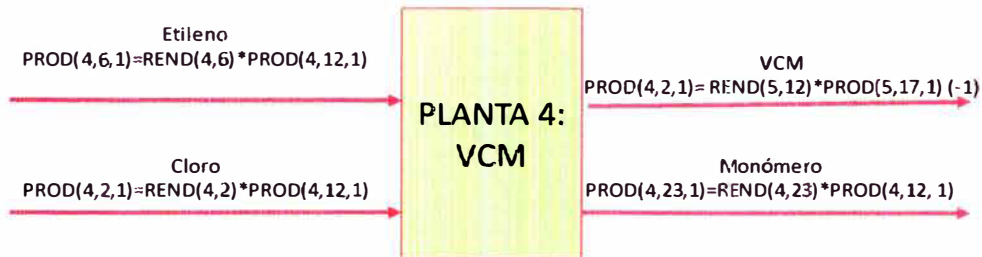


Figura 18. Balance de la Planta de VCM

3.4.3.6 Planta de EG

El balance de materiales para la Planta de EG (expresado en t /año) para el año 1 es:

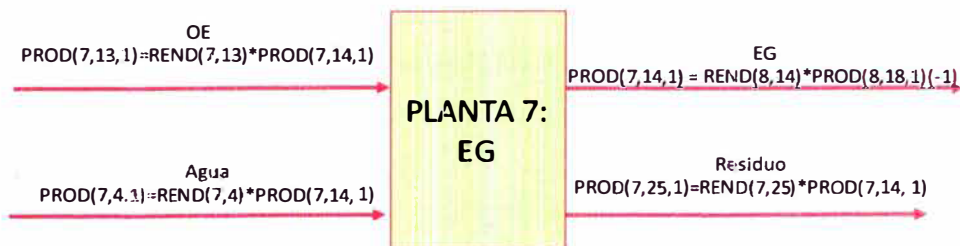


Figura 19. Balance de la Planta de EG

3.4.3.7 Planta de OE

El balance de materiales para la Planta de OE (expresado en t /año) para el año 1 es:

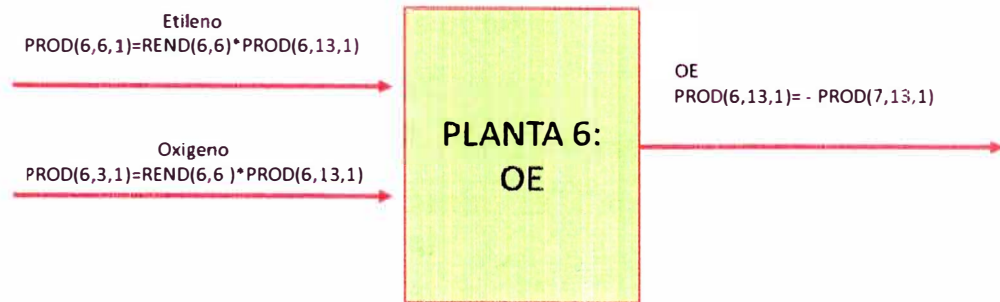


Figura 20. Balance de la Planta de OE

3.4.3.8 Planta de Pirólisis

El balance de materiales para la Planta de pirólisis (expresado en t /año) para el año 1 es:

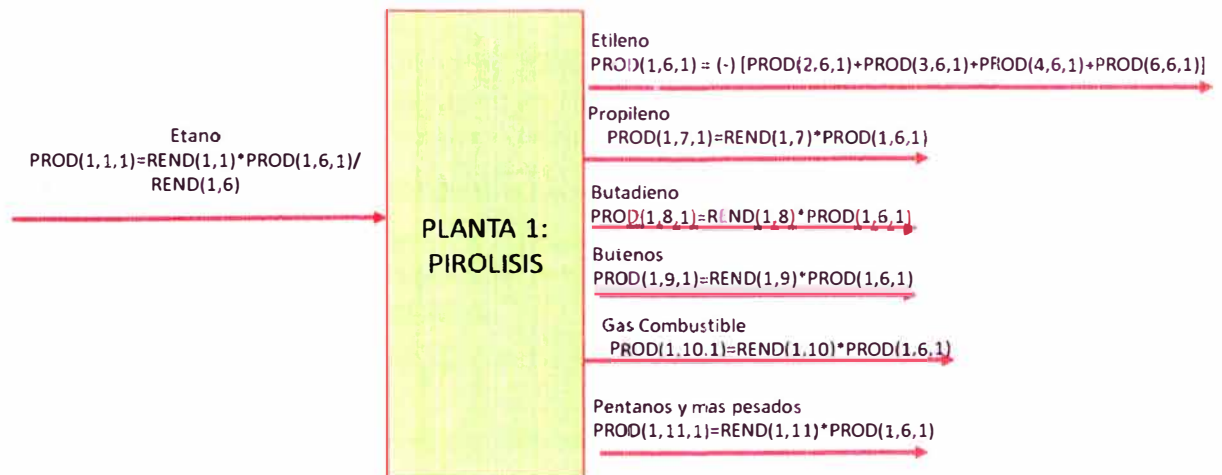


Figura 21. Balance de la Planta de PIROLISIS

3.4.4 Módulo de capacidades de planta

Para el desarrollo de este módulo se acopió capacidades o tamaños para cada una de las ocho plantas, considerando capacidades mínimas y máximas, las mismas que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4.- Capacidades de Planta mínima y máxima (t/año)

Planta	Capacidad mínima (t / a)	Capacidad máxima (t / a)
Pirolisis	182 000 ⁽²⁴⁾	1 500 000 ⁽²⁵⁾
PEAD	300 000 ⁽²⁶⁾	600 000 ⁽²⁵⁾
PEBD	50 000 ⁽²⁶⁾	400 000 ⁽²⁵⁾
VCM	10 000 ⁽²⁷⁾	650 000 ⁽²⁷⁾
PVC	50 000 ⁽²⁶⁾	650 000 ⁽²⁸⁾
OE	20 000 ⁽²⁹⁾	320 000 ⁽²⁵⁾
EG	10 000 ⁽²⁷⁾	750 000 ⁽²⁵⁾
PET	20 000 ⁽²⁶⁾	600 000 ⁽²⁵⁾

Fuentes:

(24). Cañete.B, Oteiza. P y otros. 2013. Gasolina Natural: Un sustituto para la producción de etileno en Argentina. Petroquímica, Petróleo, Gas & Química. (04/02/13) Disponible en: www.revistapetroquímica.com

(25). Gulf Publishing (2010) Petrochemical processes 2010.

(26). Hasenclever.L, López.A & Clemente de Oliveira.J (1999) Impacto del MERCOSUR sobre la dinámica del sector petroquímico. Integración y Comercio N° 7/8 Buenos Aires.

(27). Gulf Publishing (2001) Petrochemical processes 2001. Hydrocarbon Processing, 80, 69-138.

(28). Gulf Publishing (2005) Petrochemical processes 2005.

(29). Instituto petroquímico Argentino (1999). La República Argentina y su industria petroquímica.

La formulación matemática de las capacidades de las plantas petroquímicas es la siguiente: $CAP(i, k) = PROD(i, j, k) / FS(i)$

Donde:

CAP (i, k): Es la capacidad de la planta "i" para el producto principal en el año "k" de operación del complejo petroquímico (Casos del 1 al 20), en el cual se alcanzan las producciones máximas expresadas en t/año.

FS: Factor de Servicio, que se define como el porcentaje de la capacidad de la planta que está operando respecto a su capacidad real. Normalmente las plantas continuas tienen un factor de servicio de 90%, por lo cual se considera ese porcentaje como el Factor de Servicio ⁽²³⁾.

3.4.5 Módulo de Inversiones

En este módulo se pretende determinar la inversión de cada planta para cada uno de los 20 casos, para lo que se considera como datos, la capacidad de planta e inversiones de plantas de referencia (inversión de cada planta a un año determinado y a una capacidad determinada).

Para esto se definen las siguientes variables:

$C_0(i,k)$ = Capacidad de planta de referencia en 10^3 t /año, obtenido de fuentes comerciales.

$I_0(i, k)$ = Inversión total de planta de referencia (10^6 US\$), según costo comercial.

α = Coeficiente alfa, propio de cada equipo, en este caso se considera 0.6

$CAP(i, k)$ = Capacidad de planta del estudio (10^3 t /año), que es calculado.

INF_0 = Índice de costos Nelson-Farrar para el año de referencia, recopilada de la referencia bibliográfica N° 19..

$INF_{2(2016)}$ = Índice de costos Nelson-Farrar proyectados para el año 2016, como se ve en la siguiente tabla:

Tabla 5.- Índice de costos de Nelson - Farrar

Año referencia	Índice de costos	
2000	1 542,7	
2001	1 579,7	
2002	1 642,2	
2003	1 710,4	
2004	1 833,6	
2005	1 918,8	
2006	2 008,1	
2007	2 106,7	
2008	2 251,4	
2009	2 217,7	
2010	2 337,6	
2011	2 435,6	
2012	2 540,3	Proyectado
2013	2 649,6	Proyectado
2014	2 763,5	Proyectado
2015	2882,3	Proyectado
2016	3006,3	Proyectado

$INV(i, k)$ = Inversión de la planta "i". al 2016 (10^6 US\$)

$INV_t(k)$ = Inversión total del complejo petroquímico al 2016 (10^6 US\$) para el caso "k", incluyendo al fraccionamiento del etano del gas natural al que se denominará como planta 0.

Finalmente, la inversión para cada una de las plantas se determina con la siguiente ecuación:

$$INV(i, k) = I_0(i, k) * (CAP(i, k) / C_0(i, k))^{\alpha} * (INF_{2(2016)} / INF_0)$$

En consecuencia, se tiene que:

$$INVT(k) = \sum_{i=0}^{i=8} INV(i, k)$$

3.4.6 Módulo de Ingresos

En este módulo se determinó los ingresos que se obtendría por la venta de los productos finales y los subproductos, para los 20 casos, en función a la producción anual y los precios unitarios comerciales en US\$.

Es así que, se tiene las siguientes ecuaciones, para cada uno de los productos finales:

Por la venta anual de PEAD:

$$ING(2, 15, k) = PROD(2, 15, k) * PU(2, 15, k) / 10^5$$

Por la venta anual de PEBD:

$$ING(3, 16, k) = PROD(3, 16, k) * PU(3, 16, k) / 10^5$$

Por la venta anual de PVC:

$$ING(5, 17, k) = PROD(5, 17, k) * PU(5, 17, k) / 10^6$$

Por la venta anual de PET:

$$ING(8, 18, k) = PROD(8, 18, k) * PU(8, 18, k) / 10^5$$

Por la venta anual de otros subproductos:

$$ING_subp(k) = ((PROD(1, 7, k) + PROD(1, 8, k) + PROD(1, 9, k) + PROD(1, 10, k) + PROD(1, 11, k)) * PU_subp(k) / 10^6$$

La ecuación general de ingresos del año "k" en 10^6 US\$:

$$\text{ING_T}(k) = \text{ING}(2, 15, k) + \text{ING}(3, 16, k) + \text{ING}(5, 17, k) + \text{ING}(8, 18, k) + \text{ING_subp}(k)$$

Donde:

$\text{ING}(k)$ = Ingresos totales del complejo petroquímico del año "k" en 10^6 US\$.

$\text{PROD}(i, j, k)$ = Cantidad de producción de la planta "i" para el producto "j" para el año de vida del complejo petroquímico "k", expresado en t / año

$\text{PU}(i, j, k)$ = Precio unitario en US\$ / t del producto "j" de la planta "i" para el año de vida del complejo petroquímico "k".

$\text{ING}(i, j, k)$ = Monto de ingresos de la planta "i" por el producto "j" y para el año de vida del complejo petroquímico "k", expresado en 10^6 US\$.

$\text{ING_subp}(k)$ = Monto de ingresos por la venta de subproductos para el año de vida del complejo petroquímico "k", expresado en 10^6 US\$.

$\text{ING_T}(k)$ = Monto total de ingresos anual para el año de vida del complejo petroquímico "k", expresado en 10^6 US\$.

3.4.7 Módulo de egresos

Este módulo se calculó en base a los costos variables y fijos de cada planta, en función al Balance de Materiales de las 8 plantas y los precios unitarios.

La ecuación general de egresos para la planta "i" en el año "k" en 10^6 US\$ es:

$$\text{EGR}(i, k) = \text{CV}(i, k) + \text{CF}(i, k)$$

$$\text{CV}(i, k) = \text{CMI}(i, k) + \text{CCONV}(i, k) + \text{COFFS}(i, k)$$

$$\text{CMI}(i, k) = \sum_{j=1}^{j=5} \text{PROD}(i, j, k) * \text{PU} \frac{(j, k)}{10^6} \quad \text{para } i = 1, 4, 6, 7 \text{ y } 8$$

Donde:

$\text{EGR}(i, k)$ = Egresos planta "i" del complejo petroquímico del año "k" en 10^6 US\$.

$\text{CV}(i, k)$ = Costos variables planta "i" del complejo petroquímico del año "k" en 10^6 US\$.

$\text{CF}(i, k)$ = Costos fijos planta "i" del complejo petroquímico del año "k" en 10^6 US\$.

$\text{CMI}(i, k)$ = Costos variables por materias primas e insumos del complejo petroquímico del año "k" en 10^6 US\$.

CCONV (i, k) = Costos de conversión en las plantas petroquímicas para el año "k" en 10^6 US\$.

COFFS (i, k) = Costos de "off-site" y logística de las plantas petroquímicas para el año "k" en 10^6 US\$.

PROD (i, j, k) = Cantidad de producción de la planta "i" para el producto "j" para el año de vida del complejo petroquímico "k", expresado en 10^3 Kg/a.

PU (j, k) = Precio unitario en US\$ / t del producto "j" para el año de vida del complejo petroquímico "k".

Así para el año o caso 1 se tiene:

$$EGR (i, 1) = CV (i, 1) + CF (i, 1)$$

$$CV (i, 1) = CMI (i, 1) + CCONV (i, 1) + COFFS (i, 1) \quad (30)$$

$$CMI(i, 1) = \sum_{j=1}^{j=5} PROD (i, j, 1) * PU \frac{(j, 1)}{10^6} \quad \text{para } i = 1, 4, 6, 7 \text{ y } 8$$

Finalmente se tiene:

EGR_T (k) = Monto total de egresos anual para el año de vida del complejo petroquímico "k", expresado en 10^6 US\$.

3.4.8 Módulo de evaluación económica

En este módulo se determina la rentabilidad, mediante los siguientes indicadores:

- Valor Actual Neto (VAN)
- Tasa Interna de Retorno (TIR) y
- Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI).

Con los resultados de los módulos antes descritos, se calculó la rentabilidad para los 20 casos, teniendo como criterio principal elegir el caso que reporte el mayor VAN y que cumplan con la condición de que las capacidades obtenidas estén dentro del rango de capacidad mínima y máxima comercial.

Las variables de este módulo son:

- $INVT(k)$: Inversión total del complejo petroquímico al año 2016 en 10^6 US\$, incluyendo al fraccionamiento del etano del gas natural al que se denominará como planta 0.
- $ING_T(k)$: Ingresos totales del complejo petroquímico del año "k" en 10^6 US\$.
- $EGR_T(k)$: Egresos totales del complejo petroquímico del año "k" en 10^6 US\$.
- $DEP(k)$: Depreciación del complejo petroquímico del año "k" en 10^6 US\$.
- $UTILB(k)$: Utilidad bruta del complejo petroquímico del año "k" en 10^6 US\$.
- $REPU(k)$: Reparto de utilidades del complejo petroquímico del año "k" en 10^6 US\$.
- $UTILN(k)$: Utilidad neta del complejo petroquímico del año "k" en 10^6 US\$.
- $FNF(k)$: Flujo neto de fondos del complejo petroquímico del año "k" en 10^6 US\$.
- $FNF0(k)$: Flujo neto de fondos del complejo petroquímico del año "k" en 10^6 US\$, actualizado al año 0, cuando se termina de construir el complejo petroquímico.
- $VPNA(k)$: Valor presente neto actualizado.

- **N:** Tasa de corte. Se consideró 10%.
- **VAN (k, n):** Valor actual neto del complejo petroquímico para el caso “k” expresado en 10^6 US\$, utilizando una tasa de corte “n”.
- **TIR (k):** Tasa interna de retorno del complejo petroquímico para el caso “k” expresado en porcentaje.
- **PRI (k):** Periodo de recuperación de la inversión del complejo petroquímico para el caso “k” expresado en años y meses.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS, ANALISIS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados

Aplicando la metodología del capítulo 3 se hizo las simulaciones del Modelo Matemático en la hoja de cálculo en Excel para cada uno de los 20 casos, cuyo contenido y detalle se describe en el Anexo 2 (CD/archivo digital).

4.1.1 Producciones Máximas de productos petroquímicos finales

Considerando como productos finales el PEAD, PEBD, PCV y PET, se ha definido que el primer año de operación del complejo petroquímico será el año 2017 y una vida del proyecto de 20 años, siendo el último año de operación el año 2036 (año 20). Las producciones máximas de los productos indicados son crecientes y corresponden a la proyección de las demandas del país en los años indicados, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 6.- Producciones máximas de productos finales en t/año

Caso	Año	Producciones máximas de productos finales se alcanzan el año indicado (t./año)			
		PEAD	PEBD	PVC	PET
1	2017	168 519	244 275	160 797	173 069
2	2018	187 056	273 588	175 269	197 299
3	2019	207 632	306 419	191 043	224 920
4	2020	230 472	343 189	208 237	256 409
5	2021	255 824	384 371	226 978	292 307
6	2022	283 964	430 496	247 406	333 230
7	2023	315 200	482 156	269 673	379 882
8	2024	349 872	540 014	293 943	433 065
9	2025	388 358	604 816	320 398	493 694
10	2026	431 078	677 394	349 234	562 811
11	2027	478 496	758 681	380 665	641 605
12	2028	531 131	849 723	414 925	731 430
13	2029	589 555	951 690	452 268	833 830
14	2030	654 406	1 065 892	492 972	950 566
15	2031	726 391	1 193 799	537 340	1 083 645
16	2032	806 294	1 337 055	585 700	1 235 356
17	2033	894 987	1 497 502	638 413	1 408 306
18	2034	993 435	1 677 202	695 870	1 605 468
19	2035	1 102 713	1 878 466	758 499	1 830 234
20	2036	1 224 011	2 103 882	826 764	2 086 467

Fuente: Elaboración propia

4.1.2 Balance de materiales de las plantas petroquímicas

Utilizando las producciones de los productos finales (PEAD, PEBD, PCV y PET) que equivale a la demanda nacional de dichos productos petroquímicos, las producciones máximas para cada caso y los rendimientos propios de cada proceso, se corrió el modelo matemático para cada uno de los 20 casos, obteniéndose las cargas y productos (expresados en miles de toneladas por año) de cada una de las plantas que componen el complejo petroquímico, como se muestra en las figuras del 22 al 41:

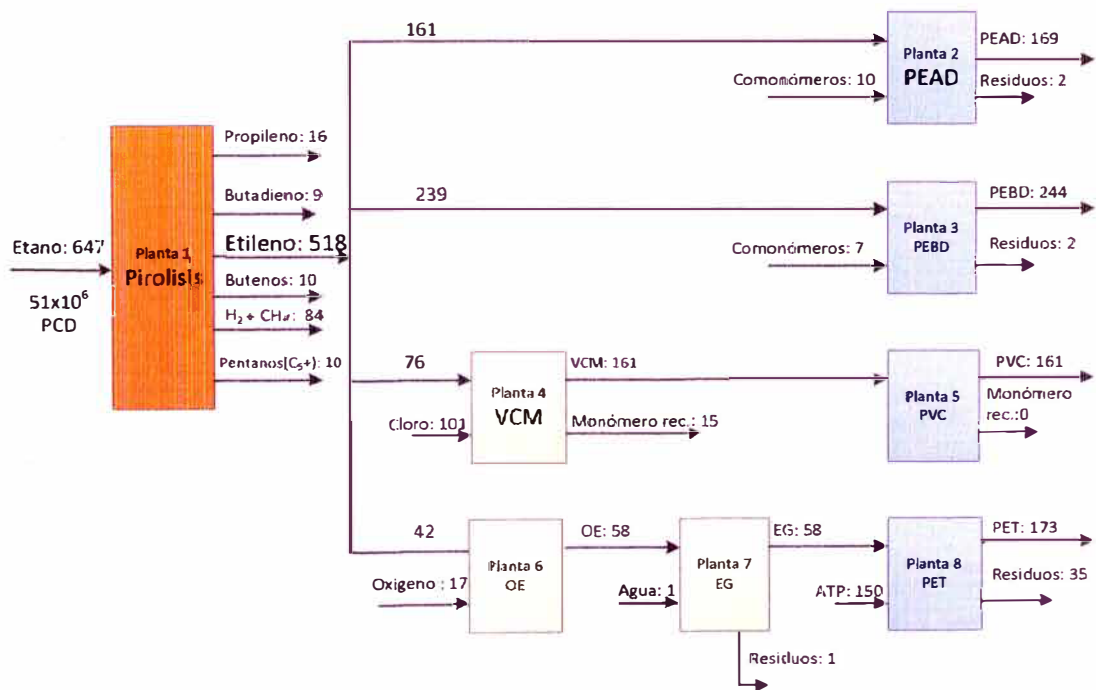


Figura 22. Diagrama de bloques del complejo petroquímico – caso 1

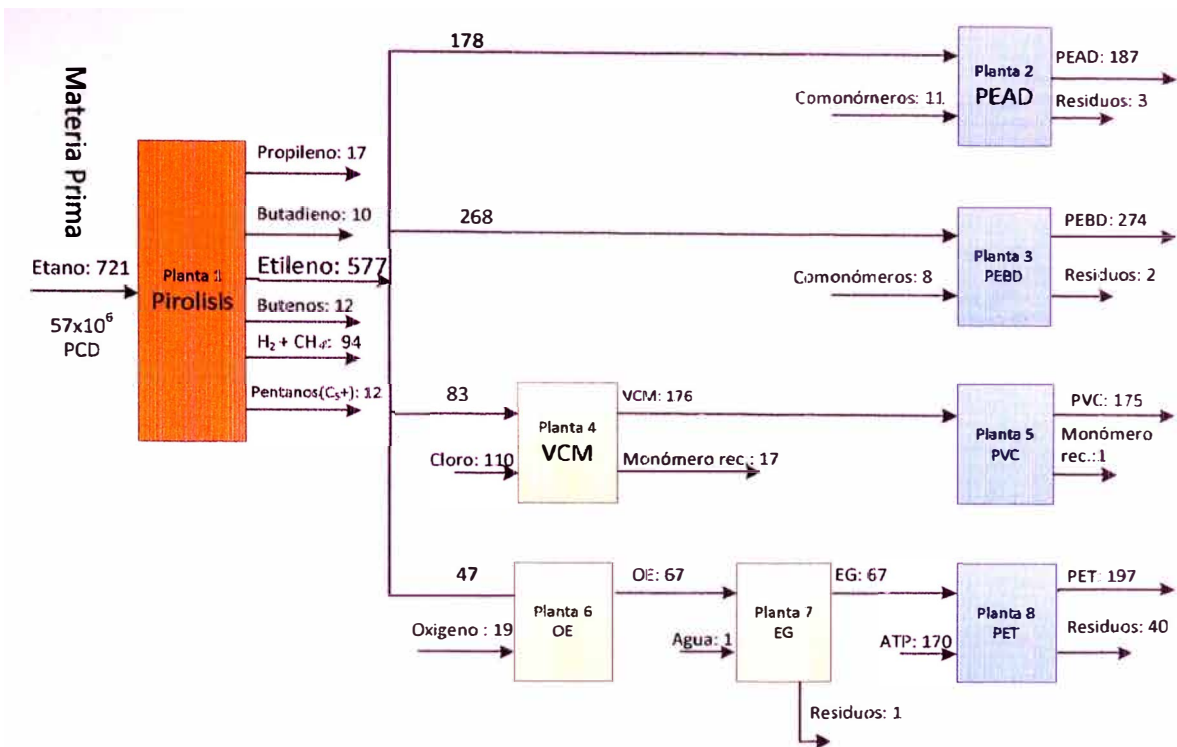


Figura 23. Diagrama de bloques del complejo petroquímico – caso 2

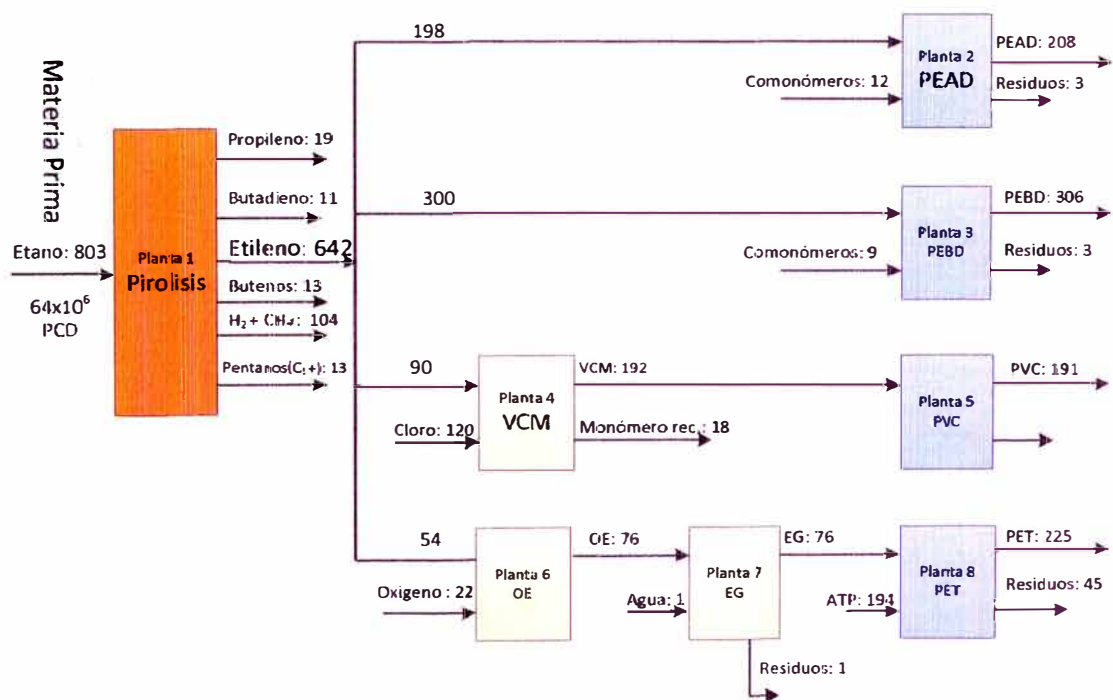


Figura 24. Diagrama de bloques del complejo petroquímico – caso 3

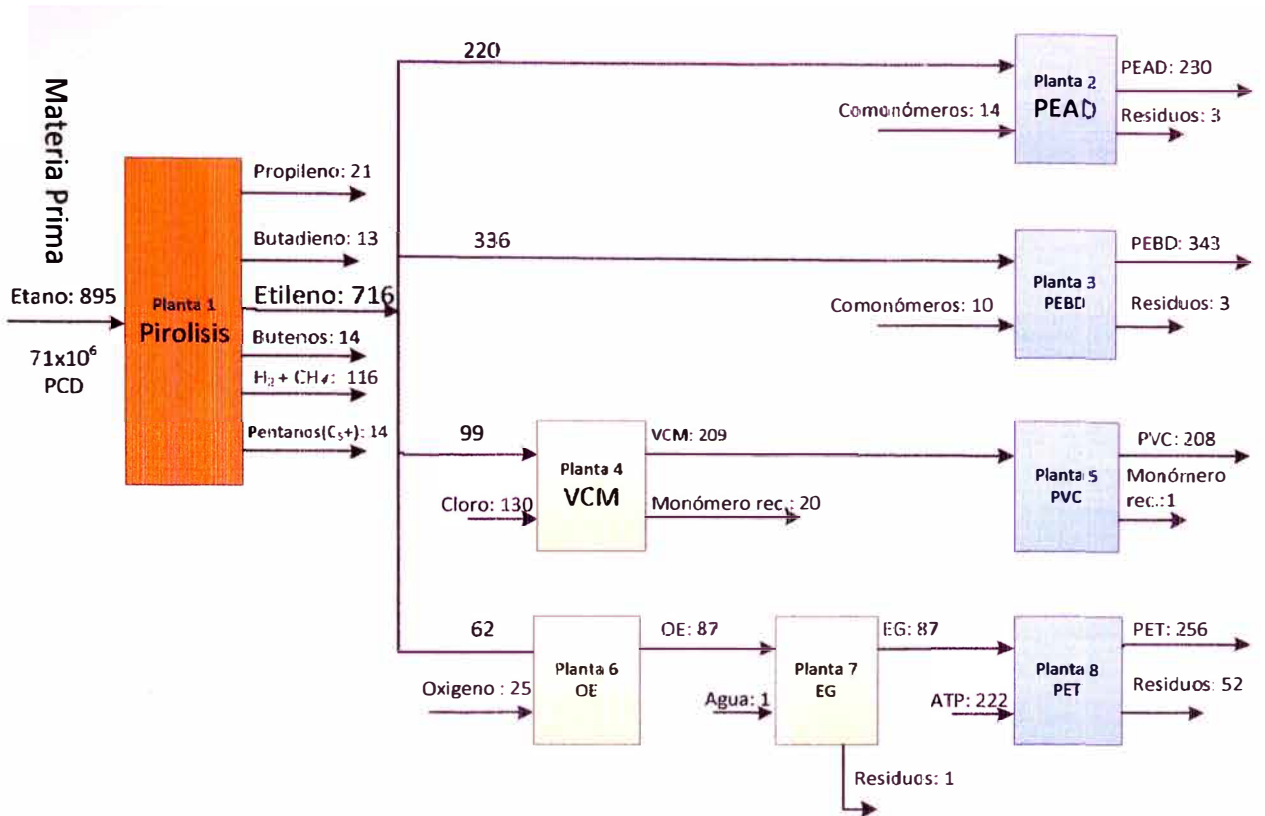


Figura 25. Diagrama de bloques del complejo petroquímico – caso 4

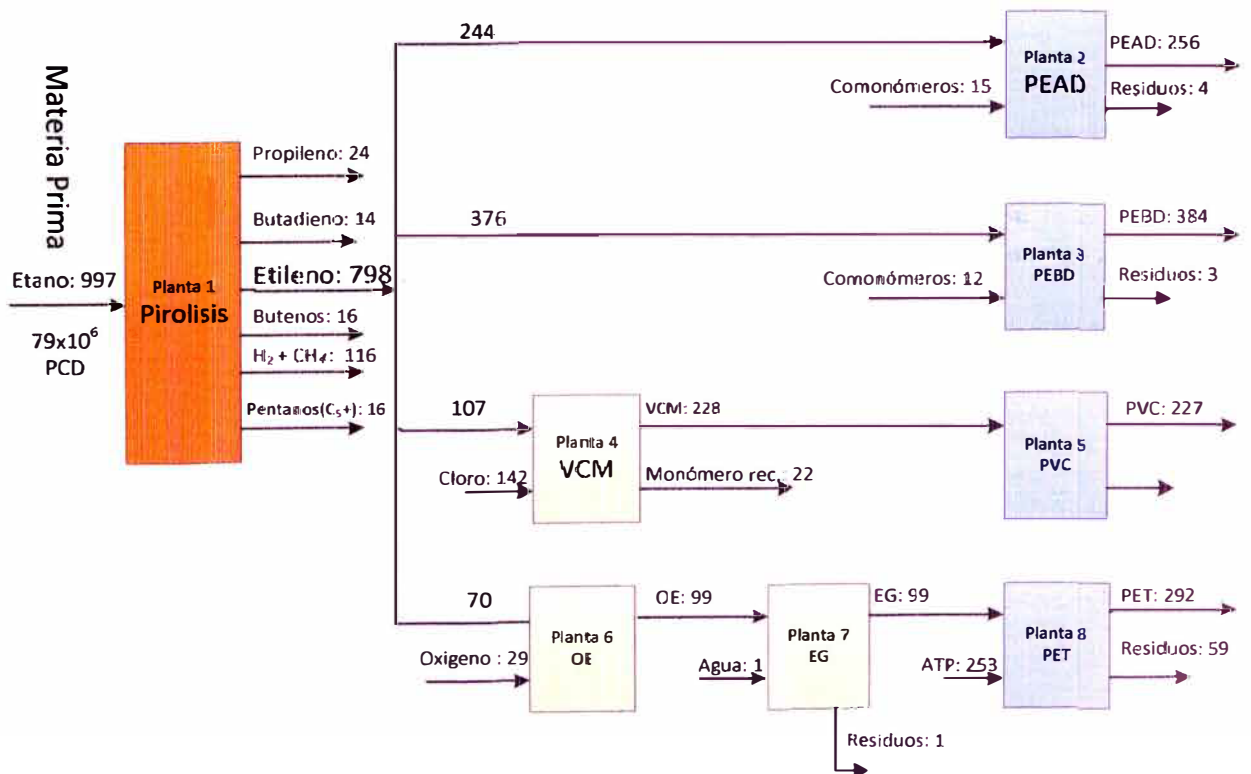


Figura 26. Diagrama de bloques del complejo petroquímico – caso 5

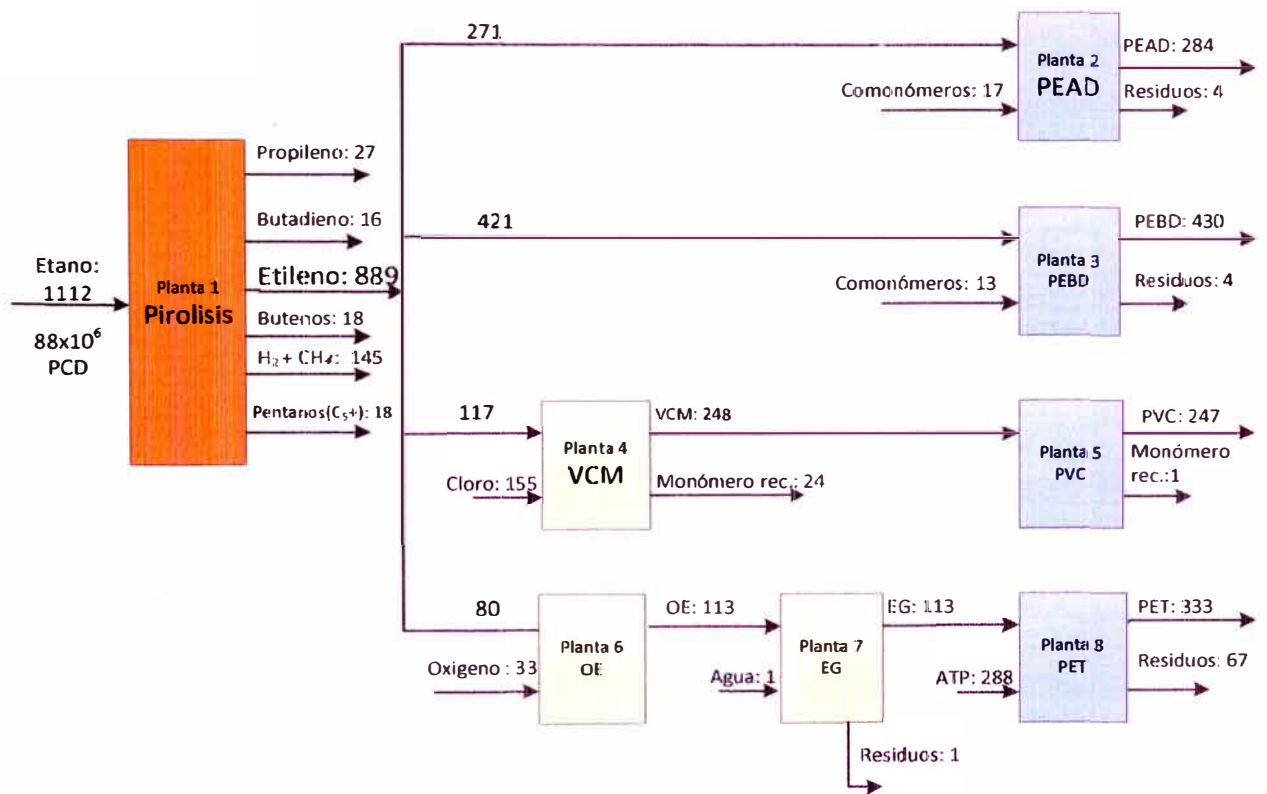


Figura 27. Diagrama de bloques del complejo petroquímico – caso 6

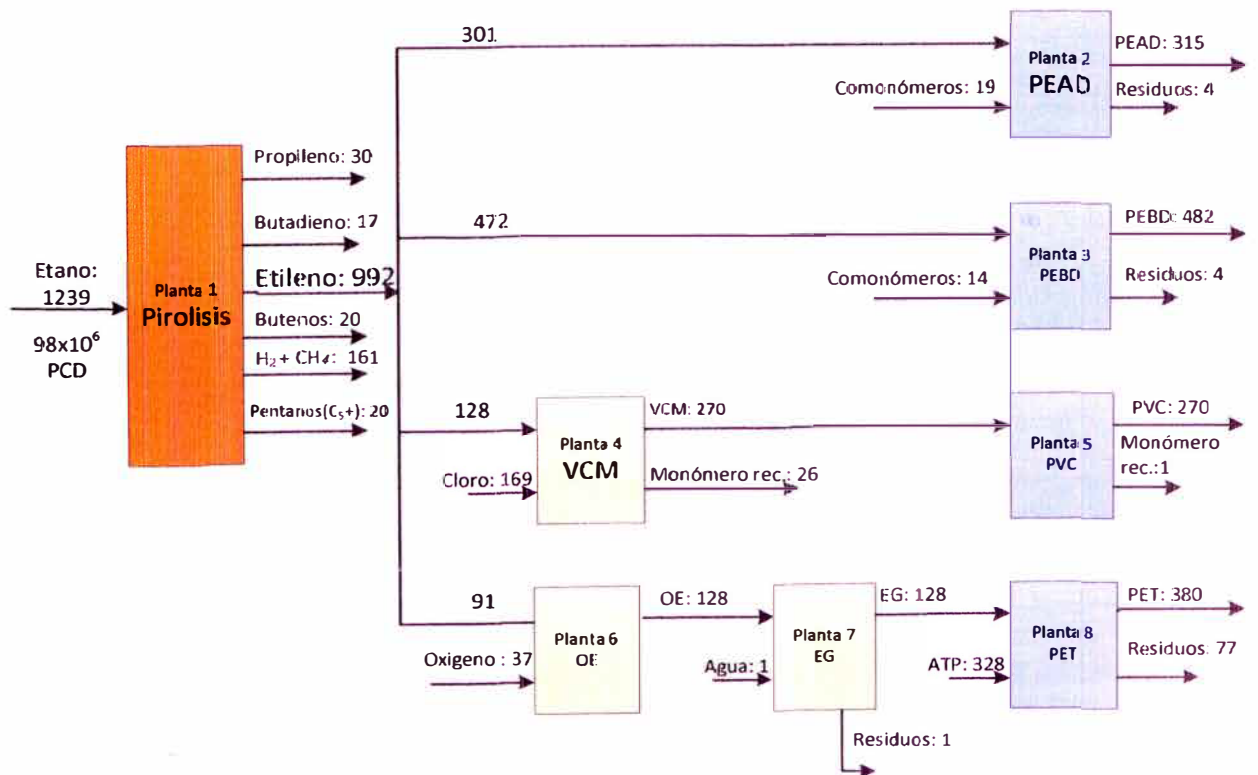


Figura 28. Diagrama de bloques del complejo petroquímico – caso 7

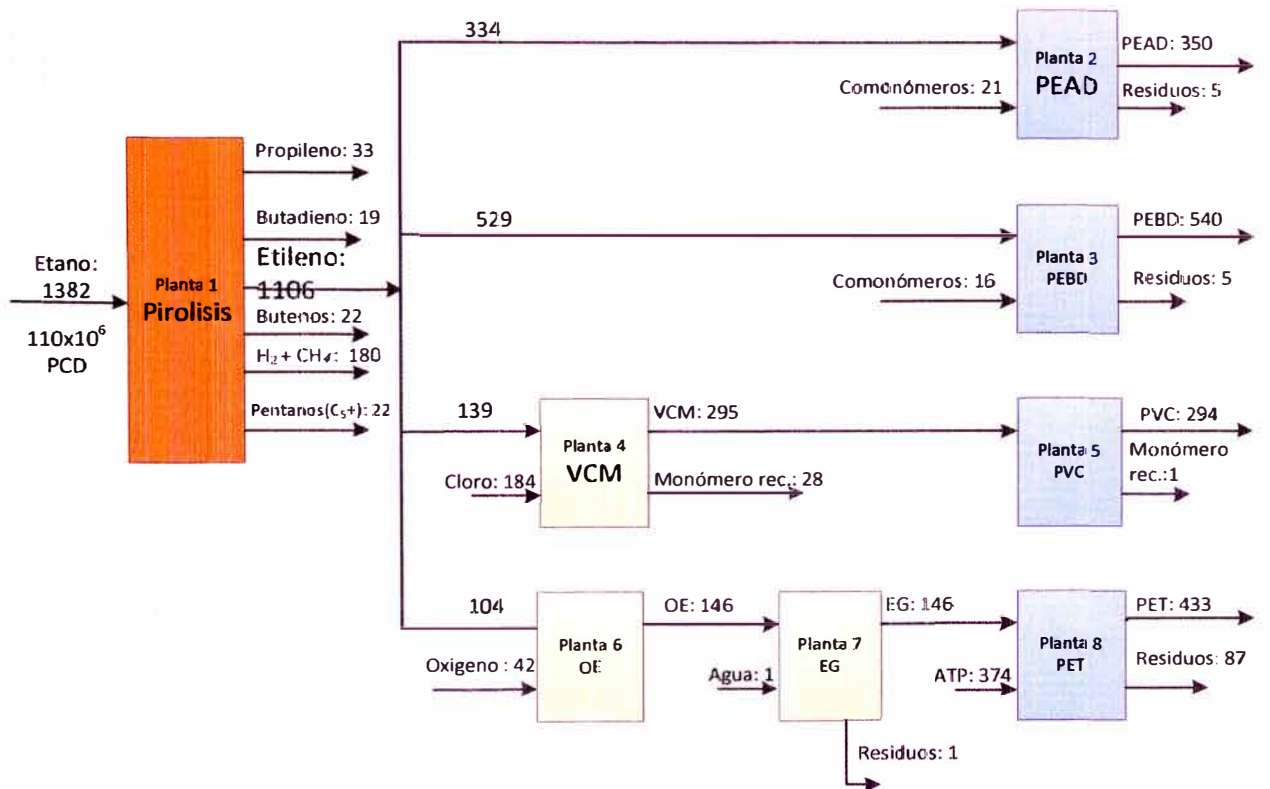


Figura 29. Diagrama de bloques del complejo petroquímico – caso 8

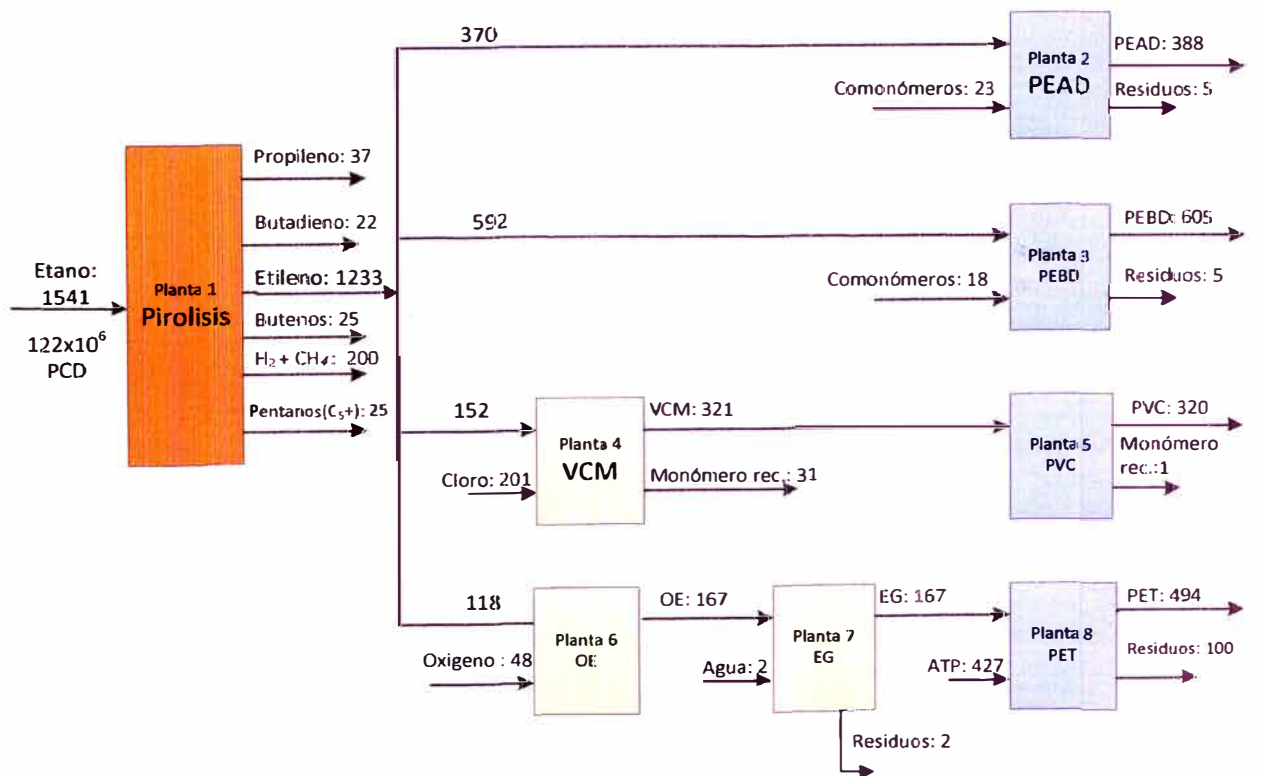


Figura 30. Diagrama de bloques del complejo petroquímico – caso 9

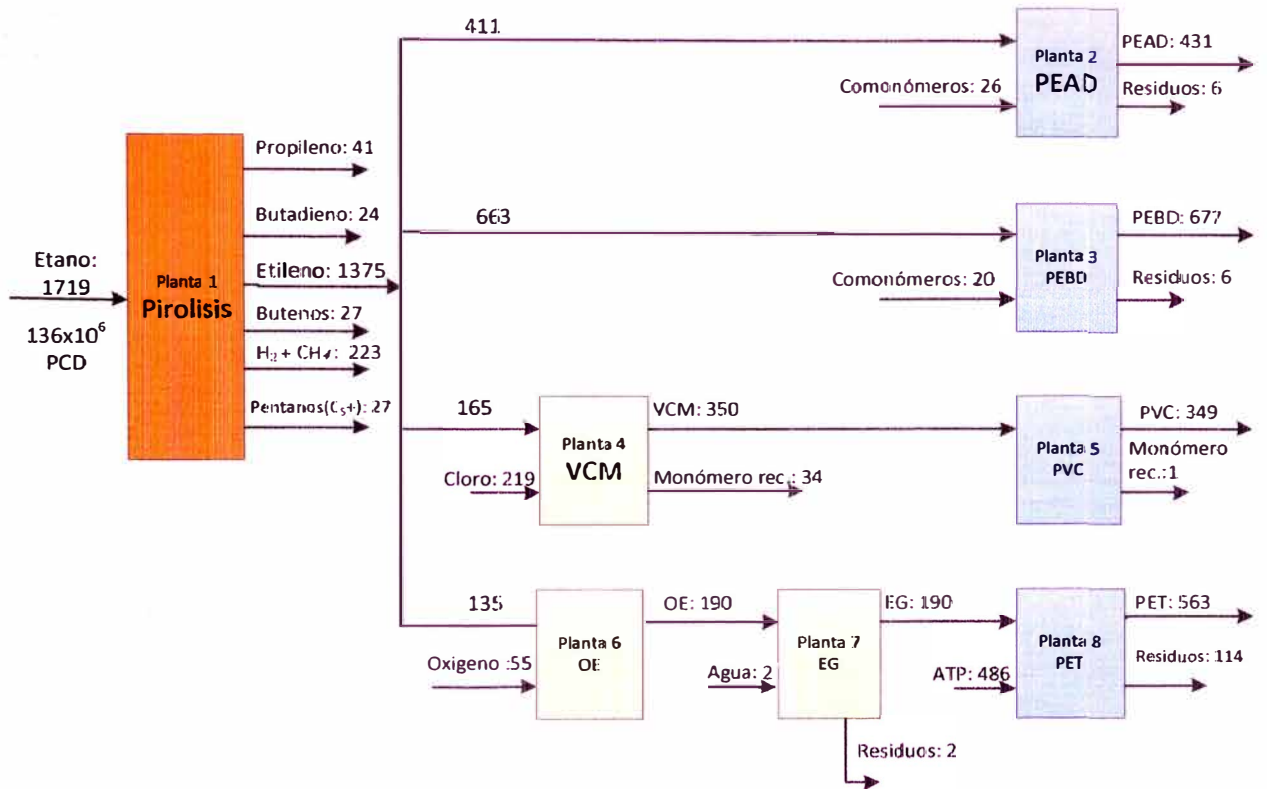


Figura 31. Diagrama de bloques del complejo petroquímico - caso 10

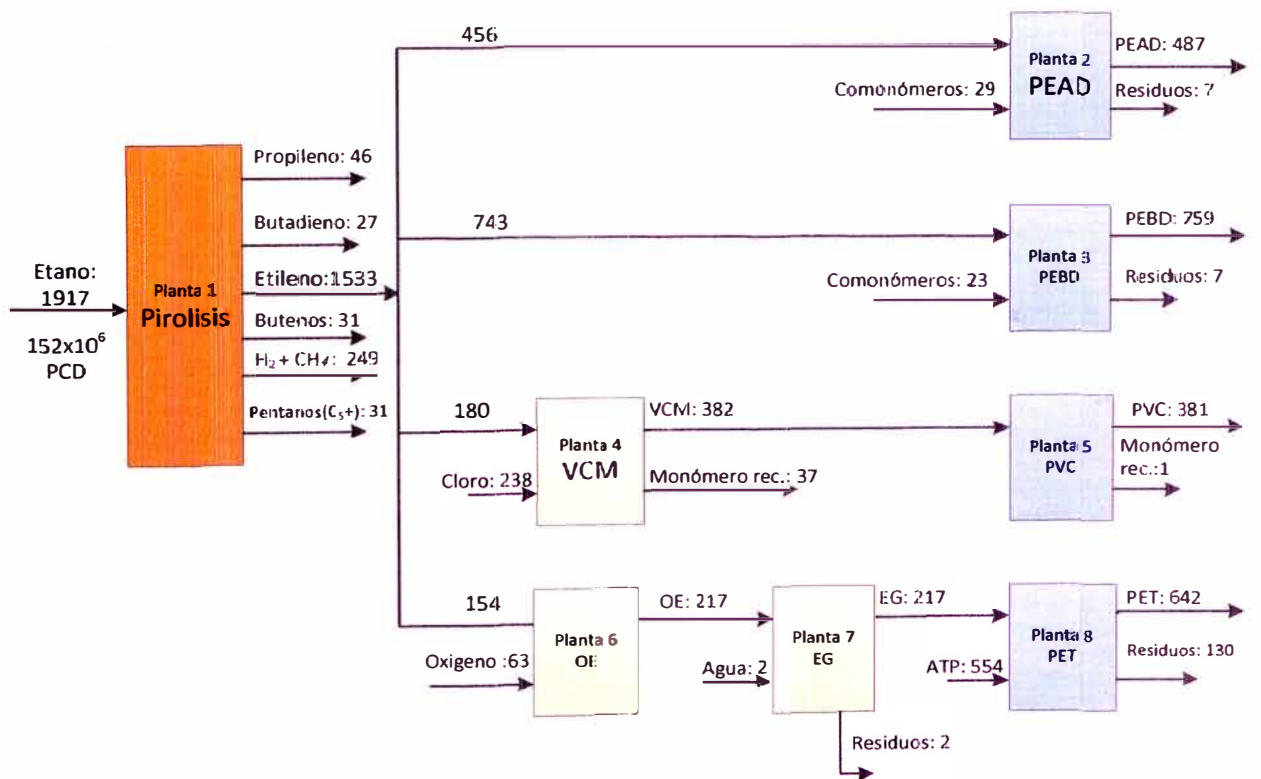


Figura 32. Diagrama de bloques del complejo petroquímico - caso 11

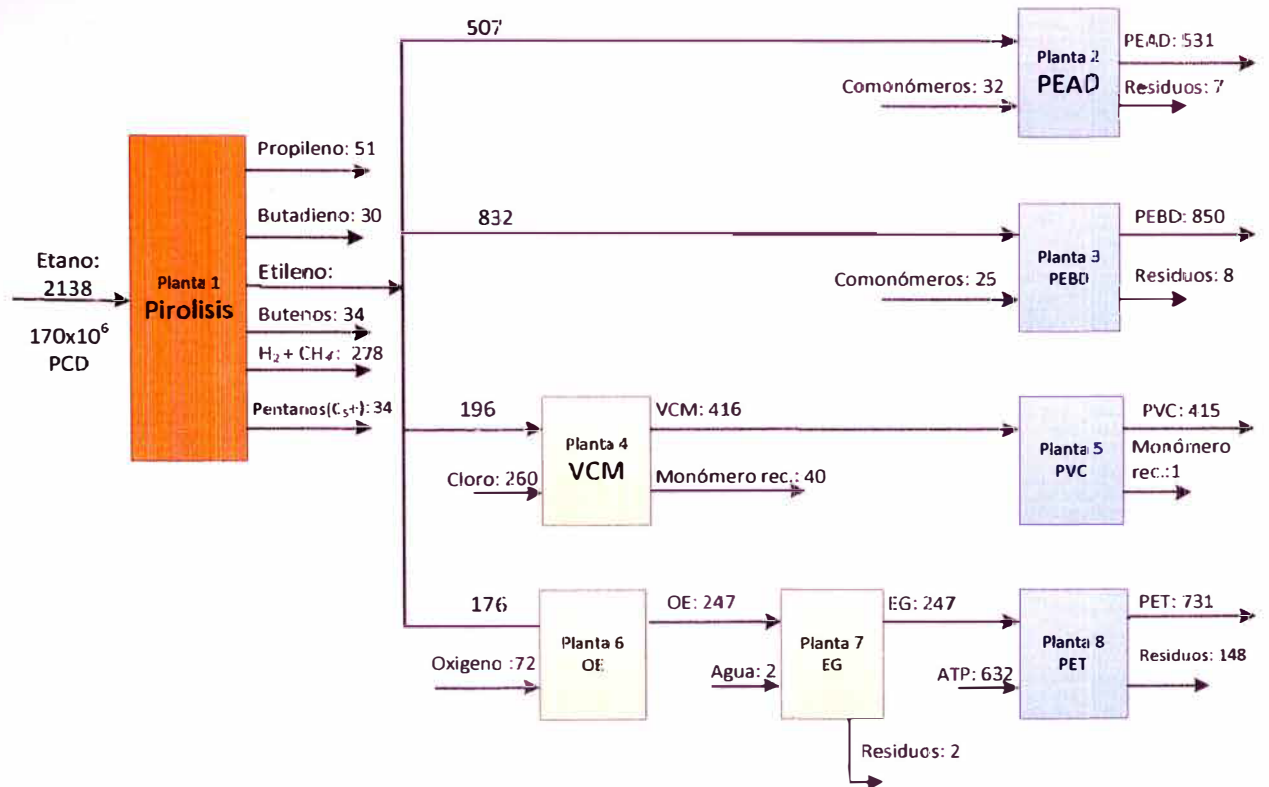


Figura 33. Diagrama de bloques del complejo petroquímico – caso 12

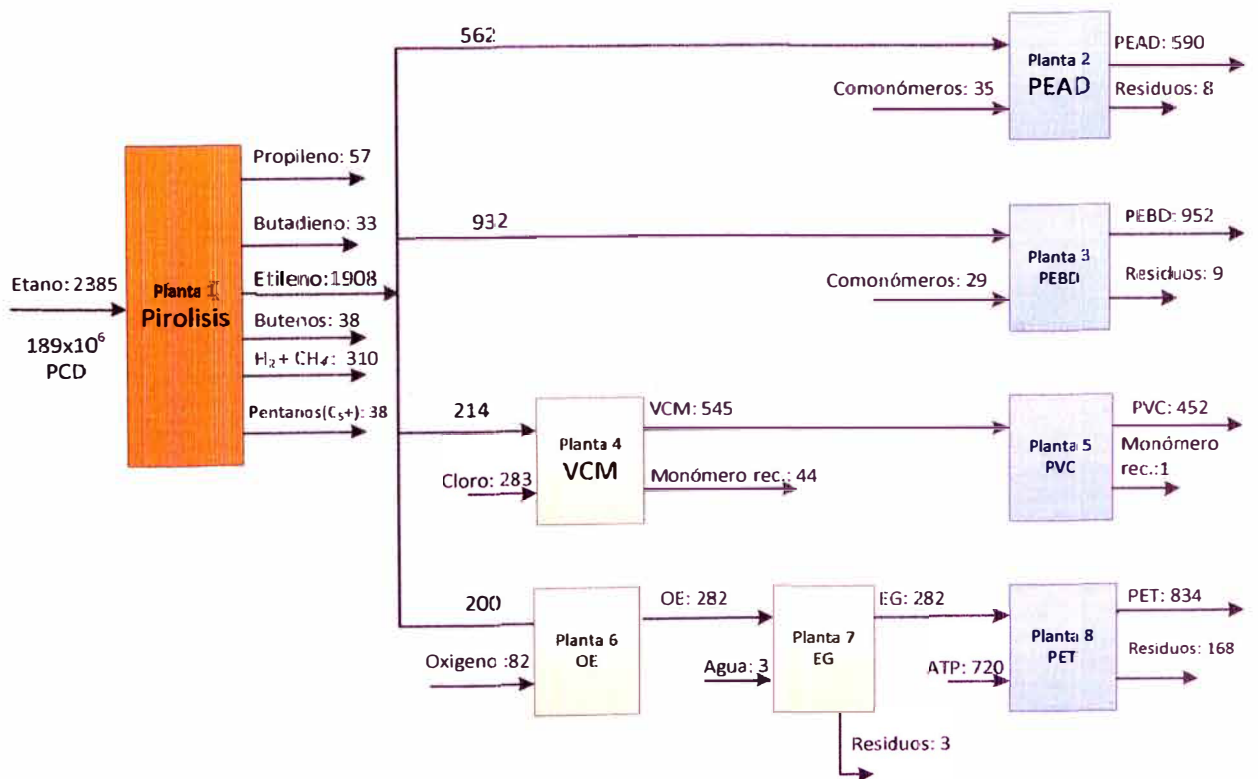


Figura 34. Diagrama de bloques del complejo petroquímico – caso 13

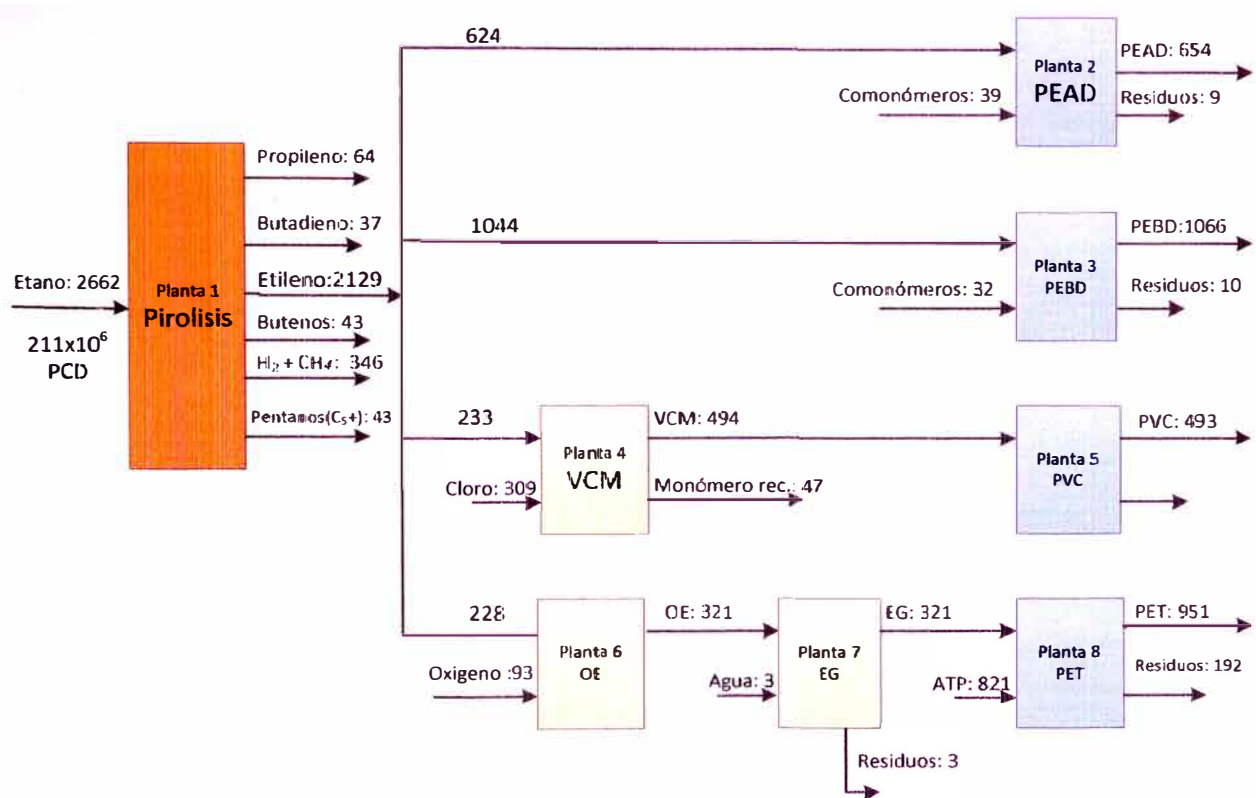


Figura 35. Diagrama de bloques del complejo petroquímico – caso 14

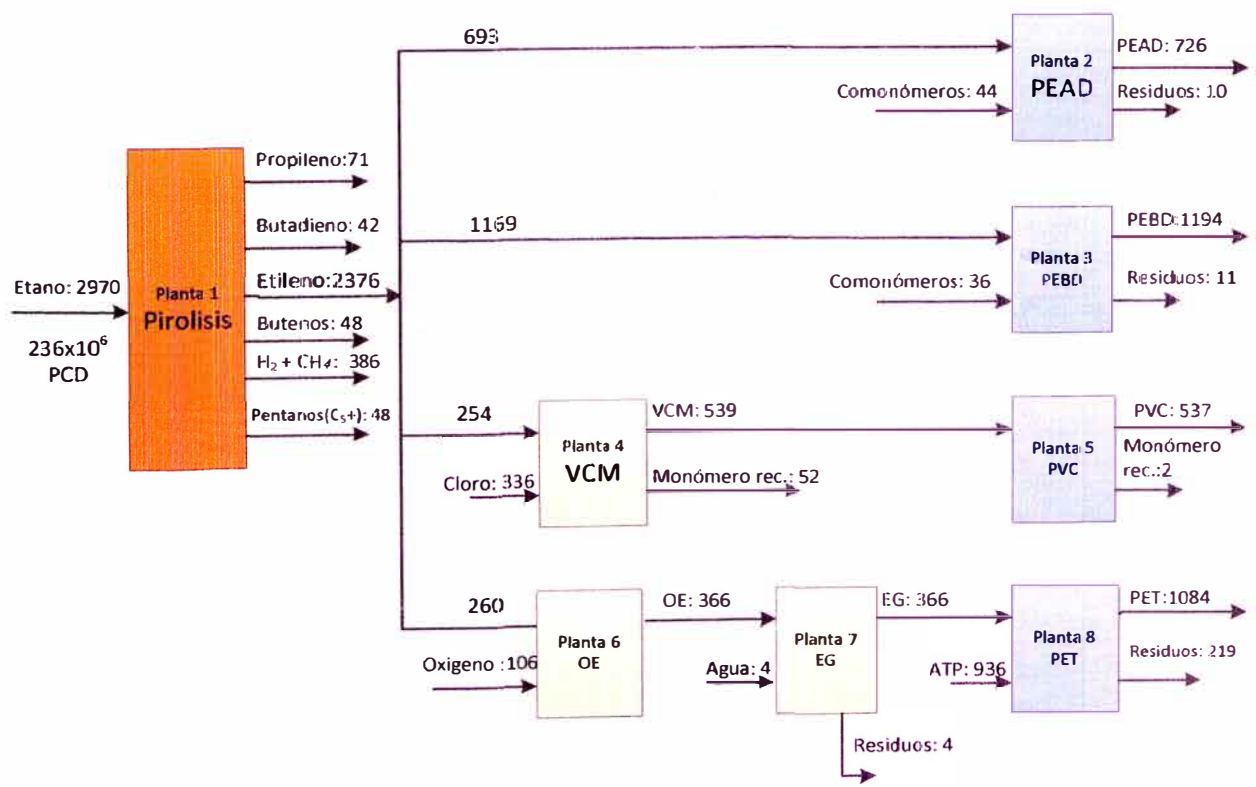


Figura 36. Diagrama de bloques del complejo petroquímico – caso 15

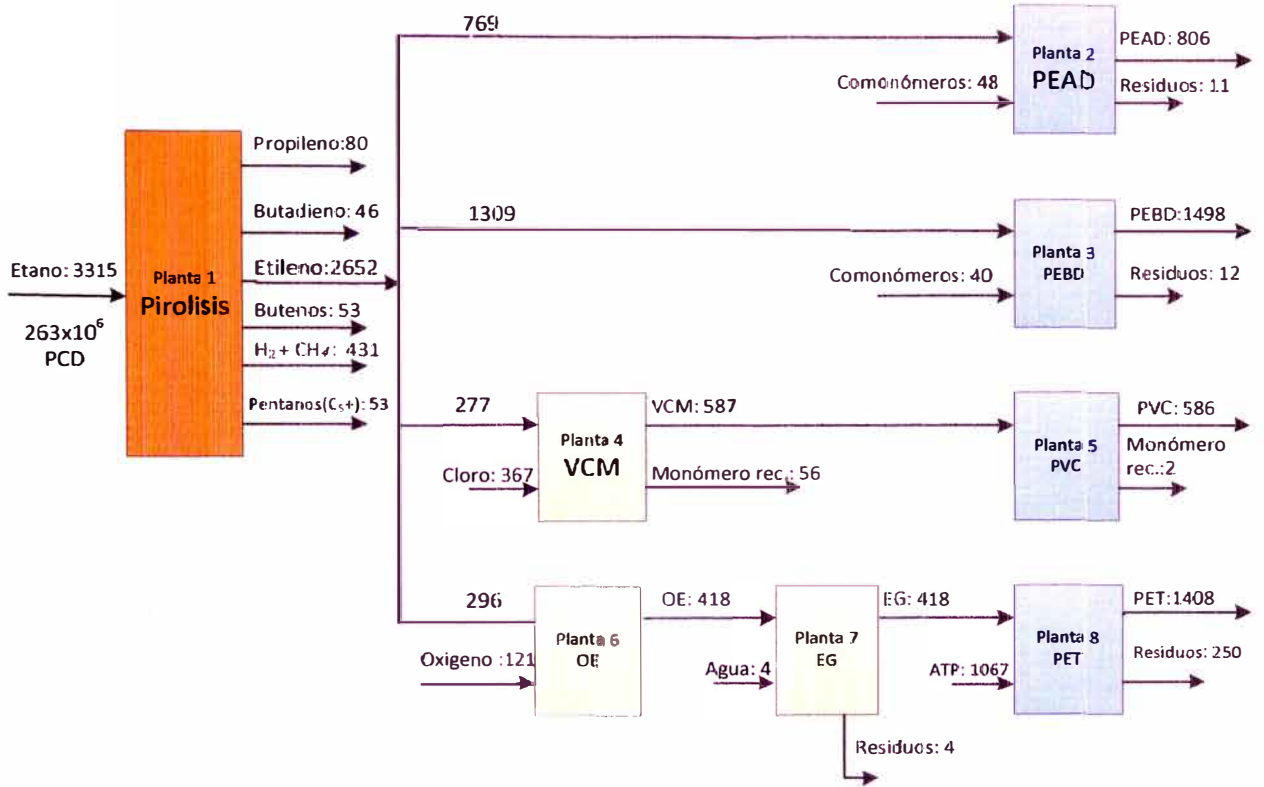


Figura 37. Diagrama de bloques del complejo petroquímico – caso 16

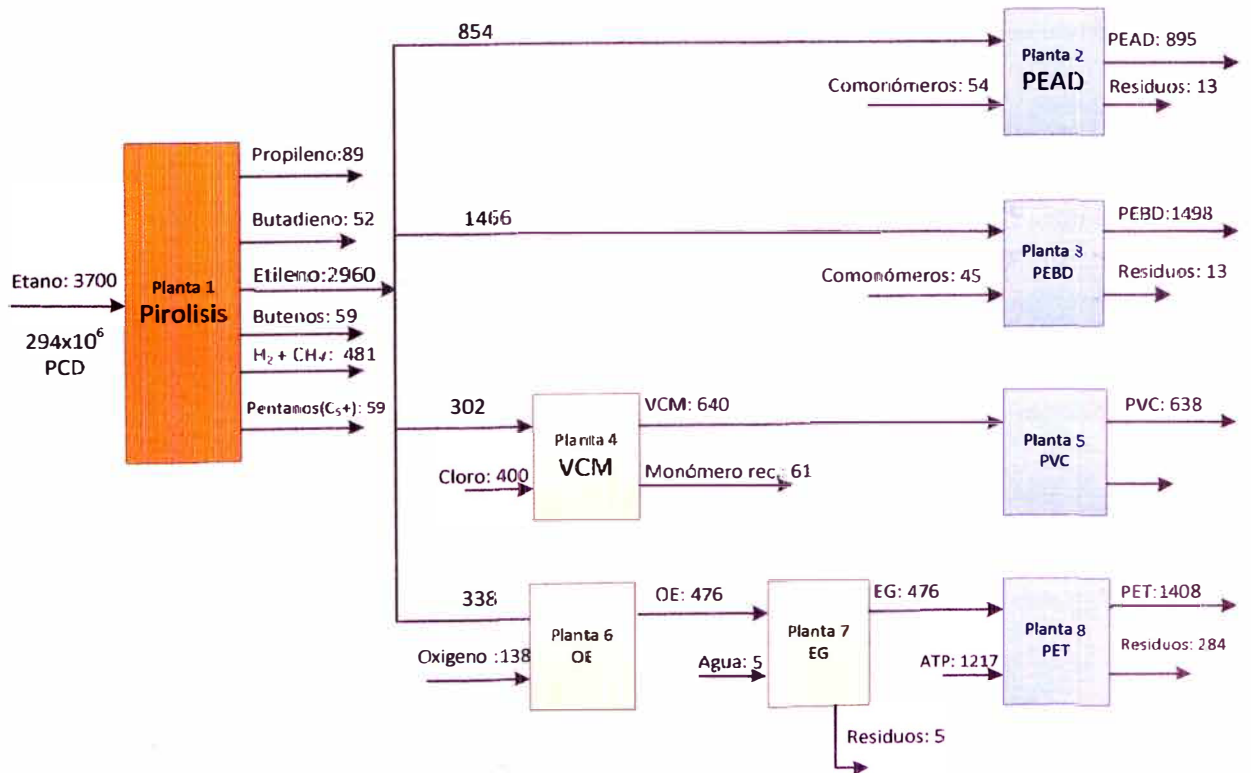


Figura 38. Diagrama de bloques del complejo petroquímico – caso 17

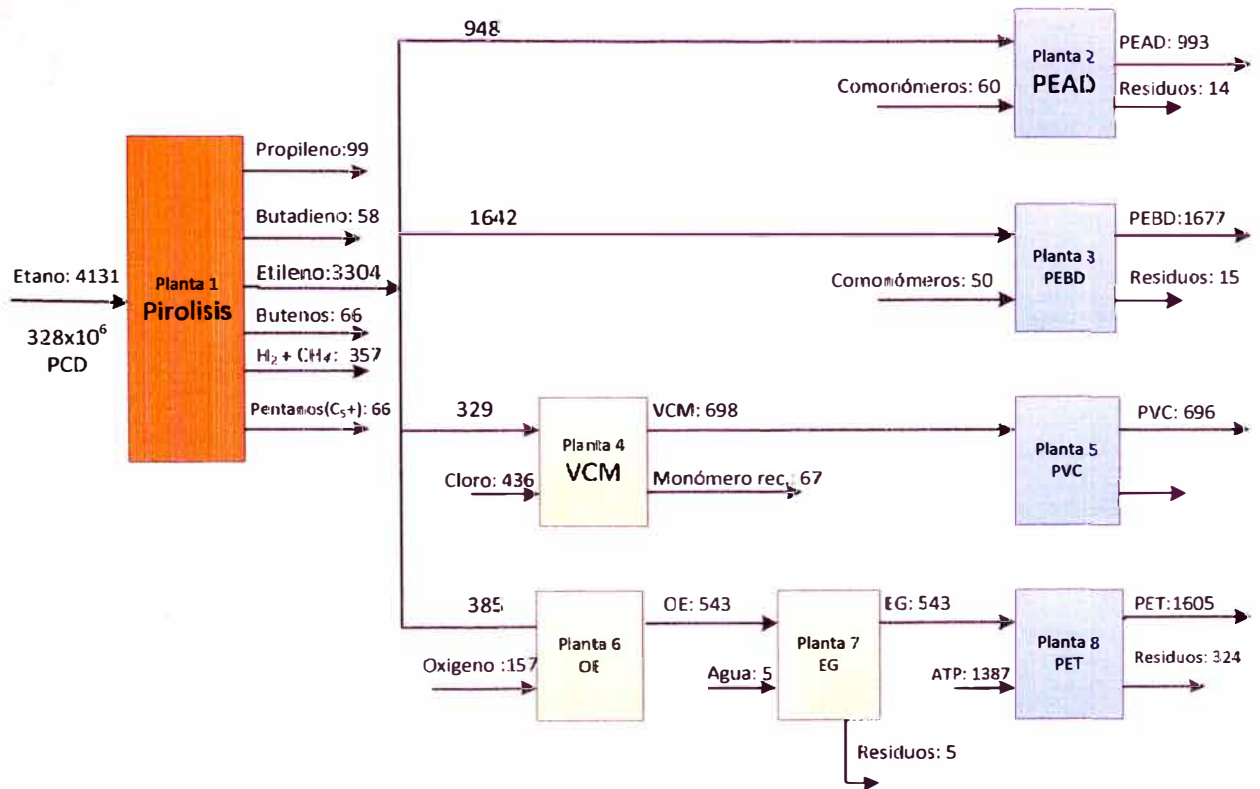


Figura 39. Diagrama de bloques del complejo petroquímico – caso 18

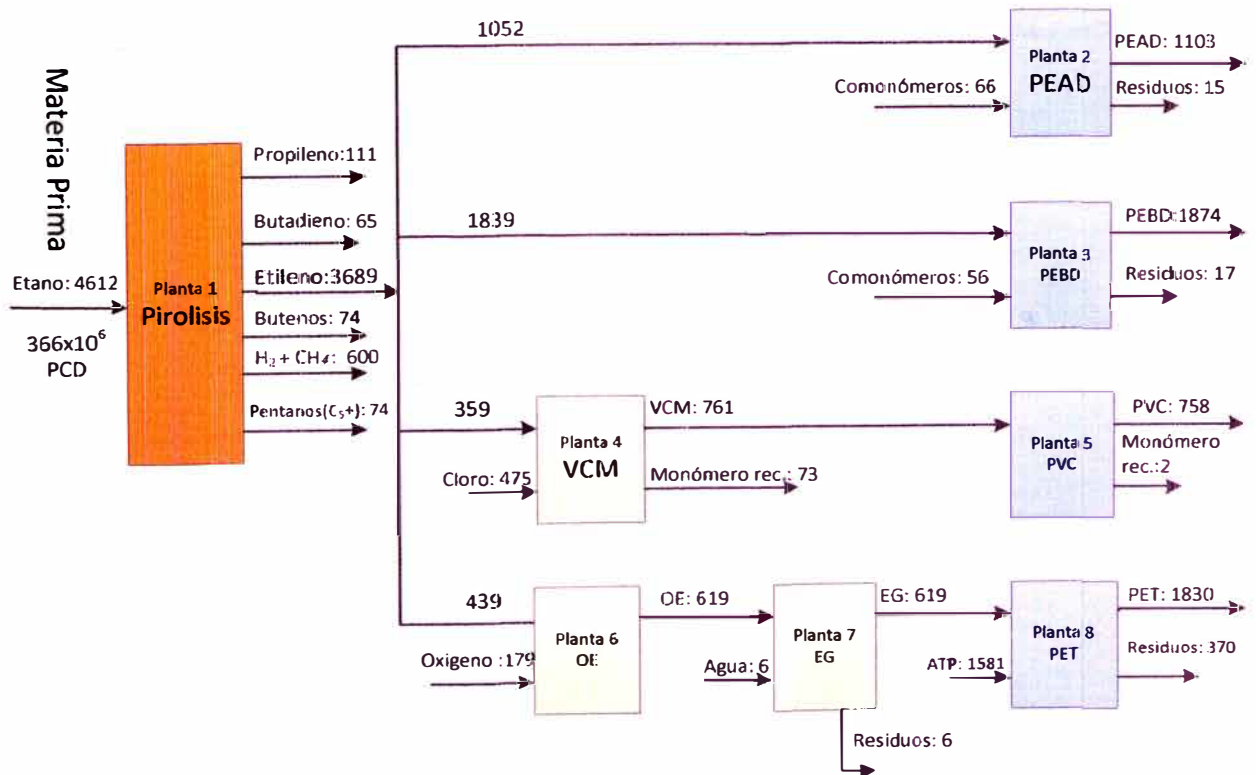


Figura 40. Diagrama de bloques del complejo petroquímico – caso 19

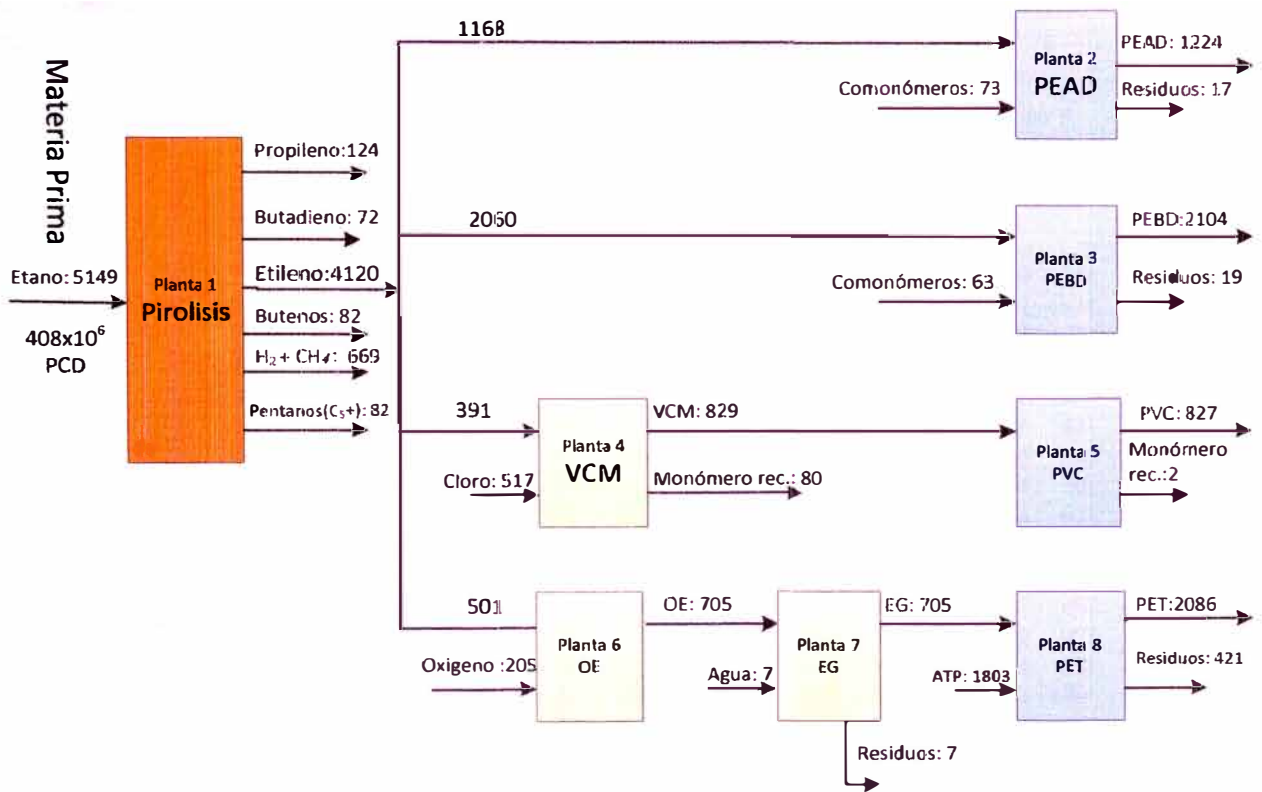


Figura 41. Diagrama de bloques del complejo petroquímico – caso 20

A continuación, en la siguiente tabla se resume los Balances de Materia para los 20 casos:

Tabla 7.- Resumen de los Balances de Materiales de los 20 casos, expresado en miles de toneladas por año

Caso	E t a n o	C l o r o	O x i g e n o	A g u a	A T P	E t i l e n o	P r o p i l e n o	B u t a d i e n o	B u t e n o s	H 2 + C H 4	P e n t a n o s	V C M	O E	E G	P E A D	P E B D	P V C	P E T
1	-647	-101	-17	-1	-150	518	16	9	10	84	10	161	58	58	169	244	161	173
2	-721	-110	-19	-1	-170	577	17	10	12	94	12	176	67	67	187	274	175	197
3	-803	-120	-22	-1	-194	642	19	11	13	104	13	192	76	76	208	306	191	225
4	-895	-130	-25	-1	-222	716	21	13	14	116	14	209	87	87	230	343	208	256
5	-997	-142	-29	-1	-253	798	24	14	16	130	16	228	99	99	256	384	227	292
6	-1112	-155	-33	-1	-288	889	27	16	18	145	18	248	113	113	284	430	247	333
7	-1239	-169	-37	-1	-328	992	30	17	20	161	20	270	128	128	315	482	270	380
8	-1382	-184	-42	-1	-374	1106	33	19	22	180	22	295	146	146	350	540	294	433
9	-1541	-201	-48	-2	-427	1233	37	22	25	200	25	321	167	167	388	605	320	494
10	-1719	-219	-55	-2	-486	1375	41	24	27	223	27	350	190	190	431	677	349	563
11	-1917	-238	-63	-2	-554	1533	46	27	31	249	31	382	217	217	478	759	381	642
12	-2138	-260	-72	-2	-632	1711	51	30	34	278	34	416	247	247	531	850	415	731
13	-2385	-283	-82	-3	-720	1908	57	33	38	310	38	454	282	282	590	952	452	834
14	-2662	-309	-93	-3	-821	2129	64	37	43	346	43	494	321	321	654	1066	493	951
15	-2970	-336	-106	-4	-936	2376	71	42	48	386	48	539	366	366	726	1194	537	1084
16	-3315	-367	-121	-4	-1067	2652	80	46	53	431	53	587	418	418	806	1337	586	1235
17	-3700	-400	-138	-5	-1217	2960	89	52	59	481	59	640	476	476	895	1498	638	1408
18	-4131	-436	-157	-5	-1387	3304	99	58	66	537	66	698	543	543	993	1677	696	1605
19	-4612	-475	-179	-6	-1581	3689	111	66	74	600	74	761	619	619	1103	1878	758	1830
20	-5149	-517	-205	-7	-1803	4120	124	72	82	669	82	829	705	705	1224	2104	827	2086

Fuente: Elaboración propia.

4.1.3 Capacidades de planta

Como resultado del balance de materia expuesto en el ítem anterior, realizado en función a los rendimientos específicos de cada planta, se obtuvo la capacidad de diseño de cada una de las plantas estudiadas, cuyos valores al ser resultados preliminares fueron materia de evaluación posterior.

En la siguiente tabla se muestra el detalle:

Tabla 8.- Capacidades de planta para cada uno de los casos en 10³ toneladas/año

Caso	Capacidades de planta para cada uno de los casos (10 ³ t / año) - Plantas							
	Pirolisis - etano	PEAD	PEBD	VCM	PVC	OE	EG	PET
1	575	187	271	179	179	65	65	192
2	641	208	304	195	195	74	74	219
3	714	231	340	213	212	84	84	250
4	796	256	381	232	231	96	96	285
5	887	284	427	253	252	110	110	325
6	988	316	478	276	275	125	125	370
7	1102	350	536	301	300	143	143	422
8	1228	389	600	328	327	163	163	481
9	1370	432	672	357	356	185	185	549
10	1528	479	753	389	388	211	211	626
11	1704	532	843	424	423	241	241	713
12	1901	590	944	462	461	275	275	813
13	2120	655	1057	504	503	313	313	926
14	2366	727	1184	549	548	357	357	1056
15	2640	807	1326	599	597	407	407	1204
16	2947	896	1486	653	651	464	464	1373
17	3289	994	1664	711	709	529	529	1565
18	3672	1104	1864	756	773	603	603	1784
19	4099	1225	2087	845	843	687	687	2034
20	4577	1360	2338	921	919	744	744	2318

Fuente: Elaboración propia

4.1.4 Inversiones del Complejo Petroquímico

En la siguiente tabla, se muestra los resultados obtenidos respecto a las inversiones necesarias para cada uno de los 20 casos:

Tabla 9.- Inversiones del complejo petroquímico (10⁶ US\$)

Inversiones del Complejo Petroquímico (10 ⁶ US\$)										
Caso	Fracc. Etano	Pirolisis - etano	PEAD	PEBD	VCM	PVC	OE	EG	PET	Total
1	55	331	288	166	19	29	237	237	274	1636
2	59	353	306	177	20	31	257	257	297	1757
3	63	377	326	190	21	32	278	278	321	1886
4	67	402	347	203	23	34	300	300	347	2023
5	72	429	370	297	24	36	325	325	376	2254
6	76	458	394	307	25	38	351	351	406	2406
7	82	489	419	328	26	40	380	380	440	2584
8	87	522	446	352	28	42	411	411	476	2775
9	93	558	475	376	29	44	445	445	515	2980
10	99	785	506	403	31	46	481	481	735	3567
11	106	839	578	407	32	49	521	521	795	3848
12	113	895	573	543	34	51	563	563	960	4295
13	121	956	805	581	36	54	609	609	930	4701
14	129	1021	857	622	38	57	870	659	1006	5259
15	138	1091	913	747	40	60	941	713	1280	5923
16	147	1165	971	799	55	83	1018	771	1385	6394
17	157	1464	1034	935	58	87	1101	834	1498	7168
18	168	1563	1101	1001	62	92	1191	902	1620	7700
19	179	1670	1379	1153	65	97	1515	976	1967	9001
20	192	2002	1468	1234	68	102	1639	1394	2128	10227

Fuente: Elaboración propia

4.1.5 Ingresos del Complejo Petroquímico

Los resultados de este módulo, que corresponde a los ingresos que se tendrá por la venta de los productos finales, se muestra para los 20 casos en la siguiente tabla:

Tabla 10.- Ingresos anuales totales (10⁶ US\$)

Caso/ Año	Ingresos anuales totales (10 ⁶ US\$)																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	993	993	993	993	993	993	993	993	993	993	993	993	993	993	993	993	993	993	993	993
2	993	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111
3	993	1111	1244	1244	1244	1244	1244	1244	1244	1244	1244	1244	1244	1244	1244	1244	1244	1244	1244	1244
4	993	1111	1244	1343	1343	1343	1343	1343	1343	1343	1343	1343	1343	1343	1343	1343	1343	1343	1343	1343
5	993	1111	1244	1343	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560	1560
6	993	1111	1244	1343	1560	1747	1747	1747	1747	1747	1747	1747	1747	1747	1747	1747	1747	1747	1747	1747
7	993	1111	1244	1343	1560	1747	1956	1956	1956	1956	1956	1956	1956	1956	1956	1956	1956	1956	1956	1956
8	993	1111	1244	1343	1560	1747	1956	2192	2192	2192	2192	2192	2192	2192	2192	2192	2192	2192	2192	2192
9	993	1111	1244	1343	1560	1747	1956	2192	2456	2456	2456	2456	2456	2456	2456	2456	2456	2456	2456	2456
10	993	1111	1244	1343	1560	1747	1956	2192	2456	2752	2752	2752	2752	2752	2752	2752	2752	2752	2752	2752
11	993	1111	1244	1343	1560	1747	1956	2192	2456	2752	3085	3085	3085	3085	3085	3085	3085	3085	3085	3085
12	993	1111	1244	1343	1560	1747	1956	2192	2456	2752	3085	3459	3459	3459	3459	3459	3459	3459	3459	3459
13	993	1111	1244	1343	1560	1747	1956	2192	2456	2752	3085	3459	3879	3879	3879	3879	3879	3879	3879	3879
14	993	1111	1244	1343	1560	1747	1956	2192	2456	2752	3085	3459	3879	4350	4350	4350	4350	4350	4350	4350
15	993	1111	1244	1343	1560	1747	1956	2192	2456	2752	3085	3459	3879	4350	4879	4879	4879	4879	4879	4879
16	993	1111	1244	1343	1560	1747	1956	2192	2456	2752	3085	3459	3879	4350	4879	5474	5474	5474	5474	5474
17	993	1111	1244	1343	1560	1747	1956	2192	2456	2752	3085	3459	3879	4350	4879	5474	6142	6142	6142	6142
18	993	1111	1244	1343	1560	1747	1956	2192	2456	2752	3085	3459	3879	4350	4879	5474	6142	6843	6843	6843
19	993	1111	1244	1343	1560	1747	1956	2192	2456	2752	3085	3459	3879	4350	4879	5474	6142	6843	7338	7338
20	993	1111	1244	1343	1560	1747	1956	2192	2456	2752	3085	3459	3879	4350	4879	5474	6142	6843	7338	8687

Fuente: Elaboración propia

4.1.6 Egresos

En la siguiente tabla se muestra el resultado de la corrida del módulo de Egresos, que constituye los costos de la materia prima, insumos, operación y mantenimiento.

Tabla 11.- Egresos anuales totales (10⁶ US\$)

Caso/ Año	Egresos anuales totales (10 ⁶ US\$)																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	554	554	554	554	554	554	554	554	554	554	554	554	554	554	554	554	554	554	554	554
2	554	611	611	611	611	611	611	611	611	611	611	611	611	611	611	611	611	611	611	611
3	554	611	656	656	656	656	656	656	656	656	656	656	656	656	656	656	656	656	656	656
4	554	611	656	772	772	772	772	772	772	772	772	772	772	772	772	772	772	772	772	772
5	554	611	656	772	868	868	868	868	868	868	868	868	868	868	868	868	868	868	868	868
6	554	611	656	772	868	976	976	976	976	976	976	976	976	976	976	976	976	976	976	976
7	554	611	656	772	868	976	1098	1098	1098	1098	1098	1098	1098	1098	1098	1098	1098	1098	1098	1098
8	554	611	656	772	868	976	1098	1235	1235	1235	1235	1235	1235	1235	1235	1235	1235	1235	1235	1235
9	554	611	656	772	868	976	1098	1235	1391	1391	1391	1391	1391	1391	1391	1391	1391	1391	1391	1391
10	554	611	656	772	868	976	1098	1235	1391	1566	1566	1566	1566	1566	1566	1566	1566	1566	1566	1566
11	554	611	656	772	868	976	1098	1235	1391	1566	1763	1763	1763	1763	1763	1763	1763	1763	1763	1763
12	554	611	656	772	868	976	1098	1235	1391	1566	1763	1986	1986	1986	1986	1986	1986	1986	1986	1986
13	554	611	656	772	868	976	1098	1235	1391	1566	1763	1986	2238	2238	2238	2238	2238	2238	2238	2238
14	554	611	656	772	868	976	1098	1235	1391	1566	1763	1986	2238	2522	2522	2522	2522	2522	2522	2522
15	554	611	656	772	868	976	1098	1235	1391	1566	1763	1986	2238	2522	2843	2843	2843	2843	2843	2843
16	554	611	656	772	868	976	1098	1235	1391	1566	1763	1986	2238	2522	2843	3205	3205	3205	3205	3205
17	554	611	656	772	868	976	1098	1235	1391	1566	1763	1986	2238	2522	2843	3205	3615	3615	3615	3615
18	554	611	656	772	868	976	1098	1235	1391	1566	1763	1986	2238	2522	2843	3205	3615	4078	4078	4078
19	554	611	656	772	868	976	1098	1235	1391	1566	1763	1986	2238	2522	2843	3205	3615	4078	4601	4601
20	554	611	656	772	868	976	1098	1235	1391	1566	1763	1986	2238	2522	2843	3205	3615	4078	4601	5193

Fuente: Elaboración propia

4.1.7 Evaluación Económica

Finalmente, en el módulo Evaluación Económica, de acuerdo a la metodología descrita en capítulos anteriores, se calculó la rentabilidad de cada uno de los 20 casos, cuyos resultados se muestran a continuación:

Tabla 12.- Evaluación Económica preliminar

Caso	VAN al 10% (10 ⁶ US\$)	TIR (%)	PRI
1	899,03	16,07	9 años y 4 meses
2	1 033,50	16,40	9 años y 7 meses
3	1 158,00	16,54	9 años y 8 meses
4	1 271,32	16,54	9 años y 7 meses
5	1 372,16	16,41	9 años 4 meses
6	1 459,05	16,20	9 años
7	1 530,43	15,91	10 años y 8 meses
8	1 584,53	15,58	10 años y 2 meses
9	1 619,45	15,21	11 años y 8 meses
10	1 805,78	15,16	11 años y 2 meses
11	1 607,60	14,33	12 años y 4 meses
12	1 586,88	13,94	13 años y 9 meses
13	1 521,73	13,48	14 años y 11 meses
14	1 424,50	13,01	14 años y 1 mes
15	1 291,82	12,54	15 años y 2 meses
16	1 119,92	12,05	16 años 3 meses
17	904,71	11,54	17 años 3 meses
18	641,65	11,03	18 años 2 meses
19	325,75	10,49	19 años 1 mes
20	-48,49	9,93	mayor a 20 años

Fuente: Elaboración propia

4.1.8 Verificación de Capacidades de Planta

A los resultados obtenidos de la simulación, se hizo la verificación de la condición de que las capacidades de planta en cada uno de los 20 casos deben estar comprendidas entre la capacidad mínima (Cmin) y la capacidad máxima comercial (Cmax). En las siguientes tablas se ve resaltadas aquellas

capacidades que están fuera del rango indicado, ya sea que son menores de la capacidad mínima o mayores a la capacidad máxima:

Tabla 13.- Verificación de capacidades del Caso 1

Planta	Capacidad (t/año)	Cmin	Cmax
Pirólisis	575 077	182 000	1 500 000
PEAD	187 243	300 000	600 000
PEBD	271 417	50 000	400 000
VCM	179 199	10 000	650 000
PVC	178 663	50 000	650 000
OE	64 997	20 000	320 000
EG	64 997	10 000	750 000
PET	192 299	20 000	600 000

Nota: La cifra resaltada es menor que la Cap mínima.

Tabla 14.- Verificación de capacidades del Caso 2

Planta	Capacidad (t/año)	Cmin	Cmax
Pirólisis	640 685	182 000	1 500 000
PEAD	207 840	300 000	600 000
PEBD	303 987	50 000	400 000
VCM	195 327	10 000	650 000
PVC	194 743	50 000	650 000
OE	74 097	20 000	320 000
EG	74 097	10 000	750 000
PET	219 221	20 000	600 000

Nota: La cifra resaltada es menor que la Cap mínima.

Tabla 15.- Verificación de capacidades del Caso 3

Planta	Capacidad (t/año)	Cmin	Cmax
Pirólisis	713 871	182 000	1 500 000
PEAD	230 703	300 000	600 000
PEBD	340 465	50 000	400 000
VCM	212 907	10 000	650 000
PVC	212 270	50 000	650 000
OE	84 470	20 000	320 000
EG	84 470	10 000	750 000
PET	249 912	20 000	600 000

Nota: La cifra resaltada es menor que la Cap mínima.

Tabla 16 .- Verificación de capacidades del Caso 4

Planta	Capacidad (t/año)	Cmin	Cmax
Pirólisis	795 520	182 000	1 500 000
PEAD	256 080	300 000	600 000
PEBD	381 321	50 000	400 000
VCM	232 068	10 000	650 000
PVC	231 374	50 000	650 000
OE	96 296	20 000	320 000
EG	96 296	10 000	750 000
PET	284 899	20 000	600 000

Nota: La cifra resaltada es menor que la Cap mínima.

Tabla 17.- Verificación de capacidades del Caso 5

Planta	Capacidad (t/año)	Cmin	Cmax
Pirólisis	886 620	182 000	1 500 000
PEAD	284 249	300 000	600 000
PEBD	427 079	50 000	400 000
VCM	252 954	10 000	650 000
PVC	252 198	50 000	650 000
OE	109 877	20 000	320 000
EG	109 877	10 000	750 000
PET	324 785	20 000	600 000

Nota: La cifra resaltada es menor que la Cap mínima.
La cifra resaltada es mayor que la Cap máxima.

Tabla 18.- Verificación de capacidades del Caso 6

Planta	Capacidad (t/año)	Cmin	Cmax
Pirólisis	988 280	182 000	1 500 000
PEAD	315 516	300 000	600 000
PEBD	478 329	50 000	400 000
VCM	275 720	10 000	650 000
PVC	274 496	50 000	650 000
OE	125 146	20 000	320 000
EG	125 146	10 000	750 000
PET	370 255	20 000	600 000

Nota: La cifra resaltada es mayor que la Cap máxima.

Tabla 19.- Verificación de capacidades del Caso 7

Planta	Capacidad (t/año)	Cmin	Cmax
Pirólisis	1 101 736	182 000	1 500 000
PEAD	350 223	300 000	600 000
PEBD	535 728	50 000	400 000
VCM	300 535	10 000	650 000
PVC	299 636	50 000	650 000
OE	142 667	20 000	320 000
EG	142 667	10 000	750 000
PET	422 091	20 000	600 000

Nota: La cifra resaltada es mayor que la Cap máxima.

Tabla 20.- Verificación de capacidades del Caso 8

Planta	Capacidad (t/año)	Cmin	Cmax
Pirólisis	1 228 374	182 000	1 500 000
PEAD	388 747	300 000	600 000
PEBD	600 016	50 000	400 000
VCM	327 583	10 000	650 000
PVC	326 604	50 000	650 000
OE	162 640	20 000	320 000
EG	162 640	10 000	750 000
PET	481 184	20 000	600 000

Nota: La cifra resaltada es mayor que la Cap máxima.

Tabla 21.- Verificación de capacidades del Caso 9

Planta	Capacidad (t/año)	Cmin	Cmax
Pirólisis	1 369 741	182 000	1 500 000
PEAD	431 509	300 000	600 000
PEBD	672 018	50 000	400 000
VCM	357 066	10 000	650 000
PVC	355 998	50 000	650 000
OE	185 410	20 000	320 000
EG	185 410	10 000	750 000
PET	548 549	20 000	600 000

Nota: La cifra resaltada es mayor que la Cap máxima.

Tabla 22.- Verificación de capacidades del Caso 10

Planta	Capacidad (t/año)	Cmin	Cmax
Pirólisis	1 527 570	182 000	1 500 000
PEAD	478 975	300 000	600 000
PEBD	752 660	50 000	400 000
VCM	389 202	10 000	650 000
PVC	388 038	50 000	650 000
OE	211 367	20 000	320 000
EG	211 367	10 000	750 000
PET	625 346	20 000	600 000

Nota: Las cifras resaltadas son mayores que la Cap máxima.

Tabla 23.- Verificación de capacidades del Caso 11

Planta	Capacidad (t/año)	Cmin	Cmax
Pirólisis	1 703 800	182 000	1 500 000
PEAD	531 663	300 000	600 000
PEBD	842 979	50 000	400 000
VCM	424 230	10 000	650 000
PVC	422 961	50 000	650 000
OE	240 958	20 000	320 000
EG	240 958	10 000	750 000
PET	712 895	20 000	600 000

Nota: Las cifras resaltadas son mayores que la Cap máxima.

Tabla 24.- Verificación de capacidades del Caso 12

Planta	Capacidad (t/año)	Cmin	Cmax
Pirólisis	1 900 598	182 000	1 500 000
PEAD	590 146	300 000	600 000
PEBD	944 136	50 000	400 000
VCM	462 411	10 000	650 000
PVC	461 028	50 000	650 000
OE	274 693	20 000	320 000
EG	274 693	10 000	750 000
PET	812 700	20 000	600 000

Nota: Las cifras resaltadas son mayores que la Cap máxima.

Tabla 25.- Verificación de capacidades del Caso 13

Planta	Capacidad (t/año)	Cmin	Cmax
Pirólisis	2 120 393	182 000	1 500 000
PEAD	655 062	300 000	600 000
PEBD	1 057 433	50 000	400 000
VCM	504 028	10 000	650 000
PVC	502 520	50 000	650 000
OE	313 149	20 000	320 000
EG	313 149	10 000	750 000
PET	926 478	20 000	600 000

Nota: Las cifras resaltadas son mayores que la Cap máxima.

Tabla 26.- Verificación de capacidades del Caso 14

Planta	Capacidad (t/año)	Cmin	Cmax
Pirólisis	2 365 900	182 000	1 500 000
PEAD	727 118	300 000	600 000
PEBD	1 184 325	50 000	400 000
VCM	549 390	10 000	650 000
PVC	547 747	50 000	650 000
OE	356 990	20 000	320 000
EG	356 990	10 000	750 000
PET	1 056 185	20 000	600 000

Nota: Las cifras resaltadas son mayores que la Cap máxima.

Tabla 27.- Verificación de capacidades del Caso 15

Planta	Capacidad (t/año)	Cmin	Cmax
Pirólisis	2 640 161	182 000	1 500 000
PEAD	807 101	300 000	600 000
PEBD	1 326 444	50 000	400 000
VCM	598 835	10 000	650 000
PVC	597 044	50 000	650 000
OE	406 969	20 000	320 000
EG	406 969	10 000	750 000
PET	1 204 050	20 000	600 000

Nota: Las cifras resaltadas son mayores que la Cap máxima.

Tabla 28.- Verificación de capacidades del Caso 16

Planta	Capacidad (t/año)	Cmin	Cmax
Pirólisis	<u>2 946 580</u>	182 000	1 500 000
PEAD	<u>895 882</u>	300 000	600 000
PEBD	<u>1 485 617</u>	50 000	400 000
VCM	<u>652 730</u>	10 000	650 000
PVC	<u>650 778</u>	50 000	650 000
OE	<u>463 945</u>	20 000	320 000
EG	463 945	10 000	750 000
PET	<u>1 372 618</u>	20 000	600 000

Nota: Las cifras resaltadas son mayores que la Cap máxima.

Tabla 29.- Verificación de capacidades del Caso 17

Planta	Capacidad (t/año)	Cmin	Cmax
Pirólisis	<u>3 288 969</u>	182 000	1 500 000
PEAD	<u>994 430</u>	300 000	600 000
PEBD	<u>1 663 891</u>	50 000	400 000
VCM	<u>711 476</u>	10 000	650 000
PVC	<u>709 348</u>	50 000	650 000
OE	<u>528 897</u>	20 000	320 000
EG	528 897	10 000	750 000
PET	<u>1 564 784</u>	20 000	600 000

Nota: Las cifras resaltadas son mayores que la Cap máxima.

Tabla 30.- Verificación de capacidades del Caso 18

Planta	Capacidad (t/año)	Cmin	Cmax
Pirólisis	<u>3 671 594</u>	182 000	1 500 000
PEAD	<u>1 103 817</u>	300 000	600 000
PEBD	<u>1 863 558</u>	50 000	400 000
VCM	<u>775 509</u>	10 000	650 000
PVC	<u>773 189</u>	50 000	650 000
OE	<u>602 943</u>	20 000	320 000
EG	602 943	10 000	750 000
PET	<u>1 783 854</u>	20 000	600 000

Nota: Las cifras resaltadas son mayores que la Cap máxima.

Tabla 31.- Verificación de capacidades del Caso 19

Planta	Capacidad (t/año)	Cmin	Cmax
Pirólisis	4 099 235	182 000	1 500 000
PEAD	1 225 237	300 000	600 000
PEBD	2 087 185	50 000	400 000
VCM	845 305	10 000	650 000
PVC	842 776	50 000	650 000
OE	687 355	20 000	320 000
EG	687 355	10 000	750 000
PET	2 033 593	20 000	600 000

Nota: Las cifras resaltadas son mayores que la Cap máxima.

Tabla 32.- Verificación de capacidades del Caso 20

Planta	Capacidad (t/año)	Cmin	Cmax
Pirólisis	4 577 246	182 000	1 500 000
PEAD	1 360 013	300 000	600 000
PEBD	2 337 647	50 000	400 000
VCM	921 382	10 000	650 000
PVC	918 626	50 000	650 000
OE	783 584	20 000	320 000
EG	783 584	10 000	750 000
PET	2 318 296	20 000	600 000

Nota: Las cifras resaltadas son mayores que la Cap máxima.

De las tablas expuestas líneas arriba, se puede observar que en algunos casos la capacidad está por debajo de la mínima, en la mayoría de los casos, las capacidades resultantes superaban la capacidad máxima comercial, por lo que se procedió a desdoblar esas capacidades en dos o más plantas hasta cubrir la demanda, descartando aquellos casos, en los cuales la capacidad está por debajo de la mínima.

Los casos seleccionados fueron: Caso 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19 y 20; a los cuales se realizó la simulación con las nuevas plantas y los resultados obtenidos se procedió a verificar las capacidades, resultando de la siguiente manera:

Tabla 33.- Verificación de capacidades del Caso 6 (Capacidades divididas)

Planta	Capacidad de planta total requerida (t/año)	Cantidad Plantas	Capacidad de cada planta (t/año)	Capacidad Mínima (t/año)	Capacidad Máxima (t/año)
Pirólisis	988 280	1	988280	182 000	1 500 000
PEAD	315 516	1	315516	300 000	600 000
PEBD	478 329	2	239165	50 000	400 000
VCM	275 720	1	275720	10 000	650 000
PVC	274 496	1	274496	50 000	650 000
OE	125 146	1	125146	20 000	320 000
EG	125 146	1	125146	10 000	750 000
PET	370 255	1	370255	20 000	600 000

Tabla 34.- Verificación de capacidades del Caso 7 (Capacidades divididas)

Planta	Capacidad de planta total requerida (t/año)	Cantidad Plantas	Capacidad de cada planta (t/año)	Capacidad Mínima (t/año)	Capacidad Máxima (t/año)
Pirólisis	1 101 736	1	1 101 736	182 000	1 500 000
PEAD	350 223	1	350 223	300 000	600 000
PEBD	535 728	2	267 864	50 000	400 000
VCM	300 535	1	300 535	10 000	650 000
PVC	299 636	1	299 636	50 000	650 000
OE	142 667	1	142 667	20 000	320 000
EG	142 667	1	142 667	10 000	750 000
PET	422 091	1	422 091	20 000	600 000

Tabla 35.- Verificación de capacidades del Caso 8 (Capacidades divididas)

Planta	Capacidad de planta total requerida (t/año)	Cantidad Plantas	Capacidad de cada planta (t/año)	Capacidad Mínima (t/año)	Capacidad Máxima (t/año)
Pirólisis	1 228 374	1	1 228 374	182 000	1 500 000
PEAD	388 747	1	388 747	300 000	600 000
PEBD	600 016	2	300 008	50 000	400 000
VCM	327 583	1	327 583	10 000	650 000
PVC	326 604	1	326 604	50 000	650 000
OE	162 640	1	162 640	20 000	320 000
EG	162 640	1	162 640	10 000	750 000
PET	481 184	1	481 184	20 000	600 000

Tabla 36.- Verificación de capacidades del Caso 9 (Capacidades divididas)

Planta	Capacidad de planta total requerida (t/año)	Cantidad Plantas	Capacidad de cada planta (t/año)	Capacidad Mínima (t/año)	Capacidad Máxima (t/año)
Pirólisis	1 369 741	1	1 369 741	182 000	1 500 000
PEAD	431 509	1	431 509	300 000	600 000
PEBD	672 018	2	336 009	50 000	400 000
VCM	357 066	1	357 066	10 000	650 000
PVC	355 998	1	355 998	50 000	650 000
OE	185 410	1	185 410	20 000	320 000
EG	185 410	1	185 410	10 000	750 000
PET	548 549	1	548 549	20 000	600 000

Tabla 37- Verificación de capacidades del Caso 10 (Capacidades divididas)

Planta	Capacidad de planta total requerida (t/año)	Cantidad Plantas	Capacidad de cada planta (t/año)	Capacidad Mínima (t/año)	Capacidad Máxima (t/año)
Pirólisis	1 527 570	2	763 785	182 000	1 500 000
PEAD	478 975	1	478 975	300 000	600 000
PEBD	752 660	2	376 330	50 000	400 000
VCM	389 202	1	389 202	10 000	650 000
PVC	388 038	1	388 038	50 000	650 000
OE	211 367	1	211 367	20 000	320 000
EG	211 367	1	211 367	10 000	750 000
PET	625 346	2	312 873	20 000	600 000

Tabla 38- Verificación de capacidades del Caso 11 (Capacidades divididas)

Planta	Capacidad de planta total requerida (t/año)	Cantidad Plantas	Capacidad de cada planta (t/año)	Capacidad Mínima (t/año)	Capacidad Máxima (t/año)
Pirólisis	1 703 800	2	851 900	182 000	1 500 000
PEAD	531 663	1	531 663	300 000	600 000
PEBD	842 979	3	280 993	50 000	400 000
VCM	424 230	1	424 230	10 000	650 000
PVC	422 961	1	422 961	50 000	650 000
OE	240 958	1	240 958	20 000	320 000
EG	240 958	1	240 958	10 000	750 000
PET	712 895	2	356 448	20 000	600 000

Tabla 39- Verificación de capacidades del Caso 12 (Capacidades divididas)

Planta	Capacidad de planta total requerida (t/año)	Cantidad Plantas	Capacidad de cada planta (t/año)	Capacidad Mínima (t/año)	Capacidad Máxima (t/año)
Pirólisis	1 900 598	2	950 299	182 000	1 500 000
PEAD	590 146	1	590 146	300 000	600 000
PEBD	944 136	3	314 712	50 000	400 000
VCM	462 411	1	462 411	10 000	650 000
PVC	461 028	1	461 028	50 000	650 000
OE	274 693	1	274 693	20 000	320 000
EG	274 693	1	274 693	10 000	750 000
PET	812 700	2	406 350	20 000	600 000

Tabla 40- Verificación de capacidades del Caso 13 (Capacidades divididas)

Planta	Capacidad de planta total requerida (t/año)	Cantidad Plantas	Capacidad de cada planta (t/año)	Capacidad Mínima (t/año)	Capacidad Máxima (t/año)
Pirólisis	2 120 393	2	1 060 197	182 000	1 500 000
PEAD	655 062	2	327 531	300 000	600 000
PEBD	1 057 433	3	352 478	50 000	400 000
VCM	504 028	1	504 028	10 000	650 000
PVC	502 520	1	502 520	50 000	650 000
OE	313 149	1	313 149	20 000	320 000
EG	313 149	1	313 149	10 000	750 000
PET	926 478	2	463 239	20 000	600 000

Tabla 41- Verificación de capacidades del Caso 14 (Capacidades divididas)

Planta	Capacidad de planta total requerida (t/año)	Cantidad Plantas	Capacidad de cada planta (t/año)	Capacidad Mínima (t/año)	Capacidad Máxima (t/año)
Pirólisis	2 365 900	2	1 182 950	182 000	1 500 000
PEAD	727 118	2	363 559	300 000	600 000
PEBD	1 184 325	3	394 775	50 000	400 000
VCM	549 390	1	549 390	10 000	650 000
PVC	547 747	1	547 747	50 000	650 000
OE	356 990	2	178 495	20 000	320 000
EG	356 990	1	356 990	10 000	750 000
PET	1 056 185	2	528 093	20 000	600 000

Tabla 42- Verificación de capacidades del Caso 15 (Capacidades divididas)

Planta	Capacidad de planta total requerida (t/año)	Cantidad Plantas	Capacidad de cada planta (t/año)	Capacidad Mínima (t/año)	Capacidad Máxima (t/año)
Pirólisis	<u>2 640 161</u>	2	1 320 081	182 000	1 500 000
PEAD	<u>807 101</u>	2	403 551	300 000	600 000
PEBD	<u>1 326 444</u>	4	331 611	50 000	400 000
VCM	598 835	1	598 835	10 000	650 000
PVC	597 044	1	597 044	50 000	650 000
OE	<u>406 969</u>	2	203 485	20 000	320 000
EG	406 969	1	406 969	10 000	750 000
PET	<u>1 204 050</u>	3	401 350	20 000	600 000

Tabla 43- Verificación de capacidades del Caso 16 (Capacidades divididas)

Planta	Capacidad de planta total requerida (t/año)	Cantidad Plantas	Capacidad de cada planta (t/año)	Capacidad Mínima (t/año)	Capacidad Máxima (t/año)
Pirólisis	<u>2 946 580</u>	2	1 473 290	182 000	1 500 000
PEAD	<u>895 882</u>	2	447 941	300 000	600 000
PEBD	<u>1 485 617</u>	4	371 404	50 000	400 000
VCM	<u>652 730</u>	2	326 365	10 000	650 000
PVC	<u>650 778</u>	2	325 389	50 000	650 000
OE	<u>463 945</u>	2	231 973	20 000	320 000
EG	463 945	1	463 945	10 000	750 000
PET	<u>1 372 618</u>	3	457 539	20 000	600 000

Tabla 44- Verificación de capacidades del Caso 17 (Capacidades divididas)

Planta	Capacidad de planta total requerida (t/año)	Cantidad Plantas	Capacidad de cada planta (t/año)	Capacidad Mínima (t/año)	Capacidad Máxima (t/año)
Pirólisis	<u>3 288 969</u>	3	1 096 323	182 000	1 500 000
PEAD	<u>994 430</u>	2	497 215	300 000	600 000
PEBD	<u>1 663 891</u>	5	332 778	50 000	400 000
VCM	<u>711 476</u>	2	355 738	10 000	650 000
PVC	<u>709 348</u>	2	354 674	50 000	650 000
OE	<u>528 897</u>	2	264 449	20 000	320 000
EG	528 897	1	528 897	10 000	750 000
PET	<u>1 564 784</u>	3	521 595	20 000	600 000

Tabla 45- Verificación de capacidades del Caso 18 (Capacidades divididas)

Planta	Capacidad de planta total requerida (t/año)	Cantidad Plantas	Capacidad de cada planta (t/año)	Capacidad Mínima (t/año)	Capacidad Máxima (t/año)
Pirólisis	<u>3 671 594</u>	3	1 223 865	182 000	1 500 000
PEAD	<u>1 103 817</u>	2	551 909	300 000	600 000
PEBD	<u>1 863 558</u>	5	372 712	50 000	400 000
VCM	<u>775 509</u>	2	387 755	10 000	650 000
PVC	<u>773 189</u>	2	386 595	50 000	650 000
OE	<u>602 943</u>	2	301 472	20 000	320 000
EG	602 943	1	602 943	10 000	750 000
PET	<u>1 783 854</u>	3	594 618	20 000	600 000

Tabla 46- Verificación de capacidades del Caso 19 (Capacidades divididas)

Planta	Capacidad de planta total requerida (t/año)	Cantidad Plantas	Capacidad de cada planta (t/año)	Capacidad Mínima (t/año)	Capacidad Máxima (t/año)
Pirólisis	<u>4 099 235</u>	3	1 366 412	182 000	1 500 000
PEAD	<u>1 225 237</u>	3	408 412	300 000	600 000
PEBD	<u>2 087 185</u>	6	347 864	50 000	400 000
VCM	<u>845 305</u>	2	422 653	10 000	650 000
PVC	<u>842 776</u>	2	421 388	50 000	650 000
OE	<u>687 355</u>	3	229 118	20 000	320 000
EG	687 355	1	687 355	10 000	750 000
PET	<u>2 033 593</u>	4	508 398	20 000	600 000

Tabla 47- Verificación de capacidades del Caso 20 (Capacidades divididas)

Planta	Capacidad de planta total requerida (t/año)	Cantidad Plantas	Capacidad de cada planta (t/año)	Capacidad Mínima (t/año)	Capacidad Máxima (t/año)
Pirólisis	<u>4 577 246</u>	4	1 144 312	182 000	1 500 000
PEAD	<u>1 360 013</u>	3	453 338	300 000	600 000
PEBD	<u>2 337 647</u>	6	389 608	50 000	400 000
VCM	<u>921 382</u>	2	460 691	10 000	650 000
PVC	<u>918 626</u>	2	459 313	50 000	650 000
OE	<u>783 584</u>	3	261 195	20 000	320 000
EG	<u>783 584</u>	2	391 792	10 000	750 000
PET	<u>2 318 296</u>	4	579 574	20 000	600 000

4.2 Análisis y Discusión

4.2.1 Análisis de Resultados

Como se puede observar, las demandas proyectadas de los productos finales tienen una tendencia diferente para cada producto, siendo en todos los casos los crecimientos lineales. Sin embargo, el modelo matemático puede aceptar cualquier tipo de crecimiento o tipo de proyección de las demandas.

En los balances de materiales, mediante los diagramas de bloque se pueden conocer la cantidad de materias primas requeridas para cada uno de los casos. En las figuras del 22 al 41, se puede ver las cantidades en miles de toneladas por año para cada uno de los 20 casos. En la tabla 8 se resume las capacidades de planta para cada uno de los casos, calculado en base al balance de materiales, datos que sirvieron para determinar las inversiones para cada una de las plantas.

En el cuadro de Inversiones, el modelo calculó dichos valores en función a los métodos de Williams (factor Costo-Capacidad), actualizando al año cero (2016) las inversiones para cada caso. Se puede ver las inversiones en millones de dólares para cada caso y para cada planta, observándose los efectos de la economía de escala, pues tomando como ejemplo la planta de pirólisis, se ve que mientras la relación de capacidades de planta entre el caso 1 y 20 es de 8, la relación de inversiones es de 3,5.

Respecto al cuadro de ingresos que se ve en la tabla 10, que es obtenido por las ventas de los productos finales y los subproductos, se puede observar que para un caso determinado (ejemplo caso 10), los ingresos se incrementan año a año desde el año cero hasta el año 9, manteniéndose constantes a partir del año 10 hasta el final de la vida del proyecto; esta situación se da en todos los casos, siendo así que para el caso 20 el incremento es durante los 20 años.

Por su parte, en el cuadro de egresos que se puede ver en la tabla 11, que corresponde al costo de las materias primas e insumos y los costos fijos, se puede observar, que al igual que el cuadro de ingresos, para cada caso, las cifras crecen hasta el año que corresponde a ese caso, luego del cual se mantienen constante hasta el final de la vida del proyecto.

4.2.2 Análisis de la Evaluación Económica final

Con todos los resultados expuestos líneas arriba, se realizó las evaluaciones económicas, que se muestran en la tabla 48, habiéndose considerado como criterios de evaluación, el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI).

Tabla 48.- Evaluación Económica final

Caso	VAN al 10% (10 ⁶ US\$)	TIR (%)	PRI
6	1 390,44	15,77	8 años y 5 meses
7	1 456,98	15,50	9 años y 9 meses
8	1 505,92	15,19	10 años y 2 meses
9	1 535,31	14,83	10 años y 9 meses
10	1 203,10	13,21	12 años y 9 meses
11	1 091,33	12,63	13 años y 6 meses
12	1 016,19	12,26	14 años y 3 meses
13	729,15	11,45	15 años y 10 meses
14	380,89	10,68	15 años y 10 meses
15	-80,30	9,87	18 años y 9 mes
16	-385,20	9,43	mayor a 20 años
17	-1278,32	8,19	mayor a 20 años
18	-1389,62	8,24	mayor a 20 años
19	-2526,90	7,16	mayor a 20 años
20	-3624,70	6,29	mayor a 20 años

Al respecto, en dicha tabla se puede observar que considerando como criterio de evaluación el VAN, el mayor valor obtenido (VAN=1535) corresponde al caso y año 9, mientras que, considerando el TIR, el mayor valor (TIR=15,77%) corresponde al caso y año 6. Finalmente, considerando el PRI, el período más corto (PRI 8 años 5 meses) corresponde al caso y año 6.

Ante esta diversidad de resultados, se optó seleccionar aquel proyecto que tenga mayor VAN positivo, tal como lo recomienda Lledó ⁽³¹⁾.

Por consiguiente, el caso 9 es el seleccionado como el Complejo Petroquímico con capacidades optimas, como se muestra a continuación:

Tabla 49.- Capacidades Optimas del Complejo Petroquímico

Planta	Capacidad de planta total requerida (t/año)	Cantidad Plantas	Capacidad de cada planta (t/año)	Capacidad Mínima (t/año)	Capacidad Máxima (t/año)
Pirólisis	1 369 741	1	1 369 741	182 000	1 500 000
PEAD	431 509	1	431 509	300 000	600 000
PEBD	672 018	2	336 009	50 000	400 000
VCM	357 066	1	357 066	10 000	650 000
PVC	355 998	1	355 998	50 000	650 000
OE	185 410	1	185 410	20 000	320 000
EG	185 410	1	185 410	10 000	750 000
PET	548 549	1	548 549	20 000	600 000

VAN = 1 535,31 X10⁶ US\$

TIR= 14,83%

PRI=10 años 9 meses

CAPITULO 5. CONCLUSIONES

- El complejo petroquímico al cual se aplicó el modelo matemático diseñado por los tesisistas en una hoja de cálculo de Excel, tiene como productos finales: PEAD, PEBD, PVC y PET.
- El cálculo de la capacidad óptima se realizó en base a información de entrada como las demandas proyectadas de los productos petroquímicos finales, las tecnologías de los procesos petroquímicos (procesos, inversiones, capacidades de planta, rendimientos, costos de operación, etc.), datos económicos y otros.
- Las plantas operarán al principio por debajo de su capacidad de diseño, con capacidades ociosas durante los primeros años de operación del complejo petroquímico, hasta el año 9. en la que llegan a operar a plena capacidad hasta el término de la vida del proyecto.
- Aplicando el modelo matemático al mercado peruano de productos petroquímicos finales del estudio, considerando que la ingeniería y construcción del complejo petroquímico considerado entre los años 2014 al 2016, siendo el periodo de operación del complejo petroquímicos considerado entre el 2017 (año 1) hasta el 2036 (año 20) y considerando el VAN como criterio de evaluación.
- Luego del análisis de las capacidades de planta para cada uno de los casos, se determinó que ninguno de los casos cumple totalmente con los criterios de tamaños mínimos y máximos comerciales para cada una de las plantas del complejo petroquímico, por lo que se optó por tener dos o más plantas en paralelo para estos casos. Asimismo, hay algunas plantas cuyo tamaño de planta es inferior al tamaño mínimo comercial, los cuales se descartó.
- El criterio de selección de caso óptimo fue el VAN, siendo así que el caso seleccionado es el caso 9, resultando así las capacidades óptimas para el complejo petroquímico, descritas en la tabla 49.
- El Modelo matemático propuesto puede ser usado para otro tipo de instalaciones industriales, pues el algoritmo considera los elementos fundamentales de determinación de tamaño de planta y evaluación económica.

CAPITULO 6. RECOMENDACIONES

- Se sugiere la aplicación del modelo matemático formulado en la determinación de los tamaños óptimos en el estudio de nuevas plantas industriales, químicas o petroquímicas.
- Propiciar la ejecución de trabajos de investigación para el desarrollo de otros módulos que puedan incorporarse al modelo matemático, tales como:
 - Ingreso de series históricas de demanda de productos petroquímicos en vez de las demandas proyectadas.
 - Creación de un módulo de materias primas que permita seleccionar la materia prima a utilizarse en la planta de pirólisis, de manera que pueda utilizarse otras materias primas además del etano (ejemplo propano, butano, gasolinas, gasóleos, etc., o mezcla de ellos).
 - Creación de un módulo de disponibilidad local de materias primas e insumos requeridos, que permitan visualizar si la disponibilidad es mayor a los requerimientos del complejo petroquímico.
- Mejorar la precisión de los datos de entrada al modelo matemático, tomando en consideración que en este estudio se han ingresado datos a nivel de perfil de proyecto, pudiendo ser datos de un estudio de factibilidad; los cuales definirán con mayor precisión los montos de inversión, localización del proyecto, etc.
- Modificar el modelo matemático para que pueda satisfacer los requerimientos locales de materias primas o insumos para otro tipo de industrias, aprovechando la ventaja de que el modelo calcula exactamente lo justo y necesario para la producción de los productos finales requeridos.

CAPITULO 7. LITERATURA CITADA

- 1.- Alfaro G., González F. 2000. Metodología para la determinación del Tamaño de Plantas Industriales, Michiacán. México. *Revista de la Universidad Michiacana de San Nicolás de Hidalgo*, 6:93-106.
- 2.- Poveda G. 2006. Modelo de planta óptima multiproducto, Antioquia, Colombia. *Revista Dyna* 148: 29 - 38.
- 3.- Ormeño V. 2008. Regulación del gas natural en el Perú. Editorial OSINERGMIN y TepsGroup SAC., Lima, Perú, 190 pp.
- 4.- Poveda, G., 2000. Tamaño óptimo de plantas industriales, Antioquia, Colombia. *Revista Dyna* 130: 21 - 30.
- 5.- Restrepo J., Uribe G., 2001. Análisis económico de plantas industriales, Antioquia, Colombia. *Revista Dyna* 134: 53 - 63.
- 6.- Poveda G. 2003. Capacidad óptima de plantas industriales, Bogotá, Colombia. *Revista de Ingeniería de la Universidad de los Andes* 18: 148 -155.
- 7.- Rossouw, R.F. 2007. Design and Analysis for efficient simulation in petrochemical industry, tesis de maestría, The Vaal Triangle Campus of the North-West University. Potchefstroom, Sudáfrica.
- 8.- Moreira, D. 2007. Modelado y desarrollo de un modelo computacional de síntesis interactivo y multirrelacional para guiar la actividad de diseño en la fase conceptual [tesis doctoral]. Universidad Jaume I, Castellón, España.
- 9.- Almansoor, A. 2008. Planning of Petrochemical Industry under Environmental Risk and Safety Considerations, tesis de maestria, Dpto. Ingeniería Química, Universidad de Waterloo, Ontario, Canadá.
- 10.- Estepa, L.,Rodríguez, L. 2009. La teoría de restricciones para mejorar la productividad de los procesos de manufactura en una empresa de alimentos de consumo masivo, tesis de grado, Universidad de la Sabana, Cundinamarca, Colombia.
- 11.- Matar, S. & Hatch, L. 2001. Chemistry of petrochemical process. Massachusetts, EEUU. Editorial Gulf Professional Publishing, 392 pp.
- 12.- Otamendi J. 2002. Simulación: una herramienta eficaz y eficiente para la toma de decisiones, Madrid, España. *Boletín de la Sociedad de Estadística e Investigación Operativa* vol. 18, N°1: 1-8.

- 13.- Pontificia Universidad de Valparaíso, Chile. Fecha de consulta: 26/06/13, http://www.material_simulacion.ucv.cl/tipos_de_modelos_matematicos.htm.
- 14.- Maldonado C., Gómez N. 2010. Modelamiento y simulación de sistemas complejos, Bogotá, Colombia. Documento de Investigación No. 65 de la Universidad del Rosario - Laboratorio de Modelamiento y Simulación.
- 15.- Martínez, V., Alonso, P. 2000. Simulación de procesos en Ingeniería Química. México D.F., México. Editorial Plaza y Valdés. 187 pp.
- 16.- Ramos, A., Sánchez, P. y otros. 2010. Modelos matemáticos de optimización. Madrid, España. Universidad Pontificia Comillas. 53 pp.
- 17.- Universidad de Salamanca, España, Diseño de equipos e instalaciones, Tema 2: Estimación de costes y rentabilidad de equipos. Fecha de consulta: 31/10/13. http://web.usal.es/~tonidm/DEI_02_Costes.pdf
- 18.- Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires – Argentina. Fecha de consulta: 03/11/13; <http://www.fio.unicen.edu.ar/usuario/cgely/q130/Apuntes/Elementos%20para%20el%20Análisis%20Economico.pdf>.
- 19.- Farrar, G. 2013. Nelson-Farrar Quarterly Costimating: Refinery construction indexes listed for 80+ years, Houston, Texas, EE.UU. Revista Oil and Gas Journal 111: Issue 1.
- 20.- Fontaine, E. 1999. Evaluación social de proyectos, Bogotá, Colombia. Editorial Alfaomega grupo editor S.A. de C.V.
- 21.- Ministerio Energía y Minas. 2002. Decreto Supremo N° 032-2002-EM: Glosario, siglas y abreviaturas del subsector hidrocarburos, Lima, Perú.
- 22.- Real Academia Española. 2001. Diccionario de la lengua española (22ª Ed.). Editorial Espasa Libros S.L.U. Madrid, España. 2448 pp.
- 23.- García. S. 2009. Colección mantenimiento industrial - volumen 2: Paradas programadas y grandes revisiones. Madrid, España. Editorial Renovetec, 34 pp.
- 24.- Cañete.B, Oteiza. P y otros. 2013. Gasolina Natural: Un sustituto para la producción de etileno en Argentina. Petroquímica, Petróleo, Gas & Química. (04/02/13) Disponible en: www.revistapetroquímica.com
- 25.- Gulf Publishing (2010) Petrochemical processes 2010.

- 26.- Hasenclever.L, López.A & Clemente de Oliveira.J (1999) Impacto del MERCOSUR sobre la dinámica del sector petroquímico. Integración y Comercio N° 7/8 Buenos Aires.
- 27.- Gulf Publishing (2001) Petrochemical processes 2001. Hydrocarbon Processing, 80, 69-138.
- 28.- Gulf Publishing (2005) Petrochemical processes 2005.
- 29.- Instituto petroquímico Argentino (1999). La República Argentina y su industria petroquímica.
- 30.- Louw, J.J. 2006. Advanced supply chain planning processes and decision support systems for large-scale petrochemical companies, tesis de doctorado, The University of Stellenbosh. Stellenbosh, Sudáfrica.
- 31.- Lledó, P. 2013. Comparación entre distintos Criterios de decisión (VAN, TIR y PRI). www.masconsulting.com.ar leído el 25/10/13.
- 32.- Chemical Industrial Division (2000) HPI chemical conversion factors and yields. California – U.S.A.

ANEXOS

ANEXO 1

GLOSARIO

A -

ACTIVIDAD DE HIDROCARBUROS: Es la operación relacionada con la Exploración, Explotación, Procesamiento o Refinación, Almacenamiento, Transporte, Comercialización y Distribución de Hidrocarburos. ⁽²¹⁾

ÁCIDO TEREFTÁLICO: El ácido tereftálico es un ácido dicarboxílico aromático de fórmula $C_6H_4(COOH)_2$. Este ácido se usa principalmente como precursor del PET, usado para hacer recubrimientos y botellas de plástico. Es uno de los 3 isómeros del ácido ftálico.

ALCANOS: Hidrocarburo alifático saturado. ⁽²²⁾

Son hidrocarburos saturados acíclicos, es decir, compuestos de cadena abierta cuyas estructuras contienen sólo átomos de carbono e hidrógeno, unidos a través de enlaces sencillos.

Tomando en cuenta la forma en que los átomos de carbono están unidos en la molécula, los alcanos pueden ser *lineales* (únicamente contienen carbonos primarios y secundarios) o *ramificados* (contienen al menos un carbono terciario o cuaternario). Su fórmula general es C_nH_{2n+2} .

ALGORITMO: Conjunto ordenado y finito de operaciones que permite hallar la solución de un problema. Método y notación en las distintas formas del cálculo. ⁽²²⁾

ALQUENOS: Los alquenos son hidrocarburos insaturados que tienen uno o varios dobles enlaces carbono-carbono en su molécula. Se puede decir que un alqueno no es más que un alcano que ha perdido dos átomos de hidrógeno produciendo como resultado un enlace doble entre dos carbonos. Los alquenos cíclicos reciben el nombre de cicloalquenos.

Antiguamente se les conocía como olefinas dadas las propiedades que presentaban sus representantes más simples, principalmente el eteno, para reaccionar con halógenos y producir óleos.

AROMATICOS: Se dice de las moléculas cíclicas, no saturadas, cuya estabilidad es superior a la de las estructuras de cadena abierta con igual número de enlaces múltiples.

B -

BARRIL (bl): Es la unidad de medida de capacidad de los Hidrocarburos Líquidos, que consiste en cuarenta y dos (42) galones de los Estados Unidos de América, corregidos a una temperatura de 15,55° C (60°F), a presión del nivel del mar, sin agua, barro u otros sedimentos. ⁽²¹⁾

BARRILES EQUIVALENTES DE PETRÓLEO (BEP): El barril equivalente de petróleo (BEP) es una unidad de energía equivalente a la energía liberada durante la quema de un barril aproximadamente (42 galones estadounidenses o 158,9873 litros) de petróleo crudo. El Servicio de Impuestos Internos estadounidense lo define equivalente a $5,8 \times 10^6$ BTU. El valor es necesariamente una aproximación, pues las diferentes calidades de aceite de calefacción tienen valores ligeramente distintos.

Un barril de petróleo equivale a $6,1178632 \times 10^9$ J o 1.700 Kilovatios-hora.

Si se tiene en cuenta el poder calorífico inferior en lugar del valor calorífico superior, el valor de un BEP sería de aproximadamente 5,7 GJ (véase tonelada de equivalente de petróleo).

Una BEP equivale aproximadamente a 5.800 pies cúbicos de gas natural. El Servicio Geológico de los Estados Unidos le da una equivalencia de 6.000 pies cúbicos (170 metros cúbicos) de gas natural típico.

BOOSTER: Se refiere a la elevación de la presión de un sistema de tuberías, por acción de una bomba o compresor.

BUTANO: Hidrocarburo de cadena abierta que tiene cuatro (4) átomos de carbono. ⁽¹⁸⁾Es el cuarto alcano lineal cuya fórmula es C_4H_{10} . Su nombre se deriva de la raíz "but" y el sufijo "ano".

BUTENOS: El Buteno es un alqueno, es el nombre de los isómeros de olefina con la fórmula C_4H_8 . Fue encontrado por primera vez en 1825 por Michael Faraday en el aceite de gas. Concretamente existen 4 isómeros:

El 1-buteno $CH_2=CH-CH_2-CH_3$

El cis- y el trans-2-buteno $H_3C-CH=CH-CH_3$ que se diferencian en que en el isómero cis los grupos metilo apuntan en la misma dirección mientras que en el isómero trans apuntan en direcciones opuestas (no olvidemos que los dos átomos del doble enlace y sus 4 sustituyentes están en el mismo plano).

El iso-buteno o más correctamente 2-metilpropeno $H_2C=C(CH_3)_2$

Los 4 isómeros son gases incoloros e inflamables que queman con llama amarilla y pueden formar mezclas explosivas con el aire.

BUTADIENO: Gas que se emplea para producir el caucho sintético y que es uno de los hidrocarburos isómeros.⁽²²⁾

C -

CAMISEA: Los yacimientos de gas natural de Camisea se encuentran ubicados aproximadamente a 500 kilómetros al este de Lima, en la cuenca Ucayali, dentro del departamento del Cusco, provincia de La Convención, distrito de Echarate. Para los efectos del Lote 88 se consideran los yacimientos San Martín y Cashiriari.

CAPACIDAD DE PLANTA

La capacidad de producción o capacidad productiva es el máximo nivel de actividad que puede alcanzarse con una estructura productiva dada. El estudio de la capacidad es fundamental para la gestión empresarial en cuanto permite analizar el grado de uso que se hace de cada uno de los recursos en la organización y así tener oportunidad de optimizarlos.

Los incrementos y disminuciones de la capacidad productiva provienen de decisiones de inversión o desinversión (por ejemplo, la adquisición de una máquina adicional), además se debe tener en cuenta la mano de obra, inventarios, entre otros

CATALIZADOR: Cuerpo capaz de producir la transformación catalítica.⁽²²⁾

CLORO: Elemento químico de número atómico 17, símbolo Cl. Muy abundante en la corteza terrestre, se encuentra en forma de cloruros en el agua de mar, en depósitos salinos y en tejidos animales y vegetales. Gas de color verde amarillento y olor sofocante, es muy venenoso, altamente reactivo y se licua con facilidad. Se usa para blanquear y como plaguicida, en la desinfección de aguas y en la industria de los plásticos.⁽²²⁾

CLORURO DE VINILO MONÓMERO: El cloruro de vinilo o cloroetileno ($H_2C=CHCl$) es un gas incoloro. Se incendia fácilmente y no es estable a altas temperaturas. Tiene un olor levemente dulce. Es una sustancia manufacturada y no ocurre naturalmente. Se puede formar por la descomposición de otras sustancias tales como el tricloroetano, tricloroetileno y el tetracloroetileno.

El cloruro de vinilo se usa para fabricar policloruro de vinilo (PVC).

CO: Monóxido de carbono. Gas tóxico.⁽²¹⁾

CO₂ : Anhídrido carbónico. Gas tóxico.⁽²¹⁾

COMPLEJIDAD ALGORÍTMICA: Extensión del programa más breve para la solución de un problema o de un conjunto o una serie de problemas. ⁽¹⁴⁾

COMPLEJIDAD COMPUTACIONAL: Condiciones (temporales, de recursos, herramientas, conceptuales y otras) de resolución de un problema o de espacios de soluciones de problemas. ⁽¹⁴⁾

CONDENSADOS: Son los Hidrocarburos Líquidos formados por la condensación de los Hidrocarburos separados del Gas Natural, debido a cambios en la presión y temperatura cuando es producido de los reservorios, o proveniente de una o más etapas de compresión de Gas Natural. Permanece líquido a la temperatura y presión atmosférica. ⁽²¹⁾

D -

DERIVADOS DEL ETILENO: Son aquellos productos petroquímicos que se producen a partir del etileno. Entre los principales derivados se tienen: las diferentes clases de polietileno, cloruro de vinilo, compuestos clorados, óxidos de etileno, estireno entre otros que tienen aplicación en plásticos, recubrimientos, moldes, etc.

E -

ETANO: Es el segundo alcano lineal cuya fórmula es C_2H_6 . Su nombre se deriva de la raíz "et" y el sufijo "ano".

ETILENGLICOL (EG): El etilenglicol (sinónimos: etanodiol, glicol de etileno, glicol) es un compuesto químico que pertenece al grupo de los dioles. El etilenglicol es un líquido transparente, incoloro, ligeramente espeso como el almíbar y leve sabor dulce. Por estas características organolépticas se suele utilizar distintos colorantes para reconocerlo y así disminuir las intoxicaciones por accidente. A temperatura ambiente es poco volátil, pero puede existir en el aire en forma de vapor. Se fabrica a partir de la hidratación del óxido de etileno.

Se utiliza como anticongelante en los circuitos de refrigeración de motores de combustión interna, como difusor del calor, para fabricar compuestos de poliéster, y como disolvente en la industria de la pintura y el plástico.

ETILENO: Es la olefina (alqueno) más simple, recibió el nombre de gas oleificante, (del latín: oleum, aceite y facere, hacer) debido a que el etileno gaseoso (C_2H_4), reacciona con el cloro para formar $C_2H_4Cl_2$, un líquido (aceite). También se le denomina Eteno y posee un doble enlace carbono – carbono.

EXTRUIR: Dar forma a una masa metálica, plástica, etc., haciéndola salir por una abertura especialmente dispuesta.⁽²²⁾

G -

GALON (GL): Unidad de medida de volumen para líquidos que equivale a 3,78533 litros. Se le conoce como Galón de los Estados Unidos de América.⁽²¹⁾

GAS COMBUSTIBLE: Mezcla de gases, cuyos principales componentes son el hidrógeno y el metano.⁽²²⁾

GAS LICUADO DE PETROLEO (GLP): Hidrocarburo que, a condición normal de presión y temperatura, se encuentra en estado gaseoso, pero a temperatura normal y moderadamente alta presión es licuable. Usualmente está compuesto de propano, butano, polipropileno y butileno o mezcla de los mismos. En determinados porcentajes forman una mezcla explosiva. Se le almacena en estado líquido, en recipientes a presión.⁽²¹⁾

GAS NATURAL: Mezcla de Hidrocarburos en estado gaseoso, puede presentarse en su estado natural como Gas Natural Asociado y Gas Natural no Asociado. Puede ser húmedo si tiene Condensado, o ser seco si no lo contiene.⁽²¹⁾

GAS NATURAL SECO: Viene a ser el metano con pequeñas cantidades de etano. Es el gas que se usa como combustible e insumo en la industria.⁽²¹⁾

GAS NATURAL ASOCIADO: El Gas Natural que se produce conjuntamente con el Petróleo, que estuvo disuelto en el o formó una capa en un reservorio de Petróleo.⁽²¹⁾

GAS NATURAL LICUEFACTADO (GNL): Es el Gas natural convertido al estado líquido por procesos criogénicos u otros que sólo le cambian su naturaleza física, siendo considerado para todos sus efectos como Gas natural.⁽²¹⁾

GAS NATURAL NO ASOCIADO: Aquel cuya ocurrencia tiene lugar en un Reservorio natural, en el cual a condiciones iniciales, no hay presencia de hidrocarburos líquidos.⁽²¹⁾

GASOLINA NATURAL: Es una mezcla de pentano, hexano y otros hidrocarburos más pesados. Se usa en las refinerías para la preparación de gasolinas de uso automotor y como materia prima para la petroquímica.

H -

H₂S: Ácido sulfhídrico, gas tóxico. ⁽²¹⁾

HEURÍSTICA: Reglas de oro, conjeturas, juicios intuitivos o sentido común orientados a la solución de problema(s) particular(es) o local(es). ⁽¹⁴⁾

HIDROCARBURO: Compuesto resultante de la combinación del carbono con el hidrógeno. ⁽²¹⁾

Compuesto orgánico, gaseoso, líquido o sólido, que consiste principalmente de carbono e hidrógeno. ⁽²¹⁾

HIDROCARBURO LÍQUIDO: Genéricamente son el Petróleo y los Condensados. En lo que se refiere al Almacenamiento de Hidrocarburos y a la Comercialización de Hidrocarburos Líquidos derivados de los Hidrocarburos se considera como Hidrocarburos Líquidos a aquellos tienen punto de inflamación superior a los 37,8° C(100° F), se subdividen en:

- Clase II, cuando tienen puntos de inflamación igual o mayor a 37,8° C, pero menor de 60° C (140° F).
- Clase IIIA, cuando tienen punto de inflamación igual o mayor a 60° C, pero menor de 93° C (200° F).

Clase IIIB, se incluyen a aquellos líquidos que tienen punto de inflamación igual o mayor a 93° C (200° F). ⁽²¹⁾

HIDRÓGENO: Elemento químico de número atómico 1, símbolo H₂. Es el más abundante de la corteza terrestre y del universo. En la atmósfera se encuentra en su forma molecular H₂, gas inflamable, incoloro e inodoro. El más ligero de los elementos, combinado con el oxígeno forma el agua. Entra en la composición de todos los ácidos y sustancias orgánicas. Se utiliza como combustible, y en la industria química para la hidrogenación de distintos productos como grasas o petróleos. Tiene dos isotopos naturales, protio y deuterio, y uno artificial, el tritio. Gas de este elemento en su forma molecular. ⁽²²⁾

HIPERHEURÍSTICA: Tipo de (meta) heurística de alto nivel que elige (meta) heurísticas de bajo nivel en cada punto de decisión de un problema dado. ⁽¹⁴⁾

I -

INDUSTRIA PETROQUÍMICA: Se llama a la industria que trata la conversión de hidrocarburos en productos químicos y es una de las piedras angulares de la industria y la tecnología actual.

INSUMO: Producto utilizado como materia prima en la industria, como son: nafta virgen, hidrocarburos aromáticos, etc. ⁽²¹⁾

Conjunto de bienes empleados en la producción de otros bienes. ⁽²²⁾

L -

LÍQUIDO: Para propósitos del Almacenamiento de Hidrocarburos es todo Hidrocarburo con fluidez mayor a una penetración de 300 medido por el ASTM D-5. En caso de no estar identificado, el término líquido se refiere a Líquidos inflamables y a combustibles líquidos. ⁽²¹⁾

LIQUIDO CRIOGENICO: Gas licuado refrigerado, cuyo punto de ebullición a presión atmosférica es menor a 90° C (194° F). ⁽¹⁸⁾

LÍQUIDOS DEL GAS NATURAL (LGN): Es una mezcla de propano, butanos, pentanos y otros hidrocarburos más pesados. Es un producto intermedio en el procesamiento del gas natural

M -

METAHEURÍSTICA: Conjunto de heurísticas que resuelven problemas en términos globales o de población. Se subdivide en híbridas, paralelas y otras. ⁽¹⁴⁾

METANO: Es el primer alcano lineal cuya fórmula es CH₄. Su nombre se deriva de la raíz "met" y el sufijo "ano". Es el principal componente del gas natural

METRO CUBICO (M³): Unidad de medida de volumen del Sistema Métrico Decimal, equivalente a 6,289 bl y 264,170 gl de Estados Unidos de América. ⁽²¹⁾

METRO CUBICO ESTANDAR (m³(ST)): Cantidad de Gas Natural que ocupa un metro cúbico (m³) a una temperatura de quince grados centígrados (15° C) y a una presión absoluta de un mil trece (1 013 mbar). ⁽²¹⁾

MODELAMIENTO: Programación computacional de un sistema, un problema o un modelo con vista a aplicaciones prácticas. ⁽¹⁴⁾

MODELO: Interpretación coherente o consistente, usualmente cerrada y eventualmente autorreferencial, del mundo, de la naturaleza o la sociedad o de una parte de ellos. ⁽¹⁴⁾

MODELO MATEMÁTICO CUALITATIVO: Aquel modelo cuyos símbolos representan en su mayoría a Cualidades no numéricas. Una fuente importante es la teoría de conjuntos. ⁽¹³⁾

MODELO MATEMÁTICO CUANTITATIVO: Es aquel cuyos principales símbolos representan números. Son los más comunes y útiles en los negocios. ⁽¹³⁾

MODELO MATEMÁTICO DESCRIPTIVO: Cuando el modelo simplemente describe una situación del mundo real en términos matemáticos, descripción que puede emplearse para exponer una situación con mayor claridad, para indicar como pueden reajustarse o aún para determinar los valores de ciertos aspectos de la situación. ⁽¹³⁾

MODELO MATEMÁTICO DETERMINÍSTICO: Corresponde a aquel modelo cuantitativo que no contiene consideraciones probabilísticas. ⁽¹³⁾

MODELO MATEMÁTICO PROBABILÍSTICO: Aquellos basados en la estadística y probabilidades (donde se incorpora las incertidumbres que por lo general acompañan nuestras observaciones de eventos reales). ⁽¹³⁾

MODELO MATEMÁTICO OPTIMIZADOR: Corresponde al modelo ideado para seleccionar entre varias alternativas, de acuerdo a determinados criterios, la más óptima. ⁽¹³⁾

MODELO SIMBOLICO: La representación se realiza con símbolos, ya sean verbales o matemáticos. Dentro de los matemáticos, se pueden mencionar la programación lineal, la teoría de colas y la simulación de sistemas.

N -

NORMA TECNICA PERUANA (NTP): La última versión de la Norma Técnica Peruana. ⁽²¹⁾

O -

OLEFINAS: Hidrocarburos que tienen uno o más enlaces dobles carbono-carbono. También se les denomina alquenos. Entre las principales olefinas se tienen al etileno, propileno y butadieno.

OPERACIÓN: En el Almacenamiento de Hidrocarburos es el término general que incluye pero que no se limita al uso, transferencia, almacenamiento y procesamiento de líquidos. ⁽²¹⁾

OTROS PRODUCTOS DERIVADOS DE LOS HIDROCARBUROS: En la Comercialización de Combustibles Líquidos y otros Productos Derivados de los Hidrocarburos, son Asfaltos y Breas, Insumos Químicos. Solventes y Lubricantes. ⁽²¹⁾

ÓXIDO DE ETILENO: El óxido de etileno es un gas inflamable de aroma más bien fuerte. Se disuelve fácilmente en agua.

El óxido de etileno es una sustancia química usada principalmente para fabricar glicol de etileno (una sustancia química usada como anticongelante y poliéster).

P -

PETROLEO: Mezcla de Hidrocarburos que se encuentran en estado líquido a las condiciones iniciales de presión y temperatura del Reservorio y que mayormente se mantiene en estado líquido a condiciones atmosféricas. No incluye condensados, líquidos del Gas Natural o Gas Natural Licuado. ⁽²¹⁾

PETROLEO CRUDO: Mezcla de Hidrocarburos que tiene un punto de inflamación menor 65,6° C y que no ha sido procesado en Refinerías. ⁽²¹⁾

PETROQUIMICA: Industria química que utiliza hidrocarburos o sus derivados como materia prima para elaborar productos químicos de uso industrial o comercial. ⁽²¹⁾

PETROQUIMICA BASICA: Industria petroquímica que realiza la primera transformación de los hidrocarburos. ⁽¹⁸⁾ Es aquella que partiendo del gas natural y el petróleo, se obtienen los productos petroquímicos básicos que son los pilares de la petroquímica; siendo los dos grupos más importantes las olefinas y los aromáticos. También se les llama materias de base o productos de primera generación.

PETROQUÍMICA INTERMEDIA: Consiste en la introducción de átomos de ciertos componentes (oxígeno, nitrógeno y azufre) en los productos petroquímicos básicos, para obtener productos petroquímicos intermedios, también llamados de segunda generación.

PETROQUÍMICA FINAL: Constituida por la elaboración de productos petroquímicos de consumo final o terminados, utilizando como materia prima productos petroquímicos intermedios, los cuales muchas veces se conjugan con los productos básicos. Su diversidad es asombrosa y alcanza una casi infinita variedad de productos habituales de consumo (fibras, cauchos, plásticos, detergentes, pinturas, barnices, abonos, anticongelantes, perfumes, explosivos, aislantes, alimentos, etc.).

PIRÓLISIS: La pirólisis es la descomposición química de materia orgánica y todo tipo de materiales, excepto metales y vidrios, causada por la acción del calor en ausencia de oxígeno.

PLANTA: Fábrica central de energía, instalación industrial. ⁽²²⁾

PLANTA PETROQUIMICA: Es aquella Planta integrada o parte de ella, distinta a una Refinería, donde a partir de Hidrocarburos o de productos derivados de estos y

mediante reacciones químicas, se producen otros derivados de los Hidrocarburos simples y complejos. ⁽²¹⁾

PLANTA CRIOGÉNICA: Planta de procesamiento de Gas Natural, capaz de obtener producción de líquidos de este, incluido etano, a bajas temperaturas de operación, usualmente menos de 10° C (menos de 50° F). ⁽²¹⁾

PLANTA DE PROCESAMIENTO: Instalación donde se cambian las características de los hidrocarburos que se encuentran en la naturaleza, al descomponerlos en los diferentes compuestos que los forman; así como también las posteriores transformaciones para convertirlos en los combustibles requeridos por la industria y su adecuación para facilitar su transporte. Incluye instalaciones donde al Gas Natural se le extrae las impurezas, el sulfuro de hidrógeno, el dióxido de carbono, el agua y componentes nocivos. ⁽²¹⁾

PLANTA DE PROCESAMIENTO DE HIDROCARBUROS: Término general para aquellas instalaciones industriales que transforman Hidrocarburos en sus derivados, que pueden ser combustibles o no combustibles. ⁽²¹⁾

PLÁSTICOS: El nombre común de plásticos se debe a la propiedad que tienen de ser deformables por plasticidad, bajo la influencia del calor, la presión o de ambos a la vez. Este término abarca productos que difieren entre sí por su estructura química, sus propiedades físicas, sus aplicaciones prácticas y sus procesos de fabricación.

POLICLORURO DE VINILO (PVC): El PVC es el producto de la polimerización del monómero de cloruro de vinilo a policloruro de vinilo. Es el derivado del plástico más versátil. Este se puede producir mediante cuatro procesos diferentes: Suspensión, emulsión, masa y solución.

Se presenta como un material blanco que comienza a reblandecer alrededor de los 80 °C y se descompone sobre 140 °C. Es un polímero por adición y además una resina que resulta de la polimerización del cloruro de vinilo o cloroeteno. Tiene una muy buena resistencia eléctrica y a la llama.

El átomo de cloro enlazado a cada átomo de carbono le confiere características amorfas principalmente e impiden su recristalización, la alta cohesión entre moléculas y cadenas poliméricas del PVC se deben principalmente a los momentos dipolares fuertes originados por los átomos de cloro, los cuales a su vez dan cierto impedimento estérico es decir que repelen moléculas con igual carga, creando repulsiones electrostáticas que reducen la flexibilidad de las cadenas poliméricas, esta dificultad

en la conformación estructural hace necesario la incorporación de aditivos para ser obtenido un producto final deseado.

POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (PEAD): El polietileno de alta densidad es un polímero de la familia de los polímeros olefínicos. Su fórmula es $(\text{CH}_2=\text{CH}_2)_n$. Es un polímero termoplástico conformado por unidades repetitivas de etileno. Se designa como HDPE (por sus siglas en inglés, High Density Polyethylene) o PEAD (polietileno de alta densidad). Este material se utiliza, entre otras cosas, para la elaboración de envases plásticos desechables. Tiene bajo nivel de ramificaciones por lo cual su densidad es alta, su rango de densidades es de 0,915 a 0,935 g/cm³.

POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PEBD): El polietileno de baja densidad es un polímero de la familia de los polímeros olefínicos. Su fórmula es $(\text{CH}_2=\text{CH}_2)_n$. Es un polímero termoplástico conformado por unidades repetitivas de etileno. Se designa como LDPE (por sus siglas en inglés, Low Density Polyethylene) o PEBD, polietileno de baja densidad. Como el resto de los termoplásticos, el PEBD puede reciclarse. El polietileno de baja densidad es un polímero con una estructura de cadenas muy ramificadas, esto hace que tenga una densidad más baja que la del PEAD, su rango de densidades es de 0,94 a 0,97 g/cm³.

POLIETILENTERFTALATO (PET): El tereftalato de polietileno, politereftalato de etileno, polietilenterftalato o polietileno tereftalato (más conocido por sus siglas en inglés PET) es un tipo de plástico muy usado en envases de bebidas y textiles. Algunas compañías manufacturan el PET y otros poliésteres bajo diferentes marcas comerciales. Químicamente el PET es un polímero que se obtiene mediante una reacción de policondensación entre el ácido tereftálico y el etilenglicol. Pertenece al grupo de materiales sintéticos denominados poliésteres.

Es un polímero termoplástico lineal, con un alto grado de cristalinidad. Como todos los termoplásticos puede ser procesado mediante extrusión, inyección, inyección y soplado, soplado de preforma y termoconformado.

PROBLEMAS N-P: *Problemas N-P:* problemas que no admiten para su comprensión y solución un tiempo fragmentado. Ejemplos de tiempo no-polinomial son el tiempo exponencial. ⁽¹⁴⁾

PROBLEMAS P: *Problemas P:* problemas que se definen en función de un tiempo polinomial, es decir, analítico y de fragmentación. ⁽¹⁴⁾

PROCESAMIENTO DEL GAS NATURAL: Constituidos por el acondicionamiento, separación y fraccionamiento del gas natural.

- Acondicionamiento del gas natural.-Consiste en la eliminación de las impurezas: azufre, agua, CO₂ y otras que no tienen valor comercial.
- Separación de componentes del gas natural.-Mediante este proceso el gas se separa en:

A) Gas natural seco (metano y etano) que se transporta por gasoductos hasta los centros de consumo.

B) Líquidos de gas natural (LGN) constituido por propano, butanos, pentanos e hidrocarburos más pesados que se transportan por poliductos hasta una planta de fraccionamiento.

- Fraccionamiento de componentes del LGN.- viene a ser la separación de los líquidos de gas natural en: Propano / butano (GLP) y Gasolina natural (pentanos e hidrocarburos más pesados).

Donde: C₁: metano; C₂: etano; C₃: propano; C₄: butano; C₅: pentano; C₆: hexano; C₇₊: heptano e hidrocarburos más pesados. C₅, C₆, C₇₊.

PROCESO: Implica una secuencia integrada de operaciones, las que pueden ser físicas o químicas. Su término general incluye, la separación, destilación, preparación, purificación, cambio de estado, polimerización, craqueo, etc., no siendo este listado de carácter taxativo. ⁽²¹⁾

PRODUCCIÓN DEL GAS NATURAL: Operación que consiste en la extracción del gas natural de los reservorios que se encuentran en el subsuelo a profundidades que por lo general pueden variar desde los 500 m hasta los 3000 m. ⁽²²⁾

PROPANO: Es el tercer alcano lineal cuya fórmula es C₃H₈. Su nombre se deriva de la raíz "prop" y el sufijo "ano". Es un hidrocarburo de cadena abierta que tiene tres átomos de carbono. ⁽²¹⁾

PROPILENO: El propileno o propeno (H₂C=CH-CH₃), es un hidrocarburo perteneciendo a los alquenos, incoloro e inoloro. Es un homólogo del etileno. Como todos los alquenos presenta el doble enlace como grupo funcional.

Es el segundo compuesto más utilizado en la industria química en todo el mundo

Q -

QUÍMICA ORGÁNICA: La química orgánica o química del carbono es la rama de la química que estudia una clase numerosa de moléculas que contienen carbono formando enlaces covalentes carbono-carbono o carbono-hidrógeno, también conocidos como compuestos orgánicos. Fredrich Kekulé es conocido como el padre de la química orgánica.

Los compuestos estudiados pueden dividirse en: compuestos alifáticos, compuestos aromáticos, compuestos heterocíclicos, compuestos fisiológicamente activos preparaciones farmacéuticas, compuestos organometálicos y polímeros.

Los hidrocarburos alifáticos son compuestos orgánicos constituidos por Carbono e Hidrógeno, en los cuales los átomos de Carbono forman cadenas abiertas y ramificadas. Los hidrocarburos alifáticos de cadena abierta se clasifican en alcanos, alquenos y alquinos.

Dentro de los alcanos están el Propano y Etano que son los productos que se van a usar como materia prima, para la obtención de alquenos, en este caso, propileno y Etileno. Se debe aclarar que este es una de las muchas formas de producción a nivel industrial.

R -

REFINERIA: Instalación industrial, en la cual el Petróleo, gasolinas naturales u otras fuentes de hidrocarburos son convertidos en combustibles líquidos. Puede incluir la elaboración de productos diferentes a los combustibles como lubricantes, asfaltos y breas, solventes, etc. ⁽²¹⁾

RENDIMIENTO: Proporción entre el producto o el resultado obtenido y los medios utilizados. ⁽²²⁾

RESERVAS POSIBLES: Son las Reservas de Hidrocarburos con menor grado de certeza de ser recuperadas que las Probadas y las Probables. ⁽²¹⁾

RESERVAS PROBABLES: Son las Reservas de Hidrocarburos estimadas con un bajo grado de probabilidad, insuficiente para definir si pueden ser recuperadas. ⁽²¹⁾

RESERVAS PROBADAS: Cantidades de Hidrocarburos estimadas a una fecha determinada, cuya existencia está demostrada con una certeza razonable por información geológica y de ingeniería, y que pueden ser recuperadas bajo las condiciones económicas, métodos de operación y regulaciones gubernamentales vigentes. ⁽²¹⁾

RESERVAS PROBADAS DESARROLLADAS: Hidrocarburos que pueden ser razonablemente recuperados de los Pozos existentes con adecuados métodos de operación y condiciones económicas existentes. Las Reservas a obtenerse por Recuperación Mejorada pueden considerarse Desarrolladas sólo después que se ha instalado un proyecto de Recuperación Mejorada. ⁽²¹⁾

RESERVAS PROBADAS NO DESARROLLADAS: Son las Reservas de Hidrocarburos adicionales que se espera sean recuperadas por la perforación futura de Pozos, profundización de Pozos existentes a un Reservorio diferente, o por la instalación de un Proyecto de Recuperación Mejorada. ⁽²¹⁾

RESERVORIO: Estrato o estratos en el subsuelo, que estén produciendo o que se haya probado que sean capaces de producir hidrocarburos, que tienen un sistema común de presión en toda su extensión, y que pueden formar parte de un yacimiento. ⁽²²⁾

RESIDUOS DE LA PLANTA DE PEAD: Parte o porción que queda de un todo, aquello que resulta de la descomposición o destrucción de algo. Material que queda como inservible después de haber realizado un trabajo u operación. ⁽²²⁾

S -

SEGURIDAD: Las disciplinas de seguridad y el conjunto de normas técnicas y disposiciones nacionales o internacionales aplicables, tendientes a prevenir, eliminar o controlar las posibles causas de accidentes, daños al ambiente, riesgos industriales o enfermedades ocupacionales a las que está expuesto el trabajador y las Instalaciones, en las Actividades de Hidrocarburos y sus áreas de influencia. ⁽²¹⁾

SIMULACIÓN: Aplicación o desarrollo de un programa con fines de investigación básica que, ulteriormente, puede llegar a tener implicaciones o aplicaciones prácticas. ⁽¹⁴⁾

SISTEMA COMPLEJO: Se dice que es de complejidad creciente todo fenómeno, sistema o comportamiento que implica rasgos tales como no-linealidad, adaptación, emergencias, autoorganización, aperiodicidad e imprevisibilidad, entre otros. ⁽¹⁴⁾

T -

TANQUE A PRESION: Utilizado para Líquidos con presión de vapor mayor o igual a 0,914 kg/cm² abs (13 psia) a nivel del mar. Pueden ser cilindros horizontales, cilindros verticales, esferas, esferoides, esferoides con domo; a temperatura ambiente o refrigerados. ⁽²¹⁾

TANQUE ATMOSFÉRICO: Tanque de Almacenamiento que ha sido diseñado para operar a presiones desde la atmosférica hasta presiones de 1,0 psig (de 760 mm Hg hasta 812 mm Hg) medidos en el tope del Tanque. ⁽²¹⁾

TANQUE DE ALMACENAMIENTO: Cualquier recipiente con una capacidad para Líquidos que exceda los 277 lt (60 gl US), usado en Instalaciones fijas y que no es usado para procesamiento. ⁽²¹⁾

TANQUE DE BAJA PRESION: Almacenamiento diseñado para mantener una presión interna mayor a 0,035 Kg/cm², pero menor de 1,055 Kg/cm² (0,5-15,0 psig) medidos en la parte superior del tanque. ⁽²¹⁾

TRANSPORTE DE GAS NATURAL: El transporte de gas natural se realiza a través de gasoductos desde los lugares de producción o procesamiento hasta un punto que se le denomina "City Gate", que viene a ser el lugar donde se realiza la reducción de presión, medición y odorización, antes de su distribución a los centros de consumo. El transporte por gasoductos se realiza a presiones que van del orden de 20 a 150 bar.

U -

UNIDADES DE PROCESO: Instalaciones donde se realiza una secuencia integrada de operaciones físicas o químicas de separación, purificación o conversión de Hidrocarburos o derivados, que forman una sección integrada de una Refinería o Planta de Procesamiento de Hidrocarburos. Por ejemplo, unidades de destilación, reformación, craqueo catalítico, alquilación, polimerización, etc. ⁽²¹⁾

USO INDUSTRIAL DEL GAS NATURAL: El gas natural es el mejor combustible que pueden usar las industrias que utilizan hornos y calderos en sus procesos productivos. Por sus características reemplaza ventajosamente a otros combustibles. En la fabricación del acero es usado como reductor para la producción de hierro esponja. Es también utilizado como materia prima en la industria petroquímica.

Y -

YACIMIENTO: Área de superficie bajo el cual existe uno o más Reservorios que estén produciendo o que se haya probado que son capaces de producir Hidrocarburos. ⁽²¹⁾

ANEXO 2

CD CON CORRIDAS DEL MODELO MATEMÁTICO