



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

## REPRESENTACIÓN DE LA INDUSTRIA PETROQUÍMICA Y FERTILIZANTES DERIVADOS EMPLEANDO PROGRAMACIÓN LINEAL

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO  
P R E S E N T A  
JOSÉ FILIBERTO GALINDO LARA



MÉXICO, D.F.



EXAMENES PROFESIONALES  
FACULTAD DE QUÍMICA

2002



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

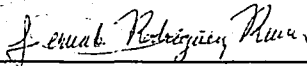
El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición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

**JURADO ASIGNADO**

<b>PRESIDENTE</b>	<b>PROF. LOPEZ TORRES ARTURO</b>
<b>VOCAL</b>	<b>PROF. ARNAUD HUERTA RAMON</b>
<b>SECRETARIO</b>	<b>PROF. RODRIGUEZ RIVERA FERNANDO DE JESUS</b>
<b>1er. SUPLENTE</b>	<b>PROF. GALDEANO BIENZOBAS CARLOS</b>
<b>2o. SUPLENTE</b>	<b>PROF. MONTIEL MALDONADO CELESTINO</b>

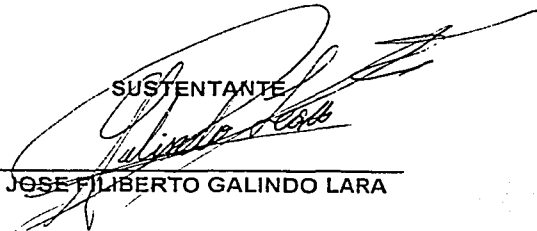
**SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:  
DEPARTAMENTO DE ADMINISTRACION INDUSTRIAL**

**ASESOR DEL TEMA**



**PROF. FERNANDO DE JESUS RODRIGUEZ RIVERA**

**SUSTENTANTE**



**JOSE FILIBERTO GALINDO LARA**

"La igualdad, la belleza, la bondad y toda existencia esencial (ιδιαι), por ser pura y simple permanece así, sin sufrir la menor alteración ni el menor cambio. Los hombres, los animales, vestidos, muebles y tantos otros objetos de la misma naturaleza, son enteramente opuestos a los primeros, en el sentido de que jamás permanecen en el mismo estado, son cosas que se pueden ver, tocar, y percibir por cualquier sentido, en cambio las primeras las que siempre son las mismas, no pueden ser percibidas más que por el pensamiento."

Palabras de Sócrates compiladas por Platon en Diálogos (Fedón)

**DEDICO ESTE TRABAJO:**

**A MI MADRE:**

*Por que gracias a su cariño y apoyo logré escribir este trabajo.*

**A MIS HERMANOS:**

**VICTOR MANUEL, SILVIA BEATRIZ, MARIA DE JESUS, REYNA GUADALUPE,  
JUAN PABLO.**

*Gracias por su cariño.*

**A MIS SOBRINOS:**

**MARIO ALBERTO, Y MIGUEL ANGEL**

*Con la esperanza de que este trabajo sirva para fomentar el amor a la ciencia..*

"Cuando el alma se sirve del cuerpo para considerar cualquier objeto, sea por la vista, por el oído ó por cualquier otro sentido, se extravía, se turba, vacila tiene vértigos, en cambio cuando examina las cosas por sí misma, sin recurrir al cuerpo tiende hacia lo que es puro, eterno, inmortal e inmutable, porque se ha unido a lo que jamás varía, este estado del alma (αρετή ή αρετή) es al que se llama sabiduría."

"Solamente afirmo que todas las cosas bellas son bellas por la presencia de lo bello mismo. Toda idea (modelo ó patrón) existe en sí."

Palabras de Sócrates compiladas por Platón en Diálogos (Fedón)

**GRACIAS:**

**A DIOS:**

*Por su infinita generosidad.*

**A MIS PROFESORES:**

*Por transmitirme su amor al conocimiento.*

**A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO:**

*Por permitirme el acceso al conocimiento y la cultura universal.*

**AL COLEGIO DE CIENCIAS Y HUMANIDADES:**

*Por mostrarme algo muy importante aprender a aprender.*

**A LA FACULTAD DE QUIMICA:**

*Por mostrarme la maravilla de las ciencias químicas*

**AL ING. FERNANDO DE JESUS RODRIGUEZ RIVERA:**

*Por dirigir y revisar este trabajo.*

**AL ING. ARTURO LOPEZ TORRES:**

*Por sus comentarios a este trabajo.*

**A MIS HERMANAS BEATRIZ Y MARY, MAYELA, ISRAEL, SALVADOR Y TODAS LAS PERSONAS QUE AYUDARON EN LA ELABORACION DE ESTE TRABAJO.**

En el principio creó Dios los cielos y la tierra. La tierra era caos, confusión y oscuridad por encima del abismo, un viento de Dios aleteaba por encima de las aguas.

Dijo Dios <haya luz> y hubo luz. Vio Dios que la luz estaba bien, aparto la luz de la oscuridad, llamó a la luz día y a la oscuridad noche, atardeció y amaneció, día primero.

Dijo Dios <haya un firmamento por en medio de las aguas, que las aparte unas de otras> e hizo el firmamento, apartó las aguas de por debajo del firmamento, de las aguas por encima del firmamento, y así fue, llamó al firmamento cielos, atardeció y amaneció, día segundo.

Dijo Dios <Acumúlense las aguas de por debajo del firmamento en un solo conjunto, y déjese ver lo seco> y así fue, llamó a lo seco tierra, y al conjunto de las aguas lo llamó mares, Vio Dios que la luz estaba bien.

Dijo Dios <Produzca la tierra vegetación: hierbas que den semilla y árboles frutales que den fruto, de su especie, con su semilla dentro, sobre la tierra> y así fue, vio Dios que estaba bien, atardeció y amaneció, día tercero.

Dijo Dios <Haya luceros en el firmamento celeste para apartar el día de la noche, y valgan de luceros en el firmamento celeste para alumbrar sobre la tierra> y así fue. Hizo Dios los dos luceros mayores; el lucero grande para el dominio del día, y el lucero pequeño para el dominio de la noche, y las estrellas, y los colocó en el firmamento celeste para alumbrar sobre la tierra, para dominar en el día y en la noche, para apartar la luz de la oscuridad: vio Dios que estaba bien, atardeció y amaneció, día cuarto.

Dijo Dios <Bullan las aguas de animales vivientes, aves revoloteen sobre la tierra contra el firmamento celeste> y los bendijo Dios diciendo <sed fecundos y multiplicaos, y henchid las aguas en los mares, y las aves crezcan en la tierra> atardeció y amaneció, día quinto.

Dijo Dios <Produzca la tierra animales vivientes, de cada especie: bestias, sierpes, y alimañas terrestres> y así fue, vio Dios que estaba bien.

Y dijo Dios <Hagamos al ser humano a imagen nuestra, y manden en los peces del mar, en las aves de los cielos, en las bestias, en todas las alimañas terrestres, y en todas las sierpes>

Creó, pues Dios al ser humano a imagen suya.

A imagen de Dios le creó.

Macho y hembra los creó.

Y los bendijo diciendo <Ser fecundos y multiplicaos, henchid la tierra y sometedla: mandad en los peces del mar y en las aves de los cielos, en todo animal que serpea sobre la tierra>.

Dijo Dios <Ved que os he dado toda hierba de semilla que existe sobre la tierra, así como todo árbol que lleva fruto de semilla, todo animal terrestre, y a toda sierpe sobre la tierra, para ustedes será alimento>, vio Dios cuanto había hecho, y todo estaba muy bien, atardeció y amaneció, día sexto.

Concluyéronse, pues, los cielos, la tierra, y todo su aparato, dio por concluida la labor que había hecho y cesó en el día séptimo de toda la labor que hiciera.

Génesis, primer relato de la creación.

# INDICE

Introducción	1
Resumen	2
<b>Petróleo y Gas Natural</b>	
Origen del petróleo y el gas natural	3
El petróleo en México y el mundo	6
Análisis Económico de la Industrialización del petróleo	11
<b>Petroquímica</b>	
La Industria petroquímica	21
Hidrocarburos básicos y productos derivados	23
Análisis Económico de la Industria petroquímica	32
<b>Fertilizantes</b>	
La Industria de los Fertilizantes	39
Análisis Económico de la Industria de los Fertilizantes	44
<b>Modelos y Modelación</b>	
Algunos aspectos interesantes acerca de los modelos	47
Modelos Matemáticos	49
Construcción de Modelos Matemáticos	51
Modelos Matemáticos empleados en la Adm. de Recursos	53
<b>Programación Lineal</b>	
Origen y Evolución de la Programación Lineal	57
Fundamentos de Programación Lineal	60
Conceptos Básicos de Programación Lineal	63
Programas de Computo disponibles	76
<b>Estimación de costos en la Industria Química</b>	
Método para estimar costos de la Industria Petroquímica	77
Escalamiento	80
Actualización de costos	84

<b>Modelo de Programación Lineal para la Industria Petroquímica</b>	
Planteamiento de un modelo de P.L. para derivados del etileno	85
Síntesis de la función objetivo	87
Límites y restricciones	90
Solución por programa de cómputo XA	92
<b>Análisis de resultados</b>	<b>95</b>
<b>Conclusiones</b>	<b>102</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>105</b>



## Introducción

La industria petroquímica mexicana es considerada un sector estratégico desde los puntos de vista tecnológico, económico y político.

Este sector a presentado grandes controversias en los últimos años, esto se debe a los graves problemas que enfrenta; entre los más importantes se pueden mencionar las variaciones bruscas en los precios de los productos petroquímicos, y la falta de Inversión en este tipo de plantas.

El gobierno mexicano actualmente tiene en su posesión la mayor parte de las plantas de este tipo que operan en el país, y ante esta situación a planteado, sin éxito, la desincorporación del sector público de las plantas que considera petroquímicas secundarias.

En estos momentos, el país vive una transición política sin precedentes, el gobierno actual a declarado su intención de fomentar la inversión privada en este sector.

En estas circunstancias se presenta este trabajo estructurado por nueve capítulos, los primeros tres capítulos se dedican a un estudio general de la industria del petróleo y la petroquímica, los siguientes tres capítulos forman parte de una síntesis del tema de la modelación matemática, para finalmente enfocarse al desarrollo de un modelo de programación lineal aplicado a la optimización económica de una cadena de plantas petroquímicas.

## Resumen

El petróleo y el gas natural cuentan con un gran potencial para transformarse en muchas sustancias útiles al hombre, y se consideran los energéticos más empleados en el mundo, por lo cual son muy importantes en la vida de los seres humanos.

La Industria Petroquímica es la rama de la Industria que se encarga de la transformación química de los derivados del Petróleo y Gas Natural en múltiples productos comerciales, entre los que se encuentran: fertilizantes, plásticos, detergentes, solventes, pigmentos, etc.

La programación lineal es una herramienta matemática que permite la optimización de sistemas mediante modelos concretos y de aplicación generalizada, conociendo los costos variables, los costo fijos y el valor de los productos de una cadena de procesos petroquímicos se puede sintetizar un modelo que permitirá conocer la cantidad de productos que conviene producir en una cadena petroquímica para optimizar su desempeño.

## Origen del petróleo y el gas natural

El petróleo es un líquido aceitoso, combustible, con amplia variación en su viscosidad y olor fuertemente característico, presenta una tonalidad oscura, exhibe una fluorescencia verdosa, y su color puede variar del castaño rojizo al amarillo, por lo general se encuentra asociado al gas natural. En términos técnicos podemos definir al petróleo y al gas natural como una mezcla altamente compleja de hidrocarburos (compuestos de carbón e hidrógeno).

Los hidrocarburos pueden estar constituidos de 1 hasta 60 átomos de carbón, se pueden encontrar en estado: sólido (asfalto), líquido (gasolina), y gaseoso (gas natural), pueden ser clasificados como:

Parafínicos: hidrocarburos saturados de cadena abierta, alcanos

Olefínicos : hidrocarburos no saturados de cadena abierta, alquenos

Nafténicos: hidrocarburos cíclicos saturados, naftas

Aromáticos: hidrocarburos cíclicos no saturados, bencénicos

Esta mezcla altamente compleja de hidrocarburos se encuentra en depósitos naturales subterráneos conocidos como yacimientos, impregnando los poros o fisuras de una capa rocosa denominada roca almacén, esta roca almacén (porosa ó compacta) se haya recubierta por una capa impermeable denominada roca impermeable que impide la fuga de los hidrocarburos.



Diagrama de un yacimiento de petróleo y gas natural. En una estructura con forma de Domo La roca porosa (arenisca) contiene impregnados en su interior gas, petróleo, y agua salada

Los yacimientos de forma porosa se conforman por rocas areniscas, que contienen gas, petróleo, y agua dentro de sus poros. Los yacimientos de rocas compactas están formados por rocas calizas, que contienen dentro de sus fallas, o fracturas (formas venosas, ramificadas), los depósitos de gas, petróleo, y agua.

El petróleo generalmente se encuentra en contacto con agua salada por lo que contiene sales disueltas principalmente cloruro de sodio, y pequeñas cantidades de elementos como azufre, nitrógeno, oxígeno, níquel, y vanadio.

Aunque las características físicas del petróleo varían ampliamente de un yacimiento a otro, su composición química en distintos yacimientos es sorprendentemente uniforme, y está comprendida dentro de los siguientes intervalos.

<u>Elementos</u>	<u>% en peso</u>
Carbón	84-87
Hidrógeno	11-14
Azufre	0-2
Nitrógeno	0-2

Existen varias teorías sobre el origen de los hidrocarburos, algunas de estas suponen que son resultado de la transformación de minerales, mientras que otras hablan de un origen orgánico, e incluso algunas han propuesto un origen extraterrestre. Pero la teoría orgánica sustenta la explicación más lógica y fundamentada que existe hasta el momento, por esta razón es la teoría científicamente más aceptable.

La teoría orgánica explica como las primeras formas de vida acuática, diminutas, y primitivas, sintetizaron mediante procesos clorofílicos los primeros hidrocarburos, estos aceites les permitían disminuir la densidad de su estructura para mantenerse a flote y captar la mayor cantidad de energía solar posible, que requerían para sus funciones vitales.

Esta teoría supone la formación del petróleo y el gas natural mediante la acumulación en lechos marinos de materia orgánica biodegradable en un ambiente anaerobio. Esta materia se conformó principalmente de; fitoplanctom (algas verdi azul, fitoflagelados, etc.), zooplanctom (especialmente foraminíferos y algunos crustáceos), bacterias, y en algunos yacimientos de menor antigüedad se han encontrado vestigios de plantas superiores y grasas de origen animal posiblemente arrastradas por los ríos.

Debido al peso en aumento de esas acumulaciones el piso marino se hundió lentamente, formando una gruesa serie de capas de lodo, arena, y materia orgánica; Esta situación dio origen al kerógeno, mineral formado por estas capas fósiles.

Durante el sepultamiento de los sedimentos, la presión y la temperatura en estos fue en aumento, generando un cracking térmico a altas presiones de los hidrocarburos contenidos en la materia orgánica, y ocasionando un rearreglo progresivo de las moléculas que conformaron el kerógeno.

De la transformación del kerógeno se formaron las primeras moléculas de lo que hoy se conoce como petróleo y posteriormente en transformaciones sucesivas se formó el gas natural.

Es así como la teoría orgánica plantea y ordena cronológicamente el complejo origen de la formación de los hidrocarburos en un proceso que tuvo una duración de millones de años.

## El Petróleo en México y el mundo

Desde tiempos remotos el hombre tenía conocimiento de la existencia y de algunos usos del petróleo, por ejemplo en Egipto servía para embalsamar las momias de los faraones, la Biblia hace varias referencias a este "aceite que brota de las rocas", en una de ellas indica a Noé como impermeabilizar el arca " hazte una arca de madera de Gopher, le dijo Dios, harás aposentos en el arca y la embetunarás con brea por dentro y por fuera", también es citada en la construcción de la torre de Babel que debería llegar a los cielos y guardar a los hombres de otro diluvio "Y les sirvió el ladrillo en lugar de piedra, y el asfalto en lugar de mezcla".

En Grecia desde el período clásico Plinio, expone que el *petra-oleum* del Agrigento fue utilizado para alumbrar.

Marco Polo al hablar de la Armenia Mayor "que es donde se encuentra el arca de Noé, situada en un alto monte", revelo que "En una parte que colinda con Georgia existe una fuente de la cual fluye el aceite en forma tan copiosa que pueden a la vez abarrotarse cien naves,...Naturalmente este aceite no es propio para guisos, es combustible y se usa para friccionar a los camellos contra la tiña y el forúnculo,...Desde muy lejos vienen a buscar y recoger este aceite y en todo el país sólo se emplea esta substancia como combustible".

El chapopotli era usado en México como pegamento, colorante y perfume, Fray Bernardino de Sahagun, en su Enciclopedia titulada "Las cosas de la Nueva España" lo describe: "existe un betún que sale de la mar, y es como un pez de Castilla que fácilmente se deshace, y el mar lo echa de sí como las ondas...Este chapopotli es oloroso, y apreciado entre las mujeres, y cuando se echa en el fuego, su olor se derrama lejos...hay dos maneras de este betún uno mezclado con resina olorosa que da buen y trascendente olor, el otro, ablandado con axin, sirve para mascar, pero no en público, sólo las personas notadas de vicio nefasto cometen tal desvergüenza, se masca no por vicio, sino para echar reuma y también por que no les hieda la boca, gustan también las muchachas y mozas que ya son adultas y mujeres". Esté último betún es el *itzcli o chicle* de nuestros días.

Los artistas cerámicos de la Huasteca imprimieron sus trabajos con chapopotli, siendo este elemento expresivo uno de sus principales rasgos. Los Lacandones aún emplean chapopote como pegamento.

En el siglo XVIII en Francia se comenzó a utilizar petróleo como lubricante, y a mediados del siglo XIX en lámparas de petróleo que iluminaban las calles de Bucarest.

Científicos de todo el mundo notaron que el petróleo era en potencia una sustancia muy valiosa, pero nadie fue capaz de producirlo en cantidades suficientes para justificar una explotación comercial.

En el invierno de 1854, el joven abogado George H. Bissell durante una visita a la Universidad de Dartmouth, donde había cursado sus estudios, conoció unas muestras de petróleo descubierto en las cercanías de la Universidad, él se interesó por el tema debido a que en esas épocas comenzó a escasear el aceite de ballena y la cera para las velas, quedó tan impresionado que compró la granja del poblado de Titusville Pensilvania donde se encontró la muestra.

Para la explotación del descubrimiento contrato a un antiguo maquinista de nombre Edwin L. Draque que por cierto se hacía llamar Coronel aunque nunca perteneció al ejército.

El Coronel Draque durante sus viajes por ferrocarril aprendió como los salineros perforaban pozos para extraer agua, y en vista de que no se podían obtener grandes cantidades del combustible decidió perforar, con la esperanza de que al igual que el agua se encontrara en yacimientos subterráneos. De esta forma fue que el día 28 de agosto de 1859 logró extraer 20 barriles de petróleo que serían vendidos a 20 dólares por barril, esto represento ventas de 400 dólares al día.

Con la aparición de cantidades abundantes de este nuevo combustible se crea la lámpara de Keroseno con la cual Rockefeller acumularía sus primeros millones, este nuevo invento y este nuevo combustible permitieron a la humanidad adentrarse en la noche y conquistar más horas al día.

El éxito y la aceptación del petróleo fue tal que apenas cuatro años después del descubrimiento de los primeros pozos, el joven de 24 años de edad William A. Rockefeller, Samuel Andrews experto en refinación de petróleo, y su socio capitalista Maurice Clark fundan una compañía de refinación de petróleo, esta compañía sería disuelta para que en 1870 Rockefeller fundara en Cleveland la Standar Oil Company actualmente Exxon Co. La Standar desde sus orígenes se dedicó a la integración de la industria, es decir extrajo, refinó y transportó petróleo por todo el mundo convirtiéndose en un gran emporio Industrial que arrasaría con todo lo que se interpusiera en sus planes, y marcando las pautas que rigen hasta nuestros días a este tipo de compañías.

El crecimiento desmedido en la demanda de los derivados del petróleo ocurrió debido a que este desplazó a el carbón de las máquinas de vapor creadas en los principios de la revolución Industrial, a esto se sumó el surgimiento del motor de combustión interna en 1886 dado a conocer por el alemán Karl Benz, que posteriormente sería traducido por Henry Ford en un artículo de uso común el automóvil.

Por último surgiría la aviación a principios del siglo XX, y apartir de 1914 la gasolina desplaza a la kerosina como el producto más importante de la destilación del petróleo.

En un principio Estados Unidos fue el productor y consumidor más grande del mundo, pero Inglaterra, Francia, Alemania, y Rusia desarrollaron una gran industria petrolera, fundamentada en la refinación de el petróleo que se descubrió en el Medio Oriente y Rusia.

En México se tenía conocimiento de la existencia y usos del petróleo desde antes de la llegada de los españoles, es por esta razón que los españoles pudieron emplearlo como impermeabilizante en sus barcos, y por esto que en la ley de minas para la Nueva España dictada en 1783 por Carlos III de España se consigna como propiedad de la corona a estos "bitúmenes o jugos de la tierra".

En el mismo año en que Drake perforó su pozo en México se despertó el interés de algunos, y se intentó extraer grandes cantidades de petróleo en el Panuco y Jalisco sin mucho éxito.

El 6 de julio de 1865, el emperador Maximiliano hombre de gran visión reafirma el estatus legal del petróleo, y promulga un reglamento en el cual prohíbe la libre explotación de este u otros minerales, además establece el requerimiento de una concesión expresa de las autoridades para su explotación.

Por esas épocas un feroz vendaval arrojó a la goleta bostoniana "Cap-Cod" a las costas de Tuxpan, esta nave fue reparada en Tuxpan y calafateada (impermeabilizada) con los antiguos métodos mexicanos, el capitán de esta embarcación previendo otro percance ordena el transporte de algunos barriles de este aceite. En Boston la fiebre de petróleo estaba en pleno auge y el químico Adolph P. J. Autrey al oír esa historia convence al capitán de vender su barco, recauda algo de capital y funda en 1868 la Compañía Explotadora de Petróleo del Golfo Mexicano.

En 1892 Porfirio Díaz Promulga La Ley Minera, en la cual otorga la libertad del propietario de un predio a explotarlo sin requerimientos o concesiones especiales.



En 1899 llega a México Weetman Dickinson Pearson, contratado en Europa por el gobierno del Presidente Porfirio Díaz, para planear el gran canal de desagüe de la Ciudad de México, El Ing. Pearson se interesa por la exploración del petróleo y funda en 1908 la Mexican Eagle Company, más tarde llamada Compañía de petróleo " El Águila ".

En 1900 llega a México por tercera vez Edwar Doheny, explorador californiano en busca de petróleo, quien en su libro Mexican Petroleum confesaría haber extraído 85 millones de barriles de petróleo.

De 1901 a 1911 las compañías de petróleo establecidas en México explotaron más de 25 millones de barriles sin pagar impuestos logrando obtener ganancias de millones de dólares.

Al ser derrocado el gobierno del General Díaz subió a la Presidencia Francisco I. Madero, este último noto que las ventas netas registradas de esta industria eran de 4'139,554 pesos, mientras que el total de la recaudación hacendaría mexicana eran de 26,000 pesos, inmediatamente gravó la producción de petróleo con un impuesto de 3 centavos por barril. Este hecho disgustó a los norteamericanos, especialmente al Embajador Lane Wilson, quien apoyó a Felix Díaz y a Victoriano Huerta contra Madero que sería derrocado y asesinado.

Venustiano Carranza derrocaría posteriormente a Huerta, e impondría un impuesto de 1.5 centavos por barril, y en 1915 establece la Comisión Técnica del Petróleo.

En 1917 el Congreso Constituyente integrado por Carranza formuló el artículo 27 constitucional, estableciendo en su párrafo IV:

"Corresponde a la nación el dominio directo de todos los minerales o sustancias que en vetas, mantos, masas o yacimientos constituyan depósitos cuya naturaleza sea distinta de los componentes de los terrenos, tales como minerales de los que se extraigan metales y metaloides utilizados en la industria, el petróleo y todos los carburos de hidrógeno, líquidos y gaseosos ".

El Presidente Carranza al igual que Madero también sería derrocado y asesinado el 21 de mayo de 1920.

Alvaro Obregón al ascender al poder firmó un tratado de comercio y amistad a cambio del reconocimiento de su gobierno por parte de Norteamérica, en los Tratados de Bucareli ofrece respetar todas las propiedades extranjeras adquiridas antes del 1o de mayo de 1917.

En el invierno de 1925 Plutarco Elías Calles promulga la Ley Orgánica y reglamentaria del petróleo, pero los norteamericanos presionaron para que se derogara a principios de 1927.

Con el auge de la Industria petrolera surge un nuevo tipo de trabajadores, estos recibían bajos salarios, las inhumanas condiciones de vida y de trabajo aunadas a las corrientes mundiales de pensamiento socialista dieron origen a los movimientos obreros revolucionarios, primero estallarían las huelgas de Río Blanco y Cananea, junto con ellas la Revolución Mexicana, posteriormente una vez consolidada la República surgiría el movimiento petrolero.

A principios de 1936 se unen los organismos locales en un gran sindicato, el Sindicato de Trabajadores Petroleros de la República Mexicana. Desde su formación el STP presentó a las compañías petroleras un proyecto de contrato colectivo único para todo el país, las empresas se limitaron a ignorar este hecho, el conflicto obrero patronal se prolongó hasta 1938, cuando la junta de Conciliación y Arbitraje emite una sentencia en favor del STP

El General Lázaro Cárdenas se ve obligado a intervenir ante la negativa de acatar la sentencia por parte de las empresas petroleras, y nombra una comisión especial conformada por Efraim Buenrostro Secretario de Hacienda, Mariano Moctezuma Subsecretario de Economía, y Jesús Silva Herzog Economista y Sociólogo connotado, esta comisión dictaminó que las empresas en cuestión podían cumplir las demandas de los obreros sin ninguna dificultad.

Las empresas petroleras en su totalidad extranjeras se negaron a acatar el mandato presidencial de satisfacer las demandas de los obreros. Esta situación continuó hasta que finalmente el 18 de marzo de 1938, El General Lázaro Cárdenas gran líder del pueblo mexicano termina con el conflicto, y decreta la Nacionalización del Petróleo.

## Análisis Económico de la Industrialización del petróleo

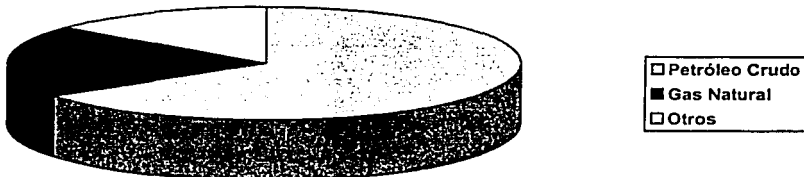
El petróleo tiene múltiples usos, sin embargo en la actualidad esta mezcla de hidrocarburos continua siendo empleada principalmente como energético.

Los energéticos han jugado un papel determinante en el desarrollo de nuestra civilización, se puede afirmar que el hombre al producir y controlar el fuego marcó sus primeras etapas evolutivas, no obstante tardaría algunos miles de años para descubrir otra fuente de energía distinta al carbón de origen vegetal.

Con el descubrimiento del carbón mineral se impulsó en gran medida la Revolución Industrial, y la demanda de combustible aumentó. Pero el carbón mineral (hulla) no es una fuente de energía de fácil acceso, para hacer rentable el proceso de extracción se requiere la localización de grandes depósitos de carbón, y como se trata de un mineral es necesario excavar minas, en estas minas es preciso contar con múltiples medidas de seguridad, debido a que el proceso de extracción de este mineral es el más peligroso de toda la minería.

Por esta razón es fácil comprender que al ser localizados grandes yacimientos de petróleo en EUA, se substituyó el carbón de hulla por el petróleo, debido a que este último representa un combustible más accesible, y por este acontecimiento se aceleraron de manera notable los procesos productivos. En los países desarrollados actualmente más del 50% del total de la energía producida fue generada a través de la combustión de hidrocarburos. En México la dependencia de este energético es aún mayor, el 65.4% de la energía consumida en nuestro país tuvo su origen en el petróleo crudo, y 20.5% en el gas natural.

Origen de la energía empleada en México



Las reservas probadas a nivel Mundial de este valioso producto representan 1 Trillón de barriles, que al ritmo de consumo actual aseguran un abastecimiento de aproximadamente 46 años.

La siguiente tabla muestra las reservas de petróleo y gas natural, la producción de petróleo, y la relación reservas de petróleo / producción de petróleo, de los principales países productores de petróleo, además muestra una relación de las reservas de gas natural / reservas de petróleo.

### Reservas Mundiales de Petróleo y Gas Natural (1994)

Organización de Países Export. de Petróleo	Reservas de Petróleo millones de barriles	Reservas de Gas Natural billones de pies cúbicos	Producción de Petróleo millones de barriles / día	Relación R.P./ P.P. años	Relación R.G./RP 10 <sup>6</sup> barriles / 10 <sup>6</sup> ft <sup>3</sup>
Arabia Saudita	258 703	185 400	7.811	91	0.72
Irak	100 000	109 500	0.550	498	1.09
Kuwait	94 000	52 400	1.811	142	0.56
Emiratos Arabes Unidos	92 200	188 400	1.835	138	2.04
Irán	88 200	741 609	3.585	67	8.41
Venezuela	64 477	139 900	2.463	72	2.17
Libia	29 500	45 800	1.380	59	1.55
Nigeria	20 828	109 710	1.883	30	5.27
Argelia	9 200	128 000	0.750	34	13.91
Indonesia	5 167	68 916	1.319	11	13.34
Katar	3 700	250 000	0.407	25	67.56
Ecuador	2 115	3 800	0.379	15	1.80
Gabón	1 340	500	0.329	11	0.37
<b>Total OPEP</b>	<b>769 430</b>	<b>2 023 935</b>	<b>24.502</b>	<b>102</b>	<b>2.63</b>
México	49 775	68 413	2.685	50	1.37
China	24 000	59 000	2.961	22	2.46
Estados Unidos	22 457	163 837	6.662	9	7.29
<b>Total Mundial</b>	<b>1 007 475</b>	<b>4 933 572</b>	<b>60.521</b>	<b>46</b>	<b>4.90</b>

\*Datos obtenidos del Statistical Year Book of British Petroleum

En la tabla anterior se puede observar que dos terceras partes del total de las reservas probadas de este valioso producto se localizan geográficamente cerca del golfo Pérsico, bajo el control de cinco países: Arabia Saudita, Irak, Kuwait, Emiratos Arabes Unidos, e Irán. Todos ellos miembros de la OPEP (Organización de Países Exportadores y Productores de Petróleo). Cabe resaltar que en estos países se presenta una disminución atenuada de sus recursos.

En la actualidad se observa una tendencia mundial encaminada a una mayor explotación de los recursos humanos y materiales de cada país; en este contexto podemos considerar la importancia estratégica del petróleo, de hecho no se podría concebir el desarrollo económico desligado de la explotación y consumo de este recurso.

México es el país que ocupa el séptimo lugar mundial en cuanto a reservas petroleras se refiere y es el quinto productor a nivel mundial de petróleo crudo.

A continuación se presenta un análisis de la política petrolera mexicana de los últimos cinco periodos sexenales.

Gov.	Año	Petróleo Crudo			Gas Natural		
		Reservas probadas 10 <sup>6</sup> barriles	Producción anual 10 <sup>6</sup> barriles/año	RP/PA años	Reservas probadas 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>	Producción anual 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup> / año	RP/PA años
LEA	1970	3 288	156.54	21	339.8	18.83	18
	1976	7 279	293.10	25	339.8	21.85	15
JLP	1982	54 999	1 002.43	55	2 134.0	43.24	49
MMH	1988	53 012	917.43	58	2 072.2	34.63	60
CSG	1994	49 775	980.02	51	1 937.2	37.46	52
EZP	1997	48 472	1 103.03	44	1765.4	46.17	38
Tmac.	82-97	- 0.84 %	0.63 %	-1.48 %	-1.25 %	0.44 %	-1.7 %
Tmac.	94-97	- 0.88 %	4.02 %	-4.80 %	-3.05 %	7.21 %	-9.9 %

- La variación de las reservas probadas depende principalmente de dos variables del descubrimiento de nuevos yacimientos y del ritmo de producción para el consumo.

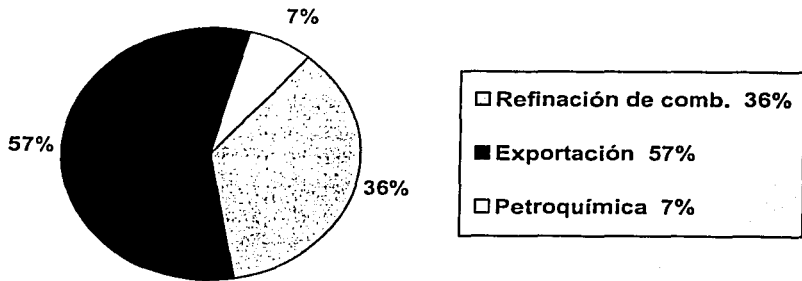
- Análisis basado en información del Compendio Estadístico del sector Energía 1980-1997.

Es importante resaltar que desde hace más de quince años México presenta un constante decremento de aproximadamente uno por ciento anual en las reservas nacionales de petróleo y de gas natural.

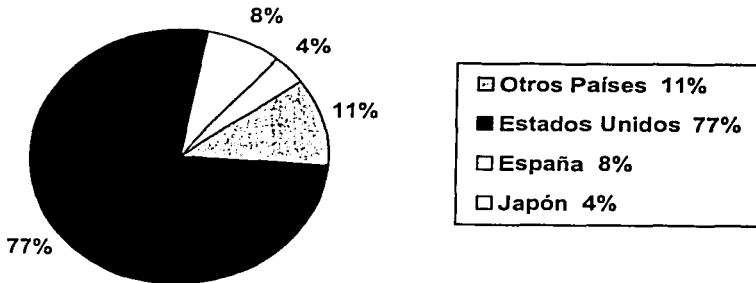
Cabe señalar que México históricamente a exportado más del 50 % de la producción nacional de petróleo crudo, y esté se destina en su mayoría a Estados Unidos.

En 1997 se exportaron 1,721,000 barriles por día, a un precio promedio de 16.46 dólares por barril, lo cual represento ingresos con un valor aproximado a los 11,000 millones de dólares. Los ingresos por exportación de petróleo representaron aproximadamente el 17 % del total de las exportaciones, y el 36.4 % de las reservas nacionales de divisas.

**Destino de la producción nacional de petróleo crudo (1997)**

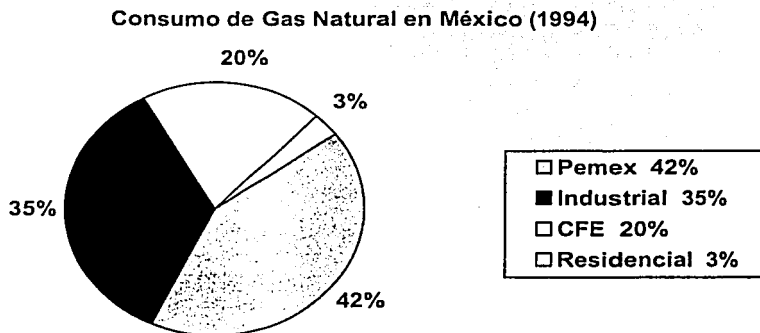


**Destino de las Exportaciones de petróleo crudo (1997)**

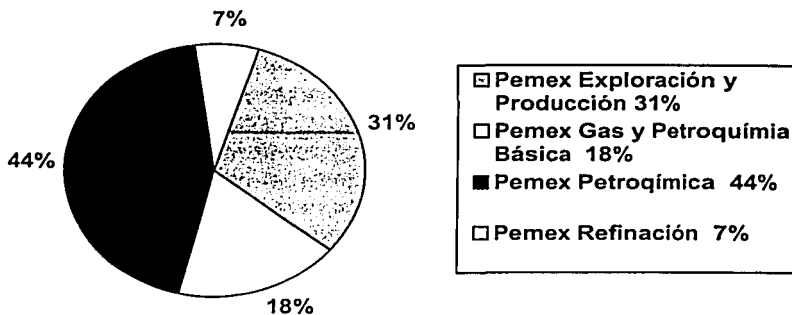


En cuanto al Gas Natural en México podemos decir que hasta 1997 se tenían registradas reservas por 1765.4 billones de metros cúbicos, y se mantuvo durante este último período un ritmo de producción de 46.17 billones de metros cúbicos por año. De continuar estas tendencias los yacimientos de gas se extinguirían en 38 años, siempre y cuando no se descubrieran nuevos yacimientos de gas, es importante analizar que desde 1985 se ha observado una disminución constante de las reservas de gas natural en nuestro país aún cuando Organismos Internacionales estiman reservas potenciales de aproximadamente 6000 billones de metros cúbicos.

En 1994 se tuvo una producción de 3,625 mcft / d , y se registro un consumo de 2,362 mcft / d el consumo presentó la siguiente tendencia :



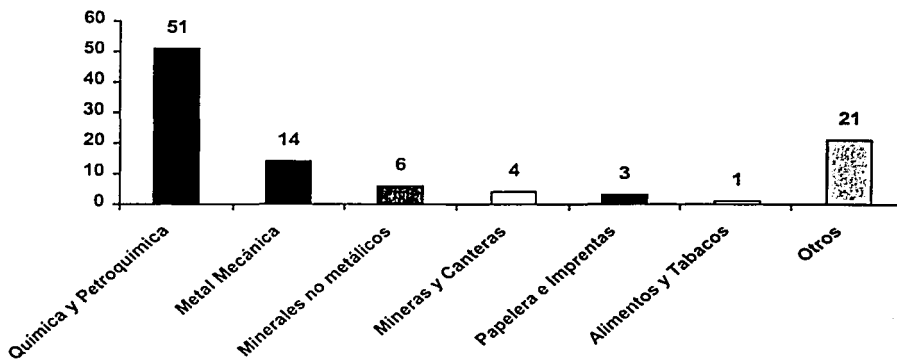
### Consumo de Gas Natural en Pemex (1994)



El consumo del sector Industrial excluyendo a Pemex y a la CFE, se encuentra polarizado por 5 grandes Compañías que consumen el 39 % del gas, mientras que 332 Empresas consumen el 51% del gas disponible para este sector, el resto del gas 3.8% se distribuye entre 446 Empresas. El balance de Energía Para México de la IEA que se muestra a continuación nos permite apreciar que el 51 % del gas empleado por el sector Industrial se destina a las Industrias Química y Petroquímica.

\* Incluye a el gas empleado en la producción de petroquímicos

### Consumo de Gas en el sector Industrial (1994)





Para explicar de una manera más clara la importancia económica y estratégica de los hidrocarburos, es necesario aclarar que el petróleo además de representar una mezcla altamente compleja de hidrocarburos también representa cantidades increíblemente grandes de dinero, que el poder y la corrupción han acompañado al desarrollo de los grandes yacimientos petroleros de todo el mundo, la historia del desarrollo de la industria petrolera en nuestro país no es de ninguna manera la excepción, y por estas razones el General Cárdenas expropió todos los recursos petroleros mexicanos el día 18 de marzo de 1938, en ese momento México no contaba con personal capacitado sin embargo lograron el desarrollo de la empresa paraestatal Petróleos Mexicanos mejor conocida por el nombre de Pemex que actualmente es la compañía que reporta las mayores utilidades en nuestro país.

Con el paso del tiempo se creó un centro de desarrollo tecnológico al que se denominó Instituto Mexicano del Petróleo, el IMP hasta 1997 contaba con aproximadamente 4000 empleados; 3105 administrativos, 633 dedicados al desarrollo experimental, y 262 dedicados a la Investigación científica.

Analizando la expropiación y la historia de esta Industria podemos observar que el petróleo permitió en el pasado un gran desarrollo para nuestro país, pero al mismo tiempo pese a innumerables esfuerzos de muchas personas fue limitando el desarrollo de nueva tecnología que permitiera a esta industria permanecer a la vanguardia, y crear nuevas opciones para nuestra economía.

Para mostrar la importancia actual de los hidrocarburos en nuestro país basta reconocer que Pemex pagó en 1997 al gobierno mexicano por concepto de Impuestos y derechos la cantidad de 159 mil millones de pesos que representa el 51 % de la recaudación Tributaria Federal, y esta alcanza para pagar 113,634.80 millones de pesos de intereses por concepto de la deuda pública Federal, a continuación se muestra la situación financiera del Gobierno Federal mexicano, la balanza comercial de México, y el Estado de Resultados Consolidado de Pemex para 1996 y 1997.

## Situación Financiera del gobierno Federal

Enero - Diciembre  
( Flujos en millones de pesos )

	1996	1997 *preliminar
<b>Balance Total 1/</b>	<b>-11,479.20</b>	<b>-43,172.40</b>
<b>Ingresos</b>	<b>392,566.00</b>	<b>503,279.40</b>
Ingresos no Tributarios	116,559.80	192,440.40
Ingresos Tributarios	226,006.20	310,839.00
ISR	97,162.00	133,497.40
IVA	72,109.60	97,445.00
IPS	29,695.20	45,268.80
Importaciones	14,854.80	18,400.40
Otros	12,184.60	16,227.40
<b>Gasto</b>	<b>403,082.80</b>	<b>541,177.60</b>
Programable	232,372.50	325,488.50
No Programable	170,710.30	215,689.10
Pago de intereses	94,285.20	113,634.80
Otros	76,425.10	102,054.30
<b>Otros Gastos 2/</b>	<b>962.40</b>	<b>5,274.20</b>

1/ En 1997 considera los ingresos extraordinarios provenientes de la venta de empresas

2/ Incluye el gasto neto efectuado por el Gobierno Federal a nombre de :  
Terceros ( cuentas ajenas al presupuesto )

## Balanza Comercial de México

Enero - Diciembre  
( Flujos en millones de dólares )

	1996	1997 p/	1998 e/
<b>Exportaciones</b>	<b>95,999.70</b>	<b>110,431.40</b>	<b>124,628.21</b>
No Petroleras	84,346.00	99,108.20	115,461.05
Petroleras	11,653.70	11,323.20	9,167.16
<b>Importaciones</b>	<b>89,468.80</b>	<b>109,807.80</b>	<b>135,283.21</b>
Bienes de Consumo	6,656.80	9,326.00	11,489.63
Bienes de uso Intermedio	71,889.60	85,365.70	105,170.54
Bienes de Capital	10,922.40	15,116.10	18,623.04
<b>Balanza Comercial</b>	<b>6,530.90</b>	<b>623.60</b>	<b>- 10,655.00</b>

p/ Preliminar

e/ Estimado

**PEMEX**  
**Estado de Resultados Consolidado**  
 Enero - Diciembre  
 ( millones de pesos )

	<b>1996</b>	<b>1997 *No auditados</b>
<b>Ventas Totales</b>	<b>219 029</b>	<b>254 014</b>
En México**	130 844	165 471
Exportaciones	88 185	88 543
Gastos de Operación	53 180	76 091
Reserva laboral	8 030	14 253
Intereses Netos	-869	994
Otros Gastos	-2 639	-3 832
Rendimiento antes de Imp.	161 327	166 508
Impuestos y Derechos	144 810	159 137
Directos	125 043	121 409
Indirectos	19 767	37 728
Rendimiento Neto	16 517	7 371
<b>Resultados de Operación</b>	<b>142 236</b>	<b>134 401</b>
Exploración y Producción	143 052	137 964
Refinación	-2 136	-4 271
Gas y Petroquímica Básica	694	1 781
Petroquímica	626	-1 074

\*\* Incluye impuestos al consumo

**PEMEX**  
**Estado de Resultados Consolidado**  
 Enero - Diciembre  
 ( millones de dólares )

	<b>1996</b>	<b>1997</b>	<b>No auditados</b>
<b>Ventas Totales</b>	<b>28 819</b>		<b>32 081</b>
En México**	17 216		20 098
Exportaciones	11 603		11 183
Gastos de Operación	6 997		9 610
Reserva laboral	1 057		1 800
Intereses Netos	-114		126
Otros Gastos	-347		-484
Rendimiento antes de Imp.	21 227		21 029
Impuestos y Derechos	19 054		20 098
Directos	16 453		15 333
Indirectos	2 601		4 765
Rendimiento Neto	2 173		931
<b>Resultados de Operación</b>	<b>18 683</b>		<b>16 993</b>
Exploración y Producción	18 786		17 440
Refinación	-281		-536
Gas y Petroquímica Básica	94		222
Petroquímica	85		-133

\*\* Incluye impuestos al consumo

## La Industria Petroquímica

La Industria Petroquímica es la rama de la Industria Química que se encarga de la producción química de múltiples productos comerciales a partir de los diversos componentes del petróleo y el gas natural.

Entre los productos que se obtienen mediante procesos petroquímicos se encuentran; fertilizantes, plásticos, detergentes, solventes, pigmentos, etc., estos productos que actualmente se obtienen del petróleo y el gas natural, se fabricaban hace ya mucho tiempo empleando otras materias primas como; carbón vegetal, carbón mineral, y fermentos alcohólicos. Por lo que es adecuado aclarar que la Industria encargada de elaborar productos Químicos Orgánicos, como los antes mencionados, puede obtener su materia prima de fuentes distintas. También es importante resaltar que de los productos derivados del petróleo se pueden preparar grandes cantidades de productos a un menor costo, y de otras fuentes de carbón se pueden elaborar pequeñas cantidades de productos de mayor valor

El uso del petróleo y el gas natural como materias primas en la elaboración de productos químicos orgánicos comenzó tiempo después del descubrimiento de grandes yacimientos de petróleo en Estados Unidos, y en su primera etapa se desarrollo de manera muy lenta.

En Rusia el famoso químico ruso Mendeleev había informado a su gobierno en 1872 sobre este tema, afirmando que "Esta materia prima es demasiado valiosa para ser quemada. Cuando se quema petróleo, se quema dinero; debería usarse como material químico básico".

Sin embargo el desarrollo de esta industria seguiría a un ritmo lento, solo en Norteamérica donde existía una Industria de refinación importante cuya orientación esencial era la fabricación de gasolina suministraba en los procesos de cracking térmico cantidades importantes de gases ricos en olefinas ( hidrocarburos de cadena abierta no saturados de gran reactividad, que sirven de materia prima básica en la elaboración de múltiples productos ), se desarrollaron algunos productos que se elaboraban en pequeñas cantidades.

La segunda etapa de el desarrollo de la Industria Petroquímica comenzaría durante la primera guerra mundial, cuando la Standard Oil de New Jersey dirigida por Rockefeller, consiguió producir a escala industrial acetona, un importante disolvente empleado en la fabricación de explosivos, posteriormente se fabricarían algunos otros productos.

La tercera etapa comienza un poco después del inicio de la Segunda Guerra Mundial, es en este momento de la historia cuando se incrementa la demanda de todo tipo de productos; combustibles, explosivos, plásticos, telas, etc.

Esta enorme demanda sirvió de base a un desarrollo impresionante de la Industria Petroquímica que puede encontrar los substitutos de muchos productos, crear nuevos, y a un costo menor. Entre los muchos éxitos de esta Industria destaca el desarrollo del caucho sintético, el caucho es un producto que antiguamente se obtenía de manera natural del árbol del hule, pero las principales plantaciones a nivel mundial fueron invadidas por los japoneses durante la Segunda Guerra Mundial, y la producción de caucho sufrió un fuerte decremento, en esos días el caucho era un producto muy valioso por su uso en la fabricación de llantas, esta situación fue solucionada cuando se logro producir caucho por una vía sintética empleando butadieno.

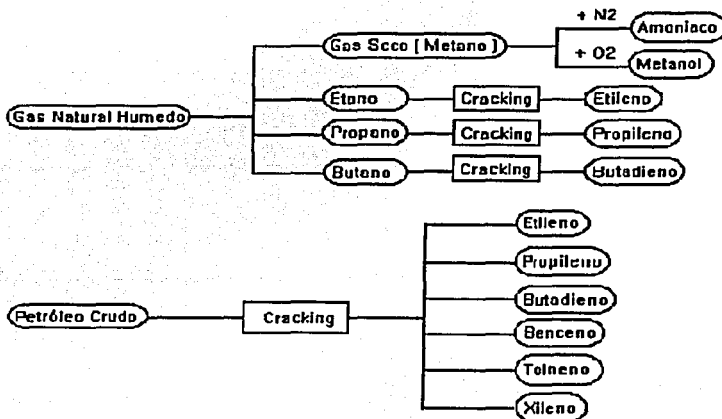
La cuarta y última etapa que marca la historia de esta Industria principia al termino de la Segunda Guerra Mundial, cuando se comienzan a perfeccionar los procesos de síntesis en una gran cantidad de productos importantes para la vida cotidiana, y desde entonces la Industria Petroquímica ha continuado con su desarrollo a un ritmo superior al de la Economía Mundial.

## Hidrocarburos Básicos y Productos Derivados

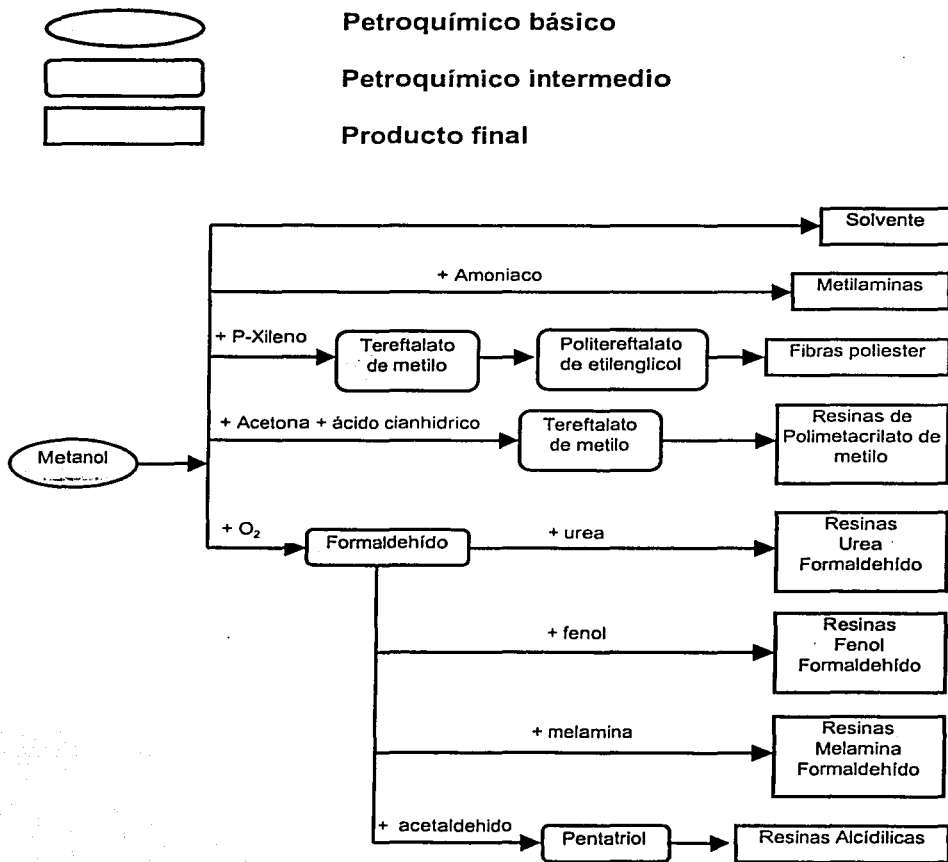
El uso de hidrocarburos como materia prima en la Industria se debe al hecho de que estos están constituidos por diversos compuestos de carbón e hidrogeno, dos de los elementos químicos más importantes de la química orgánica, sin embargo los compuestos que aparecen originalmente en el petróleo bruto y el gas natural son de reactividad débil (hidrocarburos saturados en su mayoría), que no permiten obtener fácilmente los productos finales que se desean, y por lo cual es preciso realizar una serie de operaciones químicas previas.

El proceso básico para convertir el petróleo o el gas natural en materias primas consiste en la eliminación de hidrógeno, lo cual se produce durante los procesos de cracking utilizados en el proceso de la Refinación del petróleo, o bien sometiendo a los hidrocarburos a un cracking especialmente concebido para este fin. Mediante este proceso es posible convertir los hidrocarburos originales en productos de reactividad química elevada, estos son comúnmente conocidos como productos petroquímicos básicos.

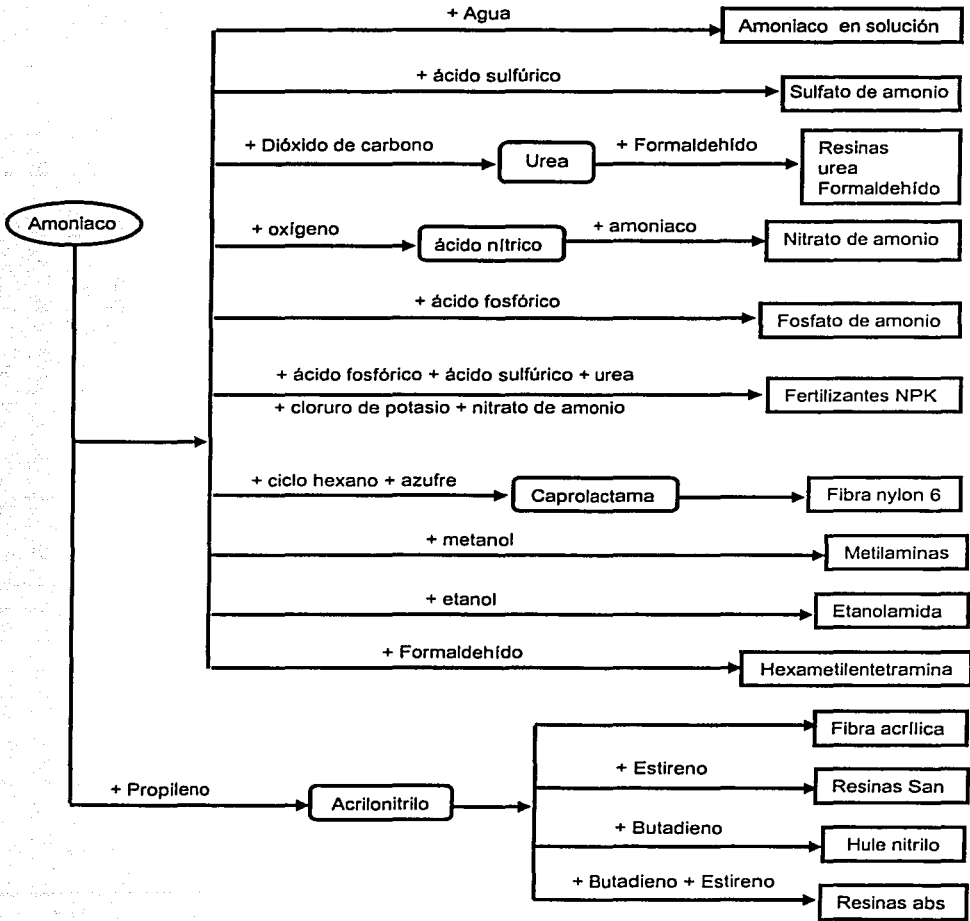
Este grupo de productos se conforma por Amoniaco, Metanol, Etileno, Propileno, Butadieno, Benceno, Tolueno, Orto Xileno, Para Xileno. El origen de estos productos se muestra en el siguiente gráfico:

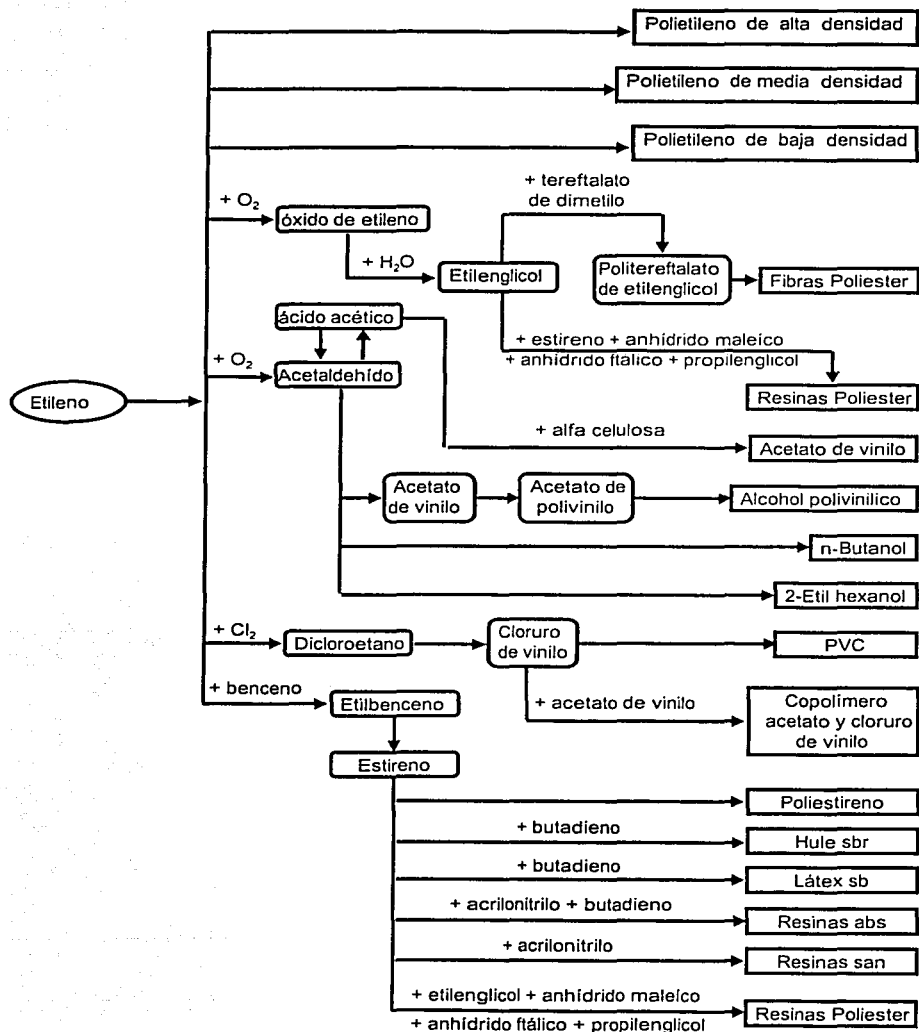


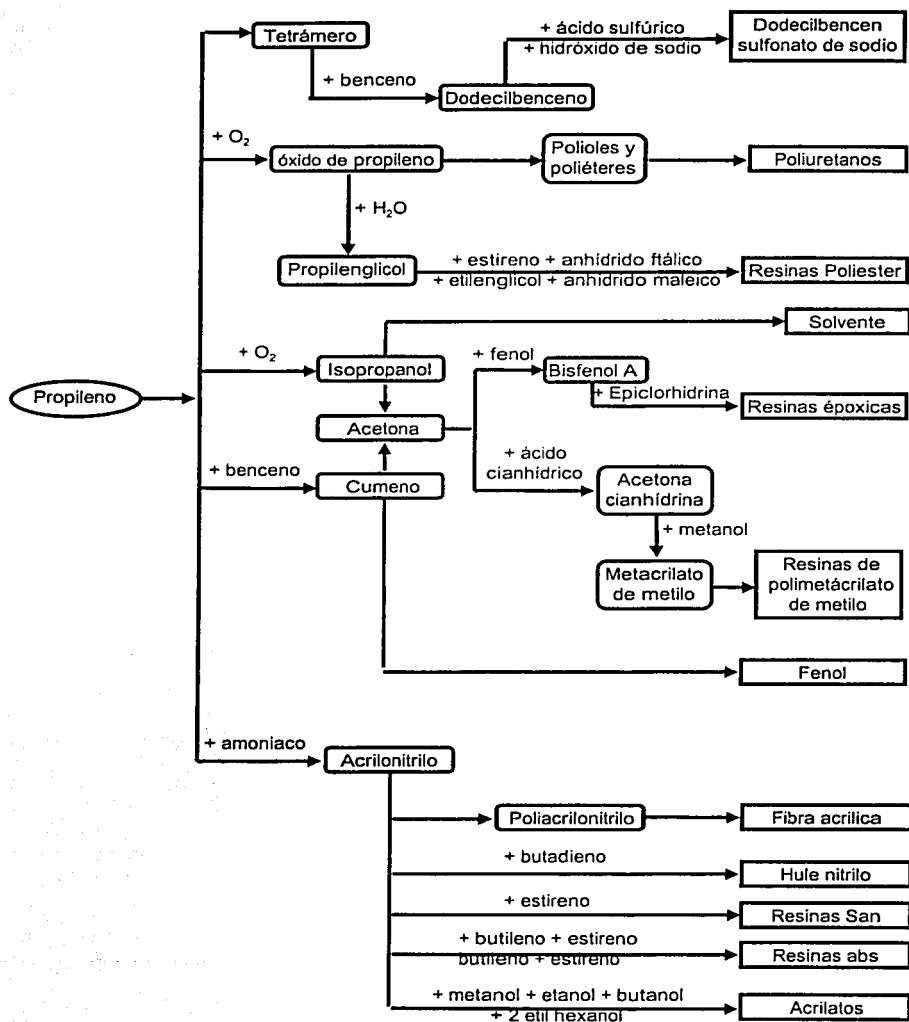
La transformación química de estos productos básicos conduce a los productos orgánicos intermedios o de segunda generación, algunos de los cuales son comercializables y otros necesitan una o varias operaciones terminales para obtener definitivamente el producto de consumo, de manera que para su estudio a continuación se muestra la cadena de productos que deriva de cada petroquímico básico.

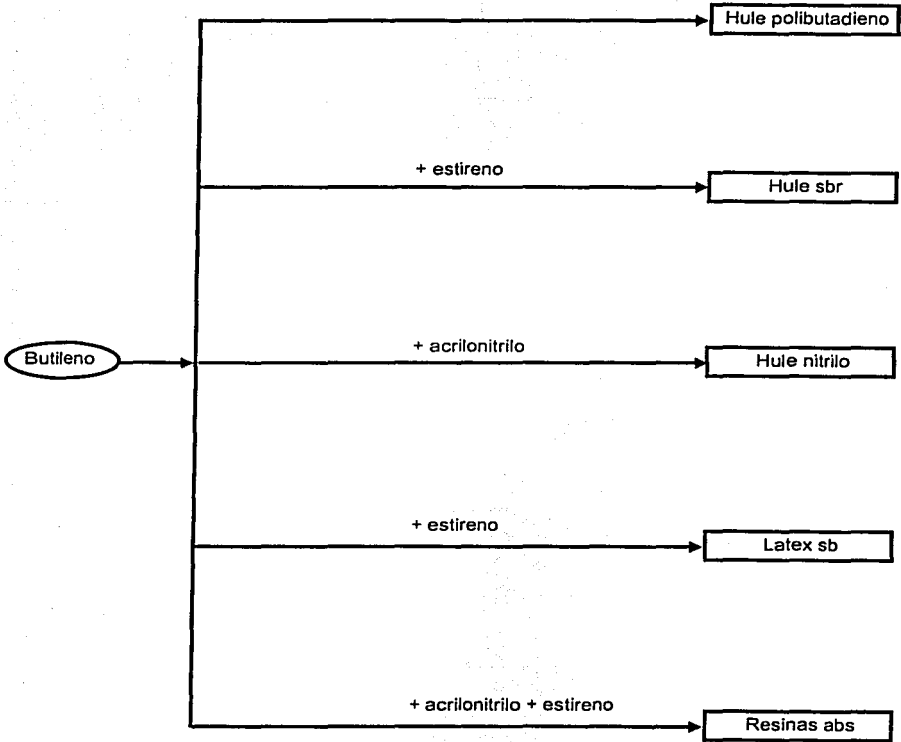


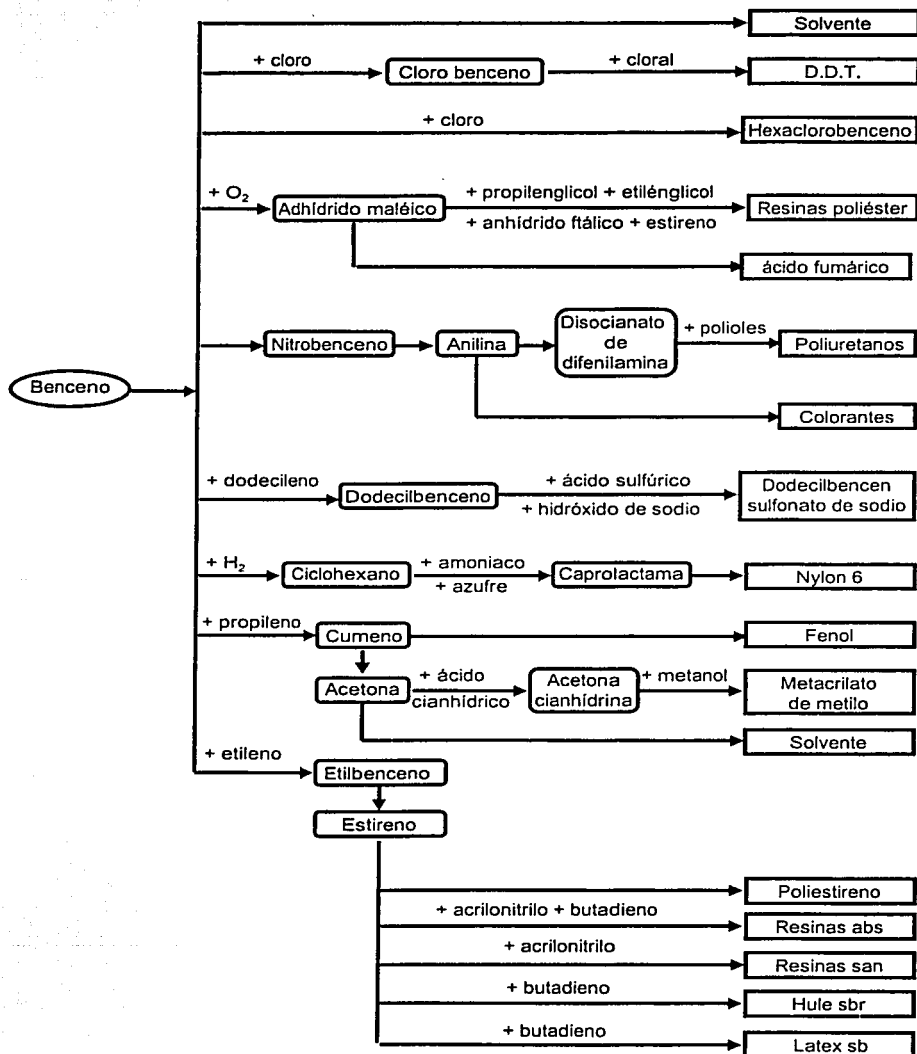


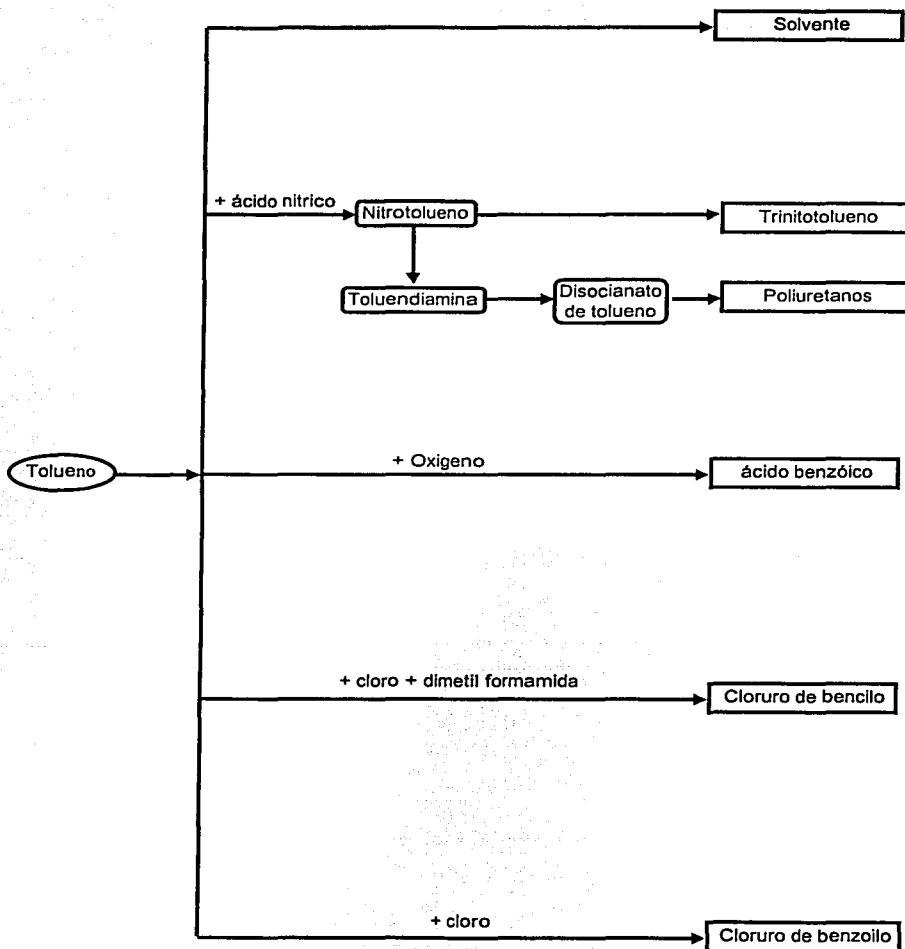


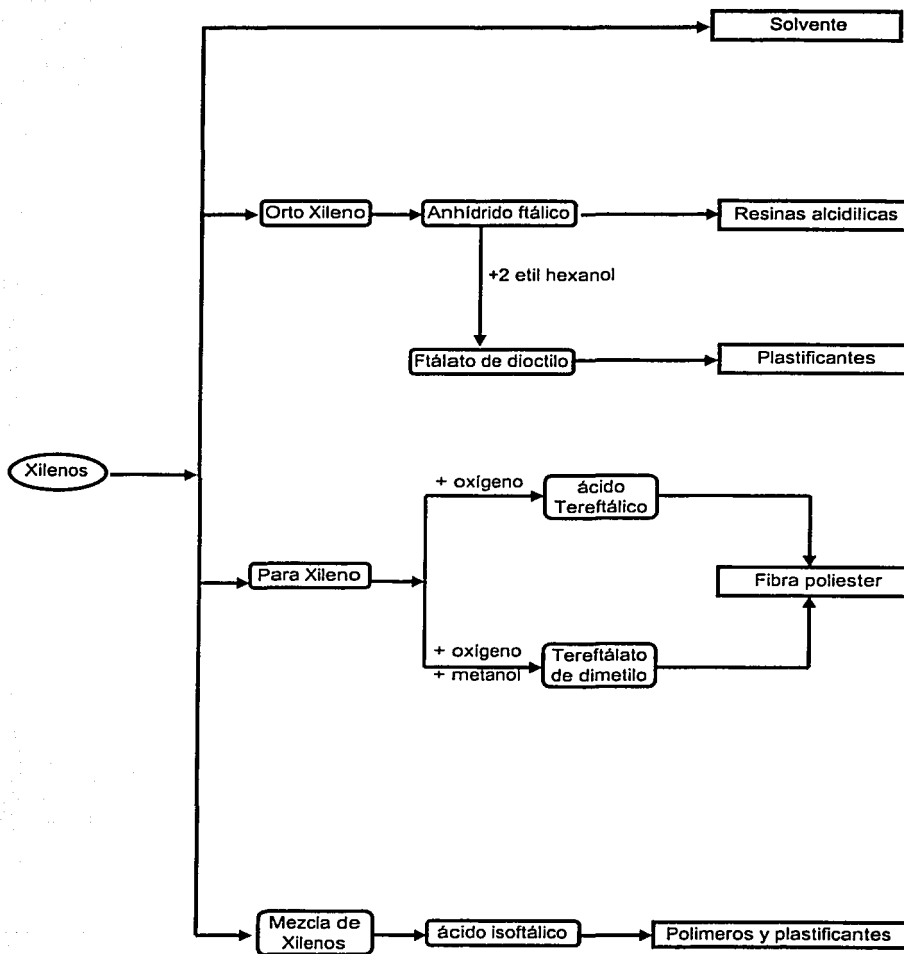












## Análisis Económico de La Industria Petroquímica

El desarrollo más importante en la historia de la Industria Petroquímica se presentó al fin de la Segunda Guerra Mundial, y se debió al desarrollo científico de una gran cantidad de productos novedosos de bajo costo, pero este ritmo de crecimiento a disminuido paulatinamente como se muestra en la siguiente tabla.

Período	Tmac. De el Consumo Mundial de Productos Petroquímicos
1951-1970	15.28 %
1971-1990	11.30 %
1991-1995	4.00 %

Tmac.: Tasa media anual de crecimiento, estimada con información de la referencia número cuatro citada en la bibliografía de este trabajo, o información de los artículos anuales "World Chemical Outlook of Chemical & Engineering News".

Los datos arriba presentados indican que los mercados de la Industria Petroquímica se encuentran al inicio de un período de maduración, por lo que se espera una disminución en el crecimiento del consumo de productos petroquímicos hasta un nivel cercano a la tasa de crecimiento de la población mundial.

Este gradiente de crecimiento puede ser absorbido por la capacidad instalada y ampliada de las plantas ya existentes, o bien por nuevas plantas de menor capacidad, más eficientes, y equipadas con modernas tecnologías.

La eminente limitación de los mercados, y el posible aumento de los competidores debido al conocimiento casi público de los procesos de elaboración tradicionales, traerán consigo una disminución en los precios de los productos petroquímicos, y esta situación repercutirá a su vez en un decremento de los márgenes de utilidad del sector.

Ante este panorama es obvio que se deberán desarrollar nuevos productos encausados a crear nuevos nichos de mercado, que permitan mayores márgenes de utilidad para estas empresas. Un ejemplo de esto podrían ser los polímeros biodegradables que no presentan un problema de contaminación ambiental, o los polímeros de ingeniería que en un futuro cercano substituirán el uso de algunos metales como aluminio, cobre, y acero.

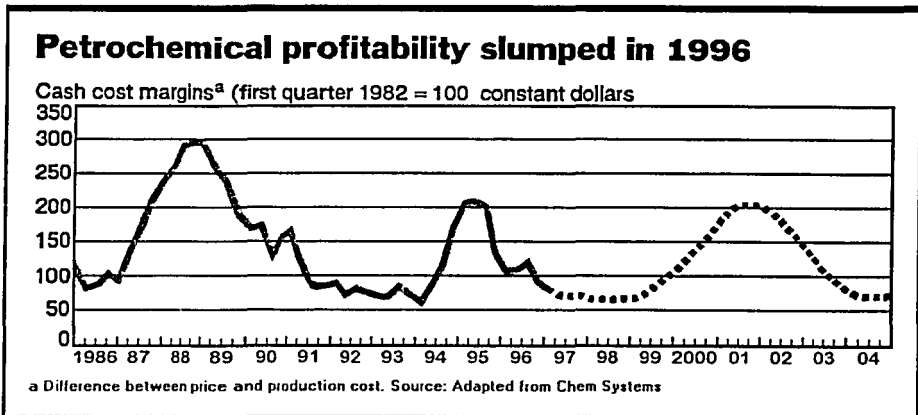


Otro factor que puede permitir el crecimiento de las empresas de este sector, es la expansión de sus mercados locales hacia otros mercados Internacionales. Por otra parte se deberá buscar la integración vertical de sus cadenas productivas, y la diversificación hacia procesos de manufactura y distribución de productos de consumo final, esto para capitalizar la disminución en los costos de mano de obra de países como México, Centroamérica, y Asia.

Los principales productores de petroquímicos en el mundo son; Estados Unidos, Alemania, Italia, Rusia, China, Japón, Brasil, y México.

Si analizamos la sección anterior referente al análisis económico del petróleo, podremos notar que Estados Unidos y México resaltan entre los principales productores de petroquímicos por ser productores de petróleo y gas natural, siendo México el único país autosuficiente en esta materia debido a que Estados Unidos importa grandes cantidades de petróleo.

Es por esta razón que a continuación se presenta un estudio del comportamiento de la Industria Petroquímica en estos dos países.



Analizando el comportamiento de la producción de los principales productos petroquímicos en Estados Unidos (principal socio comercial de nuestro país), podemos observar que estos mantienen una tasa media anual de crecimiento de 3.1 %, situación que en los últimos años a permitido a este país mantener un superávit en su balanza comercial de productos químicos, se estima que en 1997 este superávit alcanzó un valor de 19.5 billones de dólares.

A continuación se presenta un resumen de la producción anual de los principales petroquímicos en EU, y la Balanza Comercial de este país.

<b>EUA Producción Anual (miles de toneladas métricas)</b>							
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996
Amoniaco	17 003	17 169	17 924	17 195	17 869	17 402	19 530
Etileno	16 541	18 123	18 563	18 152	20 231	21 303	22 226
Propileno	9 909	9 774	10 624	9 739	10 860	11 653	11 385
Benceno	771	712	742	761	941	983	957
O-Xileno	428	348	416	377	415	460	402
P-Xileno	2 359	2 427	2 565	2 626	2 837	2 877	2 794

\*Fuente: Chemical & Engineering News

	<b>Tmac. (1990-1996)</b>
Amoniaco	2.8 %
Etileno	6.1 %
Propileno	2.8 %
Benceno	4.4 %
O-Xileno	-1.2 %
P-Xileno	3.4 %
<b>Promedio</b>	<b>3.1 %</b>

<b>Balanza Comercial</b>	<b>EUA Exportaciones</b>				<b>EUA Importaciones</b>			
	1994	1995	1996	1997p	1994	1995	1996	1997p
Billones de Dólares								
Maquinaria y Equipo de transporte	232.5	281.5	306.2	353.7	308.2	350.5	362.8	394.0
Productos manufacturados	107.4	127.6	134.6	148.8	147.1	164.3	176.5	199.1
Productos Químicos	51.5	62.2	62.9	69.5	33.2	40.4	44.9	50.0
Alimentos y animales vivos	34.3	42.2	45.8	40.4	25.5	27.2	28.9	32.0
Materias primas no comestibles	27.0	34.8	32.3	31.8	17.7	20.8	21.3	22.9
Combustibles y lubricantes	8.9	10.5	12.2	13.0	56.4	59.2	73.0	76.8
Bebidas y Tabacos	7.9	8.1	8.0	8.0	5.2	5.3	6.6	7.8
Aceite Animal y Vegetal	1.9	2.5	1.8	2.0	1.2	1.4	1.6	1.6
Otros	21.0	22.9	26.1	27.0	23.0	25.5	28.9	23.3
<b>Total</b>	<b>512.4</b>	<b>583.0</b>	<b>624.8</b>	<b>688.2</b>	<b>663.1</b>	<b>743.6</b>	<b>791.2</b>	<b>857.5</b>

\*Fuente: Chemical & Engineering News

Como ya hemos visto anteriormente, México es un importante productor de petróleo crudo, sin embargo el 50 % de esta producción es exportada, y solo el 8 % de la producción de crudo y 26 % de la producción de gas natural, se destina como materia prima a la Industria Petroquímica.

Esta situación coloca al país en una posición de gran vulnerabilidad frente a los constantes vaivenes en los precios del petróleo crudo.

La Industria Petroquímica representa un punto estratégico para la economía nacional debido a su capacidad de agregar valor a los productos derivados del petróleo.

Substituir las exportaciones de crudo por exportaciones de productos petroquímicos, permitiría a nuestro país contar con una balanza comercial más sólida, ya que el precio de los petroquímicos no varía tan bruscamente como el valor del petróleo crudo. Para lograr este propósito, se debe ampliar el mercado de petroquímicos a Europa, Asia, Centro y Sudamérica.

A continuación se presenta un estudio del comportamiento de este sector en nuestro país.

<b>Análisis Histórico del comportamiento del sector Petroquímico en México</b>					
<b>Año</b>	<b>Producción Toneladas</b>	<b>Exportación Toneladas</b>	<b>Importación Toneladas</b>	<b>Consumo Aparente</b>	<b>Capacidad Empleada</b>
1988	15 717 200	772 387	34 433	16 455 154	18 892 200
1989	16 242 200	623 953	55 498	16 810 655	19 519 300
1990	17 903 900	1 164 332	228 900	18 839 332	20 010 700
1991	18 592 200	1 538 493	299 329	19 831 364	19 807 500
1992	19 195 700	2 013 615	343 256	20 866 059	19 837 500
1993	22 844 800	2 391 453	86 810	25 149 443	21 354 000
1994	24 385 500	2 908 238	178 080	27 115 658	22 153 800
1995	22 787 200	2 201 493	97 377	24 891 316	22 153 800
1996	21 448 100	1 629 596	90 418	22 987278	22 153 800
1997 p/	20 898 600	983 393	119 769	21 762224	22 153 800
Tmac.	3.2 %	2.7 %	14.85 %	3.1 %	1.7 %

\* Datos en toneladas métricas, correspondientes a los principales grupos petroquímicos, tomados del anuario estadístico de la Secretaría de Energía Minas e Industria Paraestatal.

<b>Producción de Petroquímicos básicos en México</b>					
Miles de Toneladas	1993	1994	1995	1996	1997p
Amoníaco	2 137	2 468	2 422	2 500	2 600
Metanol	169	185	202	211	223
Etileno	1 304	1 317	1 359	1 340	1 349
Propileno	284	360	420	396	430
Butadieno	24	27	22	n.d.	n.d.
Benceno	306	320	288	273	265
Tolueno	291	329	312	314	320
Xileno	629	721	346	384	339

\*p: preliminar

\*Fuente: Compendio Estadístico del Sector Energía (1980-1997), Secretaría de Energía

<b>Composición del mercado de Productos Petroquímicos Secundarios (1994)</b>
--

	Volumen Miles de Toneladas	Participación en el mercado	Valor Millones de pesos	Participación en el mercado
Fertilizantes	4 014.2	44.2 %	1 652.4	10.0 %
Productos Intermedios	2234.3	24.6 %	4 065.9	24.6 %
Resinas Sintéticas	1 046.4	11.5 %	3 004.0	18.1 %
Fibras Químicas	933.9	10.3 %	4 928.3	29.8 %
Especialidades	634.0	7.0 %	2 258.4	13.6 %
Elastomeros	219.4	2.4 %	645.3	3.9 %
Total	9 082.2	100 %	16 554.3	100 %

\*Fuente: La Industria Química en México (1996), INEGI

( 1988-1994 )	Tasa media anual de crecimiento
---------------	---------------------------------

Fertilizantes	4.7 %
Productos Intermedios	9.4 %
Resinas Sintéticas	9.5 %
Fibras Químicas	6.5 %
Especialidades	8.5 %
Elastomeros	-1.7 %

Población mexicana	1.8 %
--------------------	-------

(1988-1994)	Tasa media anual de crecimiento
Polietileno Alta Densidad	2.4 %
Polietileno Baja Densidad	1.7 %
Adhesivos	2.6 %
Detergentes	1.8 %
Aditivos para alimentos	0.9 %
Población mexicana	1.8 %

El martes 9 de febrero de 1971, el entonces Presidente Luis Echeverría Promulgó el reglamento de la ley reglamentaria del artículo 27 constitucional, donde se estableció que el estado se encargaría de la producción de la mayor parte de los productos petroquímicos, y concediendo al estado la facultad de otorgar permisos para procesar productos de poco interés comercial.

El 17 de agosto de 1992, se publicó en el diario oficial de la federación la resolución que clasificaba a los productos obtenidos del petróleo. Esta clasificación consideraba a los productos destilados del petróleo crudo (parafinas y Naftas) como básicos y señala que solamente Pemex podía elaborarlos. Establecía los petroquímicos técnicamente básicos como productos secundarios que requerían de un permiso de la Secretaría de Energía Minas e Industria Paraestatal para su elaboración. Los demás productos quedaron desregulados y solo requerían de su registro ante la Comisión Petroquímica mexicana de la SEMIP.

El miércoles 13 de noviembre de 1996 se modificó la Ley reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en el Ramo del Petróleo, estableciendo con precisión el sector de la Industria Petroquímica que se reserva de manera exclusiva a la Nación y que comprenden a la producción de: Metano (cuando provenga de Carburos de Hidrógeno, obtenidos de yacimientos nacionales), Etano, Propano, Butano, Pentano, Hexano, Heptano, Naftas, y Materia prima para negro de humo. En esa misma fecha se abroga el decreto de 1971 mediante el cual fue creado el reglamento de la ley reglamentaria del Artículo 27 Constitucional, y de esta manera se liberó a la Industria Petroquímica Secundaria del trámite de permisos ante la actual Secretaría de Energía.

En 1997 la industria petroquímica de México afrontó un proceso de privatización parcial, a través del cual el gobierno mexicano agrupó a Pemex en cuatro subsidiarias: Exploración y producción, Refinación, Gas y petroquímica básica, y Petroquímica.

Después conforme a cada complejo petroquímico como una compañía en el régimen de sociedad anónima, para posteriormente poder ofrecer a Inversionistas privados 49% del capital de las empresas petroquímicas consideradas secundarias, y conservar el 51% del capital en manos del estado.

Sin embargo los Inversionistas interesados no concretaron sus ofertas, muy probablemente se debió al deseo de las autoridades gubernamentales de hacer valer el 51% de la participación, para nombrar a los directivos de cada empresa, y conservar el control estratégico de las petroquímicas primarias.

Actualmente se encuentran en estudio otras alternativas que en un futuro cercano podrán ser presentadas al congreso, pero será importante que las autoridades responsables de estas decisiones consideren que la mayoría de las plantas petroquímicas nacionales fueron construidas hace más de 25 años por lo cual requieren de una gran inversión en su modernización. Es importante considerar que estas inversiones podrían alcanzar una magnitud de cientos e inclusive miles de millones de dólares.

Otro punto importante que se debe considerar es que si se privatizan totalmente a Inversionistas internacionales o nacionales, es muy probable que estos opten por el cierre de las plantas mexicanas para incrementar la producción y eficiencia económica (por economía de escalas) de las plantas petroquímicas de EUA e importen hacia México estos productos para así incrementar sus ganancias.

Esta situación generaría un cambio importante en la Balanza Comercial de México, y el desempleo de una gran cantidad de trabajadores altamente capacitados, y constituiría un retraso en el avance tecnológico del país que de hecho es escaso.

Por estas consideraciones podemos precisar que el valor económico real de la Industria Petroquímica Nacional no se encuentra sólo en el valor físico de las plantas, sino en el tamaño del mercado nacional, e internacional, la posición geográficamente estratégica que ocupan estas empresas, y principalmente en la tecnología de producción que podría implementarse.

## La Industria de los Fertilizantes

Para los seres vivos es muy importante la existencia de los vegetales ya que estos forman el primer eslabón de cualquier cadena alimenticia, de hecho no es posible la existencia del hombre y de los animales sin la presencia de los vegetales.

Los vegetales para su existencia y desarrollo, absorben numerosos nutrientes del suelo y la atmósfera; a través de las raíces, las hojas, y los tallos verdes de las plantas.

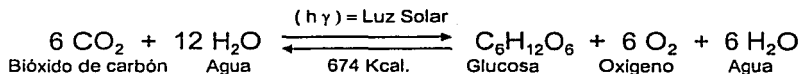
Algunos nutrientes son asimilados por las plantas en cantidades importantes, por lo que se les denomina Macronutrientes a este grupo corresponden:

C	Carbón	P	Fósforo	S	Azufre
H	Hidrógeno	K	Potasio		
O	Oxígeno	Ca	Calcio		
N	Nitrógeno	Mg	Magnesio		

También existe otro grupo numeroso de nutrientes que son asimilados en muy pequeñas dosis, a estos nutrientes se les denomina Micronutrientes, a continuación se cita una lista de los más estudiados.

Bo	Boro	Cu	Cobre	Fe	Hierro
Zn	Zinc	Mn	Manganeso	Cl	Cloro
Na	Sodio	Mo	Molibdeno		

Se sabe que los vegetales por lo general no absorben moléculas enteras, sino cationes y aniones disueltos en agua. Este fenómeno se presenta gracias a la función respiratoria de las hojas y las raíces de las plantas. El Carbón, Oxígeno, e Hidrogeno, son asimilados mediante el proceso de fotosíntesis; en forma de anhídrido carbónico del aire, agua del suelo y vapor de la atmósfera.



Ecuación de la fotosíntesis. ( Note que el Oxígeno es el único subproducto de la reacción )  
 La glucosa es la base los polisacáridos y otras moléculas hidrocarbonadas, además de ser una sustancia rica en energía

Los demás nutrientes son asimilados por los vegetales en forma de iones provenientes del suelo, abonos, y fertilizantes. Cabe aclarar que estos iones pueden ser absorbidos por la raíz, o por los estomas en las hojas de las plantas ( este fenómeno da lugar a la fertilización foliar ).

Los abonos son sustancias de origen orgánico; excremento de animales, limo de los ríos, restos triturados de plantas, u otros desechos orgánicos. Los fertilizantes son sustancias de origen mineral; Nitratos, Fosfatos, Potasa, etc.

Desafortunadamente, es común que los suelos sufran un empobrecimiento relativamente rápido de nutrientes minerales, debido al cultivo de plantas útiles al hombre. Desde la antigüedad algunos agricultores se percataron de que no se debe extraer del suelo más nutrientes de los que se ponen en él, sino se desea agotarlo completamente.

En algunos casos afortunados es la misma naturaleza la encargada de abonar, como es el caso de los valles fluviales del Nilo, donde la antigua cultura egipcia se estableció para aprovechar los suelos ricos en nutrientes, estos campos eran fertilizados cada año con el limo proveniente del desbordamiento del río Nilo.

Pero normalmente los suelos no contienen las sustancias nutritivas suficientes para obtener durante un tiempo prolongado cosechas agrícolas abundantes, y con el paso del tiempo estas sufren decrementos en su producción haciendo necesario enriquecer el suelo con abonos y fertilizantes.

En los principios de la agricultura se comenzó a utilizar los abonos naturales y posteriormente se emplearon los fertilizantes minerales como el nitrato de Chile (nitrato sódico, 16% de nitrógeno), y el amoníaco que salía como subproducto de los hornos de coque, pero estos fertilizantes eran poco utilizados.

Durante la Segunda Guerra Mundial con el auge de la Industria Petroquímica se impulsa en gran medida la producción y el uso de fertilizantes químicos.

En la actualidad existe una gran variedad de fertilizantes químicos, sólidos, líquidos, foliares, para cultivos hidropónicos, etc. Pero pueden ser clasificados en cuatro grandes familias; derivados del Nitrógeno, derivados del Fósforo, derivados del Potasio, y Fertilizantes complejos (NPK y multinutrientes).

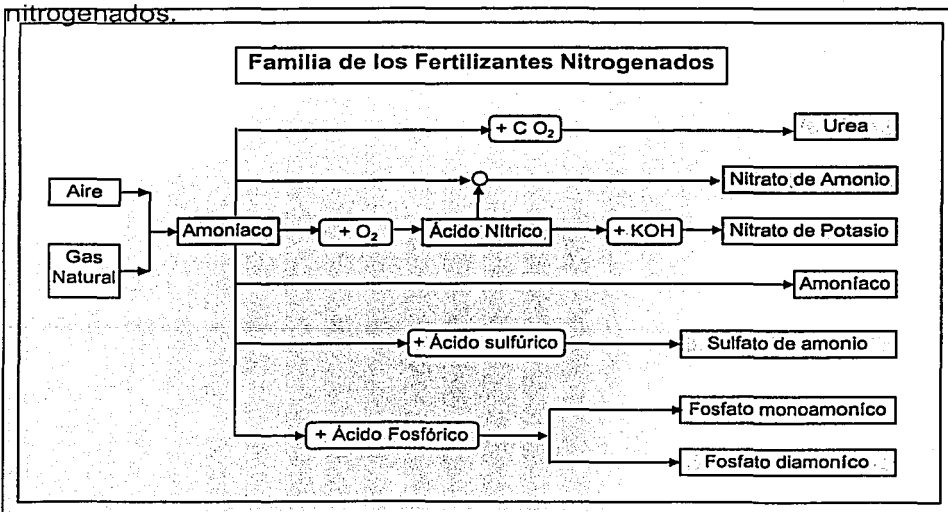


Al finalizar la Segunda Guerra Mundial comienza a emplearse el amoníaco proveniente de las industrias petroquímicas, actualmente este producto es la base de las cadenas productivas de los fertilizantes nitrogenados, estos agrupan a una gran variedad de productos cuyo contenido de nitrógeno varía desde el 11% en el caso del fosfato mono amónico hasta el 82% en el caso del amoníaco anhidro, y constituyen el sector de la industria de los fertilizantes que evoluciona más rápidamente.

El amoníaco se produce combinando, en presencia de un catalizador, tres volúmenes de hidrógeno y uno de nitrógeno a presión y temperatura elevadas.

El nitrógeno se obtiene del aire, y el hidrógeno se puede obtener mediante la combustión de gas natural, por medio de los procesos de cracking de nafta en las refinерías, ó de los gases residuales de los hornos de coque. La tecnología moderna permite recurrir a prácticamente cualquier forma económica para la obtención de hidrógeno, como la electrólisis del agua ó también a la combustión de cualquier otro hidrocarburo sólido, líquido, ó gaseoso.

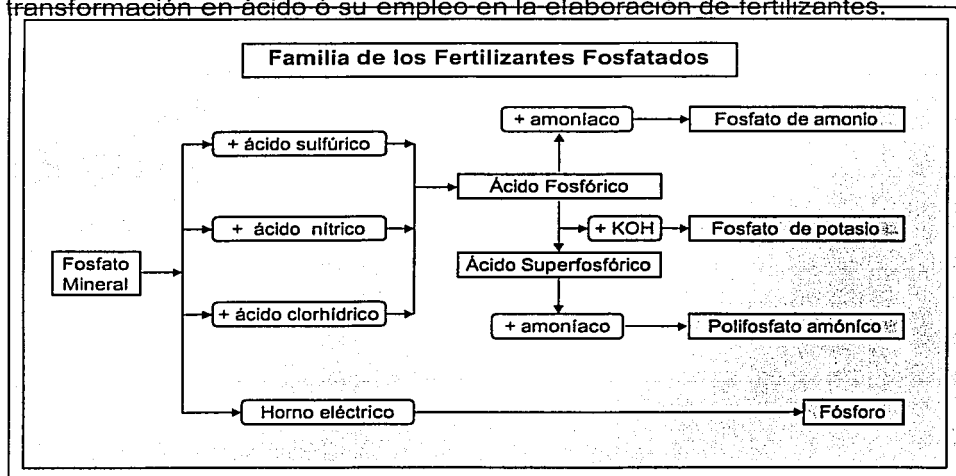
En cuanto a las necesidades agrícolas e industriales a nivel mundial de amoníaco, puede suponerse que en 1998 se consumieron 132'960,000 Toneladas de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), que equivalen a una porción insignificante de las reservas comprobadas de petróleo y gas natural. Por lo anterior puede concluirse que no existe ninguna limitante al abasto de materia prima para la producción de fertilizantes nitrogenados.



El fosfato mineral es la principal materia prima en la elaboración de fertilizantes fosfatados, este mineral se encuentra como sedimento en depósitos de origen volcánico, las reservas naturales a nivel mundial de este mineral son abundantes, de hecho se estima que estas reservas cubrirán el consumo mundial por lo menos 350 años, pero su explotación comercial es relativamente reducida, esto se debe a que el fosfato mineral de mejor calidad contiene no más del 15% de fósforo, y a que los gastos de transporte constituyen a menudo un factor decisivo para determinar las posibilidades comerciales de su explotación.

En la mayor parte de los procesos de elaboración de fertilizantes se desea que el mineral tenga un bajo contenido de impurezas como hierro y aluminio, ya que estas encarecen el proceso de trituración. Es posible beneficiar el mineral bruto mediante los procesos de flotación y calcinación, pero debe tenerse en cuenta los costos que estos procesos generan.

Comercialmente se emplean dos métodos en la producción de ácido fosfórico: El proceso por vía húmeda de acidificación del fosfato mineral con ácido (sulfúrico, clorhídrico, ó nítrico) para producir ácido fosfórico y sales de calcio que son recuperadas por un disolvente orgánico. Y la producción de fósforo mediante arco eléctrico, para su posterior transformación en ácido ó su empleo en la elaboración de fertilizantes.

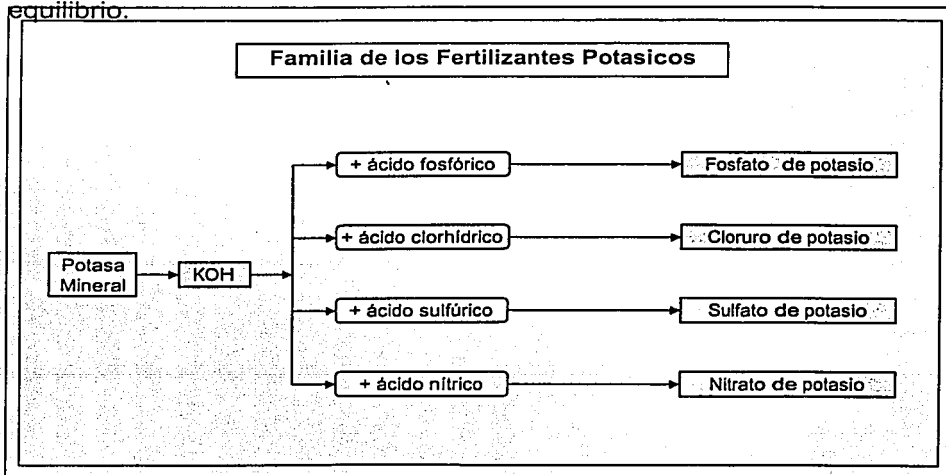


La potasa ( $K_2O$ ) es hoy un artículo importante, de 90 a 95% de la producción mundial de sales de potasio se ocupa como fertilizante, pero la potasa comenzó a emplearse como abono comercial en gran escala hasta principios del siglo XX. En el pasado se utilizó en la industria de los colorantes, curtientes, fabricación del vidrio, pirotecnia, explosivos, jabón y otros productos químicos.

Aunque son muchos los minerales que contienen potasa, la mayor parte de las reservas mundiales conocidas están en la silvita, carnalita, kainita, langbeinita, el nítro, y la polihalita. Sin embargo la mayor parte de la potasa empleada en el mundo proviene de la silvita y la carnalita.

En todas las regiones del mundo -salvo Oceanía- se han localizado reservas de potasio, pero tres cuartas partes de las reservas mundiales de este mineral se encuentran en Europa, y por esta razón la producción se ha encontrado limitada a pocos países Europeos, América del Norte, Chile, Perú, y algunos estados asiáticos como Israel.

Los costos de producción de la potasa están directamente relacionados con tres factores ; la riqueza del mineral, la profundidad de la mina, y por último la capacidad de la mina que es el factor decisivo en la explotación de esta, ya que la capacidad de la mina debe justificar los costos totales para que pueda mantenerse por encima de su punto de equilibrio.



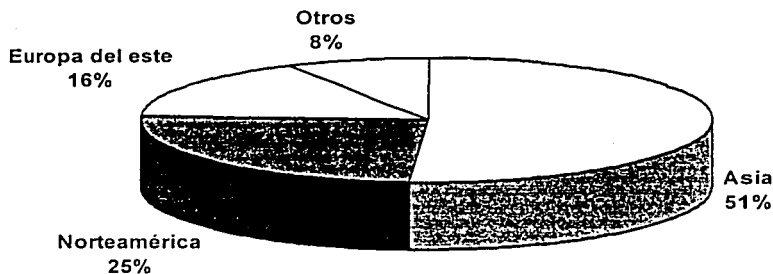
## Análisis Económico de la Industria de los Fertilizantes

Los seres humanos para su existencia y desarrollo requieren de alimentos, estos alimentos tienen su origen en vegetales, animales, y minerales. Es claro que los vegetales forman el primer eslabón cualquier cadena alimenticia y también es claro que este primer eslabón es preponderantemente esencial en el desarrollo de la especie humana.

En el mundo son contados los casos en que los suelos contienen las sustancias nutritivas suficientes para obtener durante un tiempo prolongado cosechas agrícolas abundantes, en la mayoría de los casos los suelos sufren un empobrecimiento relativamente rápido de los minerales requeridos por las plantas útiles al hombre, es por este motivo que surge la necesidad de aplicar sustancias que fertilicen los suelos.

Históricamente EUA se ha mantenido como el principal productor de fertilizantes, mientras que China e India han sido los mayores consumidores e Importadores de fertilizantes a nivel mundial. En 1997 China suspendió las importaciones de fertilizantes, ocasionando un grave descenso en los precios de estos productos y provocando una sobre oferta de productos petroquímicos que afectó a todo el sector petroquímico.

**Consumo Mundial de Fertilizantes (1995)**  
129 Millones de Toneladas Métricas



Como se menciona anteriormente Estados Unidos es el principal productor de fertilizantes, pero también es un importante consumidor de los mismos, de hecho puede observarse en las siguientes tablas que mantiene una tasa de crecimiento en su consumo de 1.13 % es decir tiende a estabilizar el consumo a tazas cercanas a las del crecimiento de la población, por lo cual podemos afirmar que el mercado de fertilizantes en Estados Unidos se encuentra en un periodo de saturación o estancamiento, esta situación repercutirá en una expansión de mercados por parte de las compañías norteamericanas hacia México, Centro y Sud América.

Producción de Fertilizantes en los Estados Unidos de Norteamérica								
Miles de Toneladas	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	Tmac (90-96)
Fertilizantes Nitrogenados								2.47 %
Amoniaco	14,446	13,790	13,309	12,588	14,475	15,670	16,814	2.56 %
Nitrato amónico	2,579	2,551	2,487	2,584	2,744	2,732	2,901	1.98 %
Sulfato amónico	2,460	2,195	2,342	2,382	2,554	2,579	2,605	0.96 %
Urea	4,287	4,241	4,164	3,863	4,614	5,177	5,551	4.40 %
Soluciones de ( N )	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	6,113	8,844	9,557	n.s.
Fertilizantes Fosfatados								1.87 %
Fosfato diamonico	13,226	13,573	14,119	12,964	14,641	15,989	15,575	2.76 %
F. monoamonico	2,252	2,227	2,342	2,693	2,869	2,715	3,332	6.74 %
Super Fosfato	1,988	1,914	2,074	1,555	1,757	1,631	1,701	- 2.56 %
Roca Fosfórica	44,269	44,877	45,941	34,800	39,172	43,992	45,080	0.30 %
Acido Fosfórico	11,036	10,934	11,354	10,503	11,979	12,420	12,511	2.11 %
Fertilizantes Potasicos								- 4.94 %
Cloruro de potasio	2,351	2,387	2,337	1,927	1,845	1,840	1,734	- 4.94 %

Consumo de Fertilizantes en los Estados Unidos de Norteamérica								
Miles de Toneladas	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	Tmac (90-96)
Nitrogenados								1.63 %
Fosfatados	4,345	4,201	4,218	4,436	4,521	4,425	4,509	0.76 %
Potasicos	5,203	5,001	5,042	5,141	5,268	5,128	5,224	0.33 %
Total	20,624	20,489	20,706	20,970	22,432	21,272	21,983	1.13 %

En las siguientes tablas se presenta un resumen de la producción de algunas sustancias que se emplean como fertilizantes (aún que también es importante señalar que se consumen en otros sectores Industriales), no obstante podemos notar que en nuestro país se producen 3,247 Toneladas de amoníaco y ácido Fosfórico dos sustancias esenciales en la producción de fertilizantes, por lo cual podemos suponer que el consumo de fertilizantes en México no rebasa las 3,500 Toneladas, esta cantidad es 6 veces inferior a el consumo de fertilizantes en Norteamérica y presenta tasas de crecimiento considerables. Estas implicaciones y el análisis de las tasas de crecimiento de estas sustancias señalan un gran potencial de mercado en nuestro país no solo de fertilizantes sino también de otros productos químicos afines que incrementaran aun más su demanda en cuanto comience la recuperación de la economía de este país.

<b>Producción de sustancias empleadas como Fertilizantes en México (1993-1997)</b>						
Miles de Toneladas	1993	1994	1995	1996	1997	Tmac (90-97)
Amoníaco	2,137	2,468	2,422	2,500	2,600	5.02 %
ác. Fosfórico	337	285	477	568	647	17.71 %
Urea	608	562	698	772	819	7.73 %
Sulfato de amonio	265	256	259	324	341	6.50 %
Nitrato de amonio	87	95	112	166	195	22.36 %
ác. Nítrico	329	336	424	425	453	8.32 %

## Algunos aspectos Interesantes de los Modelos

Cuando escuchamos hablar de modelos podemos pensar en mujeres altas y delgadas que desfilan por una pasarela, ó en el automóvil último modelo que anunciaron anoche por la televisión, incluso tal vez podemos imaginar aviones a escala volando como mariposas en el parque controlados por un control remoto, pero ¿Qué son y para que sirven los Modelos?

Los modelos propiamente definidos son; objetos ó acciones ejemplares que se proponen para ser seguidos ó imitados, también pueden ser considerados como representaciones de algo que se ha de hacer ó se ha hecho en otras dimensiones.

En este trabajo consideraremos a un modelo como una abstracción, que pretende representar y sintetizar de una manera simplificada a un sistema, tomando de este sus características más distintivas.

Una de las razones más importantes para el desarrollo de modelos, es la capacidad de estos para analizar, simular y predecir el comportamiento de cualquier sistema, haciendo posible su óptimo funcionamiento.

Como nos podremos dar cuenta los conceptos de modelo y sistema rebasan el límite de cualquier especialidad; Artística, Química, Física, Económica, etc. Por esta razón podemos comprender la existencia de múltiples y diversos modelos.

Las diferentes clasificaciones de modelos nos dan una idea adicional de sus características esenciales, ya que estos pueden clasificarse por sus dimensiones, funciones, propósitos, temas, nivel de abstracción, grado de detalle, e inclusive por el sentido mediante el cual son percibidos. A continuación se presentan dos de las clasificaciones más generales.

Según el grado de formalización de un modelo se puede clasificar en:

Modelo Mental ; Representación de la realidad no exteriorizada.

Modelo Verbal ; Descripción en lenguaje oral del modelo mental.

Modelo Físico ; Representación física mediante objetos de un sistema.

Modelo Simbólico ; Descripción de las características más distintivas de un sistema mediante lenguajes simbólicos, como por ejemplo el lenguaje matemático.

Pero la base más común de clasificación es la de Tipos de modelos, que propone incluir a todos los modelos dentro de tres tipos básicos:

Modelos Icónicos ; Un modelo icónico es una representación física de algunos objetos, ya sea en forma idealizada o en escala distinta. Los modelos icónicos son muy adecuados para la descripción de acontecimientos en un momento específico del tiempo. Por ejemplo una fotografía es una buena imagen de una fábrica y es más barata que una maqueta. Otra característica de un modelo icónico la constituyen sus dimensiones, una dimensión (Líneas y puntos, Clave Morse, Flexómetros), dos dimensiones (fotografías, planos, diagramas, mapas), tres dimensiones (Maquetas, aviones y barcos a escala, esculturas, cuerpos geométricos como las Pirámides, etc.). Cuando un modelo sobrepasa la tercera dimensión, como ocurre muy a menudo en modelos complejos, es imposible construirlos físicamente, y pasan a pertenecer a la categoría de modelos simbólicos.

Modelos Analógicos ; Los modelos analógicos representan situaciones dinámicas y se emplean con mayor frecuencia que los modelos icónicos, debido a que pueden mostrar las características del acontecimiento que se estudia y las variaciones que presenta su comportamiento a través del tiempo. Las gráficas, las estadísticas, las curvas de frecuencia, y las curvas de aprendizaje o maduras de los mercados constituyen un claro ejemplo de este tipo de modelos. Otra característica que distingue a los modelos analógicos es que estos pueden representar las relaciones cuantitativas entre propiedades semejantes de objetos de varias clases. Por ejemplo pueden representar la producción de distintos artículos de una misma fábrica de un modo sencillo y eficaz.

Modelos Simbólicos ó Matemáticos ; Este tipo de modelos representan a un sistema en su forma más abstracta, empleando cifras y símbolos matemáticos, señalando las relaciones matemáticas que guardan sus parámetros distintivos. Estos modelos pueden ser manipulados por las computadoras facilitando su simulación, análisis y optimización.

Los modelos matemáticos emplean ecuaciones que pueden ser representadas por líneas analógicas, ó por modelos icónicos de tercera dimensión como ocurre con las esferas que pueden ser representadas por un cuerpo esférico ó por una ecuación de la forma  $r^2=x^2+y^2+z^2$ , por esta razón puede dificultarse la asignación de una sola categoría a un modelo.



## Modelos Matemáticos

Como ya se mencionó anteriormente los modelos matemáticos son representaciones abstractas de la realidad, que representan las características más distintivas de un sistema con ayuda del lenguaje matemático. Pueden clasificarse por sus características en:

### Cuantitativos y Cualitativos:

La mayor parte de los pensamientos que inducen a la modelación de manera inmediata conducen a modelos cualitativos, incluso existe una gran variedad de problemas que no han podido ser cuantificados y que requieren de modelos cualitativos, un ejemplo de esto lo representan las ecuaciones químicas cualitativas.



Cuando construimos un modelo matemático e insertamos símbolos para representar cantidades constantes y variables, llamamos a esto un modelo cuantitativo, las ecuaciones y matrices constituyen modelos de este tipo.

### Específicos y Estándar:

La mayor parte de los modelos son desarrollados para solucionar problemas específicos, la construcción de modelos hechos a la medida puede extender el tiempo y el costo para resolver problemas, pero ofrecen soluciones exactas al comportamiento del sistema que se estudia.

Cuando un modelo es dado a conocer comienzan a surgir una serie de adaptaciones de ese modelo a otros problemas, hasta que este pasa ser un modelo estándar que representa menores costos en la solución de múltiples problemas pero que también puede presentar mayores desviaciones en su solución.

### Probabilísticos y determinísticos:

Los modelos que se basan en las probabilidades, las estadísticas, y se ocupan de incertidumbres futuras se llaman modelos probabilísticos.

Los modelos que se ocupan de cantidades determinadas y exactas se denominan modelos determinísticos.

Aunque ambos modelos se ocupan de acontecimientos o eventos presentes y futuros, podemos decir que los modelos probabilísticos son más empleados en la planeación de hechos futuros, mientras que los modelos determinísticos son más empleados en la planeación de eventos a corto plazo.

### Descriptivos y de optimización:

En algunas situaciones un modelo se construye sencillamente para describir una situación real de manera matemática, y por este motivo se denominan modelos descriptivos. Este tipo de modelos puede mostrar un panorama de la situación y ayudar a resolver algunas cuestiones pero generalmente son reducidos y no pueden evaluar entre varias alternativas.

Los modelos concebidos especialmente para optimizar algún sistema permiten comparar entre varias alternativas de solución y encontrar la mejor solución según los criterios señalados, estos modelos son más complejos que los modelos descriptivos por lo que requieren de un mayor tiempo en su elaboración y tienen asociados mayores costos, pero permiten encontrar las soluciones óptimas a los problemas planteados.

### Estáticos y Dinámicos:

Los modelos Estáticos se ocupan de determinar una respuesta para una serie especial de condiciones fijas que probablemente no cambiarán significativamente en el corto plazo. Un buen ejemplo de métodos para resolver este tipo de problemas lo constituye la Programación Lineal, en la que las restricciones se plantean en términos fijos.

Un modelo Dinámico está sujeto al factor tiempo, que desempeña un papel esencial en la secuencia de las decisiones: Independientemente de cuáles hayan sido las decisiones anteriores, el modelo dinámico nos permite encontrar las decisiones óptimas para los períodos futuros que se desarrollaran en un ámbito cambiante e incierto.

### Para Simulación:

El advenimiento de las computadoras ha facilitado la solución de múltiples e intrincados problemas de la ciencia y la tecnología, además ha ayudado en gran medida al desarrollo de los modelos de simulación.

La simulación es un método que comprende una serie de cálculos secuenciales paso por paso, donde puede reproducirse el funcionamiento de problemas o sistemas de gran escala.

En un modelo de simulación los datos de entrada pueden ser reales o generados, y estos pueden ser generados estadísticamente o aleatoriamente.

## Construcción de Modelos Matemáticos

Cuando se decide crear un modelo, se deben tomar en cuenta algunas consideraciones importantes que permitan el mejor desempeño del mismo, algunos investigadores de estas cuestiones han desarrollado técnicas que permiten crear modelos satisfactorios, a continuación se presenta una metodología adecuada para el desarrollo de modelos matemáticos.

### - Definir los límites del sistema:

Antes de tratar de construir el modelo de un sistema es muy importante definir los límites de este y así delimitar el problema, esto además nos permitirá ubicar al sistema dentro del universo ó entorno, y con esta información se podrá conocer y determinar si las interacciones del sistema con su entorno afectan de manera significativa el desempeño del sistema.

### - Definir las características, parámetros y criterios de Interés:

Una vez determinados los límites del sistema a analizar es importante seleccionar las características de interés sobre los cuales se basará el modelo estos pueden ser; utilidad, costos, consumo de energía, tiempo de producción, peso, cantidad de emisiones tóxicas, etc.

Normalmente se tiene el deseo de mejorar o estudiar múltiples facetas de un sistema pero en la mayoría de los casos no es posible analizar todas las características del sistema a un tiempo, por lo que es adecuado definir las características esencialmente determinantes que definirán al modelo.

El siguiente paso es determinar la escala y los parámetros de evaluación a emplear para cada característica que nos interesa.

Después se debe determinar el criterio de evaluación, es decir cual es el valor deseable en la calificación de estas características(máximo, mínimo, óptimo, deseable, etc.).

### - Detallar las variables a analizar:

La tercer parte fundamental en el desarrollo de un modelo lo constituye la selección de variables a analizar, se debe considerar sólo aquellas variables que influyen de manera significativa en el comportamiento de las características de interés.

Otro aspecto importante de este paso es la determinación de las variables que pueden ser manipulables y cuales son incontrolables.

Otra consideración pertinente que se debe tomar en cuenta es definir el nivel de detalle que se desea en el modelo, es conveniente no obscurecer el modelo con detalles innecesarios y elegir solo aquellas variables que representan impactos significativos en el comportamiento del modelo y que correspondan a los criterios señalados.

- Sistematizar el modelo:

Una vez que los límites fueron fijados, las características y criterios de evaluación determinados, las variables de selección establecidas, sólo resta ensamblar todas las variables mediante ecuaciones y relaciones matemáticas de manera que representen lo mejor posible el comportamiento del sistema en cuestión.

## **Modelos Matemáticos empleados en la Administración de Recursos**

La evolución de los modelos matemáticos se encuentra muy ligada a la continua transformación del hombre a lo largo de su historia y al consecuente desarrollo del pensamiento humano.

En el inicio de la historia de la humanidad los primeros hombres se preocupaban por cuestiones elementales; buscar sus alimentos, no ser devorados, reproducirse y disfrutar de los abundantes recursos que les brindaba la naturaleza, sin ocuparse en lo absoluto de la óptima explotación de los recursos naturales. Cuando estos grupos nómadas se establecieron en lugares fijos desarrollaron los primeros sistemas numéricos (hendiduras sobre huesos de mamut, colecciones de piedras, marcas sobre las paredes de las cuevas, etc.) para tener registros confiables del tiempo y sus propiedades, sin duda alguna estos sistemas numéricos constituyeron los primeros modelos matemáticos.

Con el tiempo se desarrollaron admirables Culturas en Mesopotamia, Egipto, Grecia, Roma, China, India, las Culturas Olmeca y Maya en Mesoamérica, y muchas otras en diferentes partes del mundo, estas desarrollaron diferentes filosofías, y junto con ellas una multitud de modelos acerca del ser humano, la vida, el mundo, y el universo, que les permitieron lograr adelantos en distintas ciencias.

Con el descubrimiento de grandes yacimientos de carbón mineral se inicia el desarrollo de la Revolución Industrial, y a partir del descubrimiento de grandes yacimientos de petróleo se presenta el impresionante auge de la Industrialización Mundial, dando inicio a una nueva etapa en la historia de la humanidad, durante este periodo se incrementó de manera impactante el desarrollo científico en todas sus áreas.

Una de las consecuencias lógicas de la revolución Industrial es el desarrollo de la Administración Científica, cuyos pioneros fueron los hermanos Frank y Lillian Gilbreth, Taylor, Fayol, y Gantt. Esta situación modificó las antiguas líneas del pensamiento administrativo, y señaló la existencia de nuevas áreas de investigación en La Teoría de sistemas que en la actualidad se conoce como "Investigación de Operaciones".

La Investigación de Operaciones está compuesta por un conjunto de herramientas matemáticas que muestran el curso de acción que permite eficientar al máximo posible el desempeño de un sistema cualquiera que este sea, considerando las restricciones que presentan los recursos siempre limitados.

En otras palabras la Investigación de Operaciones busca la maximización de las utilidades de una empresa, el mejor manejo de recursos humanos y materiales en una guerra, disminuir el consumo energético de una planta Industrial, seleccionar los alimentos mas adecuados para una dieta balanceada al menor costo posible, seleccionar en forma óptima los recursos humanos más adecuados a las necesidades de una empresa, etc.

Es difícil precisar el inicio u origen oficial de la Investigación de Operaciones, muchos Investigadores llevaron acabo trabajos que ahora se consideran de I.O., desde la Primera Guerra Mundial se encomendó a Thomas Alva Edison la tarea de analizar las maniobras de los barcos mercantes, para disminuir las pérdidas de embarques causadas por los submarinos enemigos. Edison en vez de arriesgar a los barcos en condiciones bélicas reales, empleó un " Tablero Táctico " para encontrar la solución más adecuada a este problema.

Más o menos por la misma época ( 1910 ), A.K. Erlang Ingeniero danés llevo a cabo experimentos relacionados con las fluctuaciones de la demanda de instalaciones telefónicas, este trabajo constituye el precedente de los modelos matemáticos que actualmente se emplean en la teoría de líneas de espera.

En 1928 Johon Von Neumann publica el teorema central de la "Teoría de Juegos", sin embargo este teorema seria comprendido, aplicado y divulgado hasta 1944.

En 1930 Horace C. Levison aplico modelos matemáticos muy refinados a problemas cuyo manejo habría sido imposible de otro modo. Uno de sus estudios más interesantes y mejor conocido se refería a los clientes que se negaban a recibir y aceptar paquetes de una empresa de pedidos por correo, la proporción de rechazo llegaba al 30% de las ventas brutas, hasta que descubrió que existían dos explicaciones a este fenómeno, la primera se debía a que la mercancía devuelta era la más costosa y la segunda causa de rechazo se debía a que la mercancía se enviaba más de cinco días después de recibir el pedido, cuando se dispuso de estos datos se comparo el costo del rechazo contra el costo de embarques más rápidos, por último Levison diseño un "plan óptimo de embarque".

En 1936 Leontief publicó la primera exposición clara del método de análisis input-output, este método se basa en el hecho de que la elaboración de productos finales depende de sus materias primas, es decir depende de la producción de insumos intermedios y estos a su vez de la producción de básicos.

Si bien es cierto que el interés por este tema surge con la revolución industrial, también es cierto que llega a convertirse en una necesidad durante la Segunda Guerra Mundial. La participación simultánea de los Estados Unidos; URSS, Inglaterra, Francia y sus aliados en acciones militares creó problemas muy grandes de logística, asignación de recursos, programación de la producción, control de la calidad y optimización de recursos nunca antes vistos.

Por esta razón se formaron equipos de especialistas en ciencias naturales, matemáticas, e Ingeniería para estudiar estos problemas y recomendar soluciones. Para entender mejor estos problemas, los científicos sintetizaron modelos matemáticos que permitían la comunicación en un lenguaje común a todas las áreas científicas. El desarrollo de modelos matemáticos permitió el análisis de los problemas desde varias perspectivas, la simulación más económica, y lo más importante se logró encontrar de manera infalible la mejor solución. La mejor solución significa que dado un criterio, no existe una combinación superior de las variables de decisión para el modelo.

Implícitas en la anterior afirmación eufórica acerca de las mejores soluciones posibles están las suposiciones de que el modelo elegido describe y predice el funcionamiento del sistema correctamente, y de que contempla el criterio de optimización de quien toma las decisiones. Como se puede observar, estas suposiciones son importantes y dependen de una combinación de generación de alternativas, predicción del comportamiento del sistema, de la evaluación y optimización del sistema, pero principalmente de los criterios bajo los cuales se desarrolló el modelo.

Desde principios de 1937, se pidió a los científicos ingleses que ayudaran a los militares a descubrir la mejor manera de utilizar el radar para detectar aviones enemigos.

Sir. Robert Watson, pretendió ser el creador de los primeros estudios sobre I.O. en 1937, incluso sugirió a las fuerzas armadas de los Estados Unidos la creación de grupos de investigación en esta área.

En septiembre de 1939, los científicos que trabajaban en diferentes aspectos del problema, se reunieron en el Cuartel General del Mando de Aviones de Combate ( Real Fuerza Aérea ). Ese grupo constituyó el núcleo del primer equipo de expertos en Investigación de Operaciones.

Poco Tiempo después en 1940 el físico Inglés P.M.S. Blackett, es comisionado para el análisis de las actividades del equipo de control de cañones en campo, especialmente durante los ataques de tropas enemigas. Para este trabajo formó un equipo de científicos constituido por dos fisiólogos, dos físicos matemáticos, un astro físico, un oficial del

ejército y un topógrafo, más tarde se integrarían un tercer fisiólogo, un físico general, y dos matemáticos, a este grupo se le conoció como el circo de Blackett, posteriormente debido a su éxito este grupo creció y se dividió en tres grupos Aviación, Ejército, y Marina, así fue como apartir de 1941 Inglaterra contó con grupos de I.O. destinados a las fuerzas armadas, a estos grupos se les conoció como grupos de Investigación Operacional.

En Estados Unidos Mc. Closkey y Trefethen son los primeros en nombrar a este grupo de técnicas con el nombre de Investigación de operaciones en el año de 1940.

Este tipo de actividades no sólo se desarrollo en Inglaterra y Estados Unidos, sino también en Canadá y Francia durante la Segunda Guerra Mundial.

En abril de 1942 Norteamérica ya contaba con un equipo de "Análisis de Operaciones" en la fuerza Aérea, un equipo de "Investigación de Operaciones" en el Ejército, y un equipo de "Evaluación de Operaciones" en la Marina.

Al finalizar la Segunda Guerra Mundial Inglaterra destino a los expertos en I.O. a resolver los grandes problemas Económicos e Industriales del gobierno, y algunos años después la mayor parte de las Empresas Británicas contaban con grupos de este tipo. Los grupos de United Steel Company, Carbon National Council, British Iron and Steel Research, British Petroleum, y Rehar Thomas & Balda, contaban con 180 científicos de diversas áreas dedicados a la I.O..

En EUA al terminar la Guerra se intensificaron las actividades Militares por lo que se retuvo a los grupos de I.O. e incluso aumentaron en número.

En 1950 surge la computación como una realidad, y nacen las nuevas expectativas de la automatización Industrial, dándole un gran impulso a estas técnicas matemáticas en Norteamérica. Desde su aparición hasta la fecha se han desarrollado múltiples métodos que permiten la optimización de los modelos matemáticos, pero estos como ya se menciono anteriormente, se pueden clasificar en modelos y métodos hechos a la medida y generales.

Los métodos y modelos hechos a la medida son guardados celosamente como secretos militares e industriales y en la mayoría de los casos sólo con el paso del tiempo son divulgados y transformados en métodos de uso común y generalizado.



## Origen y Evolución de la Programación Lineal

Como se mencionó en la sección anterior, durante la Segunda Guerra Mundial, la Armada Británica y las Fuerzas Armadas de los Estados Unidos se enfrentaron a diversos problemas para optimizar sus recursos, esto represento una enorme complejidad, por lo cual designaron a grupos de especialistas en múltiples disciplinas para resolver estos problemas.

Así tuvieron su origen las técnicas que hoy conocemos dentro de la categoría de "Investigación de operaciones". A este conjunto de Herramientas científicas las definiremos como el uso y la adaptación de métodos científicos, principalmente de carácter matemático y estadístico a la solución de problemas complejos.

La Programación Lineal es considerada una parte de la Investigación de operaciones, aparece al final de la Segunda Guerra Mundial, y por lo general se considera que fue desarrollada en el año de 1947 por George B. Dantzing, como una técnica para planificar las diversas actividades de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, esto se debe a la gran divulgación que tuvieron sus trabajos y por haber sistematizado un método de solución general, Dantzing comenzó a trabajar en la Fuerza Aerea de E.U. junto a Marshall Wood, John Norton y Murray Geisler en la investigación de la posibilidad de aplicar técnicas matemáticas a la planificación militar. Este equipo recibió el nombre de Proyecto Scoop (Scientific Computation of Optimum Programs). Inspirados principalmente por el enfoque interindustrial del modelo insumo-producto de Wassil Leontief (1936) crearon en el verano de 1947, el **método simplex**, este método permite encontrar el valor óptimo de un conjunto de variables relacionadas entre sí por medio de una ecuación lineal sujeta a restricciones que tienen la forma de desigualdades lineales, este método es extremadamente sencillo desde el punto de vista formal de las matemáticas, pero representa un gran potencial para resolver problemas de programación de actividades, capital, energía, materiales, etc.

La Programación Lineal y el método simplex fueron presentados por primera vez de forma privada, cuatro años más tarde esta obra sería publicada por Dantzing bajo el título de "Maximization of a Linear Function of Variables Subject to Linear Inequalities" << artículo publicado en la recopilación dirigida por T.C. Koopmas, Activity Analysis of Production an Allocation, páginas 339-347, de la editorial John Wiley & Sons Inc., New York, (1951)>>.

Se puede destacar como un precursor de estas técnicas al matemático ruso Kantorovich que publicó a través de la universidad de Leningrado su trabajo sobre los métodos matemáticos empleados en la organización y planeación de la producción.

El matemático Frank L. Hitchcock, planteó de forma abstracta el fundamento matemático de la Programación Lineal, aplicó sus teorías a un problema de transporte en el artículo "The distribution of a product from Several Sources to numerous Localities", <<Journal of Mathematics and Physics, Vol 20, pag. 224 a 230 (1941)>>.

En 1945, el Economista G.J. Stigler planteo un problema con todas las características de la Programación Lineal, tomando como datos 77 alimentos variados y nueve elementos nutritivos (calorías, proteínas, vitaminas, etc.), y mediante el empleo de un método de tanteo, base del método simplex, llego a la conclusión de que es posible mantener una dieta adecuada si se consume harina de trigo, repollo, y habas secas, a un costo de 39.93 dólares anuales considerando los precios de 1939.

Otras aportaciones importantes a este tema fueron creadas por John von Neumann creador de La teoría de juegos de estrategia, junto con A.W. Tucker de la Universidad de Princeton, ambos dieron un mayor apoyo teórico a la Programación Lineal, principalmente a la dualidad (1947).

Robert Dorfmann, en 1951, con su tesis doctoral "Aplicación de la programación lineal a la teoría de la firma". A. Charnes y W.W. Cooper, del equipo del Carnegie Institute of Technology, se interesaron en ciertos aspectos teóricos particulares como degeneración, método simplex revisado, variables acotadas, y desarrollaron aplicaciones Industriales relativas a la refinación del petróleo (1951). Por otra parte P.Massé y R. Gibrat utilizan esta técnica en la selección de fuentes de energía para la producción de electricidad (1955).

Es también importante señalar los trabajos de R. E. Gomory, quien soluciona el problema de la programación lineal discreta, y las hechas por Lester Ford y D.K. Fulkerson con su teoría de redes, dentro de la cual se consideran los sistemas de trayectoria crítica (PERT y CPM), de gran aplicación práctica como herramientas de programación y control (1956).

En los últimos años, los resultados más destacados y prometedores están en la resolución de problemas de programación lineal en números enteros, el principio de descomposición de Dantzing y Wolf, y diversos trabajos sobre Programación Lineal Estocástica.

Finalmente, señalaremos que la programación Lineal no hubiese alcanzado el amplio desarrollo que ha tenido en poco más de 20 años si simultáneamente no se hubiesen creado y perfeccionado las computadoras, ya que estas facilitan enormemente el trabajo de manipular una gran cantidad de variables y ecuaciones, permitiendo aplicaciones importantes a problemas Industriales, Económicos y de estrategia militar que anteriormente recibieron soluciones intuitivas y empíricas.

## Fundamentos de la Programación Lineal

La Programación Lineal (PL) es una de las técnicas matemáticas más difundidas de optimización. Se entiende por técnica de optimización al método matemático que tiene como objetivo maximizar o minimizar una función matemática, empleando estos modelos es posible maximizar las utilidades de una empresa o minimizar el consumo de energéticos de algún sistema.

La Programación Lineal es un subconjunto de un área más extensa de procedimientos de optimización matemática llamada programación matemática. Aunque la aplicación de estos procedimientos suele exigir el empleo de computadoras, ninguno se ocupa de la programación de estas, su principal función es desarrollar modelos matemáticos que permitan encontrar una solución óptima para una situación y facilitar la toma de decisiones.

La programación Lineal es una técnica muy potente y con multitud de aplicaciones. Se usa mucho en la Industria militar y en la petrolera. Si bien esos sectores han sido quizá los principales usuarios de ella, el sector privado, el sector publico, y la Economía también la han aprovechado ampliamente.

Matemáticamente el problema de programación lineal característico se puede definir como la obtención del máximo o el mínimo de una función lineal (denominada función objetivo).

$$f(o) = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + \dots + a_nx_n$$

Sujeta a restricciones o limitaciones lineales expresadas por desigualdades lineales por ejemplo:

$$b_{11}x_1 + b_{12}x_2 + b_{13}x_3 + \dots + b_{1n}x_n \leq C_1$$

$$b_{21}x_1 + b_{22}x_2 + b_{23}x_3 + \dots + b_{2n}x_n \leq C_2$$

$$b_{31}x_1 + b_{32}x_2 + b_{33}x_3 + \dots + b_{3n}x_n \leq C_3$$

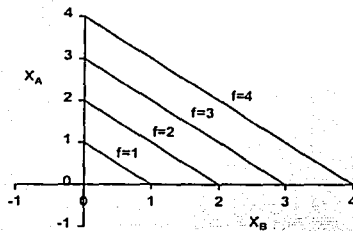
$$b_{41}x_1 + b_{42}x_2 + b_{43}x_3 + \dots + b_{4n}x_n \leq C_4$$

Además se debe considerar que las variables  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  generalmente se encuentran limitadas a tomar sólo valores positivos.

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n \geq 0$$

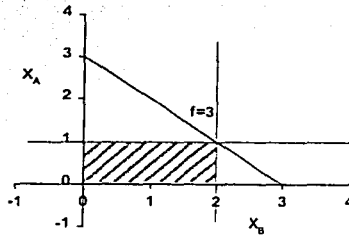
Los problemas lineales presentan ciertas características que facilitan su solución, tal vez la particularidad más importante radica en el hecho de que la función objetivo esta representada por una línea recta; y solo se puede determinar su valor máximo o mínimo cuando se encuentra sujeta a restricciones, y este máximo ó mínimo será general para el intervalo considerado.

Si examinamos la función objetivo  $f(o)=X_A+X_B$  sin considerar las restricciones que debe implicar, encontraremos que las primeras derivadas parciales  $\partial f/\partial X_A$  y  $\partial f/\partial X_B$  son iguales a uno y por lo tanto no es posible igualar a cero lo que implica la inexistencia de un máximo o un mínimo de la función en un intervalo abierto.



Sin embargo si adicionamos un par de desigualdades lineales que restrinjan al problema por ejemplo:

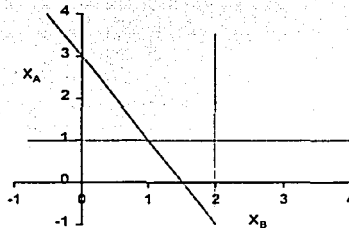
$$\begin{aligned} X_A &\leq 1 \\ X_B &\leq 2 \end{aligned}$$



Podemos observar que el valor máximo finito para esta función bajo estas restricciones se encuentra en la intersección de las dos restricciones, y que en este punto la función objetivo presenta un valor de tres.

Si además agregamos una igualdad como tercer restricción.

$$X_A + 2 X_B = 3$$



En este caso el área de las soluciones factibles es anulada debido a que la solución solo se podrá encontrar sobre la línea que marca la nueva restricción, es decir ahora la solución óptima se encontrará en la intersección de las restricciones ( $X_A \leq 1$ ) y ( $X_A + 2 X_B = 3$ ). Anulando por completo la restricción ( $X_B \leq 2$ ).

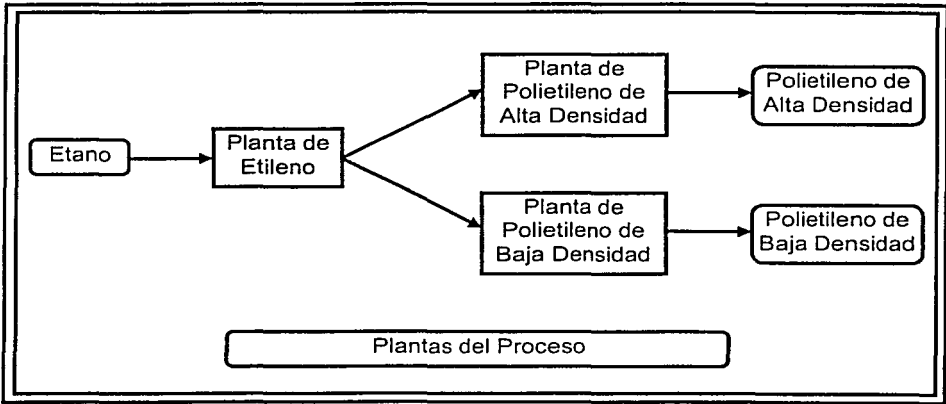
Es claro que el máximo ó mínimo de la función objetivo de un problema de programación lineal se hallara siempre en la intersección de la función objetivo con sus límites o con una o varias de las restricciones del problema ó con los límites de las variables y no en el interior de la región en marcada por los límites y restricciones del problema.

Este hecho es conocido desde hace muchos años y constituye el fundamento matemático de los algoritmos de cálculo empleados para resolver estos sistemas de ecuaciones.

# Conceptos Básicos de Programación Lineal

Para desarrollar una explicación más clara de los conceptos básicos y métodos de solución que implican este tipo de problemas consideraremos un ejemplo simplificado de la Industria Petroquímica.

Petroquímica, S.A. de C.V., cuenta con tres plantas, la primera de sus plantas produce etileno, la segunda produce Polietileno de Alta densidad, y la tercera planta produce Polietileno de Baja densidad. Se desea incrementar las utilidades de esta empresa al máximo posible, Todos los datos disponibles se presentan a continuación.



Petroquímica, S.A. de C.V.					
Planta	Capacidad Instalada Ton. / año	Costos Fijos \$ / año	Costos Variables \$ / Ton.	Precio del Producto \$ / Ton.	Demanda del Producto Ton. / año
Etileno	100	13 000 000	152	320	n.d.
PEAD	60	6 000 000	350	500	65
PEBD	55	5 000 000	347	537	50

\* n.d. no disponible ( Sólo se produce para el auto consumo de la Empresa)

Sólo se puede disponer de 110 000 Toneladas de Etano
Para producir 1 Ton. De PEAD se requiere de 1.0150 Ton. De Etileno
Para producir 1 Ton. De PEBD se requiere de 0.9513 Ton. De Etileno
Para producir 1 Ton. De Etileno se requiere de 1.2430Ton. De Etano

Para mostrar la solución del problema en una gráfica de dos dimensiones se consideró que el etileno producido es consumido en su totalidad por la empresa y no se registran ventas de este producto.

**Función Objetivo :**

Las variables empleadas en este modelo son las siguientes:

- PEAD : Producción y venta de Polietileno de Alta Densidad
- PEBD : Producción y venta de Polietileno de Baja Densidad
- $U_{\text{etileno}}$  : Utilidad asociada a la producción de etileno
- $U_{\text{PEAD}}$  : Utilidad asociada a la producción de PEAD
- $U_{\text{PEBD}}$  : Utilidad asociada a la producción de PEBD

Aplicando el concepto básico de que las utilidades resultan de la diferencia entre ingresos y costos, obtenemos la función objetivo (a Máximizarse).

$$f(u) = U_{\text{etileno}} + U_{\text{PEAD}} + U_{\text{PEBD}}$$

$$\begin{aligned} U_{\text{etileno}} &= \text{ventas} - \text{costos} \\ &= \text{ventas} - [\text{costos variables} + \text{costos fijos}] \\ &= (320 \text{ \$/Ton})\text{Prod. de Etileno} - [(152 \text{ \$/Ton})\text{Prod. de Etileno} + 13\text{E6\$}] \\ &= (320 - 152)\text{\$/Ton ( Producción de Etileno )} - \$ 13\ 000\ 000 \\ &= (168 \text{ \$/Ton}) \text{ Producción de Etileno} - \$ 13\ 000\ 000 \\ &= (168 \text{ \$/Ton}) (1.0150 \text{ PEAD} + 0.9513 \text{ PEBD}) - \$ 13\ 000\ 000 \\ &= (170.5 \text{ \$/Ton}) \text{ PEAD} + (159.8 \text{ \$/Ton}) \text{ PEBD} - \$ 13\ 000\ 000 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{\text{PEAD}} &= \text{ventas} - \text{costos} \\ &= \text{ventas} - [\text{costos variables} + \text{costos fijos}] \\ &= (500 \text{ \$/Ton}) \text{ PEAD} - [(350 \text{ \$/Ton}) \text{ PEAD} + \$ 6\ 000\ 000] \\ &= (500 - 350) \text{\$/Ton ( PEAD )} - \$ 6\ 000\ 000 \\ &= (150 \text{ \$/Ton}) \text{ PEAD} - \$ 6\ 000\ 000 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{\text{PEBD}} &= \text{ventas} - \text{costos} \\ &= \text{ventas} - [\text{costos variables} + \text{costos fijos}] \\ &= (537 \text{ \$/Ton}) \text{ PEBD} - [(347 \text{ \$/Ton}) \text{ PEBD} + \$ 5\ 000\ 000] \\ &= (537 - 347) \text{\$/Ton ( PEBD )} - \$ 5\ 000\ 000 \\ &= (190 \text{ \$/Ton}) \text{ PEBD} - \$ 5\ 000\ 000 \end{aligned}$$



**Función Objetivo :** ( a Maximizar )

$$f(u) = 320.5 \text{ PEAD} + 349.8 \text{ PEBD} - 24\,000\,000$$

**Restricciones :**

Las restricciones implicadas en este modelo son:

Capacidad Instalada : Esta restricción nos indica que la producción siempre será menor o igual a la capacidad instalada.

$$\text{Planta de Etileno : } 1.0150 \text{ PEAD} + 0.9513 \text{ PEBD} \leq 100\,000$$

$$\text{Planta de PEAD : } \text{PEAD} \leq 60\,000$$

$$\text{Planta de PEBD : } \text{PEBD} \leq 55\,000$$

Demanda : La producción por lo general es menor a la demanda debido a que en este caso se puede importar producto.

$$\text{PEAD : } \text{PEAD} \leq 65\,000$$

$$\text{PEBD : } \text{PEBD} \leq 50\,000$$

Abasto de materia prima : El consumo de materia prima deberá ser menor o igual a su disponibilidad.

$$\text{Etano : } 1.2430 [1.0150 \text{ PEAD} + 0.9513 \text{ PEBD}] \leq 110\,000$$

$$1.2616 \text{ PEAD} + 1.1825 \text{ PEBD} \leq 110\,000$$

Otras restricciones implícitas al problema son : La producción deberá ser positiva (no existe desproducción)

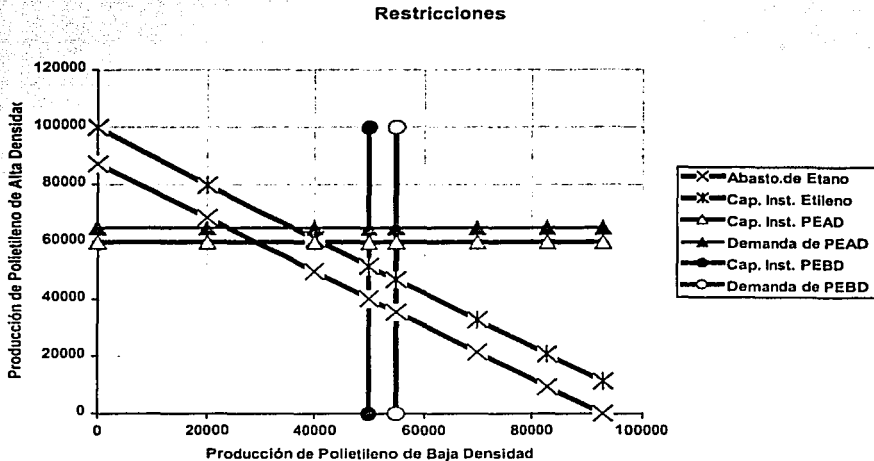
$$\text{PEAD} \geq 0$$

$$\text{PEBD} \geq 0$$

Como podemos notar nuestro problema simplificado a sido resumido en un conjunto de ecuaciones, es decir, fue traducido a un problema típico de programación lineal, consta de una función objetivo y cuatro restricciones, por lo tanto puede ser resuelto siguiendo tres pasos.

1. Mostrar en una gráfica PEAD vs PEBD las restricciones.
2. Determinar el área donde se hallan las soluciones factibles.
3. Encontrar el punto con la mayor utilidad asociada a lo largo del límite de el área de soluciones factibles. Esto se logra mediante la evaluación de la función objetivo en cada intersección de las restricciones hasta localizar el valor máximo.

En el siguiente gráfico podemos observar los límites de las seis restricciones del problema.



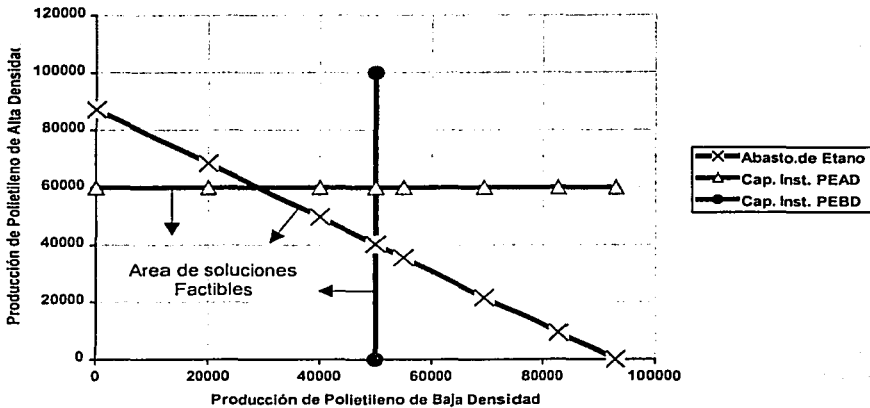
Analizando los límites de estas seis restricciones en esta gráfica podemos observar tres situaciones muy importantes.

1. El abasto de etano no permite el desempeño de la máxima capacidad de la planta de etileno.
2. La capacidad instalada de PEAD es menor a la demanda de este producto.
3. La demanda de PEBD es menor a la máxima capacidad de la planta de PEBD.

Estas consideraciones nos permiten darle mayor claridad a la solución, considerando tres restricciones como ficticias ó inactivas y reduciendo a tres las restricciones activas del problema;

1. Abasto de etano.
2. Capacidad instalada de la planta de PEAD.
3. Demanda de PEBD.

### Restricciones Activas y Area de Soluciones Factibles



Esta gráfica muestra la zona donde se encuentran todas las combinaciones posibles que podrían dar solución a este problema, esta zona es conocida como **área de soluciones factibles**.

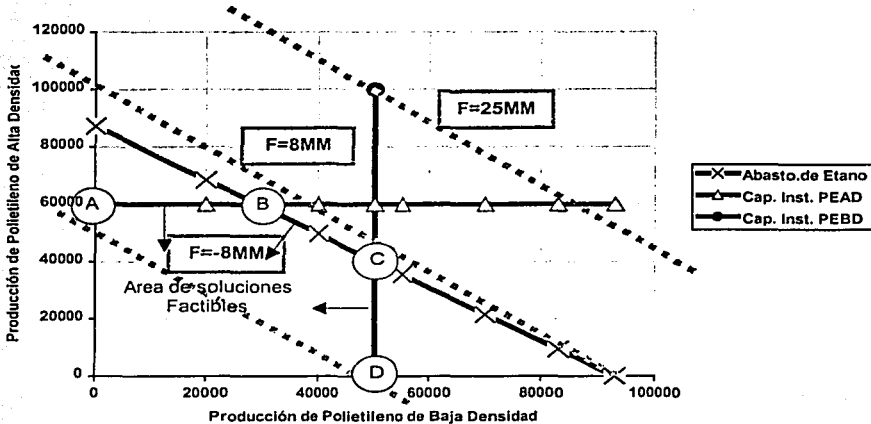
Sin embargo la **solución óptima** a este problema no se encuentra en el interior del área de soluciones factibles, sino en algún punto sobre el perímetro, específicamente en la intersección de dos o más restricciones, e inclusive se podría localizar en la intersección de las restricciones con los límites.

Es importante recordar que en este ejemplo el valor óptimo que estamos buscando es la cantidad que deben producir y vender las tres plantas que conforman la empresa Petroquímica S.A., para que esta obtenga la mayor utilidad posible.

Para lograr encontrar este punto óptimo se requiere evaluar la función objetivo en cada uno de los vértices del área de soluciones factibles hasta hallar la combinación de valores de producción que nos reporte la mayor utilidad.

Para evaluar la función objetivo en estos puntos, se requiere conocer el punto de intersección de las restricciones lineales, esto se puede resolver fácilmente cambiando los signos  $>$  ó  $<$  por  $=$  en dos de las restricciones que se interceptan y resolviendo por el método de ecuaciones simultáneas, sustitución de variables, o cualquier otro método.

## Método Gráfico



En esta gráfica podemos observar tres líneas punteadas sobre las cuales la función objetivo tiene un valor constante, como podemos notar la función objetivo en el punto (0,0) tiene un valor de  $-\$24,000,000$  e incrementa su valor a medida que se aleja del origen hacia el extremo superior derecho.

También podemos observar las intersecciones entre las restricciones y los límites del problema señaladas por las letras A, B, C, y D.

El valor de la función objetivo en estos puntos se presenta a continuación:

PUNTO A:	(PEAD=60000, PEBD=0.000)	$f(u) = -4,770,000$
PUNTO B:	(PEAD=60000, PEBD=2910)	$f(u) = 5,377,601$
PUNTO C:	(PEAD=40326, PEBD=50000)	$f(u) = 6,414,411$
PUNTO D:	(PEAD=0.000, PEBD=50000)	$f(u) = -6,510,000$

Analizando estos puntos podemos notar rápidamente que el valor más alto para esta función bajo estas restricciones se localiza en el punto "C", que es donde se encuentra el valor óptimo para esta función, esto es lógico debido a que de los cuatro es el punto más lejano al origen.

Después de analizar gráfica y matemáticamente el problema de la empresa Petroquímica, S.A., encontramos que las utilidades máximas posibles bajo estas condiciones ascienden a la cantidad de 6,414,411 USD anuales para obtener esta cantidad se debe producir y vender 40,326 Toneladas de Polietileno de Alta Densidad, y 50 000 Toneladas de Polietileno de Baja densidad, las restricciones que limitan de manera determinante a las utilidades son: la demanda de Polietileno de Baja densidad y el abasto de Etano.

Cuando un problema de programación lineal no es correctamente expresado, es posible que no tenga solución, este tipo de problemas son conocidos como **Problemas Lineales Degenerados**, Esta situación puede presentarse por tres causas:

- 1) Cuando la función objetivo se sobrepone a una restricción, debido a que la función objetivo y la restricción tienen la misma pendiente, se genera un infinito de "soluciones óptimas". Para comprender mejor observaremos el siguiente ejemplo :

Función Objetivo : ( a Máximizar )

$$f ( u ) = 340.9 \text{ PEAD} + 340.9 \text{ PEBD} - 24\,000\,000$$

Restricciones :

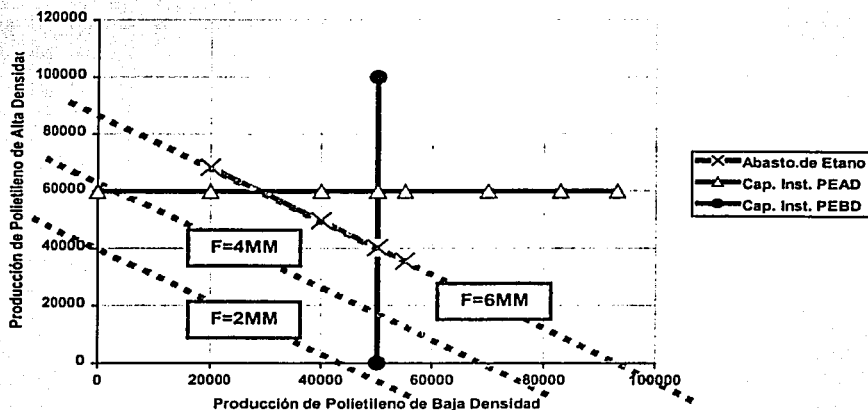
$$\begin{aligned} \text{Abasto de Etano :} & \quad \text{PEAD} + \text{PEBD} \leq 88\,000 \\ \text{Capacidad Instalada de PEAD :} & \quad \text{PEAD} \leq 60\,000 \\ \text{Capacidad Instalada de PEBD :} & \quad \text{PEBD} \leq 50\,000 \end{aligned}$$

Si se divide la función objetivo entre 340.9 tenemos que:

$$f ( u ) = \text{PEAD} + \text{PEBD} - 99585$$

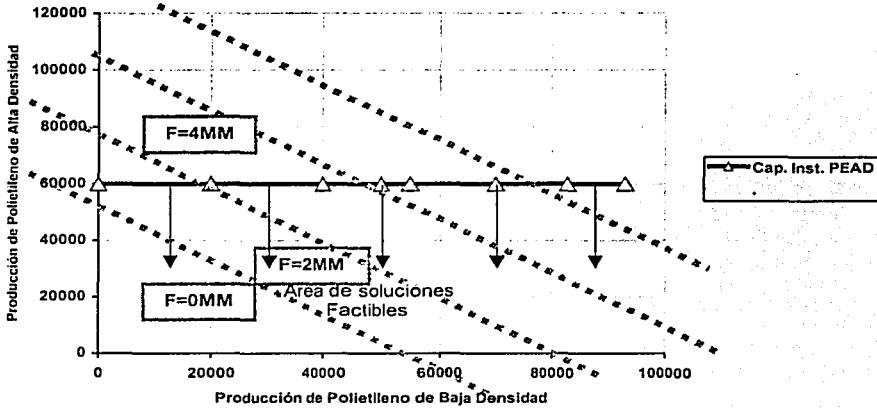
Esta situación se muestra en la siguiente gráfica.

Problemas Lineales Degenerados



- 2) Cuando el área de soluciones factibles es ilimitada, esta situación ocurre cuando existe solo una restricción ó las restricciones del problema son paralelas, recordemos que el área entre dos líneas paralelas es infinita.

### Problemas Lineales Degenerados

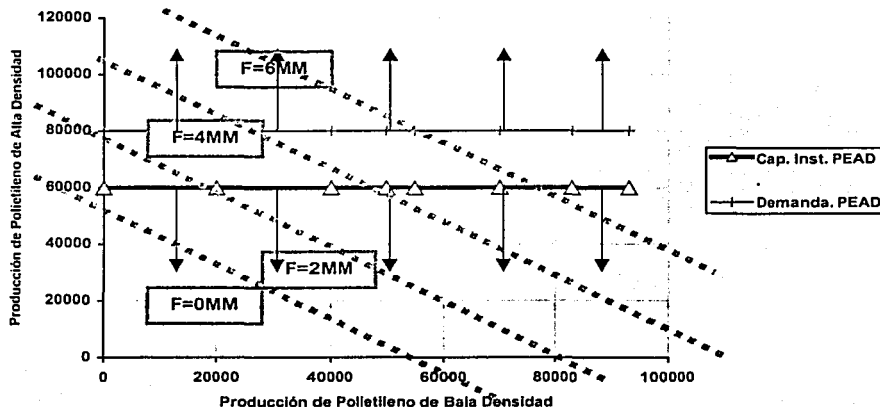


3) Cuando el área de soluciones factibles no existe, porque el área de las restricciones no coincide. Por ejemplo:

$$\begin{array}{rcl} \text{Si} & \text{Cap. Instalada de PEAD} & \leq 60,000 \\ & \text{Demanda de PEAD} & \geq 80,000 \end{array}$$

Se puede notar que no existe alguna región donde se cumplan simultáneamente ambas restricciones, esto ocasiona que no exista área de soluciones factibles, y por lo tanto se trata de un problema degenerado.

Problemas Lineales Degenerados





Este problema en particular parece simple, pero no todos los problemas de programación lineal se presentan en dos dimensiones, por ejemplo este problema simplificado puede contener una variable adicional si se considera que el etileno producido por esta empresa puede ser vendido como materia prima de otra empresa.

Por esta razón se han desarrollado otros métodos de solución, como el desarrollado por Dantzing denominado método simplex, el cual consiste en cuatro pasos que se describen a continuación:

Recapitulando las ecuaciones que definen al problema:

Función Objetivo : ( a Maximizar )

$$f ( u ) = 320.5 \text{ PEAD} + 349.8 \text{ PEBD} - 24\ 000\ 000$$

Restricciones :

Las restricciones activas en este ejemplo son:

Capacidad Instalada :

$$\text{Planta de PEAD} : \text{PEAD} \leq 60\ 000$$

Demanda :

$$\text{PEBD} : \text{PEBD} \leq 50\ 000$$

Abasto de materia prima :

$$\begin{aligned} \text{Etano} : & 1.2430 [ 1.0150 \text{ PEAD} + 0.9513 \text{ PEBD} ] \leq 110\ 000 \\ & 1.2616 \text{ PEAD} + 1.1825 \text{ PEBD} \leq 110\ 000 \end{aligned}$$

Paso 1.

Verificar que todas las restricciones se encuentren con el signo menor que, en caso de que no sea así multiplicar por menos uno ambos lados de la desigualdad para invertir su sentido, en este caso no es necesario.

$$\text{PEAD} \leq 60\ 000$$

$$\text{PEBD} \leq 50\ 000$$

$$1.2616 \text{ PEAD} + 1.1825 \text{ PEBD} \leq 110\ 000$$

## Paso 2.

Adicionar variables de holgura (S1, S2, S3 ), este es un artificio que nos permite transformar las desigualdades en igualdades.

$$\text{PEAD} + \text{S1} = 60\,000$$

$$\text{PEBD} + \text{S2} = 50\,000$$

$$1.2616 \text{ PEAD} + 1.1825 \text{ PEBD} + \text{S3} = 110\,000$$

## Paso 3.

Colocar todas las ecuaciones como se muestra en el siguiente tableu y seleccionar la primera solución factible, esto se logra localizando el valor más alto en el último renglón correspondiente a la función objetivo, esta columna se denomina columna pivote, posteriormente se divide cada uno de los valores de la columna "b" con su correspondiente de la columna pivote, esto con el fin de localizar el valor más bajo para esta relación, el renglón donde se localizo el valor más bajo se denomina renglón pivote.

$$60,000 / 0 = \cancel{\infty}$$

$$50,000 / 1 = 50,000$$

$$110,000 / 1.1825 = 50,875$$

El valor que se encuentra en la intersección de la columna pivote con el renglón pivote se denomina elemento pivote.

Elemento pivote

	PEAD	PEBD	S1	S2	S3	b
S1	1	0	1	0	0	60,000
S2	0	1	0	1	0	50,000
S3	1.2616	1.1825	0	0	1	110,000
	320.5	349.8	0	0	0	24,000,000

Columna pivote

Rengló pivote

Después se dividen todos los valores del renglón pivote entre el valor del punto pivote, todos los demás valores son substituidos siguiendo la siguiente formula:

Valor actual = Valor anterior - (Valor anterior del elemento correspondiente de la columna pivote multiplicado por el valor equivalente actual del renglón pivote).

Por ejemplo:

$$\text{Valor actual} = 0 - 1.1825 * 1 = -1.825$$

	PEAD	PEBD	S1	S2	S3	b
S1	1	0	1	0	0	60,000
PEBD	0	1	0	1	0	50,000
S3	1.2616	0	0	-1.1825	1	50,875
	320.5	0	0	-349.8	0	-6,510,000

Paso 4.

Continuar con este procedimiento hasta que desaparezcan del último renglón los números positivos.

	PEAD	PEBD	S1	S2	S3	b
S1	0	0	1	0.9373	-0.7926	19,674.2
PEBD	0	1	0	1	0	50,000
PEAD	1	0	0	-0.9373	0.7926	40,325.8
	0	0	0	-49.39	-254.03	-6,414,411

Como se podrá notar los resultados son exactamente iguales a los obtenidos por el método gráfico.

Este método no es el único que se ha desarrollado también existen otros como el método simplex revisado de dos etapas, y el método de Karmarkar entre otros.

## Programas de Computo disponibles

Actualmente se cuenta con programas de computo comerciales que facilitan de manera importante la solución a estos problemas, a continuación se presenta una lista de estos.

NOMBRE COMERCIAL	ORIGEN	LENGUAJE
XA EXtended Aplication	Sunset Software Technology 1613 Chelsa Road Suite 153 San Marino California 91108	Especial + Editor de texto
LINDO	Prof. Linus Schrage, Graduate School Busines, Univ, Chicago Chicago Il. 60637.	Fortran
LP83/MIP83	Sunset Software Technology 1613 Chelsa Road Suite 153 San Marino California 91108	Especial + Editor de texto
LP / PROTRAN	IMSI, 7500 Beilaire Blvd. Houston, TX 77036	Fortran
EMPS	Sperry Corp P.O. Box 64942 St. Paul, MN 55164	Fortran
MINOS-HP	Tennessee Valley Authority. P:O: Drawer E. Norris, TN 37828	Fortran
MICROSOLVE	Holden-Day, Inc. 4432 Telegraph Ave., Oakland, CA, 94609.	Basic
MINI-LP	Scicon Ltd., Brick Close. Milton Keynes, MK11 3EF, UK	Fortran
MPS-III	IBM	Ensamblador + Fortran
MPSX	IBM	Ensamblador + Fortran
OMNI + OPTIMIZER	Haverly System, Inc. P.O. Box 919, Denville, NJ. 07834	Especial
SCICONIC	Scicon Ltd, Brick Close, Milton Keynes, MK11 3EF, UK.	Fortran
WHIZARD	Kentron, 1700 N. Moore St., Arlington, V.A. 22209	Ensamblador
APEX-III	CDC	Fortran
PIMS	Process Industry Modeling System (ASPEN)	

## Método para estimar costos de Plantas Petroquímicas

Existen contadas plantas petroquímicas a nivel mundial, y son construidas con un gran esparcimiento en tiempo debido a que las plantas de estos productos implican grandes inversiones, por lo general del orden de 10 a 1,500 millones de dólares, esta situación genera la formación de grandes monopolios, que guardan celosamente la información económica de sus plantas, ya que proporcionan información valiosa para la toma de decisiones a la competencia.

Debido a la dificultad para conocer datos actuales de los costos para plantas de este tipo se han desarrollado técnicas como el método para estimación de costos de operación para plantas de proceso, especialmente petroquímicas (SRI) del Standford Research Institute, en el cual el valor del producto depende de los siguientes factores.

### COSTOS VARIABLES:

**Costo de materias primas:** Consumo de materia prima \* Costo unitario  
**Ingresos por venta de subproductos:** Producción de subproductos \* Valor unitario  
**Costos de Servicios:** Consumo de cada servicio \* Costo unitario

### COSTOS FIJOS:

**Mano de obra de operación:** [(Valor de Mano de Obra + prestaciones)\*1.1] \*  
 Número de operarios \* Turnos/día \* Días de operación.  
**Mano de obra del laboratorio de control:** Mano de Obra de operación \* 0.10  
**Mano de obra de mantenimiento:** Inversión en límites de Bateria \* 0.03  
**Dirección y supervisión:** [Mano de obra de operación + Mano de obra del  
 laboratorio de control + Mano de obra de mantenimiento] \* 0.80  
**Gastos Generales:** del 5 al 20% del valor del producto (Ventas e Investigación)  
**Suministros de operación:** Mano de obra de operación \* 0.10  
**Materiales de mantenimiento:** Inversión en límites de Bateria \* 0.03  
**Impuestos locales y Seguros:** Inversión total \* 0.02  
**Depreciación:** Método de la línea recta a 10 años (10% anual)  
**Recuperación de la Inversión:** Inversión Total \* 0.25

Bases para el calculo:

Considerar 330 días de operación al año  
 3 turnos de 8 horas al día

En la siguiente tabla se presenta un resumen de estos cálculos para una planta de etileno de 182,000 toneladas de capacidad, considerando que se trata de una planta de 25 años de operación en la cual se ha recuperado totalmente la Inversión.

ETILENO  
ESTIMACION DE COSTOS ANUALES DE OPERACIÓN (USD DE 1998)  
CAPACIDAD DE LA PLANTA 182,000 TON/AÑO  
INVERSION EN LIMITES DE BATERIA (USD DE 1998)  
INVERSION TOTAL (USD DE 1998)

167,821,010.40  
231,460,307.70

COSTO DE MATERIAS PRIMAS:				
	COSTO	COEFICIENTE	COSTO [ USD(1998) / TON PRODUC. ]	
	\$/TON			
ETANO	166.81	1.243		207.34
INGRESOS POR VENTA DE SUBPRODUCTOS:				
	COSTO	COEFICIENTE	COSTO [ USD(1998) / TON PRODUC. ]	
	\$/TON			
TAIL GAS	12.9744	-4.052		-52.57
PYROLYSIS LIQ.	94.2428	-0.0785		-7.40
COSTO POR SERVICIOS:				
	COSTO	CONSUMO	COSTO [ USD(1998) / TON PRODUC. ]	
	\$/m3	m3/TON PRO.		
AGUA DE ENF.	0.04	229		9.16
	COSTO	CONSUMO		
	\$/TON	TON/TON PRO.		
VAPOR	8.09	0		0.00
	COSTO	CONSUMO		
	\$/m3	m3/TON PRO.		
AGUA DE PRO.	0.2876	1.9		0.55
	COSTO	CONSUMO		
	\$/KWH	KWH/TON PRO.		
ELECTRICIDAD	0.05	18		0.90
	COSTO	CONSUMO		
	\$/TCAL	TCAL/TON PRO.		
COMBUSTOLEO	0.0113	0		0.00
	COSTO	CONSUMO		
	\$/Nm3	Nm3/TON PRO.		
GAS INERTE	0.0218	5.9		0.13
	COSTO	CONSUMO		
	\$/TCAL	TCAL/TON PRO.		
GAS NATURAL	0.0095	4850		46.08
COSTOS POR MANO DE OBRA DE OPERACION:				
	COSTO	CONSUMO	COSTO ( USD/ANO )	
	\$/HH	HH/ANO		
	5.155	61320		347,715.06
COSTOS POR MANO DE OBRA DE LABORATORIO DE CONTROL:				
			COSTO ( USD/ANO )	
				34,771.51
COSTOS POR MANO DE OBRA DE MANTENIMIENTO:				
			COSTO ( USD/ANO )	
				5,034,630.31
DIRECCION Y SUPERVISION DE LA PLANTA:				
			COSTO ( USD/ANO )	
				4,333,693.50

GASTOS GENERALES:				
				COSTO ( USD/ANO )
				4,629,206.15
COSTO DE LOS SUMINISTROS DE OPERACION:				
				COSTO ( USD/ANO )
				34,771.51
COSTOS DE MATERIALES PARA MANTENIMIENTO:				
				COSTO ( USD/ANO )
				5,034,630.31
IMPUESTOS LOCALES Y SEGUROS:				
				COSTO ( USD/ANO )
				4,629,206.15
DEPRECIACION: METODO DE LA LINEA RECTA A 10 ANOS:				
				COSTO ( USD/ANO )
				23,146,030.77

COSTOS VARIABLES  
COSTOS FIJOS

[ USD(1998) / TON. PRODC. ]  
[ USD(1998) / AÑO ]

204.18  
47, 224, 655.28

PRECIO DEL ETILENO

[ USD(1998) / TON. PRODC. ]

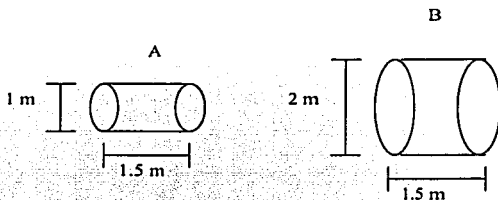
405.60

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA

## Escalamiento

Desde hace muchos años se ha observado que una planta de Etileno con una capacidad de 182, 000 Ton/año representa una Inversión de 231.5 MMUSD, si deseamos una capacidad de 364, 000 Ton/año, podríamos elegir entre la posibilidad de construir dos plantas de 182, 000 Ton/año con una inversión de 463 MMUSD ó por comprar una planta de 364, 000 Ton/año con una inversión de 392 MMUSD, este asombroso fenómeno se conoce como economía de escalas.

Para comprender esta situación analizaremos los costos de los cilindros A y B, suponiendo que ambos se pueden construir con lamina del mismo espesor, y por lo tanto el costo de fabricación de cada cilindro es directamente proporcional a su área superficial.



$$\begin{aligned}\text{Area Superficial del cilindro "A"} &= 2\pi rh + 2\pi r^2 \\ &= 2(3.1416)(0.5\text{m})(1.5\text{m}) + 2(3.1416)(0.5\text{m})^2 \\ &= 6.3 \text{ m}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Volumen del cilindro "A"} &= 2\pi r^2 h \\ &= 2(3.1416)(0.5\text{m})^2(1.5\text{m}) \\ &= 2.4 \text{ m}^3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Area Superficial del cilindro "B"} &= 2\pi rh + 2\pi r^2 \\ &= 2(3.1416)(1\text{m})(1.5\text{m}) + 2(3.1416)(1\text{m})^2 \\ &= 15.7 \text{ m}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Volumen del cilindro "B"} &= 2\pi r^2 h \\ &= 2(3.1416)(1\text{m})^2(1.5\text{m}) \\ &= 9.4 \text{ m}^3\end{aligned}$$

Si dividimos el volumen "B" entre el volumen "A" tenemos:

$$(V_B / V_A) = 9.4 \text{ m}^3 / 2.4 \text{ m}^3 = 3.9$$

Si dividimos el área superficial "B" entre el área superficial "A" tenemos:

$$(A_B / A_A) = 15.7 \text{ m}^2 / 6.3 \text{ m}^2 = 2.5$$



Estas relaciones indican que si se incrementa el diámetro un metro, se presenta un mayor incremento en el volumen del cilindro y un menor incremento del área superficial.

Esto nos lleva a concluir que es más económico construir un tanque grande como lo es el tanque B, en vez de gastar más en la construcción de cuatro tanques del tamaño A.

Esta situación por analogía nos ayuda a comprender que en una planta de la Ind. Química ocurren fenómenos similares, pues al aumentar su capacidad podemos observar que estas tienden a requerir un costo de inversión menor al que tendrían varias plantas de menor capacidad, y esto se debe a que fenómenos semejantes al descrito se presentan en tanques, tubería y equipo rotatorio.

La magnitud de este fenómeno se cuantifica mediante el coeficiente de escalamiento "n" para el caso de los tanques A y B podemos obtenerlo mediante el siguiente procedimiento:

$$(A_B / A_A) = (V_B / V_A)^n$$

$$\ln (A_B / A_A) = n (\ln(V_B / V_A))$$

$$n = \ln (A_B / A_A) / \ln(V_B / V_A)$$

Para este caso:

$$n = \ln (15.7 \text{ m}^2 / 6.3 \text{ m}^2) / \ln (9.4 \text{ m}^3 / 2.4 \text{ m}^3)$$

$$n = \ln 2.5 / \ln 3.9$$

$$n = 0.67$$

Por analogía :

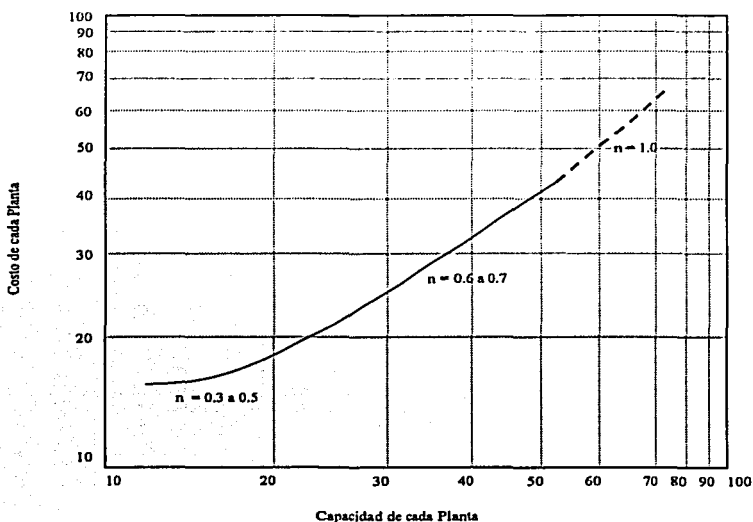
$$\left[ \frac{\text{Costo de B}}{\text{Costo de A}} \right] = \left[ \frac{\text{Capacidad de B}}{\text{Capacidad de A}} \right]^n$$

$$\left[ \frac{\text{Costo de B}}{\text{Costo de A}} \right] = \left[ \frac{\text{Capacidad de B}}{\text{Capacidad de A}} \right]^{0.67}$$

Esta relación es generalmente conocida como la regla de los seis décimos, porque en una gran cantidad de plantas este coeficiente "n" toma valores de 0.6 a 0.7.

En la practica real los coeficientes de escala de las plantas químicas se obtienen gráficamente la inversión que se realizó en la construcción de diferentes plantas contra sus capacidades correspondientes, en escala log-log. Cuando se gráfica estos datos se encuentra una línea recta cuya pendiente corresponde al valor del coeficiente de escalamiento "n".

Algunos estudios recientes de O. Kharbanda y E. Stallworthy entre otros señalan la existencia de tres segmentos de recta en vez de uno, esto se debe a que las economías de escala tienen límite inferior y superior, esta situación se muestra en la siguiente gráfica.



Como podemos observar los coeficientes son menores de 0.6 si la capacidad de la planta es muy pequeña, o pueden incluso ser iguales o mayores a 1 cuando por las dimensiones de la planta sean tan grandes que requieran soportes y cimentaciones especiales, internos de equipos con soportes, o la infraestructura fuera de límites de batería para proveer servicios a la planta sea costosa y repercute seriamente en la inversión total de la planta.

Por lo anterior, podemos concluir que la regla de los seis décimos tiene un intervalo de validez restringido, y debe tenerse en cuenta cuando se pretende estimar los costos de una planta.

## Actualización de Costos

Cuando deseamos conocer los costos de las plantas químicas nos enfrentamos a la dificultad de recabar los datos disponibles y generalmente estos datos corresponden a reportes de años anteriores, tomarlos como validos en fechas actuales representa un grave error y nos llevara a grandes desviaciones en nuestros resultados.

Existen varios métodos para obtener o estimar el valor presente de estos costos, pero podemos confiar en los tres que presentamos a continuación:

### 1) La obtención de datos actuales:

Esto es posible si se cuenta con acceso a las fuentes que generan la información, o si se trabaja en ellas, esta información es la más confiable.

### 2) Empleando Índices:

Este procedimiento es más accesible, debido a que se cuenta con publicaciones periódicas de estos datos, un ejemplo de esto son los índices de Marshall & Swift que publica anualmente la revista Chemical Engineering para plantas químicas, y que han sido compilados desde 1926 hasta la fecha.

Los cálculos para actualizar costos o inversiones son muy simples y solo se requiere de emplear la siguiente formula:

$$\frac{\text{Inversión 2}}{\text{Inversión 1}} = \frac{\text{Índice 2}}{\text{Índice 1}}$$

$$\text{Inversión 2} = \left[ \frac{\text{Índice 2}}{\text{Índice 1}} \right] \text{Inversión 1}$$

### 3) Actualización por Inflación: (Método del valor presente)

Este procedimiento requiere los datos de inflación de una economía estable como Estados Unidos de Norteamérica, este país altamente industrializado mantiene una inflación media anual de aproximadamente 3%, este dato es muy útil si se desea realizar cálculos rápidos y no se cuenta con información directa o con los índices para actualizar los datos.

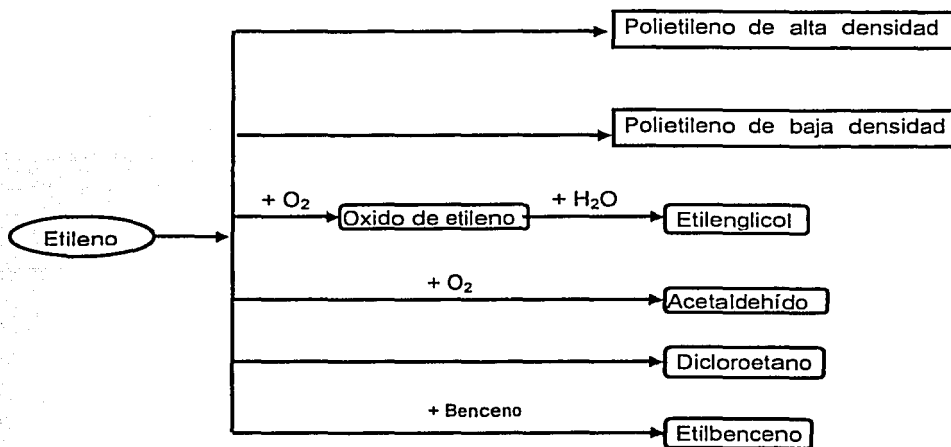
$$\text{Inversión 2} = \text{Inversión 1} (1+0.03)^n$$

n = años transcurridos entre la inversión 1 y la Inversión 2

## Planteamiento de un modelo de Programación Lineal para derivados del etileno

Para el desarrollo del presente trabajo se selecciono la estructura de la cadena productiva que forman veinticuatro plantas de productos derivados del etano con una capacidad instalada semejante a la capacidad instalada de PEMEX, tomando como base para datos y estimaciones el año de 1998.

Esta estructura se eligió debido a que puede ser representada por un diagrama de árbol que a su vez puede ser traducido a un modelo de programación lineal que nos permite observar variantes significativas, e interesantes en este tipo de modelos.



La información requerida por este trabajo fue extraída del anuario estadístico de Pemex para 1999, el programa de desarrollo de la industria petroquímica mexicana 1997-2000 presentado por la Secretaría de Energía, y datos recabados de las demás publicaciones citadas en la bibliografía.

La tabla que se muestra a continuación presenta un resumen de los costos estimados y capacidad instalada para cada una de las plantas consideradas en el modelo.

<b>Plantas Petroquímicas Consideradas</b>			
<b>Plantas</b>	<b>Capacidad Instalada Ton. / año</b>	<b>Costos Fijos USD(98) / año</b>	<b>Costos Variables USD(98) / Ton.</b>
<b>Etileno (ETL):</b>			
Planta ETL1	27, 200	11, 836, 809	204.18
Planta ETL2	181, 500	47, 128, 422	204.18
Planta ETL3	182, 000	47, 224, 655	204.18
Planta ETL4	500, 000	100, 646, 357	204.18
Planta ETL5	500, 000	100, 646, 357	204.18
<b>Poliétileno de Alta Densidad (PEAD):</b>			
Planta PEAD6	100, 000	13, 258, 063	505.68
Planta PEAD7	100, 000	13, 258, 063	505.68
<b>Poliétileno de Baja Densidad (PEBD):</b>			
Planta PEBD8	18, 000	4, 032, 910	450.53
Planta PEBD9	51, 000	7, 669, 019	450.53
Planta PEBD10	240, 000	22, 443, 005	450.53
<b>Oxido de Etileno (OE):</b>			
Planta OE11	28, 000	13, 401, 195	398.28
Planta OE12	100, 000	33, 480, 910	398.28
Planta OE13	200, 000	57, 242, 661	398.28
<b>Etilenglicol (EGL):</b>			
Planta EGL14	3, 800	1, 274, 164	351.08
Planta EGL15	135, 000	10, 150, 798	292.44
<b>Acetaldehído (ACD):</b>			
Planta ACD16	44, 000	6, 792, 335	344.74
Planta ACD17	100, 000	11, 200, 401	344.74
Planta ACD18	150, 000	14, 827, 599	344.74
<b>Dicloroetano (DCE):</b>			
Planta DCE19	16, 000	582, 193	287.02
Planta DCE20	41, 700	1, 028, 830	287.02
Planta DCE21	42, 350	1, 038, 356	287.02
Planta DCE22	115, 000	1, 914, 896	287.02
Planta DCE23	215, 000	9, 989, 746	459.08
<b>Etilbenceno (EB):</b>			
Planta EB24	174, 000	7, 855, 216	298.48

## Síntesis de la función objetivo

En la tabla anterior podemos observar que los costos variables de las plantas que producen el mismo producto son iguales ó similares, esta situación se puede explicar debido a que la tecnología empleada por estas plantas también es igual o similar y mantienen consumos equivalentes de insumos y servicios.

Por otra parte los costos fijos pueden ser muy diferentes, debido a que corresponden a la capacidad y características propias de cada planta.

Estas aseveraciones nos permiten dos importantes simplificaciones a este modelo:

- a) **Los costos fijos de cada planta son constantes**, por lo que los costos fijos de todas las plantas se pueden sumar para ser agrupados en una sola constante dentro de la ecuación.
- b) **Podemos considerar a las plantas con costos variables iguales o muy parecidos como una sola unidad.**

Por lo tanto la tabla de datos se simplifica:

<b>Plantas Petroquímicas en el Modelo</b>			
<b>Plantas</b>	<b>Capacidad Instalada Ton. / año</b>	<b>Costos Fijos USD(98) / año</b>	<b>Costos Variables USD(98) / Ton.</b>
<b>Etileno (ETL):</b>			
Planta ETL	1, 390, 700	307, 482, 600	204.18
<b>Polietileno de Alta Densidad (PEAD):</b>			
Planta PEAD	200, 000	26, 516, 126	505.68
<b>Polietileno de Baja Densidad (PEBD):</b>			
Planta PEBD	309, 000	34, 144, 934	450.53
<b>Oxido de Etileno (OE):</b>			
Planta OE	328, 000	104, 124, 766	398.28
<b>Etilenglicol (EGL):</b>			
Planta EGL14	3, 800	1, 274, 164	351.08
Planta EGL15	135, 000	10, 150, 798	292.44
<b>Acetaldehído (ACD):</b>			
Planta ACD	294, 000	32, 820, 335	344.74
<b>Dicloroetano (DCE):</b>			
Planta DCE4P	215, 050	4, 564, 275	287.02
Planta DCE23	215, 000	9, 989, 746	459.08
<b>Etilbenceno (EB):</b>			
Planta EB24	174, 000	7, 855, 216	298.48

Esto nos permite construir un modelo de 10 variables para veinticuatro plantas a continuación se detallan las variables empleadas en este modelo:

USD98 = Dólares Norteamericanos de 1998

$f(c)$  = Función objetivo (costos)

ETL = Producción de etileno

PEAD = Producción de polietileno de alta densidad

PEBD = Producción de polietileno de baja densidad

OE = Producción de óxido de etileno

EGL14 = Producción de la planta EGL14

EGL15 = Producción de la planta EGL15

ACD = Producción de acetaldehído

DCE4P = Producción de plantas: DCE19, DCE20, DCE21, DCE22

DCE23 = Producción de planta DCE23

EB24 = Producción de planta EB24

CONSMETL = Consumo mínimo de etileno

CONSMPEAD = Consumo mínimo de polietileno de alta densidad

CONSMPEBD = Consumo mínimo de polietileno de baja densidad

CONSMOE = Consumo mínimo de óxido de etileno

CONSMEGL = Consumo mínimo de Etilenglicol

CONSMACD = Consumo mínimo de acetaldehído

CONSMDCD = Consumo mínimo de Dicloroetano

CONSMEB = Consumo mínimo de Etilbenceno

CT = Costos totales de producción

CV = Costos variables de producción

CF = Costos fijos de producción

CFT = Costos fijos de todas las plantas consideradas



Por lo tanto si deseamos obtener una función objetivo que nos permita minimizar los costos de producción tenemos que:

$$f(c) = CV + CF$$

Si los costos fijos de todas las plantas pueden ser agrupados dentro de una sola constante como se mencionó anteriormente se tiene que:

$$f(c) = CV_{ETL} + CV_{PEAD} + CV_{PEBD} + CV_{OE} + CV_{EGL14} + CV_{EGL15} + CV_{ACD} + CV_{DCE4P} + CV_{DCE23} + CV_{EB24} + CFT$$

Substituyendo tenemos la función objetivo a minimizar.

$$f(c) = (204.18) ETL + (505.68) PEAD + (450.53) PEBD + (398.28) OE + (351.08) EGL14 + (292.44) EGL15 + (344.74) ACD + (287.02) DCE4P + (459.08) DCE23 + (298.48) EB24 + CFT$$

$$CFT = 538, 922, 960 \text{ USD98/AÑO}$$

## Limites y restricciones

Este tipo de modelos como todos los de su tipo se encuentra sujeta a límites y restricciones. Estos se detallan a continuación.

### Límites:

#### Abasto de materias primas:

En esta sección del modelo se deben agrupar todas las restricciones relacionadas con el abasto de materias primas e insumos.

Para este caso sólo se considera una limitante de este tipo y se encuentra relacionada al abasto de materia prima para la elaboración del etileno producto base de la cadena (sin etileno no se podrían elaborar los demás productos).

Por lo tanto suponemos que todo el etano producido esta disponible para la producción de etileno (3, 002, 239.98 Ton / año) y que se requiere de 1.243 Toneladas de etano para producir 1 Tonelada de etileno.

$$ETL \leq 2,415,317.76 \text{ (Ton / año)}$$

#### Capacidad instalada:

Por seguridad ninguna de las plantas consideradas debe exceder la capacidad con la que cuenta y esta es igual a su capacidad de diseño a menos que se hayan realizado modificaciones a la planta.

ETL	≤	1,390,700	(Ton / año)
PEAD	≤	200,000	(Ton / año)
PEBD	≤	309,000	(Ton / año)
OE	≤	328,000	(Ton / año)
EGL14	≤	3,800	(Ton / año)
EGL15	≤	135,000	(Ton / año)
ACD	≤	294,000	(Ton / año)
DCE4P	≤	215,050	(Ton / año)
DCE23	≤	215,000	(Ton / año)
EB24	≤	174,000	(Ton / año)

**Restricciones:**Consumo mínimo:

Debido a que en México Pemex es un monopolio tiene la obligación de satisfacer toda la demanda de estos productos en el país, por lo tanto la producción de todas las plantas debe ser superior o por lo menos igual a la demanda del mercado local.

ETL	≥	370,000	(Ton / año)
PEAD	≥	166,000	(Ton / año)
PEBD	≥	282,000	(Ton / año)
OE	≥	234,000	(Ton / año)
EGL14 + EGL15	≥	103,000	(Ton / año)
ACD	≥	199,000	(Ton / año)
DCE4P + DCE23	≥	103,000	(Ton / año)
EB24	≥	174,000	(Ton / año)

Balances de materia:

Este modelo contempla la necesidad de Pemex para satisfacer su consumo propio y abastecer la demanda externa (plantas petroquímicas privadas).

Balance de etileno:

Demanda externa de etileno = 370,000 Ton/año

$$\text{ETL} - (1.015) \text{PEAD} - (0.9513) \text{PEBD} - (0.9327) \text{OE} - (0.68) \text{ACD} - (0.3027) \text{DCE4P} - (0.2964) \text{DCE23} - (0.27) \text{EB24} - 370,000 = 0$$

Balance para óxido de etileno:

Demanda externa OE = 234,000 Ton/año

$$\text{OE} - (0.746) \text{EGL14} - (0.872) \text{EGL15} - 234,000 = 0$$

# Solución por programa de computo XA

Después de sintetizar el modelo, se obtuvo la solución mediante el programa de computo XA.

```

XA modfre.lp  output modfre.doc
..TITLE

    MINIMIZACION DE COSTOS (DERIVADOS DE ETILENO)

..OBJECTIVE MINIMIZE

204.18ETL+505.68PEAD+450.53PEBD+398.28OE+351.08EGL14+292.44EGL15+344.74ACD
+287.02DCE4P+459.08DCE23+298.48EB24+CFT

..BOUNDS

SUMINISTROS :

ETL <= 2415317.76

CAPACIDAD INSTALADA:

ETL <= 1390700
? Warning 10001 Line number 17

PEAD <= 200000
PEBD <= 309000
OE <= 328000
EGL14 <= 3800
EGL15 <= 135000
ACD <= 294000
DCE4P <= 215050
DCE23 <= 215000
EB24 <= 174000

..CONSTRAINT

CONSMETL : ETL >= 370000
CONSMPEAD : PEAD >= 166000
CONSMPEBD : PEBD >= 282000
CONSMOE : OE >= 234000
CONSMETGL : EGL14+EGL15 >= 103000
CONSMACD : ACD >= 199000
CONSMDCE : DCE4P+DCE23 >= 321000
CONSMEB : EB24 >= 143000

BALM-ETL : ETL-1.015PEAD-0.9513PEBD-0.9327OE-0.68ACD-0.3027DCE4P-
0.2964DCE23-0.27EB24 = 370000
BALM-OE : OE-0.7460EGL14-0.8720EGL15 = 234000

COSTOSFT : CFT = 538922960

STATISTICS - FILE: Modfre TITLE: MINIMIZACION DE COSTOS (D 2/24/01
07:01:49

```

XA VERSION 2.00 USABLE MEMORY 440K BYTES  
 VARIABLES 11 MAXIMUM 5000  
 0 LOWER, 0 FIXED, 10 UPPER, 0 FREE, 0 INTEGER.  
 CONSTRAINTS 11 MAXIMUM 1000  
 8 GE, 3 EQ, 0 LE, 0 NULL/FREE, 0 RANGED.  
 CAPACITY USED BY CATEGORY-  
 0.2% VARIABLE, 1.1% CONSTRAINT, 0.4% NON-ZERO.  
 OBJECTIVE FUNCTION IS MINIMIZED.  
 OPTIMAL SOLUTION ---> OBJECTIVE 1412202980  
 ELAPSED TIME 00:00:00 ITERATIONS 0 MEMORY USED 0.1%

File: Modfre 2/24/01 07:01:49 Page 1  
 SOLUTION (Minimized): 1412202980 MINIMIZACION DE COSTOS (DERIVADOS DE ETILENO)

Variable	Activity	Cost	Variable	Activity	Cost
I ETL	1378762.421	204.18000	I PEAD	166000.0000	505.68000
	REDUCED COST	0.00000		REDUCED COST	0.00000
I PEBD	282000.0000	450.53000	I OE	323337.2000	398.28000
	REDUCED COST	0.00000		REDUCED COST	0.00000
U EGL14	3,800.00000	351.08000	I EGL15	99200.00000	292.44000
	REDUCED COST	-15.53855		REDUCED COST	0.00000
I ACD	199000.0000	344.74000	U DCE4P	215050.0000	287.02000
	REDUCED COST	0.00000		REDUCED COST	-170.77367
I DCE23	105950.0000	459.08000	I EB24	143000.0000	298.48000
	REDUCED COST	0.00000		REDUCED COST	0.00000
I CFT	538922960.0	1.00000			
	REDUCED COST	0.00000			

File: Modfre 2/24/01 07:01:49 Page 2  
 CONSTRAINTS: MINIMIZACION DE COSTOS (DERIVADOS DE ETILENO)

Constraint	Activity	RHS	Constraint	Activity	RHS
I CONSMETL	1378762.421	>370000.0000	I CONSMPEA	166000.0000	>166000.0000
	DUAL VALUE	0.00000		DUAL VALUE	712.92270
I CONSMPEB	282000.0000	>282000.0000	I CONSMOE	323337.2000	>234000.0000
	DUAL VALUE	644.76643		DUAL VALUE	0.00000
I CONSMETG	103000.0000	>103000.0000	I CONSMACD	199000.0000	>199000.0000
	DUAL VALUE	805.80269		DUAL VALUE	483.58240
I CONSMDC	321000.0000	>321000.0000	I CONSMEB	143000.0000	>143000.0000
	DUAL VALUE	519.59895		DUAL VALUE	353.60860
I BALM-ETL	370000.0000	=370000.0000	I BALM-OE	234000.0000	=234000.0000
	DUAL VALUE	-204.18000		DUAL VALUE	-588.71869
I COSTOSFT	538922960.0	=538922960.0			
	DUAL VALUE	-1.00000			

Cumulative Variable Error: 0.00000000

Cumulative Constraint Error: 0.00000000

0.0000	=370000.0000		BALM-OE	234000.0000	=234000.0000			
			DUAL VALUE	-204.18000		DUAL VALUE	-588.71869	

---

## Análisis de resultados

Como sabemos el principal resultado que arroja este modelo es el costo mínimo que se requiere para elaborar los productos que demanda una economía, para el caso objetivo de esta tesis se obtuvo un costo total de 1, 412 MMUSD/año simulando una tecnología e infraestructura similares a las de Pemex, y el consumo de México.

Pero no debemos olvidar que existen otros dos aspectos muy importantes que se deben analizar; el valor dual, y el costo reducido, para finalmente obtener la producción asignada de cada producto por planta.

Valor dual por restricción	
Restricción	Valor Dual USD(98) / año
Consumo de Etileno	0.00000
Consumo de Polietileno de Alta Densidad	712.92270
Consumo de Polietileno de Baja Densidad	644.76643
Consumo de Oxido de Etileno	0.00000
Consumo de Etilenglicol	805.80269
Consumo de Acetaldehído	483.58240
Consumo de Dicloroetano	519.59895
Consumo de Etilbenceno	353.60860
Balance de Etileno	-204.18000
Balance de Oxido de Etileno	-588.71869
Costos Fijos Totales	-1.00000

**Valor dual:**

Comenzaremos por el análisis del valor dual, este se encuentra relacionado con las restricciones fijadas a la función objetivo, representa a las unidades en que se puede incrementar o disminuir el valor óptimo de la función objetivo por el cambio en una unidad de la restricción.

Para comprender mejor este tema observaremos los costos variables asociados a la producción de Polietileno de Alta Densidad (PEAD), estos costos engloban los costos variables de la planta en cuestión y también los costos que implica la producción de su materia prima en este caso el Etileno.

$CVA_{PEAD}$  = Costos Variables Asociados a la producción en PEAD.

$CV_{PEAD}$  = Costos Variables de la planta PEAD.

$CV_{ETL}$  = Costos Variables de la planta ETL.

Se requiere de 1.015 Toneladas de Etileno para producir 1 Tonelada de Polietileno de Alta Densidad en la planta PEAD.

**Costos Variables Asociados a la producción en PEAD:**

$$CVA_{PEAD} = CV_{PEAD} + 1.015 (CV_{ETL})$$

$$= 505.68 + 1.015 (204.18)$$

$$= 712.9227 \text{ USD(98) / Ton.}$$

Esto significa que si se incrementa la demanda de PEAD en una unidad el valor óptimo de la función objetivo se incrementaría 712.9227 unidades, y si la demanda disminuye en una unidad el valor óptimo de la función objetivo decrece en 712.9227 unidades.



### Costo reducido por cada planta petroquímica en el modelo

Plantas	Capacidad Instalada Ton. / año	Consumo Ton. / año	Producción Asignada Ton. / año	Costo Variable USD(99)/Ton.	Costo Reducido USD(99)/Ton.
<b>Etileno</b> Planta ETL	1, 390, 700	370, 000	1, 378, 762	204.18	0
<b>Poliétileno de Alta Densidad</b> Planta PEAD	200, 000	166, 000	166, 000	505.68	0
<b>Poliétileno de Baja Densidad</b> Planta PEBD	309, 000	282, 000	282, 000	450.53	0
<b>Oxido de Etileno</b> Planta OE	328, 000	234, 000	323, 337	398.28	0
<b>Etilenglicol</b> Planta EGL14 Planta EGL15	3, 800 135, 000	103, 000	3, 800 99, 200	351.08 292.44	-15.5385 0
<b>Acetaldehído</b> Planta ACD	294, 000	199, 000	199, 000	344.74	0
<b>Dicloroetano</b> Planta DCE4P Planta DCE23	215, 050 215, 000	321, 000	215, 050 105, 950	287.02 459.08	-170.7737 0
<b>Etilbenceno</b> Planta EB24	174, 000	143, 000	143, 000	298.48	0

### Costo Reducido:

Estos se presentan cuando se cuenta con más de una tecnología para la elaboración de un producto, para este caso se presentan en la producción de Etilenglicol y Dicloroetano.

Para comprender mejor este tema observaremos los costos variables asociado a la producción de Etilenglicol en las plantas EGL14 y EGL15.

$CVA_{EGL14}$  = Costos Variables Asociados a la producción en EGL14

$CVA_{EGL15}$  = Costos Variables Asociados a la producción en EGL15

$CV_{EGL14}$  = Costos Variables de la planta EGL14

$CV_{EGL15}$  = Costos Variables de la planta EGL14

$CV_{OE}$  = Costos Variables de la planta OE

$CV_{ETL}$  = Costos Variables de la planta ETL

Se requiere de 0.9327 Toneladas de Etileno para producir 1 Tonelada de Oxido de Etileno en la planta OE.

Se requiere de 0.746 Toneladas de Oxido de Etileno para producir 1 Tonelada de Etilenglicol en la planta EGL14.

Se requiere de 0.872 Toneladas de Oxido de Etileno para producir 1 Tonelada de Etilenglicol en la planta EGL15.

#### Costos Variables Asociados a la producción en EGL14:

$$\begin{aligned} CVA_{EGL14} &= CV_{EGL14} + 0.746 [ CV_{OE} + 0.9327 (CV_{ETL}) ] \\ &= 351.08 + 0.746 [ 398.28 + 0.9327 (204.18) ] \\ &= 790.26 \text{ USD(98) / Ton.} \end{aligned}$$

#### Costos Variables Asociados a la producción en EGL15:

$$\begin{aligned} CVA_{EGL15} &= CV_{EGL15} + 0.872 [ CV_{OE} + 0.9327 (CV_{ETL}) ] \\ &= 292.44 + 0.872 [ 398.28 + 0.9327 (204.18) ] \\ &= 805.80 \text{ USD(98) / Ton.} \end{aligned}$$

Aparentemente producir una tonelada en EG15 es más económico, si tomamos en cuenta solamente los costos variables de las plantas EG14 y EG15, no obstante analizando los costos asociados podemos notar que producir en EG14 es 15.54 USD(98)/Ton más económico, a esta diferencia se le conoce como costo reducido.

Como anteriormente se menciona este mismo fenómeno se presenta en la producción de Dicloroetano en las plantas DCE4P y DCE23.

$CVA_{DCE4P}$  = Costos Variables Asociados a la producción en DCE4P:

$CVA_{DCE23}$  = Costos Variables Asociados a la producción en DCE23:

$CV_{DCE4P}$  = Costos Variables de la planta DCE4P:

$CV_{DCE23}$  = Costos Variables de la planta DCE23:

$CV_{ETL}$  = Costos Variables de la planta ETL:

Se requiere de 0.3027 Toneladas de Etileno para producir 1 Tonelada de Dicloroetano en el grupo de plantas DCE4P.

Se requiere de 0.2964 Toneladas de Etileno para producir 1 Tonelada de Dicloroetano en la planta DCE23.

#### Costos Variables Asociados a la producción en DCE4P:

$$CVA_{DCE4P} = CV_{DCE4P} + 0.3027 (CV_{ETL})$$

$$= 287.02 + 0.3027 (204.18)$$

$$= 348.82 \text{ USD(98) / Ton.}$$

#### Costos Variables Asociados a la producción en DCE23:

$$CVA_{DCE23} = CV_{DCE23} + 0.2964 (CV_{ETL})$$

$$= 459.08 + 0.2964 (204.18)$$

$$= 519.59 \text{ USD(98) / Ton.}$$

Analizando los costos asociados podemos notar que producir en DCE4P es 170.77 USD(98)/Ton más económico.

### Producción asignada por planta:

Debemos recordar que la producción estimada por el programa de computo XA para cada producto se obtuvo considerando una división de las plantas en dos categorías las plantas agrupadas por manejar tecnologías similares y las que emplean tecnologías diferentes, esta consideración nos permite precisar el resultado del modelo debido a que podemos asignar la producción de las plantas agrupadas por manejar tecnologías semejantes, comenzando por las de menores costos fijos por tonelada, para este efecto consideraremos un factor que resulta de dividir los costos fijos entre la capacidad instalada (C.F./C.I.).

Por ejemplo; tenemos como resultado que debemos producir 1, 387, 762 Ton./año de Etileno, y para este objetivo se cuenta con las plantas ETL1, ETL2, ETL3, ETL4, y ETL5. Los factores correspondientes son:

<b>Costo fijo unitario</b>	
<b>Planta de Etileno</b>	<b>(C.F./C.I.)</b>
Planta ETL1	435.18
Planta ETL2	259.66
Planta ETL3	259.48
Planta ETL4	201.29
Planta ETL5	201.29

Por lo cual asignaremos la producción comenzando por aquellas plantas cuyos coeficientes son menores.

<b>Producción asignada para las plantas de Etileno</b>				
	<b>Plantas de Etileno</b>	<b>(C.F./C.I.)</b>	<b>Capacidad Instalada</b>	<b>Producción Asignada</b>
5o	Planta ETL1	435.18	27, 200	15, 262
4o	Planta ETL2	259.66	181, 500	181, 500
3o	Planta ETL3	259.48	182, 000	182, 000
2o	Planta ETL4	201.29	500, 000	500, 000
1o	Planta ETL5	201.29	500, 000	500, 000
<b>Total</b>				<b>1, 387,762</b>

Este criterio puede aplicarse a la mayoría de las plantas con excepción de aquellas en las que se involucran costos reducidos, en estas el análisis debe ser más cuidadoso, en este trabajo se desconocen factores adicionales como pudieran ser el costo de desmantelamiento y cierre de una planta, por lo cual se empleo la asignación siguiendo el criterio de costos reducidos.

<b>Asignación final de la producción por planta</b>					
<b>Plantas</b>	<b>Capacidad Instalada Ton. / año</b>	<b>Costos Fijos USD(98) / año</b>	<b>Costos Variables USD(98)/Ton.</b>	<b>C.F. / C.I. USD(98)/Ton.</b>	<b>Producción Estimada Ton. / año</b>
<b>Etileno (ETL):</b>					
Planta ETL1	27, 200	11, 836, 809	204.18	435.18	15, 262
Planta ETL2	181, 500	47, 128, 422	204.18	259.66	181, 500
Planta ETL3	182, 000	47, 224, 655	204.18	259.48	182, 000
Planta ETL4	500, 000	100, 646, 357	204.18	201.29	500, 000
Planta ETL5	500, 000	100, 646, 357	204.18	201.29	500, 000
					1, 378, 762
<b>Polietileno de Alta Densidad (PEAD):</b>					
Planta PEAD6	100, 000	13, 258, 063	505.68	132.58	83, 000
Planta PEAD7	100, 000	13, 258, 063	505.68	132.58	83, 000
					166, 000
<b>Polietileno de Baja Densidad (PEBD):</b>					
Planta PEBD8	18, 000	4, 032, 910	450.53	224.05	0
Planta PEBD9	51, 000	7, 669, 019	450.53	150.37	42, 000
Planta PEBD10	240, 000	22, 443, 005	450.53	93.51	240, 000
					282, 000
<b>Oxido de Etileno (OE):</b>					
Planta OE11	28, 000	13, 401, 195	398.28	478.61	23, 337
Planta OE12	100, 000	33, 480, 910	398.28	334.81	100, 000
Planta OE13	200, 000	57, 242, 661	398.28	286.21	200, 000
					323, 337
<b>Etilenglicol (EGL):</b>					
Planta EGL14	3, 800	1, 274, 164	351.08	335.30	3, 800
Planta EGL15	135, 000	10, 150, 798	292.44	75.19	99, 200
<b>Acetaldehído (ACD):</b>					
Planta ACD16	44, 000	6, 792, 335	344.74	154.37	0
Planta ACD17	100, 000	11, 200, 401	344.74	112.00	49, 000
Planta ACD18	150, 000	14, 827, 599	344.74	98.85	150, 000
					199, 000
<b>Dicloroetano (DCE):</b>					
Planta DCE19	16, 000	582, 193	287.02	39.39	16, 000
Planta DCE20	41, 700	1, 028, 830	287.02	24.67	41, 700
Planta DCE21	42, 350	1, 038, 356	287.02	24.52	42, 350
Planta DCE22	115, 000	1, 914, 896	287.02	16.65	115, 000
Planta DCE23	215, 000	9, 989, 746	459.08	46.46	105, 950
<b>Etilbenceno (EB):</b>					
Planta EB24	174, 000	7, 855, 216	298.48	45.14	143, 000

## Conclusiones

La industria petroquímica tiene una gran importancia económica, sin embargo en los últimos años Pemex Petroquímica ha presentado pérdidas ó ganancias mínimas (-133 MMUSD en 1997), debido a la falta de inversión, no obstante que existe un crecimiento de aproximadamente 4% anual en la demanda de productos petroquímicos, que a su vez se transforma en importación de estos.

La cadena productiva de derivados de etileno es una de las cadenas mas rentables de productos petroquímicos.

En 1998 Pemex reportó 1, 287, 395 Ton./año de etano que no se aprovechó, esta cantidad de etano se inyectó a ductos de gas seco, con el fin de disminuir el déficit de gas natural, por esta razón se concluye que existe suficiente materia prima para abastecer nuevas plantas de derivados de etileno que se ubiquen en las zonas de influencia de los centros de producción.

Ante este panorama es importante subrayar no solo el potencial si no la necesidad de incrementar los estudios en el área de modelación matemática para optimizar al máximo las cadenas productivas de petroquímicos.

En este ramo la programación lineal constituye sin lugar a dudas una gran herramienta en la optimización de sistemas complejos y en la toma de decisiones de gran trascendencia.

En este trabajo se propone un modelo de programación lineal para la planeación de la producción de derivados de etileno, que considera la capacidad instalada con la que contaba Pemex petroquímica hasta 1998, basado en una clasificación de costos en fijos y variables, y en una función objetivo que nos permite minimizar los costos de producción.

La información requerida en la elaboración de un modelo de este tipo se encuentra involucrada en estados financieros, y en datos de producción, ambos propiedad de las empresas involucradas, en este caso de Pemex Petroquímica, ó bien puede ser estimada por métodos como los mostrados en este trabajo, por lo tanto puede decirse que los modelos de programación lineal son adecuados y viables en la optimización de cadenas productivas aunque esto no significa que sea fácil desarrollarlos.

Por otra parte estos modelos arrojan resultados que pueden ser interpretados por cualquier Ingeniero Químico con conocimientos de investigación de operaciones.

Los resultados finales del modelo indican que se deben cerrar las plantas PEBD8 y ACD16, de hacer esto se tendría un ahorro de 11 MMUSD por año, estos recursos pueden ser empleados para ampliaciones, ó modernizaciones de estas plantas.

Dentro de los resultados obtenidos de este trabajo sobresale una cuestión que podría pasar inadvertida, la diferencia notable que existía hasta 1998 en la capacidad de las plantas que producen el mismo producto, esta situación puede notarse en la tabla mostrada a continuación.

Plantas para producción de etileno					
Planta	Complejo petroquímico de Pemex con plantas de la misma capacidad instalada (1998)	Año de Arranque	Capacidad Instalada Ton. / año	Inv. Tot. Estimada MMUSD(98)	Inv.T./ Cap. USD(98)/(T/a)
ETL1	Petroquímica Reynosa, S.A	1966	27, 200	55. 63	2, 045. 41
ETL2	Petroquímica Pajaritos, S.A	1972	181, 500	230. 98	1, 272. 63
ETL3	Petroquímica Escolín, S.A	1978	182, 000	231. 46	1, 271. 76
ETL4	Petroquímica Cangrejera, S.A	1984	500, 000	495. 99	991. 99
ETL5	Petroquímica Morelos, S.A	1989	500, 000	495. 99	991. 99

Si analizamos la columna de (C.F./C.I.) en la tabla "Asignación final de la producción para las plantas de Etileno (ETL)", notaremos la diferencia en este parámetro de 216.19 % entre las plantas ETL1 y ETL5. La teoría de economías de escala indica que dos son rentables, dos son poco rentables, y una de sus plantas no es rentable.

Asignación final de la producción para las plantas de Etileno (ETL)					
Planta	Capacidad Instalada Ton. / año	Costos Fijos USD(98) / año	Costos Variables USD(98)/Ton.	C.F./C.I. USD(98)/Ton.	Producción Estimada Ton. / año
ETL1	27, 200	11, 836, 809	204.18	435.18	15, 262
ETL2	181, 500	47, 128, 422	204.18	259.66	181, 500
ETL3	182, 000	47, 224, 655	204.18	259.48	182, 000
ETL4	500, 000	100, 646, 357	204.18	201.29	500, 000
ETL5	500, 000	100, 646, 357	204.18	201.29	500, 000
					1, 378, 762

Por estos motivos podemos notar que el principal problema de Pemex es la obsolescencia de sus plantas y la falta de inversión en nuevas plantas de capacidad competitiva a nivel mundial.

Por otra parte es importante concluir que los modelos matemáticos son abstracciones de la realidad que nos permiten predecir, analizar, y optimizar el comportamiento de sistemas complejos, si embargo es importante considerar que la realidad solo puede ser igualada por la realidad misma, los modelos matemáticos intrínsecamente contienen un grado de incertidumbre en la predicción de este comportamiento que depende principalmente de los criterios empleados en su concepción y del cuidado que se tenga en el proceso de síntesis del modelo.

Los modelos de programación lineal no escapan a estas premisas, en particular el modelo de programación lineal propuesto en este trabajo para la planeación de la producción de derivados de etileno, no obstante que se basa en un amplio estudio mostrado en los primeros seis capítulos con el fin de reducir la incertidumbre de sus resultados, cabe aclarar que su desempeño se encuentra acotado a las siguientes consideraciones:

- a. Se encuentra basado en la clasificación de costos en fijos y variables.
- b. Genera como resultado la producción anual óptima de cada planta.
- b. La inflación ocasiona que todos los costos a la larga sean variables.
- c. Algunos costos son constantes solo en algunos rangos de producción,
- d. siempre existe incertidumbre en los precios de venta del producto y el valor de los costos de producción,

por estos motivos se debe considerar que este modelo se encuentra limitado a horizontes de planeación inferiores a un año.



## Bibliografía

### Capitulos I, II, III

1. El Petróleo su Formación y Localización  
B.P. Tissot & D.H. Welte  
CONACYT, México, 1982.
2. Ingeniería de Producción de Petróleo  
Lester Charles Uren  
Compañía Editorial Continental, México, 1965.
3. Refino de Petróleo  
James H. Gary & Glenn E. Handwerk  
Editorial Reverte, España, 1980.
4. Economía del Petróleo y del Gas Natural  
Roberto Centeno  
Ed. TECNOS, Madrid España, 1974.
5. Las Perspectivas del Petróleo Mexicano  
Colegio de México  
Ed. Fondo de Cultura Económica, México, 1979.
6. Petróleo y Nación (1900-1987)  
Lorenzo Meyer & Isidro Morales  
Ed. Fondo de Cultura Económica, México, 1990.
7. El Petróleo de México  
José López Portillo y Weber  
Ed. Fondo de Cultura Económica, México, 1975.
8. La Verdad del Petróleo en México  
Miguel Alemán Valdés  
Editorial Grijalbo, S.A., México, 1977.
9. Los Veneros del Diablo  
Jorge García Granados  
Ediciones Liberación, México, 1941.

10. **El petróleo en México y el mundo**  
Bernard Tissot  
CONACYT, México, 1979.
11. **La Guerra Secreta del Petróleo**  
Jacques Bergier & Bernard Thomas  
Editorial Plaza & Janes, España, 1968.
12. **La Petroquímica en el Mundo**  
Raymund Guglielmo  
Editorial Universitaria de Buenos Aires, Argentina, 1975.
13. **Regulatori Reform in Mexico's Natural Gas Sector**  
International Energy Agenci  
Editado por la OCDE, Paris, 1996.
14. **Pemex Anuario Estadístico 1999**  
Editado por Gerencia corporativa de evaluación de información
15. **Petroquímica 1995, Anuario Estadístico**  
Secretaría de Energía  
Edición de la Oficialía Mayor y la Dirección General de Recursos Energéticos y Radiactivos, Noviembre de, 1996
16. **Compendio Estadístico del Sector Energía (1980-1997)**  
Secretaría de Energía  
Edición de la Oficialía Mayor y la Dirección General de Programación y Presupuesto, 1998.
17. **Indicadores Petroleros**  
Pemex  
Gerencia Corporativa de Evaluación e Información, enero de 1998.
18. **Programa de Desarrollo de la Industria Petroquímica Mexicana 1997-2000**  
Secretaría de Energía y SECOFI  
México, Septiembre de 1997.

## Capítulos IV, V, VI

19. Modelos Econométricos  
Antonio Pulido  
Editorial Pirámide, Madrid España, 1993.
20. Modelación Matemática en Ciencias e Ingeniería  
Ismael Herrera Revilla  
Editado por la UNAM, México, 1988.
21. Investigación de Operaciones  
Robert J. Therauf and Richard A. Grosse  
Editorial Limusa, México, 1984.
22. Investigación de Operaciones  
Hamdy A. Thaha  
Editorial Alfaomega, México, 1995.
23. Guía ilustrada para la Programación Lineal  
Saúl I. Gass  
Editorial Continental, CECSA, México, 1968.
24. Programación Lineal, Métodos y Aplicaciones  
Saúl I. Gass  
Editorial Continental, CECSA, México, 1966
25. Programación Lineal; base teórica y sus aplicaciones administrativas  
Peñañiel Millan, Luis  
Editorial Trillas, Madrid España, 1967
26. Programación Lineal; su aplicación a la teoría de la empresa  
Dorfman Robert  
Editorial Aguilar, México, 1976.
27. Optimización of Chemical Process  
T.F. Edgar. & D.M. Himmelblau  
Editorial Mc. Graw Hill, USA, 1989.

## Artículos y Publicaciones

- Reglamento de la Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en el Ramo del Petróleo, en Materia de Petroquímica.  
Luis Echeverría Alvarez  
Diario Oficial de la Federación, Martes 9 de febrero de 1971.
- Decreto por el que se reforma la Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en el Ramo del Petróleo.  
Ernesto Zedillo Ponce de León  
Diario Oficial de la Federación, Miércoles 13 de noviembre de 1996.
- "Registró Pemex utilidades por 73,582 mdp en el primer semestre"  
Jorge Cisneros Morales  
El Nacional, Sección de Economía  
Viernes 2 de agosto de 1996.
- World Chemical Outlook  
Chemical & Ingeniering News  
December 11, 1995.

## Paginas de Internet consultadas.

- <http://Process.web.com.mx/>
- <http://dgcnesyp.inegi.gob.mx/>
- <http://www.inegi.gob.mx/>
- <http://www.shcp.gob.mx/>
- <http://www.banxico.org.mx/>
- [http://www.git.pemex.com/intranet.](http://www.git.pemex.com/intranet)
- <http://www.pemex.com/>
- <http://www.chemexpo.com/>
- [http://www.el\\_nacional.com.mx/](http://www.el_nacional.com.mx/)
- <http://www.economista.com.mx/>
- <http://www.proceso.web.com.mx/>