

74

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE QUIMICA

ANTEPROYECTO DE UN PROGRAMA DE  
INVESTIGACION PARA EL ESTUDIO DE  
LA GASIFICACION DEL CARBON

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
Ingeniero Químico Metalúrgico  
P R E S E N T A N

RODOLFO CHAVEZ VALENCIA

JOSE MARIN AMBROSI

GONZALO ALEJO OCHOA ABARCA



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.

CLAS Tesis  
AÑO 1975  
FECHA 11-74  
8 74



QUINQ.

JURADO ASIGNADO ORIGINALMENTE SEGUN EL TEMA

Presidente	Prof. Manuel Gaviño Rivera
Vocal	" Alberto Obregón Pérez
Secretario	" Fernando Maldonado Mendoza
1er. Suplente	" José Campos Caudillo
2o. Suplente	" Enrique Martínez Martínez

FACULTAD DE QUIMICA U.N.A.M.

Asesor: M. en C. Fernando Maldonado Mendoza



A MI MADRE

A MIS PADRES

Y HERMANAS

AMIGOS

Y MAESTROS

## INDICE

	Pag.
I. INTRODUCCION . . . . .	1
II. ESTUDIO DE LOS RECURSOS DEL CARBON EN MEXICO . . . . .	4
2.1 Usos del carbón mineral.	
2.2 Historia del carbón mineral en México.	
2.3 Reserva del carbón mineral en México.	
2.4 Posibilidades de encontrar yacimientos de carbón mineral en otras partes de la República Mexicana.	
III. ESTUDIOS EXPERIMENTALES EFECTUADOS PARA ESTUDIAR LA CINETICA DEL PROCESO. . . . .	23
3.1 Consideraciones de equilibrio.	
3.2 Química de la gasificación.	
3.2.1 Procesos de gasificación que usan oxígeno.	
3.3 Cinética de la combustión.	
3.3.1 Efecto de cama profunda.	
3.3.2 Efecto de exeso de aire.	
3.3.3 Efecto de la temperatura de la cama.	
3.3.4 Efecto de la velocidad de fluidización.	
3.3.5 Pérdida de calor en carbón sólido por elutia ción de la cama.	
3.3.6 Uso de catalizadores para promover la eficien cia de la combustión.	

## IV. PROCESOS EXISTENTES. . . . . 37

- 4.1 Producción de combustibles líquidos.
- 4.2 Otros procesos.
- 4.3 Procesos de gasificación.
  - 4.3.1 Proceso "Gassynthan",
  - 4.3.2 Proceso "Bi-Gas".
  - 4.3.3 Proceso "Synthane".
  - 4.3.4. Método "Cogas".
  - 4.3.5 Proceso "Hygas".
  - 4.3.6 Proceso de la "Sal Fundida".
  - 4.3.7 Proceso "Lurgi".
  - 4.3.8 Proceso "Koppers-Totzek".
  - 4.3.9 Proceso "Dioxido de carbono acceptor".

## V. MANUFACTURA DE GAS ENTUBABLE A PARTIR DEL CARBON. . . 52

- 5.1 Costo del proceso "Lurgi".
- 5.2 Desarrollo del proceso de gasificación de carbón.
- 5.3 Potencial económico del desarrollo del proceso.

## VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

BIBLIOGRAFIA.

## I N T R O D U C C I O N

### I. Gasificación: vieja idea.

No hay nada nuevo en cuanto a los procesos de gasificación del carbon, que se han venido usando en Europa desde hace años.

Hasta en Estados Unidos de Norteamérica, el carbón suministró la mayor parte del gas usado en el país hasta una fecha tan reciente como 1940. Estas plantas, sin embargo, producian un gas escaso de poder calorífico, 500 BTU por pié cúbico. El problema consiste en obtener grandes cantidades de gas de alto poder calórico a precios económicos.

El mundo confronta una grave crisis energética al consumir cantidades siempre crecientes de combustibles. Una posible solución sería la gasificación del carbón.

El problema es en parte ambiental, en parte tecnológico y en parte económico. Aún cuando no hay escasez de fuentes de energía, son formidables los problemas de utilizar esta energía sin perjudicar el medio ambiente y llevarla hasta el consumidor a precio capaz de ser pagado.

Un estudio realizado revela que los requisitos energéticos casi se han triplicado entre 1950 y 1970, y se espera que aumentarán a un ritmo de 5% por año hasta 1985.

La solución al problema de la energía no es fácil, pero es evidente que será necesario utilizar carbón en forma creciente. La gasificación del carbón, en particular, se presenta como parte esencial de toda solución a largo plazo. Esto puede tener consecuencias de largo alcance para la industria química mundial.

En primer lugar, el desarrollo de un proceso económico para la gasificación del carbón es un problema de ingeniería química.

En segundo lugar las plantas comerciales de gasificación que fabricarán sub-productos químicos y los convertirán a productos vendibles, serán otro campo de actividad para los tecnólogos químicos.

En un futuro previsible no se espera que los procesos de gasificación del carbón sean capaces de suministrar un porcentaje elevado de los requisitos energéticos. Estos procesos se consideran como suplementales, aún cuando -- podrían llegar a ser sumamente necesarios.

Tampoco se observa mucha prisa para construir plantas de gasificación, éstas son muy costosas y se necesita mucho tiempo para erigirlas.

Los principales objetivos comprendidos en esta tesis son dar a conocer, por medio de una información bibliográfica, los métodos existentes de la gasificación del carbón enfocada hacia la crisis de energéticos.

CARACTERISTICAS GENERALES DE LOS CARBONES MINERALES.

TIPO DE CARBON	HUMEDAD	% CONTENIDO EN SECO				PODER CALORIFICO
	%	C	H	O	Mat. Vol.	B.T.U.
LIGNITO	20 a 40	65 a 75	+ - 5	15 a 25	40 a 50	4 000 a 8 000
CARBON BITUMINOSO	5 a 10	75 a 90	4 a 5	5 a 20	18 a 40	11 000 a 16 000
ANTRACITA	menos de 5	92 a 94	3 a 4	3 a 4	menos de 15	14 000 a 16 000

C: Carbón

H: Hidrógeno

O: Oxígeno

Mat. Vol.: Materia Volátil

BTU: Unidades británicas térmicas.

Esta es la clasificación general de los carbones minerales, pero algunos autores clasifican especies intermedias con características igualmente intermedias colocando el siguiente orden: carbón pardo, lignito, carbón subbituminoso, carbón bituminoso de volatilidad alta, carbón bituminoso de volatilidad media, carbón bituminoso de volatilidad baja, semiantracita, antracita y metantracita.



## II. ESTUDIO DE LOS RECURSOS DEL CARBON EN MEXICO.

### 2.1 Usos del carbón mineral.

El carbón en cualquiera de sus formas como se presenta en la naturaleza, puede ser quemado en forma directa; casi todos los carbones bituminosos pueden coquizarse y de ellos derivar, mediante el aprovechamiento de los subproductos de las materias volátiles, un sin número de sustancias básicas para la industria; el carbón así mismo puede convertirse en gas y aprovecharse directamente o mediante procesos industriales; finalmente, del carbón pueden obtenerse combustibles líquidos sintéticos similares a los derivados del petróleo.

Los procesos para la obtención de combustibles sintéticos han sido ya probados y usados industrialmente en países europeos y lo han hecho en forma competitiva económicamente con los otros energéticos.

Como combustible quemado directamente, el uso del carbón constituye en algunos países la principal fuente de energía en los siguientes servicios:

- a) Calefacción industrial, comercial y doméstica; preparación de alimentos.
- b) Industrias de la cerámica y de refractarios; fabricación de materiales de construcción, talleres, etc.
- c) Producción de vapor para algunas calderas fijas y de

movimiento, plantas de energía eléctrica, plantas industriales, transportación marítima, etc.

d) Fabricación de cemento, industria de laminación y aceración, hornos de calentamiento, etc.

Mediante procesos de carbonización del carbón mineral, se produce: coque, alquitrán, aceites ligeros, productos químicos y gases.

Cuando el carbón se procesa, para su coquización, en hornos tipo colmena, el coque es el único producto que se obtiene, desaprovechándose los subproductos derivados de las materias volátiles, sin embargo, cuando el proceso de carbonización se realiza en hornos especiales, (de tipo retorta) todos los subproductos derivados de las materias volátiles se recuperan para su aprovechamiento.

Los carbones subbituminosos no coquizables y los lignitos pueden someterse a un proceso de carbonización de baja temperatura obteniéndose entonces la recuperación de los subproductos derivados de las materias volátiles y semi-coque de características tales que puede utilizarse para producir calor, en la misma forma que se obtiene al quemar carbón directamente.

El proceso de carbonización de los carbones bituminosos se realiza mediante el calentamiento del carbón hasta el punto en que se produce el ablandamiento del material;

un calentamiento adicional de la mesa origina una degradación del contenido de carbón, dejando escapar las materias volátiles en forma de gas, vapor de agua, aceites ligeros y alquitrán. Cuando se impone el carbón un calentamiento adicional hasta el rojo, en un recipiente cerrado en el que pueda controlarse la cantidad de aire, y -- por lo mismo de oxígeno, se forma una aglutinación de -- material carbonoso, opaco, de aspecto poroso y de una apariencia metálica, de gran resistencia física. Este producto se denomina coque y su composición alcanza un contenido de carbón que efectúa entre 82 y 95%. El coque -- con menosde 90% de contenido de carbón se clasifica como coque estandar, y cuando el contenido de carbón es mayor del 90% se llama coque imperial. Este producto constituye el elemento básico para la producción del lingote de hierro en el alto horno. Si la relación entre los componentes del coque, azufre y las cenizas se mantiene dentro de los límites especificados, el coque se denomina -- metalúrgico y es el material adecuado para el alto horno. El coque metalúrgico ha sido reconocido universalmente como el elemento base de la presente civilización mecanizada. Generalmente en el proceso de carbonización artificial de carbón natural, además del coque metalúrgico se obtiene el coque denominado ceniza, que consiste en -

pequeñas partículas de carbón que pueden quemarse en equipos diseñados especialmente, o moldearse en ladrillos para uso doméstico.

El alquitrán, el amoníaco, los aceites ligeros y el gas, producidos durante la carbonización del carbón en los hornos de retorta, constituyen materias primas de gran valor para la industria química; de estos productos se obtienen muchos derivados que incluyen, desde los asfaltos para carreteras, hasta perfumes, explosivos, medicinas, insecticidas, plásticos y muchos más.

La aplicación y obtención de los productos derivados del carbón, aún no se considera agotada y numerosos laboratorios en todo el mundo, con verdaderos ejércitos de químicos y personal técnico, trabajan constantemente para descubrir nuevas aplicaciones.

El proceso de carbonización de un carbón bituminoso de características comerciales, por cada tonelada de carbón se obtienen los siguientes subproductos:

650 a 700 Kg de coque.

33 a 41 lt de alquitrán.

9 a 12 Kg de sulfato de amonio.

1.25 a 1.75 Kg de aceite ligero.

300 a 360 m<sup>3</sup> de gas.

La producción de combustibles sintéticos obtenidos del

carbón puede variar desde aceites pesados y aceites diesel hasta gasolinaz para aviones; para obtenerse estos productos pueden aplicarse procesos como los siguientes:

a) La carbonización del carbón bituminoso del cual se derivan alquitranes y aceites ligeros que se procesan para la obtención de los combustibles sintéticos.

b) La hidrogenación a presión de carbones bituminosos, subbituminosos, lignitos o alquitranes con alto contenido de materias volátiles.

c) El tratamiento del gas mediante el procesamiento Fisher-Tropsch mediante el cual se logra una síntesis de gas por medio de la combinación del hidrógeno y el monóxido de carbono para formar líquidos.

La tabla y el árbol de usos industriales del carbón mineral, mostradas en las figuras ( 1 y 2 ), nos dá idea de la manera como han sabido aprovechar sus recursos naturales, algunos países que van a la vanguardia de la civilización.

## 2.2. Historia del carbón mineral en México.

Indudablemente que en México el carbón mineral ya se conocía como elemento combustible, desde la época precolombina, pero se ignora si se usó en fundición de minerales o para algunos otros usos.

México era favorecido por la abundancia de sus bosques y

en ellos tenía la fuente de energéticos aparentemente su suficiente para sus necesidades de momento y futuras, pero desgraciadamente, no se ha sabido combinar la utilización de sus recursos naturales y empezamos a usarlos hasta que la crisis nos obliga. Las riquezas forestales se consumieron quemándolas casi hasta su agotamiento total. A mediados del siglo pasado, cuando en Europa y en Estados Unidos ya la explotación del carbón constituía una de -- las industrias básicas para su desarrollo económico, va-- rios ingenieros señalan la existencia de carbón en Méxi-- co, pero éste no se explota más que en los lugares donde las necesidades lo van exigiendo. En el decenio de 1800 se introduce el ferrocarril a México y se extiende por -- la frontera de Laredo y Piedras Negras, se requiere car-- bón y se empiezan a reconocer los yacimientos de Colom-- bia, Coahuila y Fuentes, Coahuila, de donde se logra ob-- tener inicialmente todo el carbón necesario para las ne-- cesidades del ferrocarril. La explotación del carbón se inicia en el año de 1884 en Villa de Fuentes, y para 18-- 91 ya alcanzan una producción de 30 000 toneladas. El carbón de las regiones de Colombia y de Villa de Fuen-- tes es carbón de flama larga, no coquizable y especiales para calderas de hogar abierto, es muy frágil, se pulve-- riza fácilmente por lo que se dificulta su manejo y ade--

más produce mucho humo durante su combustión. A unos 150 kilómetros al sur de la frontera se encuentran los yacimientos de la zona carbonífera de Sabinas, muy abundantes, fáciles de explotación y constituidos por un carbón bituminoso, que aunque tiene un poder calórico semejante al carbón de flama larga, tiene la ventaja de que es menos deleznable a la intemperie, y además es coquizable, por lo cual se abandona prácticamente la explotación y exploración del carbón de flama larga y desde entonces no se hace necesario mas que ligeras exploraciones para conservar las reservas positivas indispensables para mantener, a medias, las necesidades de la industria minero-metalúrgica y siderúrgica del país.

Con la seguridad de tener reservas suficientes de carbón coquizable en México, a partir de 1900 se desarrolla la industria siderúrgica y minero-metalúrgica y se integran varias industrias mas que se basan en el carbón mineral y sus derivados como combustibles principales.

Uno de los principales consumidores del carbón producido en México fueron los ferrocarriles nacionales, pero poco a poco fue desplazado por el petróleo, de manera que para 1930 prácticamente todas las locomotoras utilizaban exclusivamente este producto como combustible y el uso del carbón mineral en México se vió reducido, hasta la -

fecha, unicamente como elemento reductor en fundición de minerales y en la siderurgia.

A pesar de que el carbón mineral ha sido la base principal como energético, en la electrificación de los países mas desarrollados del mundo, en México casi no se ha usado en ésta rama, pues en forma comercial unicamente en dos ocaciones se ha hecho: En 1932 la planta termoeléctrica de Franke, Durango, que abastece de energía eléctrica a la zona lagunera inició sus operaciones utilizando carbón tal como sale de la mina y operó exclusivamente con este combustible durante algunos años de manera que en 1937 su consumo de carbón era de cerca de 500 toneladas diarias. Por la mayor facilidad del manejo de los combustibles líquidos, el carbón fué mayormente substituido por estos, y para 1956, en esta planta, únicamente se producía el 60% de la energía, con carbón y el 40% con petróleo con un margen económico favorable para el carbón; para 1963 se eliminó totalmente el uso del carbón para generar energía eléctrica.

En el año de 1967 se puso en operación la planta termoeléctrica de Nava, Coahuila, con capacidad instalada de 37 500 KW la que utiliza como combustible carbón mineral de la mina de Río Escondido, Coah. Esto es, que en México el uso de carbón mineral para producir energía eléc-



trica ha sido practicamente nulo si se compara que el -- consumo anual de 4 887 toneladas de carbón apenas se utilizan 140 para producir electricidad, o que de 3.5 millones de KW instalados en el país, unicamente 0.037 millones de KW se generan con carbón. (figura 3).

El carbón que se ha explotado en México ha sido para la fabricación del coque y corresponde a un carbón bituminoso de volatilidad media, solo que éste carbón se en---cuentra con impurezas areno-arcillosas formando parte -- del manto del carbón y además ha sido común que entremedio del manto se presente un cuerpo de roca estéril de -- unos 20 o 30 cm de espesor que es necesario sacarlo junto con el carbón.

El contenido de impurezas, de los carbones explotados en la región de Sabinas ha sido del 20%, pero con el hueso intermedio hace que el contenido de cenizas del carbón -- todo uno ( tal como sale de la mina) suba a 30 y a veces a 40%.

Un coque que tenga mas de 18 a 20% de cenizas se vuelve quebradizo y no puede usarse en alto horno. Si el carbón constituido principalmente por carbón fijo, materia volátil y cenizas, al convertirse en coque pierde la materia volátil, el porcentaje en el coque de carbón fijo y cenizas aumenta, por lo que se requiere que el carbón que se

meta a las coquizadoras tenga un contenido de cenizas no mayor del 15%; pocas son las minas que logran un carbón todo uno con menos del 15% de cenizas por lo que en su mayoría se requiere someterlos a un tratamiento metalúrgico de lavado.

Este lavado del carbón aumenta el costo además de que -- no logra quitar el contenido de cenizas como se deseara, y en ocasiones el coque resulta en los límites aceptables, o sea con un 18 a 20% de cenizas

El carbón mineral, en México ha sido explotado para beneficio exclusivo de 3 o 4 empresas particulares y no tan solo no han fomentado el uso del carbón para otros fines, sino que ni siquiera han tratado de cubrir su propia demanda y por lo mismo no han puesto interés en incrementar las reservas más allá de sus necesidades.

A pesar de que las reservas de carbón en México son sumamente amplias para cubrir las necesidades industriales y buscarle otros usos además del de la siderurgia y la fundición de minerales a que se destina actualmente, se ha estado importando cada año en mayor escala; en el año de 1972 se importó el 26.76% del consumo nacional.

Indudablemente que este aumento de importación no ha sido por desconocimiento de las reservas carboníferas de México, ni por la falta de previsión industrial al pro--

yectar las ampliaciones siderúrgicas, sino que se debe a una conveniencia económica individual de las empresas. Desde el año de 1956, el entonces Instituto Nacional para la Investigación de Recursos Minerales, en colaboración con la Geological Survey, United States, hicieron un estudio geológico de los depósitos de carbón de la región de Sabinas en el estado de Coahuila, en forma conjunta entre México y los Estados Unidos, contaron con la colaboración y el apoyo de los gobiernos de los dos países y visitaron minas, instalaciones y lugares con carácter de empleados oficiales, por lo que tuvieron los datos particulares, estatales, técnicos y de laboratorios de los Estados Unidos.

Como resultado de éste estudio se editó un libro al respecto en el que se indica la existencia de siete cuencas carboníferas en la región de Sabinas que contienen reservas por el orden de 4 138 634 000 toneladas de carbón -- económicamente explotable en mantos de mas de 1.5 m de espesor, a menos de 300 m de profundidad.

El estudio fué hecho por técnicos e instituciones que gozan de un prestigio mundial indiscutible y de la confianza oficial como la de Estados Unidos, quienes hasta la fecha, sus informes y programas los basan en estudios de la Geological Survey United States, Departamento of -

the Interior, que fué la que colaboró y puso todos sus recursos para este estudio.

Puede haber una razón individual de orden económico pero no técnico, el que las empresas prefieran usar, carbón mineral y coque importado pués el que se produce en México es menor de calidad y mayor costo que el norteamericano, y es que los Estados Unidos además de cuidar su industria del carbón para cubrir sus necesidades, la han fomentado como una fuente de trabajo y de ingreso de divisas. En 1971 exportaron, entre producto natural y coque el 12% del equivalente a carbón natural, de su producción ( 71 millones de toneladas, de las 590 que produjeron).

### 2.3. Reservas de carbón mineral en México.

En términos mineros, mundialmente, las reservas de minerales se consideran de tres tipos: POSITIVAS O MEDIAS; PROBABLES O INDICADAS y POSIBLES O INFERIDAS.

Las reservas mineras positivas o medias son las que se conocen perfectamente, por medio de afloramiento, zanjas, obras mineras o barrenos; de manera que se está plenamente seguro de su calidad, cantidad y características generales, y que se tengan medidas en sus tres dimensiones: espesor, largo y ancho.

Cuando las reservas mineras se tienen también conocidas:

por obras mineras, afloramientos, zanjas o barrenos, pero a distancias a las que no se puede estar absolutamente seguro de lo sintermio ( en carbón, a más de 250 m); o bien cuando únicamente se conocen dos lados del área - bloqueada, se dice que las reservas son indicadas o probables.

Cuando un yacimiento minero se conoce por medio de sus - afloramientos, por obras mineras aisladas, por barrenos de reconocimientos a distancia tal que no se pueda asegurar con certeza la parte intermedia, pero que, de acuerdo con la práctica local u las deducciones geológicas y mineras existan posibilidades de mineralización, - se pueden considerar reservas mineras posibles o inferidas.

Es obvio que para lograr estar absolutamente seguro de - la existencia de un tonelaje de mineral y conocer este - en todas sus características y dimensiones se requiere - de inversiones y obras que están en función de su tonelaje, pero también es cierto que ninguna industria debe -- hacer gastos innecesarios.

Se ha visto que en México el carbón mineral únicamente se ha utilizado en la industria siderúrgica y metalúrgica, - y en los últimos años la comisión Federal de Electricidad ha estado ligeramente interesada en su utilización -

para generar corriente eléctrica.

Las necesidades de carbón para las dos primeras ramas -- industriales ha sido, conforme las tablas de consumo, -- del orden de 2 millones de toneladas anuales y ha aumentado a cuatro en el último año, por lo que, con un tonelaje de reservas positivas de carbón para las necesidades de 50 años ha sido suficiente y esto es lo que razonablemente han hecho las compañías.

También debemos considerar que todos los datos e investigaciones de carácter económico, los industriales los pueden conservar, con todo derecho, como datos confidenciales y mantenerlos en secreto y es por lo cual no se han tenido las cifras exactas de las reservas existentes. Por esto las reservas de carbón mineral en México son -- estimativas y se han considerado de la siguiente manera: Por una encuesta formulada por la comisión de Energéticos de la SEPANAL, Altos Hornos de México S.A., en agosto de 1973 manifestó que cuenta con 219.5 millones de toneladas de reservas de carbón positivas; 45.3 millones de toneladas probables y 71.3 millones de toneladas posibles; estas reservas se tratan de carbones coquizables. La Comisión Federal de Electricidad también informó que cuenta con 50 millones de reservas positivas de carbón de -- flama larga en la mina de Río Escondido, Coah. De Fundi-

dora de Fierro y Acero de Monterrey y de Asarco Mecicana, no se tienen datos.

En el año de 1947, la oficina de Estudios Económicos del Banco de México hizo algunos estudios de las reservas -- carboníferas, de la región carbonífera, de San Marcial, -- Sonora, Santa Clara, Sonora y la Mixteca, Oaxaca.

Publicó los informes correspondientes, con detalles del trabajo realizado y llegó a las conclusiones anotadas en la figura (4).

En el año de 1956, el Instituto Nacional de la Investigación de Recursos Minerales, por parte de México, y el United States Geological Survey del Departamento de los Estados Unidos, hicieron un estudio bastante completo del carbón mineral de la región Sabinas, y llegaron a la conclusión de que en Sabinas se tienen reservas de carbón -- mineral conforme se indica en la figura (5).

En los últimos años, el consejo de Recursos Naturales no Renovables de la Secretaría de Patrimonio Nacional, se -- ha evocado el estudio de las reservas carboníferas del -- país y, tal vez por los resultados de las exploraciones -- obtenidas, o por ~~mantenerse~~ dentro de un margen de seguridad muy conservador ha recalculado las áreas de las -- cuencas carboníferas de la región de Sabinas, Coah. y se le aplicó todavía otro factor mas de seguridad que se le

llanó factór de lenticularidad. De la misma manera se le aplicó este factor a los datos de las reservas dadas por los estudios del Banco de México, por lo que se consideró únicamente la mitad de las reservas ya anotadas.

En diciembre de 1973, el subcomité de carbón de la Comisión de Energéticos de la Secretaría de Patrimonio Nacional, después de analizar todos los datos particulares y oficiales a la mano y aplicando un criterio muy conservador llegó a la conclusión de que las reservas de carbón en México, considerando únicamente mantos de mas de 1.5 m de espesor y a no mas de 300 m de profundidad, son las siguientes:

<u>CLASIFICACIÓN</u>	<u>MILLONES DE TONELADAS METRICAS</u>	
Positivas	445.172	
Probables	<u>137.866</u>	<u>583.038</u>
Posibles		1 546.033
<b>TOTAL</b>	<u>2 129.071</u>	

Estas reservas se refieren tan solo a la región de Sabinas y Río Escondido, que es donde ha habido necesidad de explotar el carbón; a la zona de San Marcial y Santa Clara Sonora y a la Mixteca de Oaxaca, en donde ocasionalmente se han visto los afloramientos de carbón.

- 2.4. Posibilidades de encontrar yacimientos de carbón mineral en otras partes de la República Mexicana.



Se ha visto que todos los estudios de carbón se han enfocado principalmente a la zona carbonífera de Sabinas, en donde, a pesar de que ha sido prácticamente la única --- fuente de carbón mineral en México, difícilmente se le --- conoce un 20%, pues hablamos de unos 445 millones de toneladas positivas cuando se estiman sus reservas posi--- bles, con un margen muy amplio de seguridad, de cinco --- veces más. Esto representa que, únicamente en esta re--- gión de Sabinas se tiene carbón mineral positivo o medido, para cubrir las necesidades de consumo a un ritmo actual, por cien años y que además se tenga un margen muy amplio para abastecer un crecimiento de cinco veces mayor durante los mismos cien años.

Suponiendo también que la técnica de explotación y las --- necesidades no nos obliguen a utilizar yacimientos de --- menos de 1.5 m de carbón ni a más de 300 m de profundidad. (En Europa y aún en mismo Estados Unidos, ya se con sidera carbón explotable comercialmente, en mantos de 70 cm de espesor y hasta 700 m de profundidad).

Se conoce, por su afloramiento y algunos barrenos exploratorios, siete cuencas carboníferas, de las cuales apenas dos o tres se han explotado en una mínima parte. Se ha tomado en cuenta exclusivamente el carbón bituminoso coquizable y se han subestimado los otros tipos de carbones, así como los mantos de carbón de menor espesor.

Por opiniones de varios expertos en la materia y en el mismo estudio desarrollado por México y Estados Unidos, considera que, nada más en la región de Sabinas se cuenta con un potencial en yacimientos de carbón, por el orden de los 12 500 millones de toneladas de carbón bituminoso coquizable.

La C.F.E. dice que tiene, ubicadas en el área de la mina de Río Escondido, un tonelaje de carbón mineral de flama larga de 50 millones de mineral positivo. Esta mina de Río Escondido fué trabajada desde principios de siglo y se reconoció porque estaba al paso del ferrocarril que en esa época consumían ese tipo de carbón. No se tiene conocimiento que se hayan hecho exploraciones conocidas ya, como son: La región de Colombia, Coah., y toda la -- basta zona carbonífera de Fuentes y Piedras Negras en -- donde geologicamente existen las mismas condiciones y posibilidades de localizar yacimientos de carbón.

No se debe olvidar que aquí en México, se ha considerado únicamente como carbón mineral industrial al carbón bituminoso coquizable y se han desperdiciado los otros tipos de carbón que tienen el mismo interés energético. Ya se mencionó que por ejemplo, el lignito que representa la clasificación más baja de los carbones, es tanto en producción actual como en reservas, un elemento de primer -

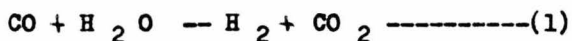
orden en varias naciones de las mas industrializadas como en Alemania y en Rusia.

En México se conoce perfectamente la existencia de un -- cuerpo lignítico que se extiende por varios kilómetros -- en un espesor de mas de diez metros, en la zona sur de -- la República, que si es cierto se encuentra a más de 700 m de profundidad, también es cierto que no se le ha estudiado como yacimiento de carbón, no se le ha buscado en otros lugares fuera de donde ocasionalmente se le conoce. En las figuras (6 y 7 ), se muestran dos planos de la República Mexicana, en donde se señalan las cuencas sedi--mentarias y que obviamente existen posibilidades de en--contrar yacimientos de carbón; la prueba de esta hipóte--sis es que ya ocasionalmente se han encontrado conforme al plano segundo afloramientos de carbón, reconocidos a la fecha.

III. ESTUDIOS EXPERIMENTALES EFECTUADOS PARA ESTUDIAR LA  
CINETICA DEL PROCESO.

3.1 CONSIDERACIONES DE EQUILIBRIO.

Generalmente los componentes que efectúan la síntesis -- del gas son considerados en el equilibrio con respecto a la reacción agua-gas ocurrida a temperaturas a las cua-- les se produce sa síntesis del gas:

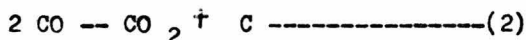


$$K_1 = K_p = (\text{CO}_2) (\text{H}_2) / (\text{CO}) (\text{H}_2\text{O})$$

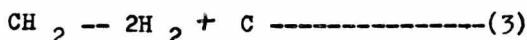
De la reacción ( 1 ) es evidente que la concentración de CO en una síntesis de gas es determinada por la concen-- tración de vapor y CO<sub>2</sub> , también como por la temperatu-- ra de reacción. Para cualquier contenido de CO<sub>2</sub> dado en la mezcla de reacción, la alta temperatura y el bajo con-- tenido de vapor favorecen la formación de una síntesis -- de gas alta en CO. Desde el punto de vista de eficiencia de operación, muy a menudo es deseable llevar a cabo la producción de síntesis de gas a la más baja temperatura en la cual la rapidez de la reacción sea alta. Por lo -- las condiciones óptimas de operación para la síntesis -- del gas serían: La operación continua, interrumpida por la deposición del carbón, requiriendo para esto la con--

centración de  $\text{CO}_2$  mas baja posible y el vapor necesario para la producción de gas de una composición deseada; y permite la operación a una temperatura no muy elevada -- en la cual la reacción se efectúe económicamente.

Considerando el equilibrio cuando los hidrocarburos ligeros reaccionan con  $\text{CO}_2$  y vapor, se hicieron algunas hipótesis para simplificar el procedimiento: el hidrocarburo es metano, se forma carbón grafitico, todos los gases son tratados como gases ideales, el sistema está a 1 atm de presión y la mezcla que reacciona está en equilibrio con respecto a la reacción agua-gas cambia la reacción y dá las reacciones (2) y (3).

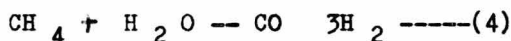


$$K_2 = K_p = \frac{(\text{CO}_2)}{(\text{CO})^2}$$



$$K_3 = K_p = \frac{(\text{H}_2)^2}{(\text{CH}_4)}$$

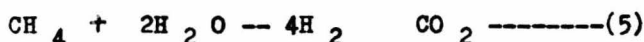
Ordenando las reacciones (1), (2) y (3) es aparente que resultará otra reacción ya familiar, así, combinando -- las reacciones (1), (2) y (3) obtenemos la reacción (4).



$$K_4 = K_p = \frac{(\text{CO}) (\text{H}_2)^3}{(\text{CH}_4) (\text{H}_2\text{O})}$$

Esta es una reacción completa por la cual los hidrocar--

buros reaccionan con el vapor en la producción de hidrógeno. Ahora combinando las reacciones (1), (2) y (3) en otra forma resulta la reacción (5).



$$K_5 = K_p = (\text{H}_2)^4 (\text{CO}_2) / (\text{CH}_4) (\text{H}_2\text{O})^2$$

Esta es otra reacción completa para la reducción de hidrógeno. Ahora combinando las reacciones (2) y (3) nos resulta la reacción (6).



$$K_6 = K_p = (\text{H}_2)^2 (\text{CO})^2 / (\text{CH}_4) (\text{CO}_2)$$

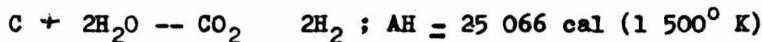
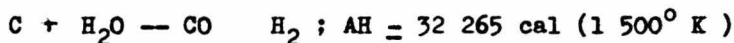
Esta es otra reacción entre  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$  en ausencia de vapor.

### 3.2

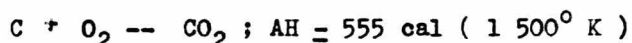
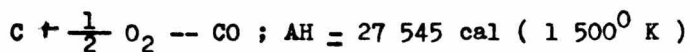
#### QUIMICA DE LA GASIFICACIÓN.

La reacción en el sistema C,  $\text{O}_2$  y vapor están indicadas en la figura (14) a dos diferentes temperaturas. Los valores de  $\Delta H$  negativos son para reacciones exotérmicas y los positivos para endotérmicas. A presiones normales, - las primeras 8 reacciones predominan, mientras que las - otras 4 son significantes a altas presiones.

Las reacciones deseadas primeramente para la producción de síntesis de gas son:



Ambas son endotérmicas, y, al suministrar el calor de -- reacción, las reacciones exotérmicas consisten principalmente de:



La formación de metano en una zona de baja temperatura, también exotérmica, suministra un calor adicional a la -- reacción.

Para limitar el calor de la formación del metano suministrado, se tiene que reducir el suministro de  $O_2$ . De ésta forma se verá posteriormente en el proceso " LURGI" de -- gasificación presurizada, que el volúmen formado de metano y el oxígeno en exceso son relativamente bajos.

En el estudio de las reacciones del sistema C,  $O_2$  y vapor a presiones atmosféricas y mayores, los cálculos se hicieron sobre la composición en equilibrio de los gases formados dentro del intervalo de temperaturas de -- operación de la producción del gas, y los efectos netos -- del calor fueron calculados, con el fin de estudiar la -- entalpia.

Está demostrado que en la presión lleva a un decremento en la concentración del equilibrio  $H_2$  y CO, un incremento en las concentraciones de  $CO_2$  y  $CH_4$  y un decremento en

la conversión de agua.

En general, la proporción oxígeno-vapor requiere mantener un intercambio fijo en el contenido de calor que se incrementa elevando la temperatura y disminuyendo la presión. El aumento es alto a temperaturas bajas y disminuye a temperaturas altas hasta el punto donde empiezan a convertirse muy pequeñas, mientras que el decremento es más notorio a bajas presiones.

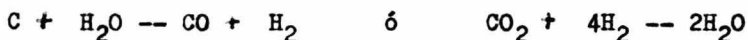
Las figuras de la 15 a la 18 muestran la dependencia de la temperatura de las composiciones en equilibrio a presiones de 1, 10, 20 y 40 atm respectivamente.

La figura 19 muestra una tabla logarítmica estandar de la temperatura constante de equilibrio para 8 reacciones. Las condiciones de equilibrio, como se determinaron en estudios de laboratorio usando grafito, raramente se obtienen operaciones prácticas. La reactividad del combustible y sus características físicas, así como también la composición deseada del gas, serán determinadas por la temperatura, presión y reacción química en sí, nos permitirán encontrar el modo de operación más económico.

Los experimentos realizados han demostrado que el CO es el producto primario cuando el  $O_2$  reacciona con el carbón sólido a temperaturas arriba de  $1472^{\circ}F$ , pero cuando se tomaron pruebas de la zona de combustión, se encontró



que existía más  $\text{CO}_2$  que  $\text{CO}$ , probando así que las reacciones secundarias tienen gran importancia al menos en procesos de cama fluida. Es claro que mucho del oxígeno restante y el  $\text{CO}$  formado en la superficie del combustible serán oxidados al vacío y se convertirán en  $\text{CO}_2$ , el cual será reducido a  $\text{CO}$  por contacto con carbón. Sin embargo existe alguna incertidumbre a cerca de cual es la reacción que se lleva a cabo primero.



En los reportes británicos se encuentra que la interacción de  $\text{C}$  con  $\text{H}_2$  en las camas es de igual importancia que en la formación de metano como en la reacción entre el  $\text{H}_2$  y  $\text{CO}$  ó  $\text{CO}_2$ .

Muy lejos de su influencia acerca del diseño de equipo y las condiciones de operación actuales, las condiciones cinéticas y de equilibrio se citarán a continuación:

### 3.2.1.

#### PROCESO DE GASIFICACION QUE USAN OXIGENO

Existen cuatro grupos principales de gasificación usando oxígeno y estos son:

- 1) Procesos en los cuales el combustible fino es gasificado en una cama fluidizada.
- 2) Procesos en los cuales el combustible fino es gasificado en suspensión.
  - a) Gasificación en estado simple.

b) Gasificación con recirculación de gas.

3) Procesos en los cuales el combustible fino es gasificado en una cama mezclada.

a) Gasificación a presión normal.

b) Gasificación a presión alta.

Procesos en los cuales un poco de combustible es gasificado en una cama mezclada.

a) Operación estandar.

b) Operación tipo escoriado.

### 3.3

#### CINETICA DE LA COMBUSTION.

La proporción del calor desprendido disponible para un cambio directo en la combustión de una cama fluida depende de la relación  $CO / CO_2$  y  $CO_2$  de los gases salientes de la cama. Si el contenido fuera obtenido en una cama de combustible a  $980^{\circ}C$ , la relación sería unitaria, mientras que a temperaturas de  $650^{\circ}C$  la relación sería más grande de 0.5. Por lo tanto en condiciones de equilibrio, solo una pequeña porción del gas desprendido es disponible para el cambio directo de la cama de combustible. como sea, aparecen dos factores los cuales pueden ser manipulados para analizar el equilibrio de las reacciones obtenidas en la cama fluida. El primer factor a considerar es que a temperaturas menores de  $1650^{\circ}C$ , la reacción  $C / CO_2$ , - es más lenta que la reacción de oxidación, la cual resul

ta en la formación del  $\text{CO}_2$ , y la diferencia aumenta mientras que la temperatura disminuye.

De hecho, cuando se trabaje con una cama fluida, la temperatura debe ser lo mas baja posible. El segundo es que existen razones prácticas para hacer operar el reactor - con bajas concentraciones de carbón, y esto disminuye la formación de CO. El alto intervalo de mezclado de sólidos existente en la cama fluida es beneficioso para la combustión. En la figura (20) puede verse que aumenta la eficiencia de la combustión cuando ésta se lleva a cabo en la cama fluida.

La C.E.G.B. hizo experimentos con gases sobrantes de chimenea de un reactor fluidizado a varias temperaturas. La concentración de carbón en la cama fué de 2%. Se mostró que a  $600^\circ\text{C}$  hubo un 5% de CO y 14% de  $\text{O}_2$  en el gas, mientras que a  $700^\circ\text{C}$  el  $\text{O}_2$  bajó a 7% y el CO a 1.5%.

La figura (20) muestra también que un incremento en el contenido de carbón de la cama a temperatura de  $770^\circ\text{C}$  -- la concentración de oxígeno disminuye y aumenta la concentración de CO en el gas de chimenea.

Se pueden presentar efectos nocivos, particularmente a elevadas temperaturas, estos son, que el contenido de CO puede disminuir al reducirse la cantidad del 2% del carbón, y esto fué confirmado por la C.R.E. y B.C.U.R.A.

El hecho de que el  $\text{CO}$  y el  $\text{O}_2$  esten presentes sobre la cama, viene a ser una consecuencia de la formación de burbujas. El oxígeno presente en las burbujas reacciona lentamente con el combustible, así que cualquier medida tendiente a evitar la formación de burbujas grandes está destinada a mejorar la operación del equipo.

Observaciones hechas por la C.R.E. indican que es uno de los beneficios de la recirculación de la elutriación a la cama.

### 3.3.1. EFECTOS DE CAMA PROFUNDA.

La C.R.E. estudió el efecto de la combustión alterando la altura de la cama, con un exceso del 10 al 30% de aire en un combustor de 0.15 m los resultados de este experimento se muestran en la figura (21). Se verá que la disminución de la altura de la cama de 1.0 a 0.4 m tuvo un pequeño efecto en la eficiencia de la combustión, como se juzgó por la información del  $\text{CO}_2$ .

Este hallazgo tuvo una considerable importancia práctica, así bajando la altura de la cama se reduce el costo de la bomba.

Bajo las diferentes condiciones de operación obtenidas en el combustor piloto a escala ( particularmente la alta velocidad de fluidización), B.C.U.R.A. observó que como la profundidad de la cama se incrementó de 0.3 a 0.6 m

aumentó la cantidad total de combustión en la cama, mientras que la cantidad desprendida de calor, ocurrida arriba de la cama, fué reducida, figura (21).

### 3.3.2 EFECTO DE EXCESO DE AIRE.

En la serie de experimentos representados en la figura - (21), hechos por C.R.E., vemos que aún con "o" exceso de aire la concentración de CO fué solo 1.4%, y se verá que fué menor de 0.1% en todo el exceso de valores de aire - de 7%.

Similares resultados fueron reportados por B.C.U.R.A., - C.S.I.R.O. en Australia y la C.E.I.

Basándose en los hallazgos antes citados, C.R.E. ha comparado todas las pérdidas de calor en un combustor fluidizado con todos los típicos hornos p.f.

En un boiler p.f. operado con 20% de exceso de aire y en el cual el carbón sólido pierde 1.5%, todas las pérdidas están calculadas para ser equivalentes a 3.5% de carbón. Los resultados experimentales de la figura (22) indican que todas las pérdidas de calor en un combustor fluidizado, están variando en el intervalo de 5 a 30% de exceso de aire, y serán menores que en un boiler p.f. (fig. 22).

### 3.3.3. EFECTO DE LA TEMPERATURA DE LA CAMA.

Experimentos realizados por C.R.E. en un combustor de -

0.15m, usando 20% de exceso de aire, se encontró que a 800°C el CO en el gas que sale de la cama era generalmente menor de 0.1%.

A 700°C, fué tan alto como 0.7%, pero la proporción bajó velozmente como la de fluidización (mostrado en la figura 23). Hallazgos substancialmente similares son reportados por B.C.U.R.A. y U.S. oficina de minas.

#### 3.3.4. EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUIDIZACIÓN.

C.R.E. encontró, como se ve en la figura (23), que aumentando la velocidad de fluidización en un 50% (de 0.6 a 0.9 m/s) aumenta el CO en el gas afluente en la misma proporción aproximadamente, a 700 y 800°C. El efecto de la velocidad de fluidización en la pérdida de carbón por se discute separadamente.

#### 3.3.5. PERDIDA DE CALOR EN CARBON SOLIDO POR ELUTRIACION DE LA CAMA.

Generalmente, ha sido reconocido que el factor que afecta toda la eficiencia de un combustor fluidizado, es la cantidad de calor perdido como calor sólido en las partículas elutriadas de la cama de combustión o quemandolos en otro horno.

El problema de acarrear los sólidos ha sido estudiado -- por B.C.U.R.A. usando cuatro carbones sin lavar, con tamaños de 1/2 a 5 1/4, los resultados de estos experimen

tos están representados en la figura (24).

Se verá que la pérdida de calor por carbón elutriado aumenta con el rango de alimentación de carbón, y también aumenta generalmente con la velocidad de fluidización.-- También existe una tendencia a que la pérdida disminuye cuando se incrementa el exceso de aire y con altos valores de recirculación. La pérdida de calor como carbón -- sólido en estos experimentos, al menos 5%, como se muestra en la figura (24), es más alta que la tolerable en un sistema comercial, pero la combustión mas completa indudablemente podría ser obtenida modificando los arreglos para recircular sólidos.

Los mismos problemas han sido estudiados por C.R.E. y -- los resultados de éstos experimentos están mostrados en la figura (23). El nivel de carbón perdido por elutria-- ción fué mucho mas bajo que el reportado por B.C.U.R.A., indudablemente porque la velocidad de fluidación fue más baja, la cual fue del orden de 1/4 de velocidad usada -- por B.C.U.R.A. en sus experimentos.

Con una temperatura de  $800^{\circ}\text{C}$  en la cama y una velocidad de 0.6 m/s, el carbón pierde ( sin recircular) una cantidad de 6.5% del carbón terminado. Cuando el primer ciclo de los finos fue recirculado, solo un 0.16% de carbón remanente no es quemado. figura (24).

### 3.3.6.

#### USO DE CATALIZADORES PARA PROMOVER LA EFICIENCIA DE LA COMBUSTION.

Considerables ventajas técnicas y económicas serán ganadas al operar un combustor fluidizado a la menor temperatura posible de acuerdo con la combustión completa. Estas ventajas potenciales incluyen el evitar problemas -- los cuales son causados por la fusión de la ceniza en -- una cama que tenga tubos intercambiado es de calor, reduce los costos contenidos. (figura 25).

El uso de catalizadores para facilitar que la combustión sea llevada a cabo con baja temperatura relativamente, ha sido estudiado por C.E.I. y C.R.E.. En el proceso ingenieril de combustión, la cama fluidizada está compuesta totalmente o en una parte de un catalizador de oxidación granular, consistente en un óxido de un metal activado como alúmina impregnada con más del 1% de platino u otro metal noble. La temperatura de la cama es mantenida dentro de un rango de 600 a 850°C. El proceso de usa para combustibles sólidos o gaseosos, también como para -- combustibles líquidos. Con los primeros, parece que la -- necesidad de recibir el catalizador, lo cual es caro, -- constituye un serio inconveniente.

C.R.E. intentó catalizar la combustión, en una cama a -- 700°C, incorporando 1% de óxido cúprico u óxido férrico



en la alimentación de carbón, los resultados de éstos - experimentos aparecen en la figura (25). Se notará que ambos aditivos y particularmente el óxido cúprico, catalizó la combustión de CO substancialmente; aún así, - la concentración no fué reducida a un nivel aceptable - (0.2%), por lo tanto C.R.E. no trabaja más sobre esto.

#### IV.

#### PROCESOS EXISTENTES.

El carbón parece ser la solución mas obvia del problema del petróleo. Los yacimientos abundan en muchos países - con gran consumo de energía. Además, es bien conocida la tecnología para convertirlo no solo en gas, sino en combustibles líquidos. Por qué pues no está el carbón resolviendo la crisis energética.?

Hay dificultades, hoy más que nunca es difícil inducir a la gente a trabajar en minas de carbón, lo cual en parte obedece al hecho de que durante los últimos 30 años muy poco capital y tecnología se han dedicado a la explotación del carbón. El costo " relativamente bajo " del petróleo y las predicciones de una rápida aceptación de la energía nuclear contribuyeron a la decadencia de la explotación de minas carboníferas, al punto de abandonarse muchas de dudoso rendimiento.

También actuó en contra del carbón el interés por combatir la contaminación atmosférica. Muchas plantas se vieron forzadas al abandono de los carbones con gran proporción de azufre en favor del petróleo y el gas natural. - Ahora los usantes del carbón tienen una oportunidad para demostrar que el empleo del carbón no necesariamente entraña chimeneas corruptoras del ambiente.

Con la creciente demanda del carbón las empresas mineras

tratan de impulsar su producción. En los Estados Unidos el precio del carbón se ha mas que duplicado durante los últimos tres meses y, sin embargo, a pesar de tal incentivo las firmas mineras afrontan serias dificultades y - demoras respecto al incremento de la producción. El problema se agrava mas con la escasez de los vagones especiales para el transporte del carbón y la demora que habrá para la construcción de más de ellos.

Para el futuro próximo, por lo tanto, el carbón no constituye una alternativa muy promisoria. No obstante, las perspectivas a largo plazo son excelentes para la mayor utilización del carbón.

Con el alza de los precios la extracción del carbón representa una inversión mejor y las firmas mineras están efectuando fuertes desembolsos para la ampliación de sus instalaciones. Por ejemplo la American Metal Climax Inc. planea invertir 285 millones de dólares para triplicar - su producción de carbón en los Estados Unidos hasta 50 - millones de toneladas en 1978. Otras compañías tienen planes análogamente ambiciosos que pudieran capacitar a la industria minera de los Estados Unidos para hacer frente a la demanda prevista de 1 500 millones de toneladas hacia 1985, lo cual equivale al triple de la producción actual.

Poder calórico de 1 000 BTU.

Gran parte de la producción adicional se convertirá en gas. La producción de gas con reducida capacidad calorífica a partir del carbón no tiene nada de nuevo, y en Europa y Sudáfrica existen muchas plantas en que se utiliza el proceso Lurgi de Alemania Occidental. Lo que sí es nuevo son las plantas gasificadoras del carbón que producen gas con un rendimiento calórico de 1 000 BTU por pié cúbico, en comparación con las 300 - 500 BTU producidas por las plantas ordinarias de gas con poco poder calórico.

Amplios estudios tecnológicos se efectúan para la realización de gigantescas plantas de gas hipercalórico a partir de carbones de todos los tipos, incluso los aglutinantes. El objetivo consiste en producir grandes cantidades de gas exento de azufre que se conducirían por gasoductos a las industrias consumidoras y que eliminarían para las mismas las posibilidades de contaminación. Fuertes inversiones en camino.

Puesto que un establecimiento productor de 250 millones de pies cúbicos diarios de gas representa una inversión de unos 400 millones de dólares, fuertes cuantías de capital se emplearán durante los próximos diez años en estas nuevas instalaciones gasificadoras. En plantas expe-

rimentales se ensaya en la actualidad una variedad de -- procesos.

La oficina de tecnología del carbón del gobierno de los Estados Unidos está contribuyendo a costear cuatro importantes estudios realizados para determinar cual de dichos procedimientos para gas hipercalórico será el mas -- conveniente.

Mediante dichas técnicas se hace reaccionar el carbón -- con vapor de agua en un gasificador o gasógeno para producir metano, hidrógeno y monóxido de carbono. El hidrógeno entonces se hace pasar sobre un catalizador para -- producir más metano, el principal componente del gas natural. El tratamiento adicional con vapor produce dióxido de carbono y más hidrógeno.

Uno de los problemas básicos es la eliminación del azufre antes del tratamiento del gas con el catalizador, -- porque aún en pequeñas cantidades estropea el catalizador y paraliza el proceso de metanación.

A causa de este problema con el catalizador, y de la necesidad urgente de la industria por combustibles de bajo costo, se ha renovado el interés por los procesos comercialmente probados para producir gas de poco poder calórico. Los conocimientos técnicos para estas plantas abundan, y el capital necesario es menor que el requerido --

por los mas complejos procesos para el gas hipercalórico. La principal desventaja del gas hipercalórico es que él mismo ha de consumirse localmente, y la clave de su rendimiento estaría en convertirlo en electricidad cerca de la mina, "porque no es rentable su transporte a lasg - distancias por gasoductos" ( referencia I.M.P.).

Conforme a un experimento en la actualidad realizado por la oficina de minas de los Estados Unidos, el gas se produce a partir del carbón subterráneo. El carbón, en vez de sacarse, se quema bajo la tierra, y se capta el gas - hipocalórico saliente con 100-200 BTU. En la instalación experimental de Hanna Wyoming U.S.A. se están produciendo 2.8 millones de pies cúbicos diarios. Una segunda empresa de gasificación subterránea se planea en Morgantown, West Virginia para el año que viene.

Otro método para la utilización del gas pobre en BTU corresponde a las centrales elécticas de ciclo combinado, - se eliminan las substancias indeseables, se hace pasar - por una turbina de gas y luego va a una caldera para producir vapor de agua.

#### 4.1 Producción de combustibles líquidos.

Al igual que la gasificación del carbón, su licuación se ha venido practicando por muchos años. Durante la guerra los alemanes tenían en funciones aproximadamente una do-

cena de plantas, con el empleo del proceso Fisher-Trop--sch y otros análogos, para producir combustibles de avia--ción. En Sud-Africa Sasol producía a partir del carbón - más o menos el 10% de la gasolina consumida en el país.- En la planta de Sasol se empleaban 13 gasógenos Lurgi -- de lecho fijo.

Con el alto precio del petróleo existe un renovado inte--rés mundial por mas eficientes sistemas licuadores del - carbón. En muchos respectos la licuación no entrafía los problemas tecnológicos implícitos en la producción del - gas hipercalórico. El producto líquido es un combustoleo sintético, con reducida proporción de azufre, y llamado sincrudo, (crudo sintético). Su ventaja sobre el gas hi--pocalórico consiste en que puede quemarse directamente - en las calderas existentes.

Hay numerosos procesos productores del sincrudo. Uno de ellos, el COED ( Char-oil Energy Development) fué objeto de gran publicidad cuando un destructor de la armada es--tadounidense completó un recorrido de 30 horas en el A--tlántico con el uso del sincrudo en calidad de combusti--ble propulsor. El rendimiento del mismo fué equivalente al de otros combustibles de norma quemados por la armada de Estados Unidos.

El sincrudo se produjo en una planta experimental de Prin

centon N.J., construida y administrada por la FMC Corporation, y en la cual se convierten diariamente 36 toneladas de carbón en 36 barriles de petróleo. Para el proceso se emplea un método por pirólisis según el cual el carbón se tritura y se descompone por calor en un aceite pesado que se trata con hidrógeno bajo presión para producir el sincrudo. Además, por cada barril, el proceso rinde de 9 000 pies cúbicos de gas y media tonelada de coque de calidad inferior.

#### 4.2 Otros procesos.

Otro proceso, llamado de licuación por refinación con disolvente y perfeccionado por la Pittsburg & Midway Coal, se ensayará en una instalación experimental de Tacoma, Washington. En este proceso el carbón se disuelve antes de su tratamiento con hidrógeno bajo condiciones de temperatura y presión elevadas. Se calcula que el procedimiento estará en uso comercial dentro de seis años y que pudiera utilizarse en una refinería para trabajar con el carbón con fines productores tanto líquidos como gaseosos hipercalóricos.

Señal indicativa de la cantidad de dinero que está invirtiéndose en trabajos tecnológicos del carbón se encuentran en el presupuesto anual de la oficina de tecnología del carbón de los Estados Unidos, el cual, que hace tres



años era de 17 millones de dólares, es hoy de 122 millones. En total el gobierno de los Estados Unidos planea - desembolsar en estudios del carbón 1 500 millones de dólares durante los cinco años fiscales próximos.

De conformidad con una investigación de la entidad Chase Econometric, afiliada del Chase Manhattan Bank, para --- 1985 mas o menos un 25% de carbón producido en los Estados Unidos se empleará como materia prima para procesos que lo convertirán en gases y líquidos.

En dicho estudio del Chase se calcula que para 1977 los procesos gasificadores del carbón proveerán a la industria gas de poco poder calórico a un costo aproximado de 0.90 dólares por cada millón de BTU. No obstante, en el mismo estudio se prevé que el costo del gas de alto poder calórico, o sea con gran proporción de BTU, oscilará entre 1.50 y 1.75 dólares por cada millón de BTU, muy por encima del costo actual del gas natural, que es de 0.40 a 0.50 dólares por cada millón de BTU.

El costo del carbón licuado se calcula entre 1.30 y 1.75 dólares por cada millón de BTU, o el equivalente de 8 a 11 dólares por barril de petróleo equivalente. Los autores del estudio del Chase sin embargo creen que combustibles licuados a partir de Esquisto bituminoso, o se sílice impregnada con petróleo bituminoso, estarán disponi--

bles a un costo inferior.

Pero sean cuales fueren los costos, resulta evidente que los años por venir, la industria en escala mundial, dependerá mucho más del carbón fuente de energía. El carbón por lo tanto, recobrará en parte los méritos que había perdido en favor del combustóleo.

#### 4.3 Procesos de gasificación.

Existen varios procesos diferentes para la gasificación del carbón, obteniéndose sustituto de gas natural y subproductos químicos o del petróleo. Todos se basan en el principio general de hacer reaccionar el carbón con vapor de agua en el gasificador, produciendo metano, hidrógeno y monóxido de carbono como ya es sabido. Estos productos se tratan con más vapor para obtener dióxido de carbono y más hidrógeno. Desde el punto de vista químico, estos pasos son idénticos a las primeras etapas al hacer ya sea amoníaco o metanol.

A continuación, el dióxido de carbono y el hidrógeno se hacen pasar sobre un catalizador, con el objeto de formar más metano (componente principal del gas natural), que se hace sacar. Sobre esto existen estas variaciones:

##### 4.3.1 Proceso "Gassynthan"

El proceso "Gassynthan" de Lurgi, desarrollando por esta casa y la BASF, es capaz de producir un gas SNG que -

contiene hasta 99% de metano y tiene un valor calórico - de 1 000 BTU por pié cúbico. El material de carga se hace vaporizar bajo presión y se extrae el azufre. La licencia en Estados Unidos es propiedad de la C.F. Braun.

#### 4.3.2. Proceso "Bi-Gas".

El proceso "Bi-Gas" desarrollado por Bituminous Coal Research, usa como material de carga carbón recientemente pulverizado. En la segunda etapa, produce una hulla residual que se saca del gasificador y retorna a la primera etapa. La BCR informa que la tecnología para la primera etapa es todavía incompleta, pero suficiente para diseñar una planta piloto grande. La compañía se esfuerza -- ahora por desarrollar la segunda etapa y por mejorar las condiciones con el fin de producir un gas de alto valor calórico.

#### 4.3.3. Proceso "Synthane".

En el proceso "Synthane", desarrollado por la oficina de Minas de E.E.U.U. se emplea un lecho fluidizado para la gasificación inicial, operado a 40 ata. y aproximadamente 1 800<sup>o</sup>F. Ha sido ensayado con carbones bituminosos, - sub-bituminosos y ligníticos. La oficina informa que casi el 60% del metano presente en el gas acabado se obtiene en la gasificación inicial.

#### 4.3.4. Método "Cogas".

El método "Cogas" de la FMC se basa en su método de producir hulla residual y petróleo a partir de carbón según el proceso COED. Este último ha sido probado en escala de planta piloto en el centro de investigación de Princeton N.J. La FMC informa que las principales dificultades técnicas han sido identificadas, y que podría comenzarse muy pronto el proyecto de una planta comercial.

#### 4.3.5. Proceso "Hygas".

El Proceso "Hygas" del IGT y de la American Gas Association emplea hidrógeno en la gasificación para obtener -- máxima producción de metano en la primera etapa. Utilizando un cieno de carbón o de hulla residual. Debe emplearse un tratamiento previo, que requiere oxidación de -- carbón al aire a presión atmosférica y temperatura de -- 750-800°F.

#### 4.3.6. Proceso de la "Sal Fundida"

El proceso de la "sal fundida", en la que trabaja la M.W. Kellogg, comienza con la inyección de vapor y carbón fino dentro de un lecho de sal fundida. Este proceso promete gran adaptabilidad. Permite manejar carbones que se aglutinan o no, así como fracciones residuales de crudos, esquistos, arenas alquitranadas y hasta residuos municipales. En este método, los óxidos de azufre se mantienen fuera de los gases de tubos, y se elimina la dilución --

del producto acabado por los óxidos de carbono. Se presentan serios problemas de corrosión, pero la Kellogg cree que podrán ser resueltos.

Se están ensayando varios otros enfoques con el carbón. La Westinghouse y La Public Service of Indiana informaron hace poco que realizarán el primer ensayo para la conversión de carbón con alto tenor de azufre en un gas sintético que no causará contaminación. El gas será usado como combustible por la citada empresa pública en su central termo-eléctrica de Dresser, cerca de Terre Haute Indiana. Se espera que la nueva técnica podrá evolucionar en un sistema comercial para 1980.

La idea consiste en que al quemar carbón con elevado contenido de azufre produce una fuerte emisión de calor. El razonamiento de la Westinghouse es que es más barato gasificar el carbón para extraer el azufre de lo que sería la recuperación de los óxidos ya formados en la chimenea. La subsidiaria de la Gulf General Atomic trabajó originalmente en un proceso de carbón refinado con disolventes, que fué desarrollado por Stone & Webster. Ambas compañías están estudiando ahora la posibilidad de convertir carbón de calidad inferior en un material con bajo contenido de azufre y de cenizas, que pudiera ser gasificado para obtener un producto adecuado de calidad para -

tuberías. Este estudio se realiza por cuenta del estado de Oklahoma.

Sin embargo, aún cuando se descubriera ya ahora un proceso comercial eficiente, pasará algún tiempo hasta que la gasificación del carbón haga sentir su influencia. - La construcción de una planta gasificadora exige mucho tiempo, y la inversión es necesariamente enorme.

La mayoría de las plantas bajo estudio producirían 250--500 millones de pies cúbicos por día, y consumirían cada una tanto como 30 000 toneladas de carbón diariamente. Para abastecer solo el 10% de la demanda por gas natural prevista en los Estados Unidos, para 1980 sería necesario construir una veintena de estas plantas. Esto representa 220 millones de toneladas de carbón por año, o sea una tercera parte de la producción total de carbón de los Estados Unidos en 1969. Para explotar las minas y construir los gasificadores se necesitaría una inversión de más de 5 000 millones de dólares.

Pero quizás sea necesario erogar estas vastas sumas si se ha de evitar que la crisis energética se convierta en desastre energético.

#### 4.3.7. Proceso "Lurgi".

El Proceso "Lurgi" es uno de los métodos que están disponibles para efectuarlos en una escala comercial. Consis-

te en un proceso de presurizado en el cual el carbón triturado, de cierto tamaño, entra en el gasificador, previamente es secado y después es carbonizado por medio de la reacción de oxígeno y vapor. En el fondo del gasificador se deposita el carbón remanente el cual es quemado para proporcionar calor y así llevar a cabo las reacciones mencionadas anteriormente.

#### 4.3.8. Proceso "Koppers-Totzek".

El proceso "Koppers-Totzek" es el segundo método disponible para efectuarlo en escala comercial. También se emplean vapor y oxígeno en el paso de gasificación. El proceso funciona con presión atmosférica y podrá usarse cualquier tipo de carbón. Ninguno de los procesos comerciales da un gas con el valor calórico del gas natural, así que estos dos procesos requieren un paso de metanación, en el cual el gas producido por el carbón es pasado sobre un catalizador de níquel. La metanación no ha sido lograda en una escala comercial, pero se siguen efectuando pruebas para el logro de la misma.

#### 4.3.9. Proceso "Dióxido de carbono aceptor".

El proceso "dióxido de carbono aceptor es un proyecto de la Consolidation Coal Company, y aún está a nivel de planta piloto. Este consiste en hacer circular dolomita calcinada a través de una cama fluida de ceniza de lignito,

la dolomita reacciona con el dióxido de carbón producido en la gasificación inicial del carbón, liberando así suficiente calor para que se efectúe la reacción vapor-carbón. El gas crudo producido, el cual contiene metano. hidrógeno y monóxido de carbono, es sometido a un paso final de metanación.



## V. MANUFACTURA DE GAS ENTUBABLE A PARTIR DEL CARBÓN.

### Química Básica.

El hidrógeno que contiene el carbón, que es el 5% en peso, es muy bajo comparado con el 25% que tiene de hidrógeno el metano, el cual debe ser el componente mayor en el gas entubable. Un problema clave de la conversión de carbón en gas, es la generación de grandes cantidades de hidrógeno, las cuales provienen del agua descompuesta -- por la reacción de carbonización.

La reacción del carbón con el vapor de agua es altamente endotérmica, se requieren aproximadamente 60 000 BTU/mol de vapor, con temperaturas de 1 600 a 1 900°F para obtener resultados aceptables de reacción. Proveer el gas a ese nivel de temperatura y magnitud, resulta demasiado caro, y es un factor importante en la gasificación del carbón.

Con presiones suficientemente elevadas, el hidrógeno reaccionará directamente con el carbón a la temperatura de descomposición del vapor y libera cantidades substanciales de calor ( aproximadamente 40 000 BTU/mol de metano). Como una mol de metano es estequiométricamente equivalente a una mol de vapor descompuesto, es claro que la reacción de hidrogenación del carbón puede proveer una mayor cantidad de calor necesitado para la reacción de descom-

posición del vapor si las dos reacciones ocurren en la misma zona. El resultado sería reducir a 1/3 la cantidad de calor necesitada para la descomposición del vapor en ausencia de hidrógeno, así, se reducen los costos del gas entubable.

Tomando en cuenta que la hidrogenación es incompleta, el trabajo del reactor de calor aumenta, y adicionando la síntesis, del gas generado a 1 600°F que fluye del reactor de alta temperatura, debe ser convertido en metano en un reactor de metanación. Esta última reacción ocurre a 600°F y libera casi 100 000 BTU/mol de metano formado por la síntesis de gas, y requiere un flujo volumétrico de gas a través de un número de pasos de 4 veces tan grande como el flujo volumétrico del metano. Así que reduciendo la síntesis de metanación influye reducir el costo del gas.

Los diversos procesos de manufacturación de gas disponibles, difieren primeramente en el método de contacto gas-sólido, en la proporción de calor a la reacción de vapor y el grado de la hidrogenación directa de carbón en metano, la cual es combinada con la descomposición de vapor en el sistema de reacción a alta temperatura. Figura (26).

Además, el gas entubable requiere grandes facilidades al

preparar carbón para la reacción, purificar y convertir los gases de alta temperatura para la metanación. Figura (27).

Al principio de la recuperación en la pila de alimentación, el carbón se tritura, pulveriza y seca, el polvo se lleva al pretratamiento e hidrogenación donde reacciona con vapor de agua y el gas de síntesis bajo presiones de 400 a 1 200 psia, y temperaturas de 1 200 a 1 600<sup>o</sup>F;- en esta operación el carbón se hidrogena para obtener metano, dependiendo de la cantidad de carbón, la actividad del mismo, y del calor exotérmico, el cual es transferido en la reacción carbón- vapor, descomponiendo el agua para formar una mezcla de monóxido de hidrogeno-carbón a la cual se le llama síntesis del gas.

Ha sido probado que este proceso puede llevarse a cabo - comercialmente en un reactor de cama móvil, de cama fluida y en algunos otros tipos de reactor que aún están en estudio. Los productos obtenidos en el pretratamiento de hidrogenación son: gas crudo y ceniza caliente. En general, la etapa de pretratamiento es innecesaria para carbones no aglutinantes, pero es necesaria para carbones - aglutinantes en algunos sistemas de reacción. Tales como lechos móviles y fluidos.

La ceniza caliente se transfiere a un paso final de gasi

ficación, donde el vapor es descompuesto para generar el gas de síntesis usado en el paso de hidrogenación. La temperatura en esta parte del proceso dependerá del método de suministrar el calor, pero éste puede estar arriba de los 2 000°F.

Varios procesos disponibles, combinan la hidrogenación y la gasificación en diferentes maneras.

Una vez que los gases dejan la sección de hidrogenación, este vapor es pasado a través de una sección donde se recupera calor enfriando los gases a la temperatura requerida para el proceso adicional.

Dependiendo de la clase y análisis del carbón, y del balance entre las reacciones de hidrogenación y descomposición del agua usadas en cada situación particular, la composición del gas de vapor variará y podrá ser o no la apropiada debido a la estequiometría de la reacción final de metanación. Consecuentemente, el enfriamiento del gas debe estar sujeto a los pasos de transferencia y purificación del gas de agua, de tal forma que se obtenga un gas de síntesis crudo con una composición tal que en la reacción de metanación resulte un gas que no contenga más CO, H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> de lo permitido en la metanación catalítica.

Después de la purificación y el ajuste de la composición,

el gas de síntesis es convertido mediante un paso de metanación catalítica usando un catalizador de níquel. Esta reacción es usada comercialmente para eliminar óxido de carbono en la síntesis del amoníaco, pero su uso en la manufactura del gas entubable representa una importante contribución a la tecnología disponible.

Esto resulta cuando se tiene una elevada cantidad de óxidos de carbón en el gas, para los cuales se necesita una mayor cantidad de calor para liberarlos. La disipación de este calor y el control de las temperatura son las consideraciones importantes en la adaptación de la tecnología de metanación al usar el gas entubable pero esto no es considerado como un serio problema en el desarrollo del gas entubable.

La gran sensibilidad del catalizador de níquel, requiere una cuidadosa atención eliminando los componentes sulfurados en la etapa de purificación. Por lo tanto, el gas entubable sintético es un problema en su manufactura si los gases contienen un gran exceso de gases sulfurados. Después de la etapa de metanación del gas, el agua producida por la reacción debe ser eliminada para cumplir las especificaciones de secado de la tubería y así poder usarla nuevamente.

Los mayores problemas, que actualmente se están estudiando

do, son la descomposición de vapor y la hidrogenación del carbón, estos son los pasos que presentan un mayor potencial para reducir los costos.

Por otro lado, la firma comercial "Lurgi" ha desarrollado un proceso que puede manejar los carbones aglutinantes previamente tratados, incluyendo la mezcla de los finos, los cuales pueden ser tratados por los reactores — "Lurgi" convencionales.

La preparación de este tipo de carbón requiere también de estudio extensivo. La metanación catalítica requiere también de estudiarse mediante algún programa de investigación adecuado.

Los otros pasos, tales como: molido, secado, transformación agua-gas y purificación del gas, son bien conocidos y existen procesos comercialmente disponibles.

#### 5.1 COSTO DEL PROCESO "LURGI".

La gasificación del carbón en gasificadores "Lurgi", usando  $O_2$  para obtener el calor requerido, la ha practicado Europa durante 35 años y Africa hace 2 décadas ( con carbón de 30% de ceniza se producen 7 000 ton/día.).

En el último caso, el gas crudo es procesado para obtener hidrocarburos líquidos, y el proceso completo es muy similar a los requerimientos en la manufactura del gas entubable, excepto en el paso de metanación.

La substitución del líquido producido en la reacción catalítica, hace posible convertir el carbón no aglutinable en procesos de gas entubable una vez que se demuestre que la adaptación de la metanación catalítica puede hacerse.

Existen un gran número de publicaciones acerca de los costos del proceso "Lurgi", pero desafortunadamente no son recientes, por lo tanto, el margen se ha hecho por el factor tiempo. En base a esto, la inversión requerida para una planta completa de gasificación empieza con la pila de alimentación de carbón y termina con la de gas seco. Las inversiones están basadas en una planta que produce  $27 \times 10^7 \text{ft}^3/\text{día}$ , con un contenido calórico alto, del orden de  $900 \text{ BTU}/\text{ft}^3$ , incluyendo servicios.

La inversión para una planta de carbón aglutinante es más grande porque se incluye la planta para el tratamiento del carbón.

También los costos básicos del proceso son para una localización generalizada y detallada, la firma comercial no los ha llevado a cabo, sino que ha dado un margen del 15% a la inversión de la planta. Figura (28).

Además se ha dado un margen del 10% para las interrupciones durante la construcción, la variación de ésta depende del tiempo de construcción de la planta. Un margen a-

dicionales del 20% para imprevistos que aparezcan en la adaptación de las tecnologías disponibles en la metanación catalítica, en las condiciones del proceso y por otras modificaciones menores que se presenten. Finalmente, se añade un 5% para cubrir los costos de coordinación durante la construcción, piezas de repuesto y costos de arranque. El mérito de la inversión es de 203 000 000 de dólares para carbones no aglutinantes, y 235 000 000 de dólares para carbones aglutinantes, a lo cual se le suma el capital de trabajo.

La contribución individual de las etapas del proceso se muestra en la figura ( 29). Como la metanación es el único paso que requiere una mejor adaptación de la tecnología conocida, debe concluirse que la proposición base de 209 000 000 y 247 000 000 de dólares es una buena base para estimar los costos de las plantas basadas en el proceso "Lurgi". Los costos calculados se muestran en la figura ( 30).

La labor está basada en una dotación de 50 hombres por turno y un promedio de 4.75 dólares hora/hombre.

Como un ejemplo del tipo de utilidad financiera, los cargos de capital usados en los cálculos del costo de proceso, figura ( 30), son puestos en promedio del 13% por año en la proporción base de la figura ( 26 ). Este 13%



incluye 5% de la proporción base por año por depreciación, 3% de la proporción base por impuestos y seguros, y además, intereses en el capital prestado; esto regresa con igualdad las inversiones de la planta y los impuestos.

Es sabido que el 65% de la proporción base es dado por préstamo, y el 35% por acciones de capital.

El interés de los fondos prestados, es pagado a razón del 5% al año durante los primeros 20 años de vida de la planta.

Similarmente con el capital se obtiene una ganancia del 10% después del impuesto, se ganan la mitad de las acciones hasta que son pagadas completamente por la depreciación sobre la vida de la fábrica. El impuesto total es el 48% de las ganancias brutas. Sobre ésta base, un promedio del costo del gas al consumidor, esta computado para 20 años de vida de la planta.

Como se mostró en la figura (30), el gas puede ser vendido al mercado a razón de \$ 0.76 (U.S.) por millón de BTU, esto es para el carbón no aglutinante, el cual costó \$ 0.15 por millón de BTU. Ahora para el carbón aglutinante con un costo de \$ 0.30 por millón de BTU, se vende a razón de \$ 1.06 por millón de BTU.

El costo del carbón indicado en la figura (30), es el 30 ó 40% del total, y por lo tanto, es un importante fac--

tor del costo.

El efecto del costo del carbón arriba del precio de \$ 0.10- \$ 0.40 por millón de BTU, se muestra en la figura (31) en un promedio del 13% del cargo del capital base. Para indicar el impuesto mayor, causado por los cargos de capital, la figura (31) nos muestra los costos comparables si el cargo de capital es tomado como el 18% de la proporción base por año.

Con esta base, y después del impuesto, el interés podría ser pagado al 7% y las acciones podrían elevarse a un 23% del promedio no depreciado de la proporción base por año.

Los factores que mas afectan los costos del gas son los siguientes: costos del carbón, inversiones de la planta e inversiones del cargo de capital. Por lo tanto, el costo del gas entubable variará entre \$ 0.68 y \$ 1.29 por millón de BTU.

## 5.2 DESARROLLO DEL PROCESO DE GASIFICACION DE CARBON.

Varios procesos de gasificación están en desarrollo, estos están concernidos con las reacciones de gasificación e hidrogenación del carbón y con la manera de suministrar el calor.

Una planta piloto, ( que comunmente pasa por una prueba preliminar) del proceso "HYGAS", ha sido donada por el -

Instituto de Tecnología del Gas y la Oficina de Búsqueda del Carbón, esta planta esta situada en Chicago Illinois. El proceso "HYGAS" se lleva a cabo en camas fluidas y -- consta de 4 pasos.

El carbón aglutinante es pretratado en condiciones normales para eliminar las características aglutinantes, bajo las condiciones de los siguientes pasos:

El carbón se transporta a la segunda cama a 1 000 ó 1 500 psia, en esta cama, a 1 500<sup>o</sup>F, el carbón reacciona con los gases de la cama contigua y cae en la última cama del reactor de hidrogasificación, donde reacciona con gases -- procedentes de la cama del electrogasificador, este último es alimentado con cenizas de la cama precedente. El -- calor es introducido a la reacción, por medio de un sistema eléctrico, entre electrodos sumergidos en la cama -- electrogasificadora.

Es esperado, que a temperaturas altas, 2/3 del metano producirán camas fluidas, dejando solo 1/3 del metano para -- que se produzca la metanación catalítica a bajas temperaturas. Esto podría reducir los requerimientos calóricos -- necesarios para que se efectúe la reacción de gasificación del carbón, y reducir los costos de preparación del -- mismo.

Otra planta piloto está en construcción en Dakota del Sur,

desarrollando el proceso CGS, bajo el patrocinio de la -  
OCR, este proceso utiliza 3 camas fluidas. El lignito, ó  
carbón sub-bituminoso (no aglutinante), se carga en la -  
primera cama donde reacciona con gases de la segunda, pa  
ra producir el gas crudo necesario para que se lleve a -  
cabo el proceso adicional en la fabricación del gas entu  
bable. Lo carbonizado de esta cama, fluye a la segunda, -  
donde reacciona con el vapor de agua en presencia de va  
por de dolomita calcinada ó  $\text{CO}_2$  como receptor. El calor  
es proporcionado por la carbonización de la cal, conteni  
da en la dolomita calcinada, y por el gas receptor. La -  
ceniza residual y el gas receptor son llevados a un rege  
nerador, donde la ceniza es quemada, produciendo el ca--  
lor suficiente para convertir el carbonato de calcio en  
cal, para recircular esta en la segunda cama. La presión  
de operación de este proceso es de 300 psia, y la máxima  
temperatura es de 1 900<sup>o</sup>F. El calor producido por la cir  
culación del gas receptor, es la mejora básica usada en  
este proceso; pero eliminar el  $\text{CO}_2$  del proceso, se espe  
ra que enriquezca el gas crudo en  $\text{H}_2$  y reduzca la trans  
ferencia agua-gas requerida.

El diseño del proceso de una planta piloto para la BCR -  
está en desarrollo, este diseño lo está llevando a cabo  
la Compañía Investigadora de Carbón Bituminoso con el aus

picio de la Oficina de Búsqueda de Carbón.

El carbón y el vapor son suministrados a la mas alta temperatura posible para ponerse en contacto con el gas de síntesis de la seccion mas baja del reactor; la ceniza -- es separada del gas y recirculada hacia la parte baja del reactor donde reacciona con el  $O_2$  para producir calor y mas vapor. La presión usada en el proceso es de 1 050 a 1 500 psia, de esta manera se efectúa la hidrogenación -- substancial y directa del carbón y subsecuentemente, el proceso de obtención de gas crudo es minimizado.

Además el proceso se opera con el carbón y la ceniza que están contenidos en los flujos de gas para eliminar el -- paso de pretratamiento de los carbones aglutinantes.

Una planta piloto está siendo planeada para el proceso -- "SYNTHANE" por la Oficina de Minas. En este proceso son suministrados carbón, vapor de agua y algo de oxígeno en lo alto del reactor gasificador, y fluyen hacia abajo en una fase diluida para destruir las características de --- aglutinamiento de los carbones y así permitir el uso directo de los carbones aglutinantes.

El carbón pretratado cae en una cama fluida donde es gasificado con vapor de agua y oxígeno, los caules son usados para proporcionar el calor requerido. La presión a la --- cual se opera es de 600 psia, y la temperatura de la cama

fluida varía entre 1 650 y 1 800°F. Las condiciones de generación esperadas, son aproximadamente la mitad del producto total de metano en el gasificador, reduciendo así los costos y minimizando los requerimientos de oxígeno.

Entre los procesos de gasificación de carbón que aún no se llevan a una planta piloto, está el Kellogg Coal Gasification Process, el cual usa carbonato de sodio fundido para catalizar la gasificación del carbón con vapor de agua, para así obtener la hidrogenación directa del carbón en presencia de  $\text{CH}_4$ . Además, el carbonato de sodio fundido proporciona calor al gasificador por recirculación entre este y el aire ú oxígeno.

### 5.3 POTENCIAL ECONOMICO DEL DESARROLLO DEL PROCESO.

Un cálculo aproximado de la inversión y costos de operación de un proceso en desarrollo, ha sido publicado, este cálculo, se basa en una pequeña escala de pruebas, -- las cuales serán variables hasta que se verifiquen las hipótesis usadas en una planta piloto. Se podrán usar -- estas aproximaciones para elaborar el programa de búsqueda y desarrollo.

Sin embargo, es posible derivar una idea de los costos potenciales de este proceso, que darán un fin satisfactorio al trabajo ahora empezado.

Las estimaciones disponibles difieren mucho, y están basadas en una considerable variedad de carbones, y una gran variedad de formas de llevar a cabo las reacciones requeridas. La inversión necesaria para una planta de una capacidad de 250 millones de  $\text{ft}^3$ / día, incluyendo utilidades y facilidades, varía entre 80 y 150 millones de dólares, lo cual se puede comparar con los 155 millones de dólares del proceso "Lurgi" para carbones aglutinantes.

Aunque la primera planta de cualquier proceso en desarrollo costará más porque los márgenes que tenemos que incluir son las dependibilidades del seguro, parece razonable que algunos de los nuevos procesos deberían tener ahorros sobre los procesos establecidos. Los ahorros reales deberían estar disponibles como resultado de la incorporación de un incremento de hidrogenación directa en el gasificador, y una disminución en el calor requerido. Un ahorro potencial en la inversión, aproximadamente 35 millones en la proporción base, sería posible obtenerlo. En base a esto, los ahorros totales en los costos de gas serían de \$0.08 a \$ 0. 12/ millón BTU, sin crédito de ahorros en la catalización del carbón.

Si un 10% del consumo del gas corriente fuera a ser proporcionado en el futuro, con un ahorro de \$ 0.08 a \$ 0.

12/ millón BTU abajo del costo de la tecnología disponible de la gasificación del carbón, los ahorros anuales - en el mercado consumidor serían de 175 a 265 millones de dólares por año. Estos ahorros serían dispuestos para pagar costos de desarrollo.

La inversión de la planta es alta (mas o menos \$ 800 -- por 100 ft<sup>3</sup> diarios de salida), pero no ilógica para proveer el gas necesario.

Estimaciones detalladas del costo de los presentes programas de desarrollo no son disponibles, pero parecería que el costo podría ser tan alto como 80 millones de dólares.

Sobre el complemento de estos programas, en 3 ó 4 años - sería deseable una unidad semicomercial, para confirmar los resultados de la planta piloto, y también sería deseable un desarrollo en escala comercial.

Una unidad costaría 100 millones de dólares si usara un reactor de tamaño completo. Diseño, construcción y operación de esta unidad requerirían 4 ó 5 años.

En vista de que existen ahorros ya indicados de tecnología, y ahorros sobre establecidos en el proceso "Lurgi", el ánimo y el esfuerzo en el desarrollo de este programa debería ser interés nacional.



## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

La búsqueda ha proporcionado respuestas favorables a la mayoría de las preguntas científicas, las cuales fueron clasificadas como críticas, que se salían de los programas comunes y corrientes para establecer una combustión fluidizada como un método disponible a nivel industrial. En particular se estableció que:

- 1) La pérdida de combustible por elutriación, en la cama fluida, puede ser reducida a un muy bajo nivel por medio de la recirculación de los sólidos separados.
  - 2) Virtualmente, la combustión completa de los volátiles puede ser lograda por la combustión dentro de la cama.
  - 3) Mediante el uso de una cama, en la cual la concentración de carbón se va haciendo más pequeña, la pérdida del potencial de calor, como CO, es reducido a un nivel aceptable a la temperatura relativamente baja de 800°C.
  - 4) Han sido confirmadas las teorías excepcionales de obtener altos niveles de transferencia de calor en las superficies contenidas en la cama.
  - 5) Las cantidades de calor liberado dentro de la cama fluidizada pueden ser al menos el doble que en un boiler.
- Los hallazgos 1, 2, y 3, que fueron tomados juntos, indican que sería posible lograrlos en una cama fluidiza-

da con una eficiencia de combustión al menos tan alta - como la de un boiler p.f.; esto es un prerequisite para un exitoso desarrollo. Además, los hallazgos indican -- que la combustión fluidizada abrirá el camino para mejorar el método de la contaminación atmosférica por medio de óxidos de azufre.

Por lo tanto, los principales problemas restantes para solucionar el desarrollo de la combustión fluidizada en una escala comercial son de carácter ingenieril esencialmente.

B.C.U.R.A. concluyó que estos problemas restantes pueden ser resueltos en una mejor forma a través de la operación de unidades prototipo.

Esto parece ser cierto, en el caso de que se aplique -- una estación; como sea, algunas investigaciones más serán requeridas para responder interrogantes a preguntas específicas.

En seguida se citarán los puntos más importantes que necesitan urgentemente más investigación:

- 1) Implicaciones para el reactor, incluyendo su geometría.
- 2) La distribución del aire sobre las grandes áreas de la cama, suministrándolo a una presión baja.

- 3) La distribución de carbón sobre la grandes areas sin reducir la eficiencia de la combustión.
- 4) Métodos para lograr un radio adecuado, incluyendo el uso de la cama fluidizada como un almacenador de - calor.
- 5) Recirculación u otros métodos de tratamiento con - los sólidos carbónicos elutriados en la cama fluidizada.
- 6) Corrosión y eroción de las superficies donde existe un intercambio de calor.

B I B L I O G R A F I A.

"COAL COKE AND COAL CHEMICALS"

Wilson and Wells.

Editorial: Mc. Gran- Hill

Book Company.

"EL CARBÓN MINERAL DE MEXICO".

Ing. Marcelino Reyes Paredes.

Comisión de Energéticos de la

Secretaría del Patrimonio Nal.(1974).

"LOS HIDROCARBUROS SOLIDOS".

Ing. Marcelino Reyes Paredes (1973).

Revista de la Asociación de Petroleros  
Mexicanos.

SME

"Mining Engineering" (Hand book).

Cumminks Given (1973).

Society of Mining Engineers.

"WORDL COAL RESEARCH" (U.S.A.)

Is Published by Miller Freeman  
Publications, Inc.

"GEOLOGIA GENERAL"

Por Ing. E. López Ramos. (1972).

"EL CARBON MINERAL EN MEXICO".

Jiménez L.G.

Boletín Minero Tomo XI ( 1921).

"LOS CARBONES MINERALES, MEXICO."

Imprenta Universitaria (1944).

"GEOLOGIA Y DEPOSITOS DE CARBON  
DE LA REGION DE SABINAS, EDO DE  
COAHUILA"

Raymond C. Robeck, Ruben Pesquera.  
y Salvador Ulloa. A.

Estudio hecho en colaboración con  
el United States Geological Survey  
México (1956).

"MINAS DE FIERRO Y MINAS DE CARBON  
DE PIEDRA".

Bartoccini Astolto

Cia Fundidora de Fierro y Acero de  
Monterrey, S.A. (1906).

REVISTAS:

"PETROLEUM ENGINEER"

June 1972

(Engineering Profits Into Energy  
Operations).

"OIL & GAS".

Journal (Published Weekly)

"WORLD OIL"

Vol 179 ( Published Weekly).

# CARBON MINERAL

PRINCIPALES USOS Y SUB-PRODUCTOS DE LA CARBONIZACION  
EN HORNOS DE RETORTA

USOS: 52.6% = 100

INDUSTRIA ELECTRICA	IND. SIDERURGICA Y CEMENTO	FERROCARRILES Y TRANSP. MARITIMO Y FLUVIAL	DOMESTICOS, COMERCIALES E INDUSTRIALES
SERVICIOS MUNICIPALES	PROCESO DE REDUCCION	LOCOMOTORAS	INDUSTRIAS Y SERVICIOS - MISCELANEOS
SERVICIOS INDUSTRIALES Y AGRICOLAS	ACERACION Y LAMINACION	TALLERES	CALEFACCION INDUSTRIAL
SERVICIOS DOMESTICOS	HORNOS DE CALENTAMIENTO	VAPOR Y CALEFACCION	CALEFACCION COMERCIAL
SERVICIOS COMERCIALES	HORNOS ROTATORIOS	PRODUCCION DE ELECTRICIDAD	REFRACTARIOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCION
COMUNICACIONES	INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION	BARGOS	CERAMICA
TRANSPORTES		USOS MISCELANEOS	PANADERIAS Y SIMILARES
			CALEFACCION DOMESTICA
			PREPARACION ALIMENTOS
			TALLERES VARIOS
50%	10.25%	12.35%	27.4%

SUB-PRODUCTOS: 47.4% = 100

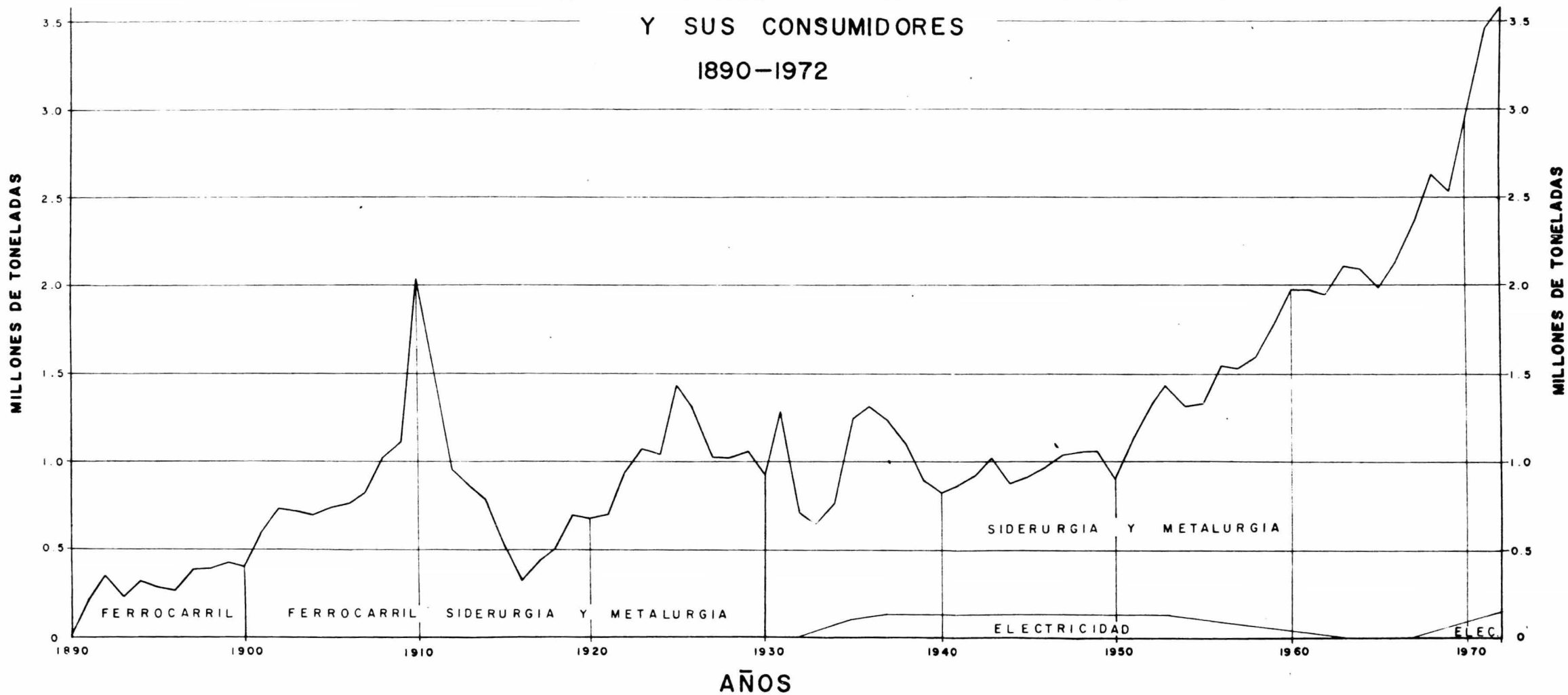
COKE	ALQUITRAN	PRODUCTOS QUIMICOS	ACEITES LIGEROS	GAS
COMBUSTIBLE	ACIDOS ALQUITRANADOS	ACIDO NITRICO	TOLUOL	AZUFRE
COKE METALURGICO	ACEITES PESADOS	OXIDO NITROSO	BENZOL	SULFOCIANIDA
GAS	PEZ DURA	AMONIACO	SISULFURO DE CARBONO	GAS COMBUSTIBLE
CARBUO DE CALCIO	PEZ SUAVE	SULFATO DE AMONIO	NAFTA	GAS ILUMINACION
CARBON DE RETORTA	ACEITES MEDIANOS	PERSULFATO AMONIO	VARNICES	CIANOGENOS
GRAFITO	ALQUITRAN REFINADO	FERTILIZANTES	INSECTICIDAS	
COMBUSTIBLE CALDERAS		EXPLOSIVOS		
76%	5%	0.5%	1.5%	17%

FIGURA ①





PRODUCCION DE CARBON MINERAL EN LA REPUBLICA MEXICANA  
Y SUS CONSUMIDORES  
1890-1972



RESERVAS DE CARBON MINERAL EN:  
REGION CARBONIFERA DE SAN MARCIAL, SON.

Tipo de Reservas:

Positivas	4'000,000 ton.
Probables	9'000,000 ton.
Posibles	18'000,000 ton.

REGION CARBONIFERA DE SANTA CLARA, SON

Tipo de Reservas:

Medidas	470,930 ton.
Indicadas	2'247,873 ton.
Inferidas	3'664,098 ton.
Posibles	5'348,200 ton.

CUENCA CARBONIFERA DE LA MIXTECA

Tipo de Reservas:

Positivas	13'115,456 ton.
Probables	52'718,043 ton.
Posibles	60'545,120 ton.

**TABLA 8**  
**RESERVAS DE CARBÓN EN LA REGIÓN DE SABINAS**  
(toneladas métricas)

CUENCA	Superficie Total (Hectáreas)	Reservas originales totales incluyendo las porciones centrales más profundas de las cuencas		Reservas originales a profundidades explotables por los sistemas en uso		Producido hasta el 1° de enero de 1953	Perdido en la explotación hasta el 1° de enero de 1953
		Hectáreas	Toneladas	Hectáreas	Toneladas		
Sabinas	104,500	105,000	2,457,000,000	60,000	1,401,240,000	55,700,000	68,100,000
Las Esperanzas	18,100	19,000	444,600,000	8,000	185,549,000	5,900,000	7,200,000
Saltillito	101,100	105,000	2,457,000,000	28,300	669,486,000	2,450,000	3,400,000
San Patricio	179,300	180,000	3,369,600,000	70,700	1,324,000,000	—	—
Las Adjuntas	136,300	140,000	2,620,800,000	29,500	551,900,000	8,000	19,000
Monclova	35,600	35,800	837,700,000	24,200	5,616,000	—	—
San Salvador	3,600	3,600	84,200,000	3,600	843,000	—	—
<b>Total</b>	<b>578,500</b>	<b>588,400</b>	<b>12,270,900,000</b>	<b>224,300</b>	<b>4,138,634,000</b>	<b>64,058,000</b>	<b>78,719,000</b>

CUENCA	Reservas explotables <i>in situ</i> el 1° de enero de 1953					Reservas recuperables hasta el 1° de enero de 1953
	Reservas medidas	Reservas indicadas	Reservas inferidas	Reservas posibles	Total	
Sabinas	125,650,000	40,210,000	397,010,000	714,570,000	1,277,440,000	431,477,000
Las Esperanzas	159,000	—	77,625,000	94,665,000	172,449,000	64,718,000
Saltillito	35,192,000	42,482,000	9,634,000	576,328,000	663,636,000	273,205,000
San Patricio	2,809,000	20,600,000	—	1,300,591,000	1,324,000,000	531,940,000
Las Adjuntas	954,000	2,809,000	37,400,000	510,710,000	551,873,000	230,565,000
Monclova	—	—	—	5,616,000	5,616,000	2,246,000
San Salvador	94,000	281,000	468,000	—	843,000	421,000
<b>Total</b>	<b>164,858,000</b>	<b>106,382,000</b>	<b>522,137,000</b>	<b>3,202,480,000</b>	<b>3,995,857,000</b>	<b>1,536,572,000</b>

Figura 5

CONSEJO DE RECURSOS NATURALES  
NO RENOVABLES

PRINCIPALES REGIONES  
CARBONIFERAS DE MEXICO

ESCALA 1:10 000 000

0 100 200 300 400 500  
KILOMETROS



Figure 6

## CUENCAS SEDIMENTARIAS

CLAVES	NOMBRES
01	PURISIMA-IRAY
02	VIZCAINO
03	SAN QUINTIN
04	SONORA
05	SINALCA
06	CHIHUAHUA
07	SABINAS
08	BURGOS
09	MESA CENTRAL
10	TAMPICO-MISANTLA
11	GUERRERO
12	TLAXIACO
13	PAPALDAPAN
14	CUENCAS TERCIARIAS DEL SURESTE
15	TEHUANTEPEC

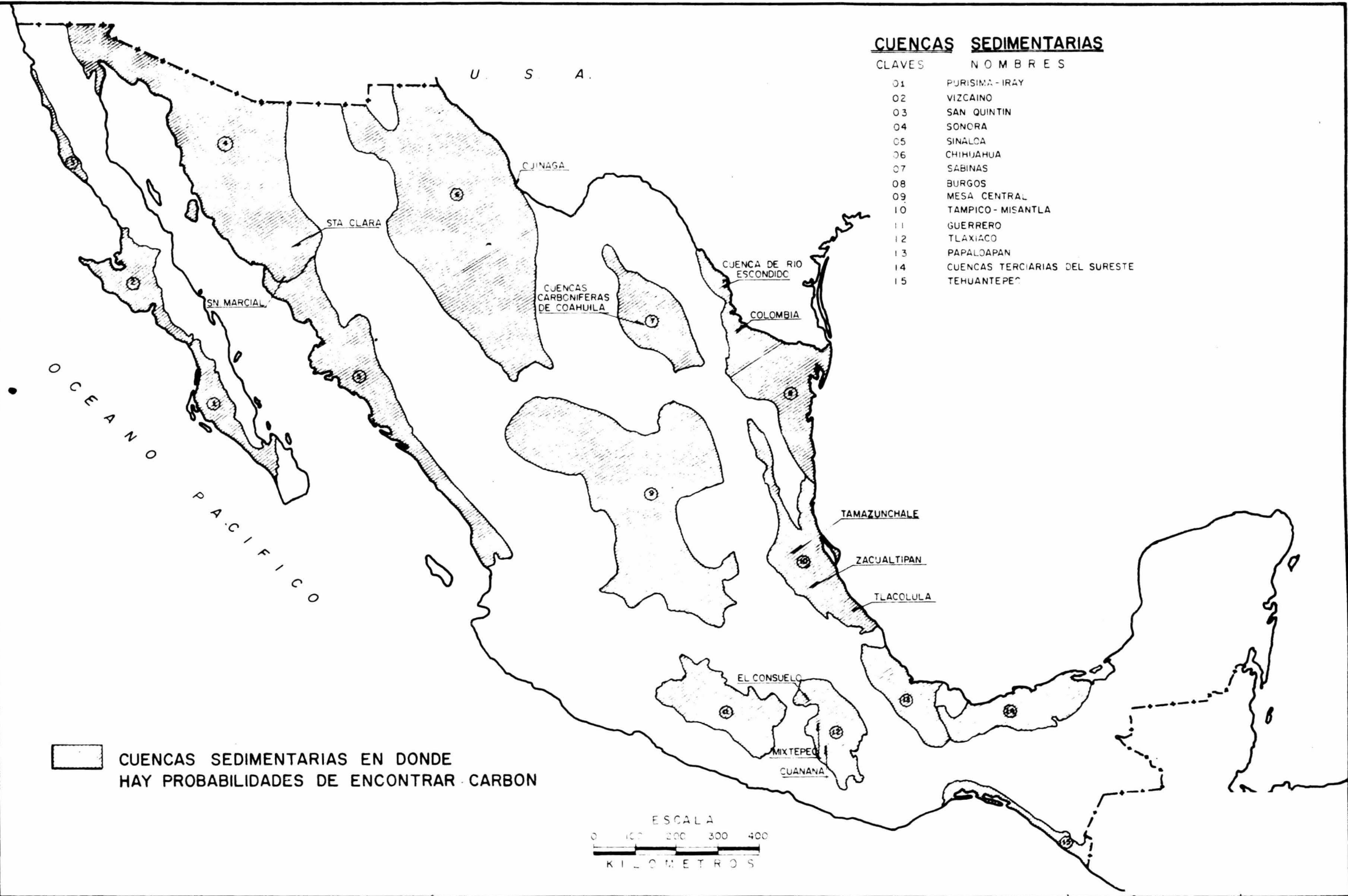
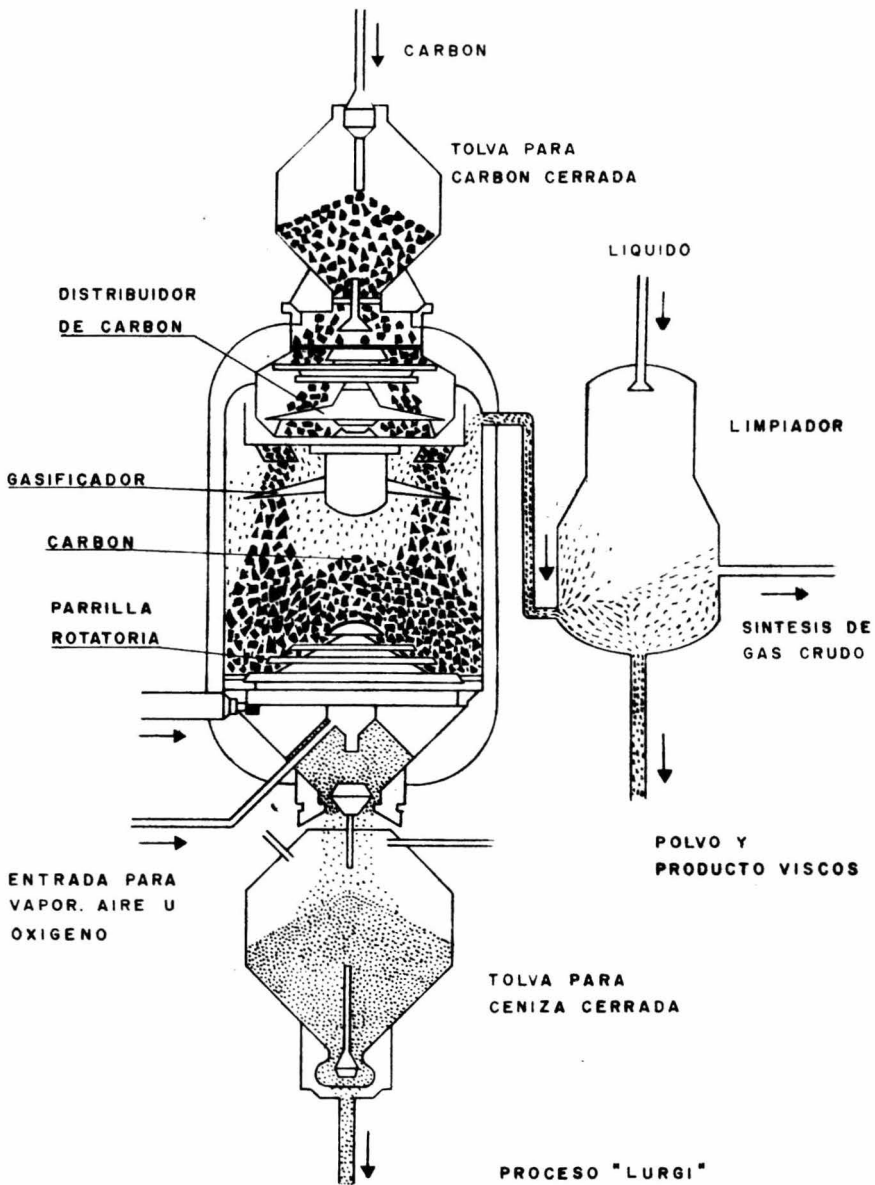
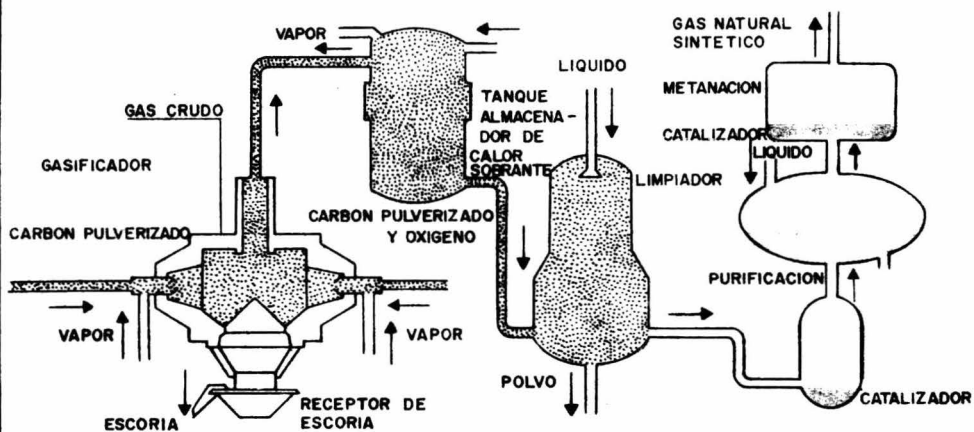


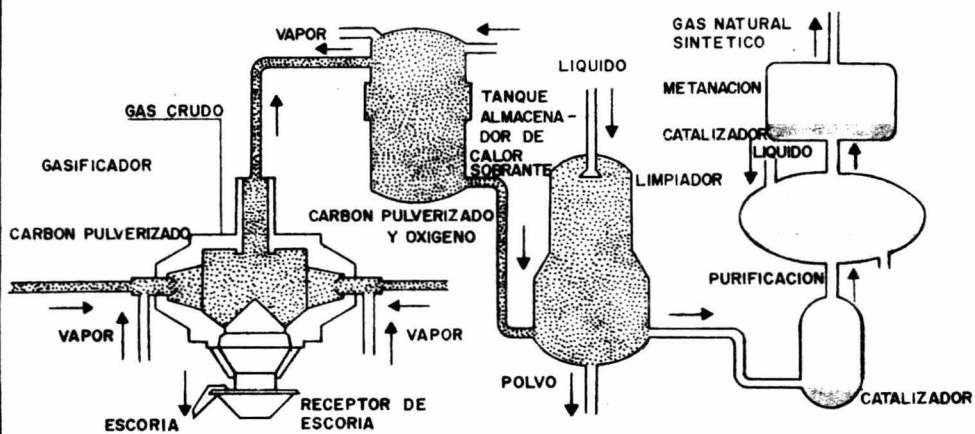
FIGURA 7



8 FIGURA

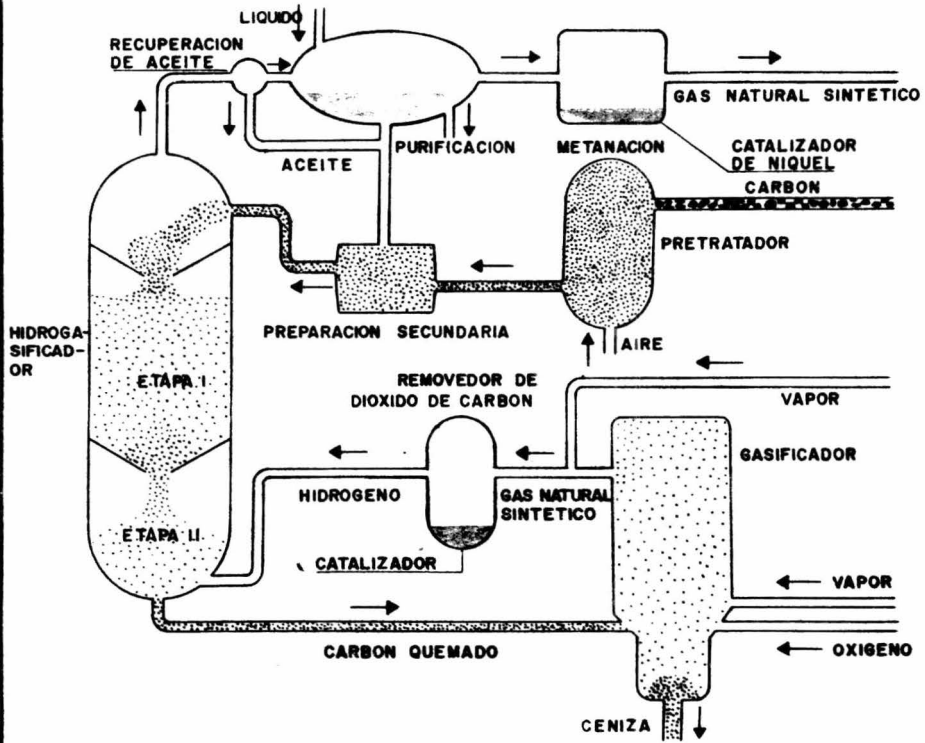


PROCESO " KOPPERS - TOTZEK "

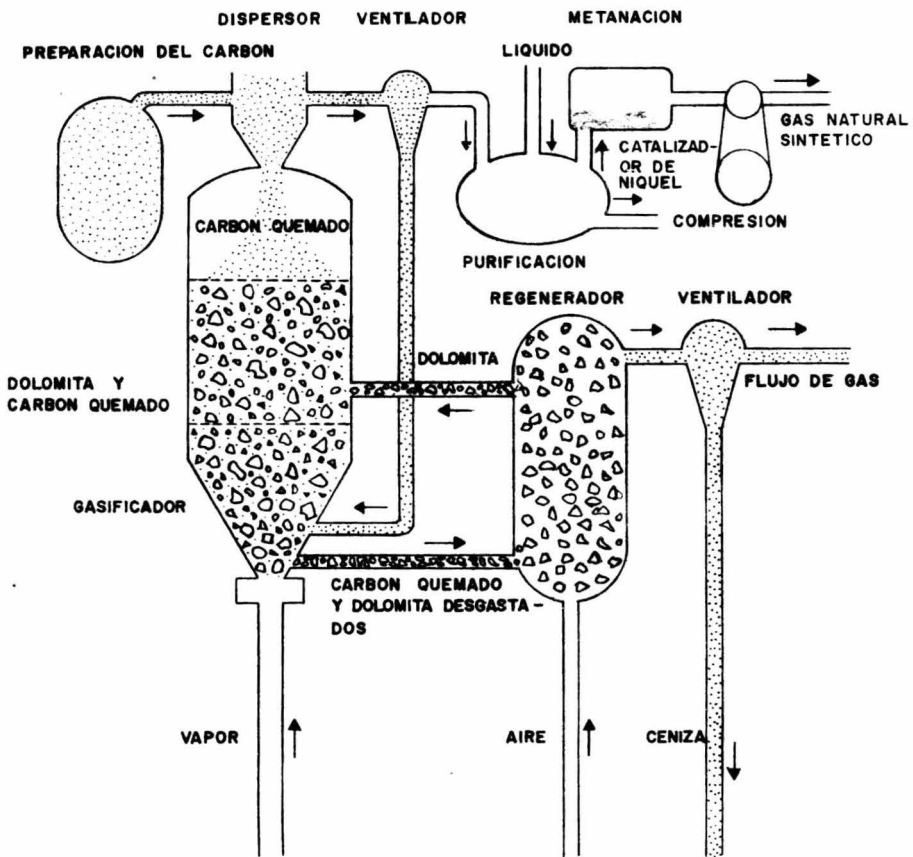


PROCESO " KOPPERS - TOTZEK "

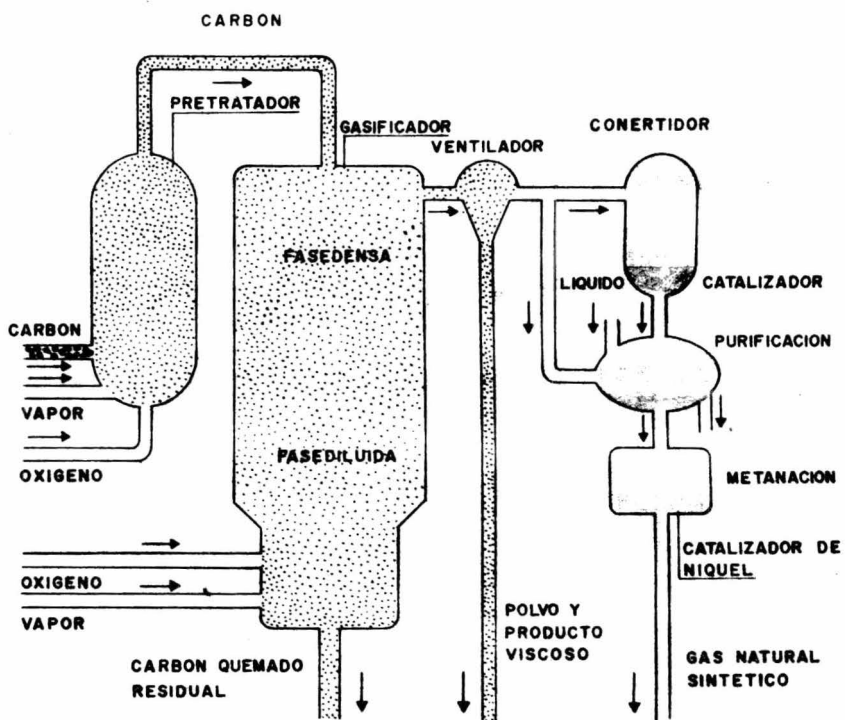




PROCESO "HYGAS"



PROCESO "ACCEPTOR DE DIOXIDO DE CARBONO"



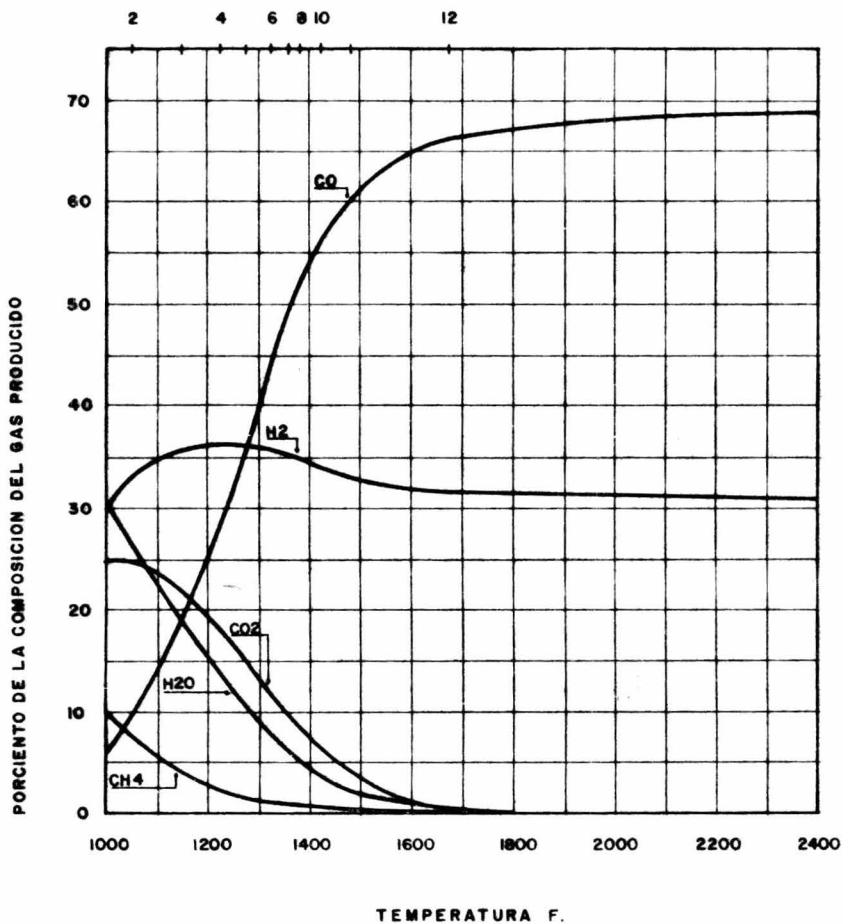
PROCESO "SYNTHANE"

VALORES DE CALOR DE REACCION EN CALORIAS POR MOL Y BTU POR LIBRA MOL  
 AH a 298.16°K (77°F) y 1 500°K (2240°F).

Reacciones	298.16°K Calorias	1 500°K Calorias	77°F BTU	2240°F BTU
1) C + 1/2 O <sub>2</sub> -- CO	- 26 416	-27 545	-47 549	-49 581
2) CO + 1/2 O <sub>2</sub> -- CO <sub>2</sub>	- 67 636	-67 010	-121 744	-120 618
3) C + O <sub>2</sub> -- CO <sub>2</sub>	- 94 052	-94 555	-169 294	-170 199
4) C + H <sub>2</sub> O (gas) -- CO + H <sub>2</sub>	31 382	32 265	56 488	58 077
5) C + 2H <sub>2</sub> O (gas) -- CO + 2H <sub>2</sub>	21 544	25 066	38 779	45 119
6) H <sub>2</sub> + 1/2 O <sub>2</sub> -- H <sub>2</sub> O (gas)	- 57 798	-59 811	-104 036	-107 660
7) C + CO <sub>2</sub> -- 2CO	41 220	39 464	74 196	71 035
8) CO + H <sub>2</sub> O (gas) -- CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub>	- 9 838	- 7 199	- 17 708	- 12 958
9) 2CO + 2H <sub>2</sub> -- CH <sub>4</sub> + CO <sub>2</sub>	- 59 109	-61 524	-106 396	-110 743
10) CO + 3H <sub>2</sub> -- CH <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O (gas)	- 49 271	-54 325	- 88 688	- 97 785
11) CO <sub>2</sub> + 4H <sub>2</sub> -- CH <sub>4</sub> + 2H <sub>2</sub> O (gas)	- 39 433	-47 126	- 70 979	- 84 827
12) C + 2H <sub>2</sub> -- CH <sub>4</sub>	- 17 889	-22 060	- 32 200	- 39 708

FIGURA (14)

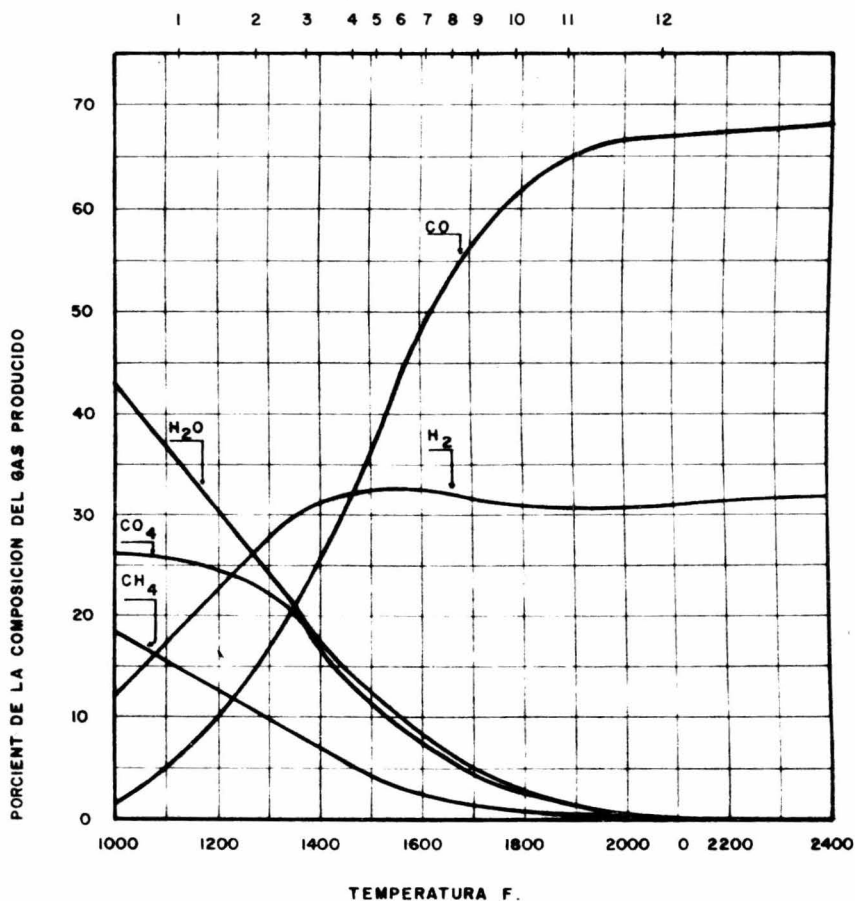
PROPORCIÓN DE OXIGENO ADMITIDO EN EL VAPOR (CU. FT. O<sub>2</sub>/LB. H<sub>2</sub>O)



DEPENDENCIA DE LA TEMPERATURA EN LA COMPOSICION DE LOS SISTEMAS CARBON - AGUA - OXIGENO EN EQUILIBRIO

CAMBIO NETO DE ENTALPIA, O. PRESION 1 ATM. ABSOLUTA

PROPORCION DE OXIGENO ADMITIDO EN EL VAPOR (CU. FT. O<sub>2</sub> / LB. H<sub>2</sub>O)

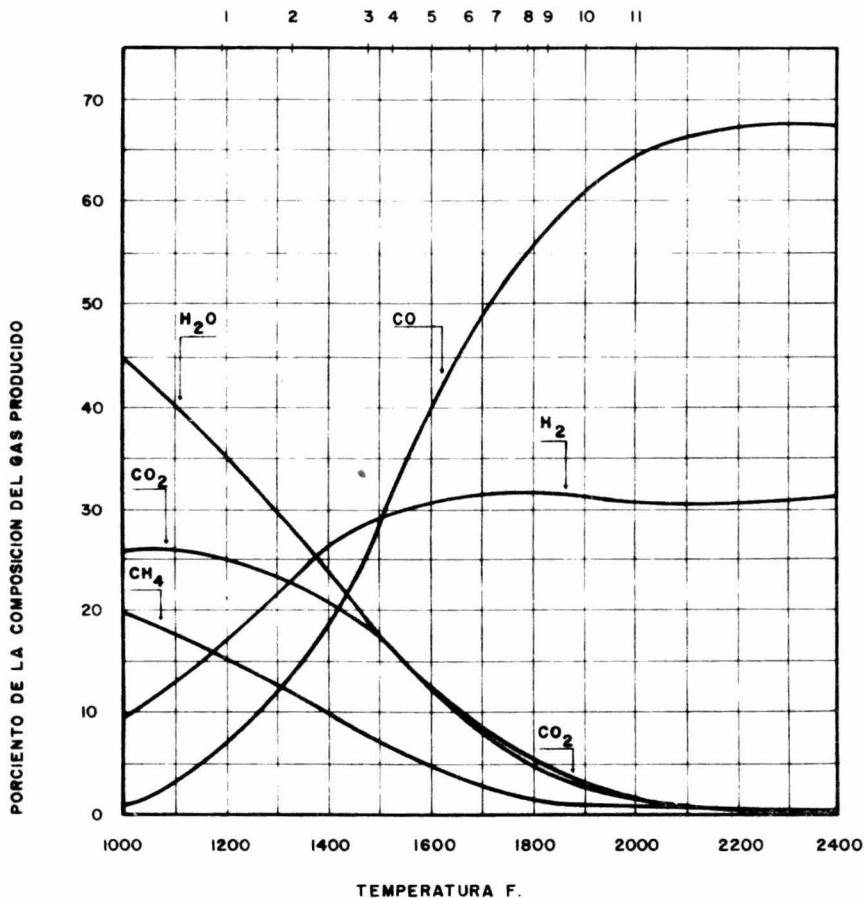


DEPENDENCIA DE LA TEMPERATURA EN LA COMPOSICION DE LOS SISTEMAS CARBON - AGUA - OXIGENO EN EQUILIBRIO

16 FIGURA

CAMBIO NETO DE ENTALPIA O. PRESION 10 ATM. ABSOLUTAS

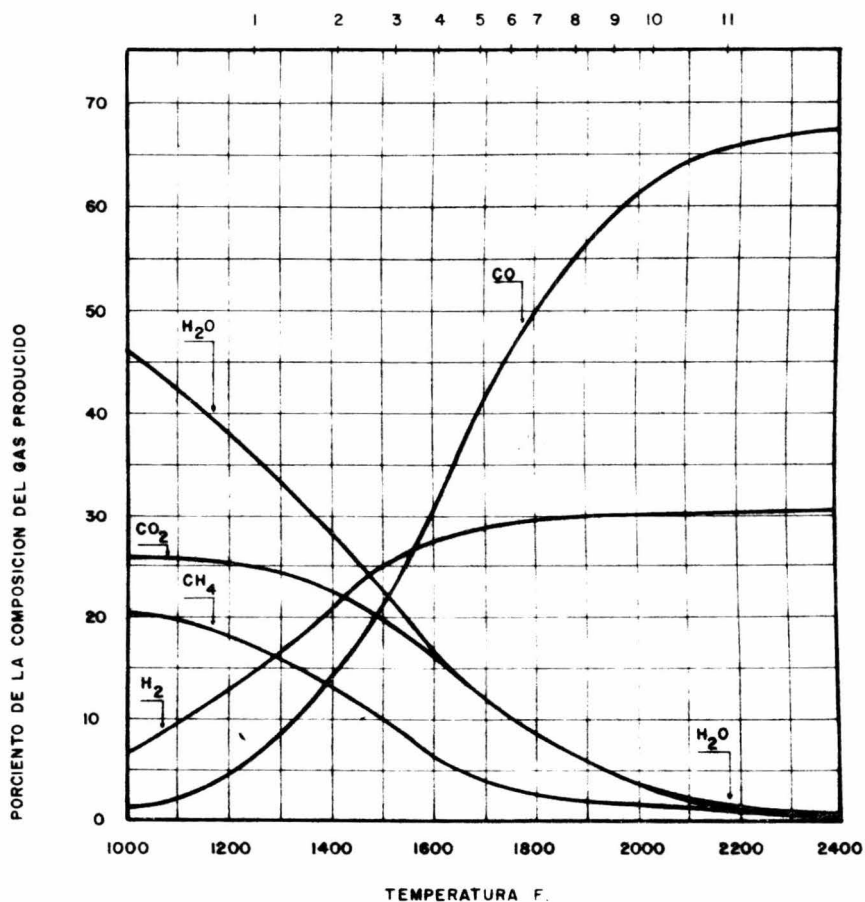
PROPORCION DE OXIGENO ADMITIDO EN EL VAPOR (CU. FT. O<sub>2</sub> / LB. H<sub>2</sub>O)



DEPENDENCIA DE LA TEMPERATURA EN LA COMPOSICION DE LOS SISTEMAS  
CARBON - AGUA - OXIGENO EN EQUILIBRIO

CAMBIO NETO DE ENTALPIA, O. PRESION 20 ATM. ABSOLUTAS

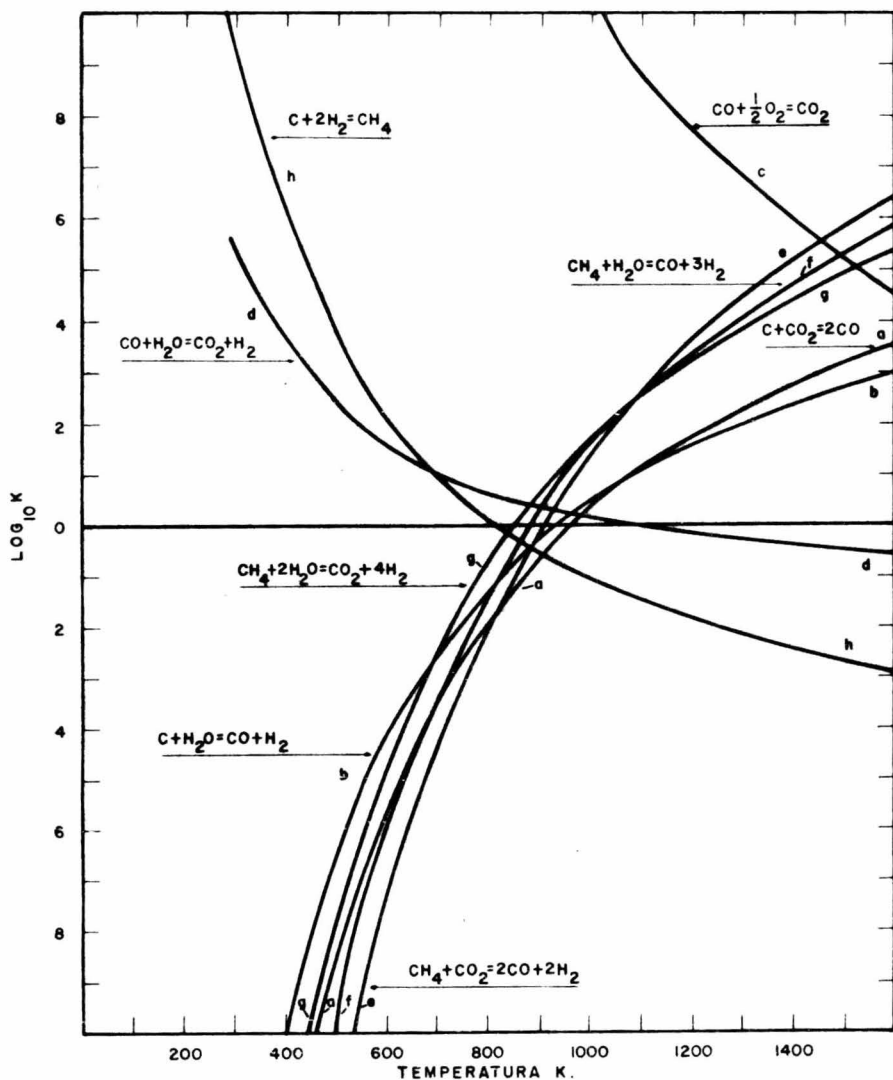
PROPORCION DE OXIGENO ADMITIDO EN EL VAPOR (CU. FT. O<sub>2</sub> / LB. H<sub>2</sub>O)



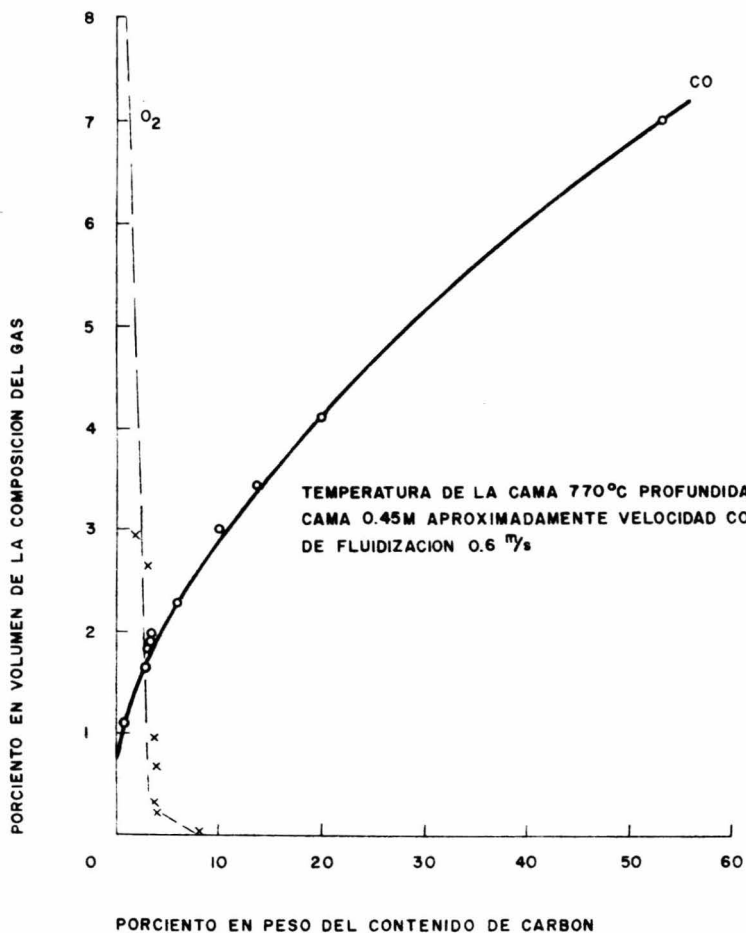
DEPENDENCIA DE LA TEMPERATURA EN LA COMPOSICION DE LOS SISTEMAS  
CARBON - AGUA - OXIGENO EN EQUILIBRIO

CAMBIO NETO DE ENTALPIA, 0. PRESION 40 ATM. ABSOLUTAS

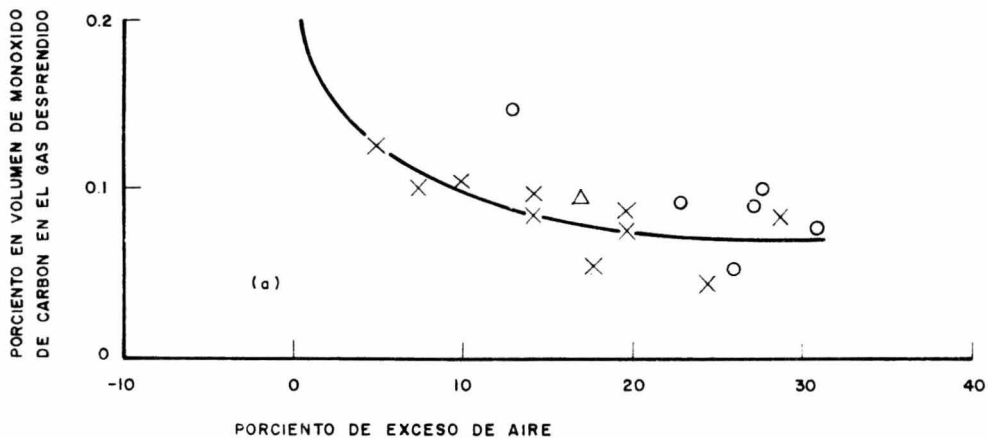
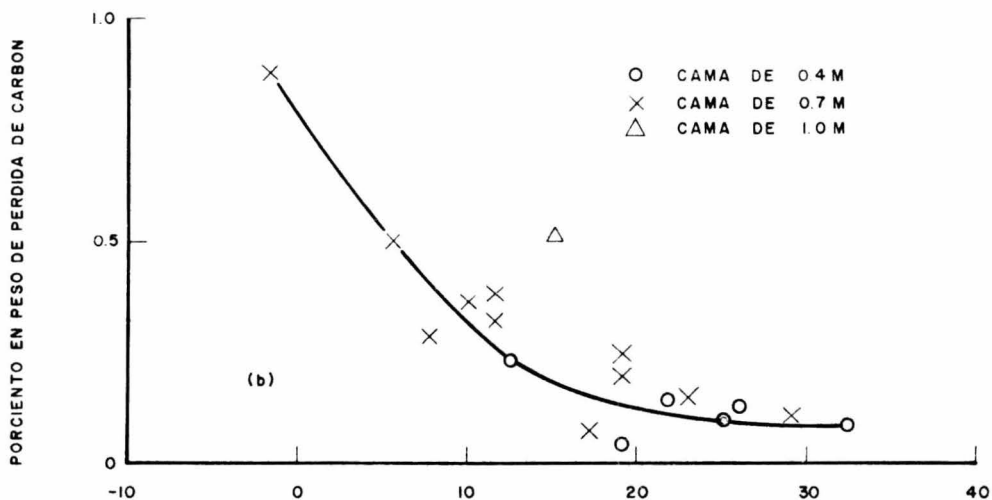




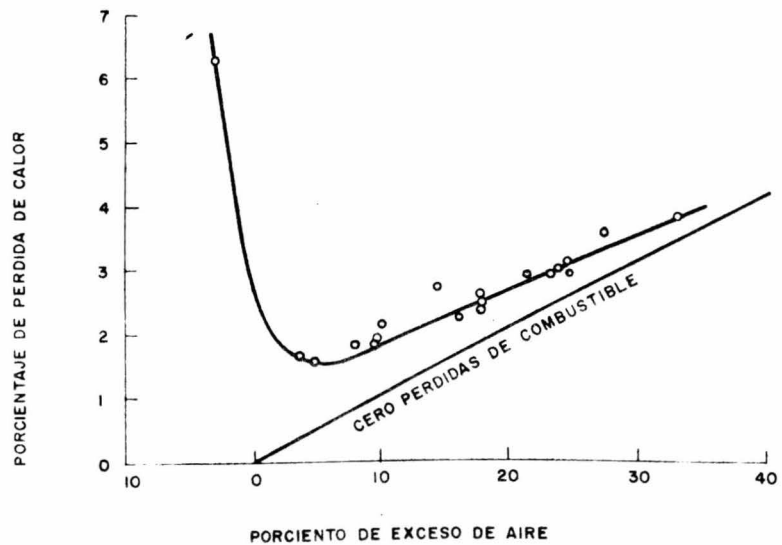
GRAFICA LOGARITMICA DE LA CONSTANTE DE EQUILIBRIO PARA OCHO REACCIONES  
 CONTENIENDO: OXIGENO, HIDROGENO, AGUA, CARBON (GRAFITO) MONOXIDO DE  
 CARBON, DIOXIDO DE CARBON Y METANO



COMPOSICION DEL GAS / CONTENIDO EN LA CAMA DE CARBON  
 POR COMBUSTION DE CARBON QUEMADO EN UN COMBUSTOR  
 FLUIDIZADO C. E. G. B.



VARIACION DE LA PERDIDA DE CARBON Y MONOXIDO DE CARBON CON EL PORCENTAJE DE EXCESO DE AIRE: CAMA FLUIDIZADA A  $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$  Y  $800. \text{ C}$  CON RECIRCULACION



VARIACION DE LA PERDIDA DE CALOR DE MONOXIDO DE CARBONO  
 CARBON NO QUEMADO CON EL PORCENTAJE DE EXCESO DE AIRE  
 CAMA FLUIDIZADA A 0.6 m<sup>3</sup>/s Y 800°C CON RECIRCULACION

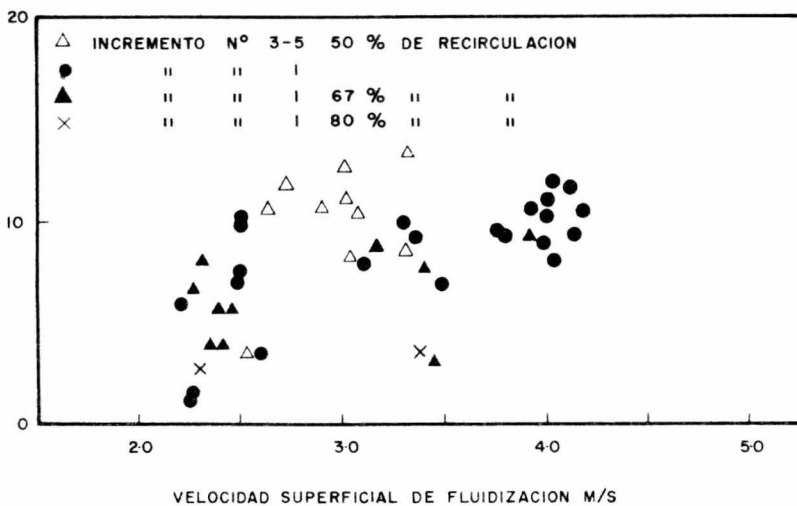
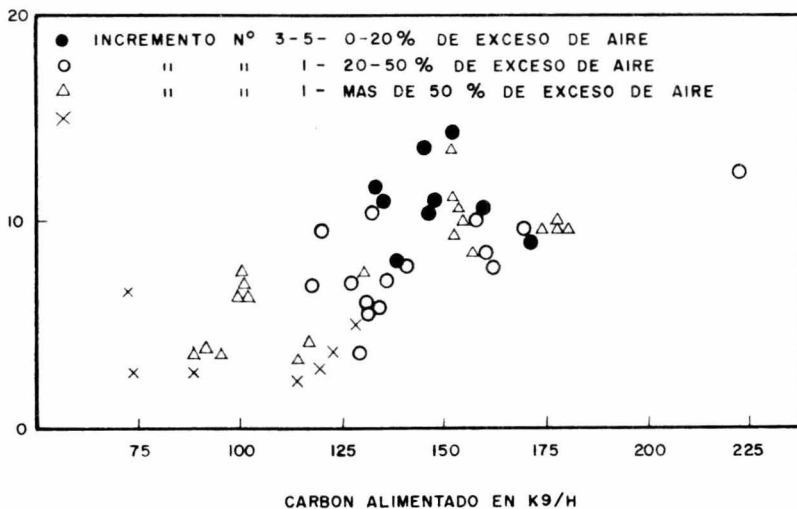
PERDIDA DE MATERIALES COMBUSTIBLES DE LA CAMA

TEMPERATURA DE LA CAMA °C.	VELOCIDAD DE FLUIDIZACION M/S.	SISTEMA DE CIRCULACION.
800	0.6	no recircula
800	0.3	no recircula
800	0.9	recircula
800	0.6	recircula
700	0.6	recircula
700	0.3	recircula

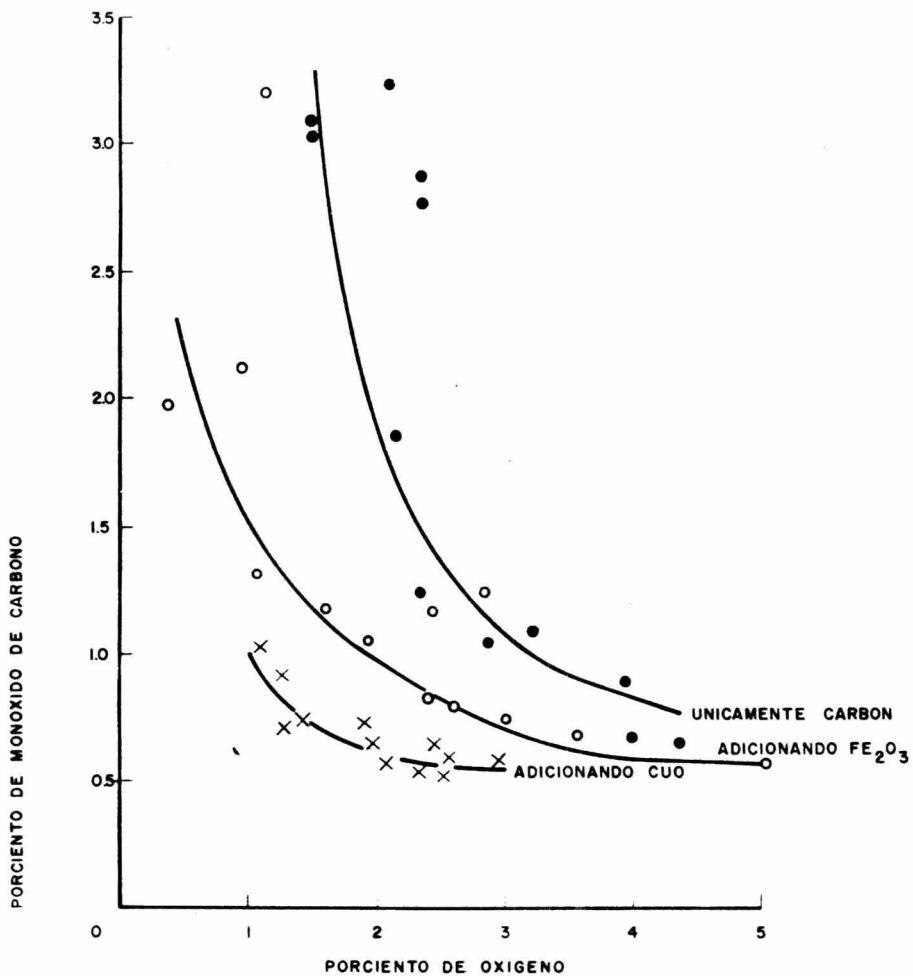
% EN VOL. DE PERDIDA DE CO EN EL GAS DES PRENDIDO.	% EN PESO DE PERDIDA DE C A LA ENTRADA.	% EN PESO DE PERDIDA DE C COMBUSTIBLE A LA ENTRADA.
0.05	6.5	6.7
0.04	1.9	2.1
0.14	0.48	1.0
0.09	0.16	0.5
0.70	0.48	3.3
0.31	1.0	2.2

FIGURA ( 23 ).

CALOR PERDIDO EN LA ELUTRIACION DEL CARBON: PORCIENTO DE CALOR A LA ENTRADA



PERDIDA DE CALOR EN LA ELUTRIACION DEL CARBON CUANDO EL CARBON NO TRATADO, DE TAMAÑO 6.4 A 0 MM. ES QUEMADO



EVOLUCION DEL MONOXIDO DE CARBONO BAJO EFECTO DE CALALIZADORES A 700. C Y 0.6  $m/s$

REACCIONES QUE SE LLEVAN A CABO EN EL PROCESO DE GASIFICACION DEL CARBON (\*).

PRINCIPALES REACCIONES.

Descomposición del vapor	$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$	-60 000 BTU/lb mol
Hidrogenación	$C + 2H_2 \rightarrow CH_4$	+40 000 BTU/lb mol
Metanación	$CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$	+100 000 BTU/lb mol

REACCIONES AUXILIARES

Para suministrar calor	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	+170 000 BTU/lb mol
Transferencia agua-gas.	$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	+14 000 BTU/lb mol.

(\*) Colores de reacción a niveles de temperatura de gasificación.



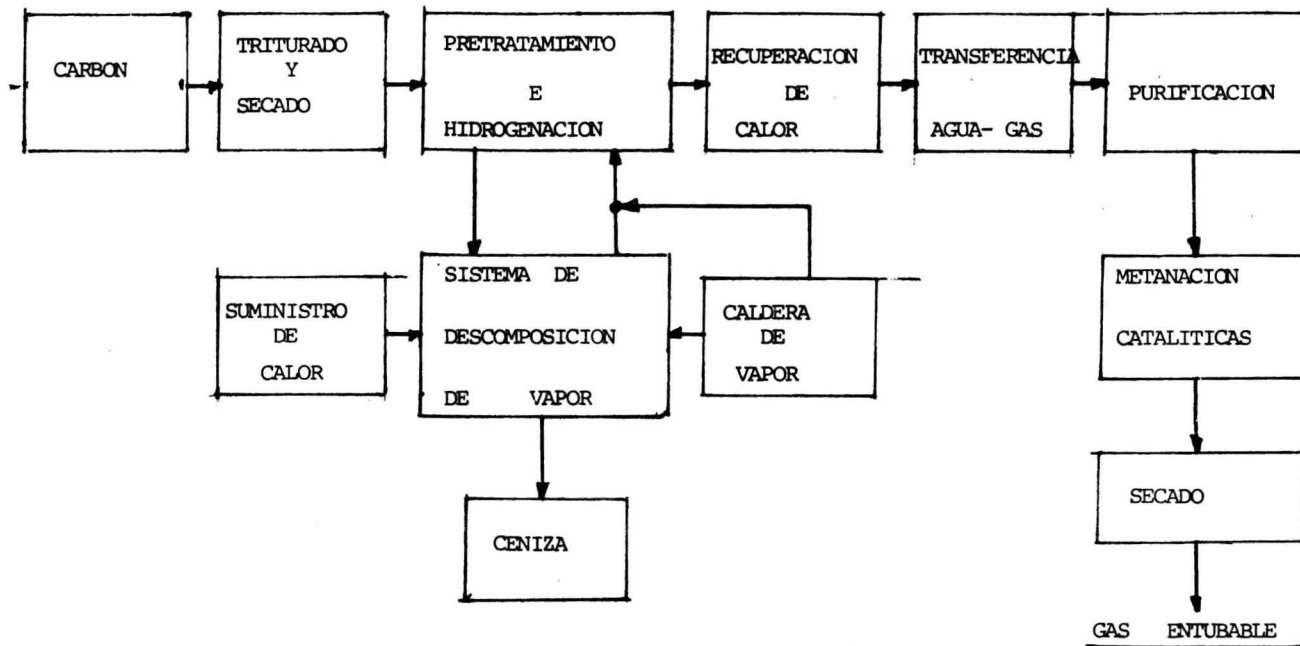


FIGURA No. 27

INTEGRACION DEL GAS ENTUBABLE A PARTIR DEL CARBON ( DIAGRAMA DE BLOQUES )

REQUERIMIENTOS DE CAPITAL PARA LA GASIFICACION DEL CARBON EN EL PROCESO "LURGI"  
 (270 000 000 SCF POR DIA DE 900 BTU/SCF GAS)

	CARBON NO AGLUTINANTE.	CARBON AGLUTINANTE.
Inversión para el proceso	132 000 000	157 000 000
Utilidades	23 000 000	23 000 000
Margen para diseño detallado	20 000 000	24 000 000
Interrupción durante la construcción	15 000 000	18 000 000
Margen para desarrollo del proceso	5 000 000	5 000 000
Varios (*)	8 000 000	8 000 000
	<hr/>	<hr/>
TOTAL	203 000 000	235 000 000
Capital de trabajo	6 000 000	12 000 000
PROPORCION BASE	209 000 000	247 000 000

(\*) Arranque, refacciones, coordinación, etc.

DISTRIBUCION DE LA INVERSION EN LA PLANTA "LURGI".

	‰ DEL TOTAL
Carbón manejado (no aglutinante)	4
Planta de oxígeno	25
Gasificación	23
Transferencia agua-gas	6
Purificación del gas	22
Recuperación de azufre	4
Metanación	16
	<hr/>
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>

FIGURA ( 29 ).

COSTO DE OPERACION ANUAL Y PROMEDIO DEL COSTO DEL GAS AL CONSUMIDOR

	COSTO ANUAL		COSTO UNITARIO	
	(\$)		(\$/MM BTU'S)	
	CARBON		CARBON	
	No aglutinante	aglutinante	No aglutinante	aglutinante
Carbón (15 y 30 \$/MM BTU'S)	17 900 000	35 800 000	22.2	44.2
Catalizadores	1 200 000	1 200 000	1.5	1.5
Agua	300 000	300 000	0.4	0.4
Suministro de operación	600 000	600 000	0.7	0.7
Labor directa	2 300 000	2 300 000	2.8	2.8
Mantenimiento	6 000 000	7 000 000	7.4	8.6
Supervisión	230 000	230 000	0.3	0.3
Gastos de nómina	250 000	250 000	0.3	0.3
Gastos generales	4 560 000	5 060 000	5.6	6.2
<b>Gastos generales de planta.</b>	<b>33 340 000</b>	<b>52 740 000</b>	<b>41.2</b>	<b>65.0</b>
Contingencias	700 000	1 100 000	0.9	1.4
<b>Cargos de capital de la producción base (13%)</b>	<b>27 200 000</b>	<b>32 100 000</b>	<b>33.7</b>	<b>39.6</b>
<b>REDITO TOTAL ANUAL</b>	<b>61 240 000</b>	<b>85 940 000</b>		
<b>COSTO PROMEDIO DEL GAS AL CONSUMIDOR (\$/MM BTU'S)</b>			<b>75.8</b>	<b>106.0</b>

FIGURA (30)

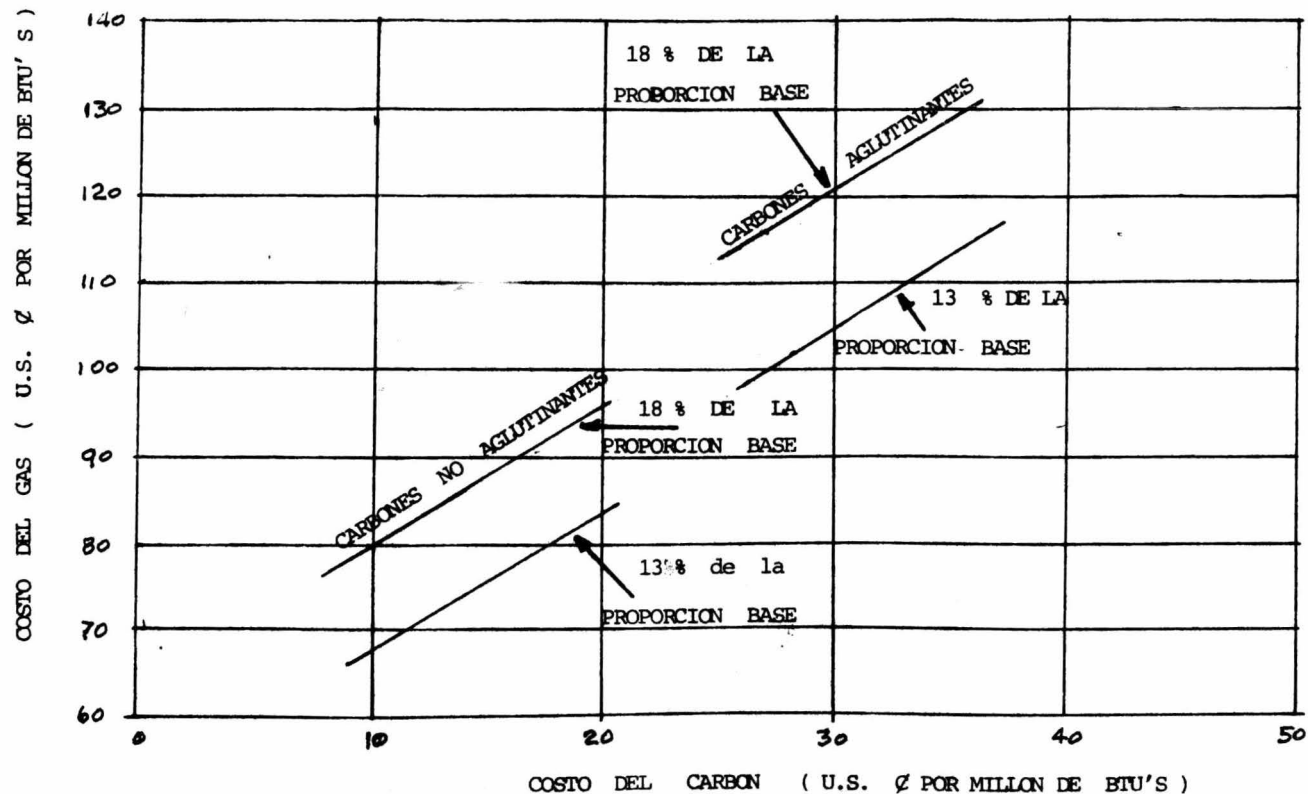


FIGURA No. 31 COSTO PROYECTADO DEL GAS ENTUBABLE ( PROCESO LURGI )