

**APLICACIÓN DEL PLASMA EN LA CONVERSIÓN DE GAS NATURAL A
LÍQUIDOS.**

EDGAR FERNANDO TÉLLEZ CÁCERES

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS
BUCARAMANGA**

2008

**APLICACIÓN DEL PLASMA EN LA CONVERSIÓN DE GAS NATURAL A
LÍQUIDOS.**

EDGAR FERNANDO TÉLLEZ CÁCERES

Monografía para optar al título
ESPECIALISTA EN INGENIERÍA DEL GAS

Director
JULIO CÉSAR PÉREZ ANGULO
Ingeniero de Petróleos

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS
BUCARAMANGA
2008**

Con todo mi cariño:

*A Jesucristo quien me guía, ilumina y
protege en todo momento y lugar*

*A mi esposa quien con su amor y
apoyo me da la fuerzas para continuar
adelante*

*A mi madre quien con su apoyo y amor
ha hecho posible este nuevo logro*

AGRADECIMIENTOS

Al Centro de Investigación del Gas y del Petróleo (CIGP) y todo su equipo de trabajo por el apoyo brindado.

A Julio César Pérez Angulo, Ingeniero de Petróleos y Director del proyecto, por todo el apoyo brindado y por su gran amistad.

A los Profesores de la Especialización en Ingeniería del Gas por todas sus enseñanzas.

A todas las personas que de una u otra manera me colaboraron en la realización de esta monografía.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION.....	1
1. GENERALIDADES.....	3
1.1 MERCADO DEL PETRÓLEO.....	3
1.2 MERCADO DEL GAS NATURAL.....	5
1.2.1 Reservas Convencionales de gas natural.....	5
1.2.2 Oferta y demanda de Gas natural.....	7
1.2.3 Reservas no convencionales de gas natural.....	8
1.3 PROBLEMÁTICA DE LA REFINACIÓN CONVENCIONAL.....	10
1.3.1 Ámbito Internacional.....	10
1.3.2 Ámbito Nacional.....	11
2. TECNOLOGIA GAS-TO-LIQUIDS (GTL).....	12
<i>2.1 GENERALIDADES DEL PROCESO FISCHER-TROPSCH.....</i>	<i>13</i>
2.1.1 Etapas de proceso Fischer-Tropsch.	14
2.1.1.1 Generación del gas de síntesis – Syngas.....	14
2.1.1.2 Síntesis de Fischer-Tropsch (FT).....	14
3. SISTEMAS ALTERNATIVOS DE CONVERSION DE GAS NATURAL A COMBUSTIBLES LIQUIDOS POR MEDIO DE PLASMA.....	16
3.1 DESCRIPCIÓN DE PROCESO CONVERSION ELECTROQUIMICA DE PLASMA DEL GAS NATURAL A LIQUIDOS HIDROCARBUROS.	17
3.1.1 Plasma de descarga de barrera dieléctrica (DBDP).....	22
3.1.2 Celda electroquímica de oxido sólido (SOEC).....	23
3.2 DESCRIPCIÓN DE LAS PARTES DE LAS DIFERENTES CONFIGURACIONES DEL REACTOR.....	24

CONCLUSIONES.....38
RECOMENDACIONES.....39
BIBLIOGRAFÍA..... 40

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Precios del petróleo WTI.....	4
Figura 2. Histórico de reservas mundiales de petróleo.....	4
Figura 3. Reservas mundiales de petróleo 2006.....	5
Figura 4. Consumo esperado de petróleo y gas natural.....	6
Figura 5. Reservas Probadas de gas natural por regiones a finales del 2006	6
Figura 6. Consumo mundial de gas 1965 – 2006.....	7
Figura 7. Proceso para obtener Combustibles Líquidos a partir de gas Natural.....	12
Figura 8. Principales Etapas del Proceso Fischer-Tropsch.....	13
Figura 9. Representación esquemática de la síntesis de Fischer-Tropsch.....	15
Figura 10. Diagrama básico del reactor para transformar gas natural a líquido.....	18
Figura 11. Diagrama de los mecanismos de reacción dentro del reactor.....	19
Figura 12. Análisis cromatográfico de los productos obtenidos de la reacción electroquímica de plasma mostrando hidrocarburos líquidos de rango de combustibles.....	20
Figura 13. Diagrama del reactor para transformar gas natural a líquido.....	23
Figura 14. Reactor químico # 1.....	26
Figura 15. Reactor químico # 2.....	30
Figura 16. Reactor químico # 3.	33
Figura 17. Reactor químico # 4.	35
Figura 18. Reactor químico # 5.....	36
Figura 19. Reactor químico # 6.....	37

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Producción vs Consumo de gas – Mundial.....	8
Tabla 2. Reservas No Convencionales de Gas natural.....	9

RESUMEN

TITULO: APLICACIÓN DEL PLASMA EN LA CONVERSIÓN DE GAS NATURAL A LÍQUIDOS*.

AUTOR: EDGAR FERNANDO TÉLLEZ CÁCERES. **

PALABRAS CLAVES: Plasma, “Gas to Liquids”, GTL, Gas natural, Conversión electroquímica, Barrera dieléctrica, DBDP, Celda electroquímica.

DESCRIPCIÓN:

El objetivo principal de esta monografía es describir el proceso de conversión de gas natural a líquidos combustibles por medio de plasma No-Térmico según lo presentado en las más recientes publicaciones.

Otro de los objetivos a mediano plazo es que se convierta en la base para un estudio de factibilidad técnica y económica de la construcción en banco de prueba de un reactor químico para transformar gas natural a líquidos por medio de plasma, su posterior construcción, pruebas de operatividad, y por último su implementación a nivel industrial; lo cual dará como resultado una excelente fuente de recursos a nivel departamental y nacional.

La estructura del proyecto está basada en dar la mayor cantidad de información acerca de los materiales necesarios para el diseño del reactor, y entregar la última información publicada acerca de las variables de operación; este presenta en el Capítulo 1 la revisión de mercado de los combustibles hidrocarburos, en el Capítulo 2 una breve descripción de la tecnología Fischer Tropsch, y en el Capítulo 3 se presenta la descripción del proceso conversión electroquímica del gas natural a líquidos hidrocarburos por medio plasma, las reacciones ocurridas dentro del reactor, los productos obtenidos, las variables de operación, se describe la función de las principales partes del equipo, como son la celda de Plasma de Descarga de Barrera Dieléctrica y la Celda Electro-Química de Oxido Sólido, e igualmente se especifican los materiales con los que puede ser construidas las diferentes partes del reactor, y adicionalmente se muestran las diferentes configuraciones que permitirán mejorar el proceso de conversión de gas natural a líquidos.

* Monografía

** Facultad de Ciencias Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería de Petróleos, Especialización en Ingeniería del Gas.
Director: Ing. Julio César Pérez Angulo.

ABSTRACT

TITLE: PLASMA APPLICATION IN NATURAL GAS TO LIQUIDS CONVERSION *.

AUTHOR: EDGAR FERNANDO TÉLLEZ CÁCERES. **

KEY WORDS: Plasma, "Gas to Liquids", GTL, Natural gas, Electrochemical conversion, Dielectric Barrier, DBDP, Electrochemical cell.

DESCRIPTION:

The main objective of this monograph is describe the process of natural gas to liquids conversión by means of Non-Thermal plasma according to the most recent publications.

Another objective to medium term is that this work becomes the base for a technical and economic feasibility study of the construction of a chemical reactor in a laboratory bench scale to transform natural gas to liquids by means of plasma, its followed construction, operating tests, and finally its implementation at industrial level; which will be an excellent source of resources to departmental and national level.

The structure of the project is based on giving the greater amount of information about of necessary materials for the reactor design, and give the last published information about operation variables; this work presents in the Chapter 1 a revision of market of fuel hydrocarbons, in the Chapter 2 a brief description of Fischer Tropsch technology, and in the Chapter 3 it presents the description of the process of electrochemical conversión of natural gas to hidrocarbons liquids by means of plasma, the reactions happening into the reactor, obtained products, operation variables, the function of the main parts of the equipment is described, these parts are the Dielectric barrier discharge plasma cell and the Solid oxide electrochemical cell, the materials with which it can be constructed the different parts of the reactor are specified, and additionally different configurations that will allow improve the natural gas to liquids conversión process are shown.

* Monograph

** Faculty of Physical-Chemical Engineering. Petroleum Engineering School. Gas Engineering Specialization. Director: Eng. Julio César Pérez Angulo.

INTRODUCCION

Desde que lo descubrió, el hombre se ha acercado cada vez más al petróleo. Dos simples hechos lo confirman: desde 1880 la producción de crudo ha aumentado 3.500 veces, y hoy en día un hogar en cualquier parte del mundo tiene innumerables elementos y productos provenientes del petróleo, siendo los combustibles como gasolina y ACPM los cuales ocupan un amplio rango de los productos derivados del petróleo.

Sin embargo, el frenesí de precios, la coyuntura actual del mercado mundial y las apreciaciones de algunos expertos según las cuales las reservas actuales se acabarán en 2045, son factores que han puesto sobre el tapete un interrogante cada vez más latente: ¿está el petróleo cerca de alcanzar sus límites máximos de producción? El impacto de una pregunta de esta naturaleza hace pensar de inmediato en la dependencia que la sociedad tiene de los hidrocarburos.

Teniendo en cuenta las anteriores incertidumbres del mercado energético, se comienzan a visualizar otras fuentes de energía que suplan gran parte de los derivados del petróleo. Dentro de las opciones se encuentra el gas natural, con unas grandes reservas a nivel mundial, y además siendo un combustible con un bajo impacto ambiental, lo cual lo convierte en una alternativa bastante atractiva.

Aunque igualmente el gas tiene sus desventajas, la principal de este es que sus grandes reservas se encuentran localizadas en lugares lejanos a los mercados de

comercialización, que hacen inviable la construcción de gasoductos, por lo cual se deben buscar alternativas para desarrollarlas, entre las que se encuentra la conversión de gas natural a combustibles líquidos – GTL, denominado de esta manera por sus siglas en inglés “Gas to Liquid”.

Dentro de las tecnologías para la conversión de gas natural a líquidos se encuentra principalmente el método Fischer-Tropsch y Metanol-to-Gasolina (MTG), estas dos ya están ampliamente desarrolladas pero igualmente tienen sus desventajas. Las dos principales son que requieren de una gran cantidad de equipos y altos costos de operación.

Existe otra tecnología que está surgiendo y es la utilización de Plasma No-Térmico, esta no se encuentra desarrollada, pero ya existen algunos estudios preliminares los cuales muestran que es un proceso de GTL viable técnicamente, pero que igualmente requiere de investigaciones posteriores para determinar su viabilidad económica.

La realización de estas investigaciones muy probablemente dará el siguiente paso hacia la implementación de esta tecnología a escala industrial, lo cual determinará un importante nicho de mercado para el desarrollo de la industria del petróleo y de Colombia.

Este proyecto se basa principalmente en la revisión del proceso de transformación de gas natural a líquidos por medio de plasma y su estructura se divide principalmente en cuatro etapas: revisión de mercado de los combustibles hidrocarburos, descripción de la tecnología Fischer Tropsch, descripción de la tecnología del plasma, pre-selección de los equipos necesarios para el montaje de un piloto para transformación de gas natural a líquidos por medio del plasma.

1. GENERALIDADES

Es preciso iniciar nuestro estudio, con una revisión general del mercado del crudo, y seguidamente del gas natural a nivel mundial y de Colombia, ya que este corresponde a la materia prima para la generación de combustibles líquidos ultra – limpios, denominada tecnología GTL.

1.1 MERCADO DEL PETROLEO.

En la actualidad el mercado petrolífero esta sufriendo fuertes transformaciones, en primer lugar, la concientización ecológica de los países desarrollados se ha canalizado en la exigencia de combustibles con especificaciones mas rígidas desde el punto de vista medioambiental, en segundo lugar, los precios han alcanzado valores muy elevados, que amenazan el crecimiento económico y plantean la búsqueda de nuevas formas de energía que sean rentables a estos niveles (Ver figura 1).

Sumado a esto, el continuo decrecimiento de las reservas convencionales de crudo a nivel mundial, las altas demandas de consumo, y la disminución en el descubrimiento de nuevas reservas.

Afortunadamente para Colombia en el 2006 se logro detener la declinación de las reservas probadas y se continúa trabajando en muchas otras áreas del país para aumentarlas (ver en la Figura 2 y 3).

Figura 1. Precios del petróleo WTI.

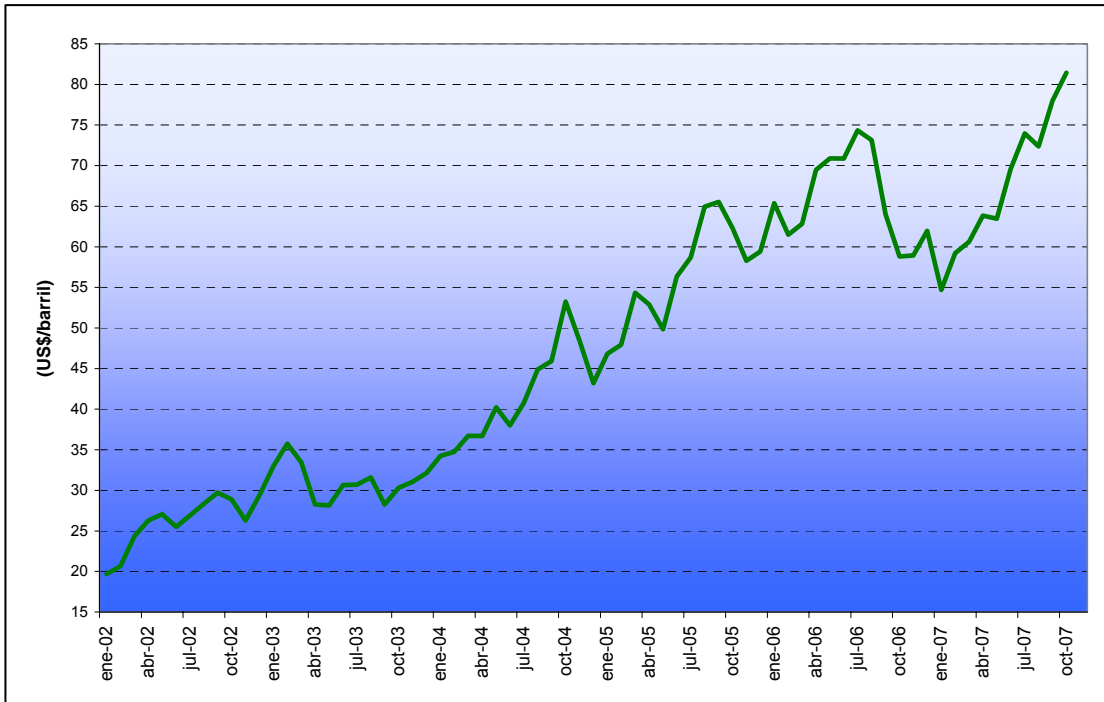
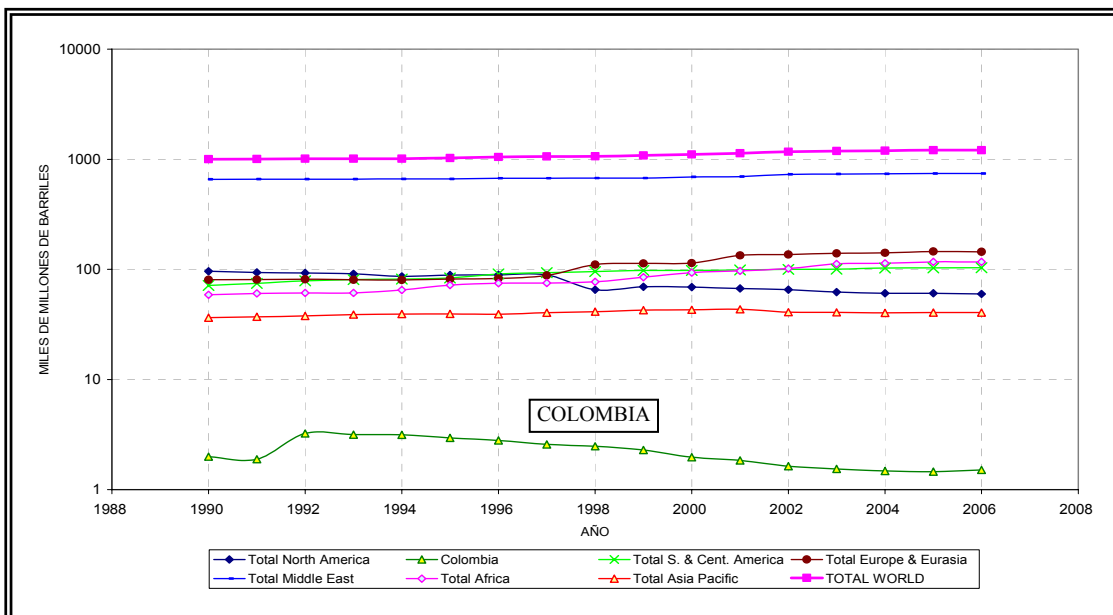
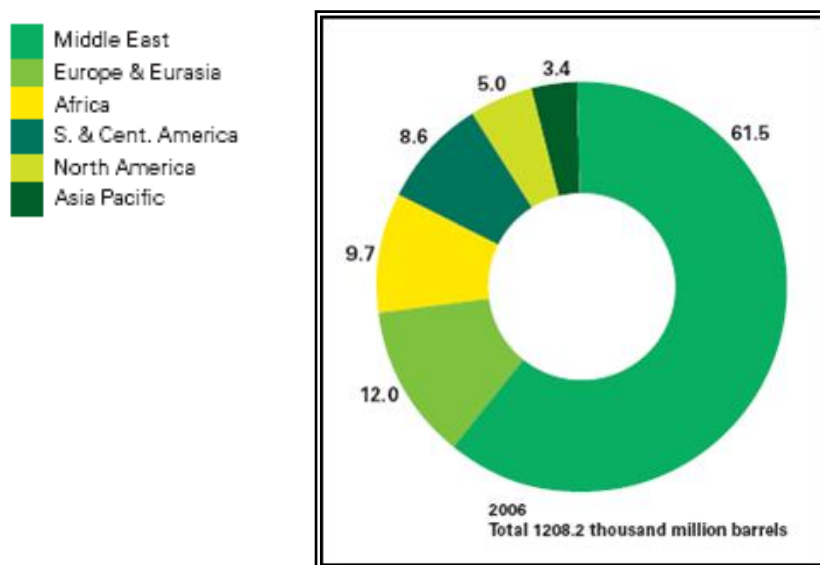


Figura 2. Histórico de reservas mundiales de petróleo.



Fuente: BP Statistical Review of World Energy

Figura 3. Reservas mundiales de petróleo 2006.



Fuente: BP Statistical Review of World Energy

1.2 MERCADO DEL GAS NATURAL.

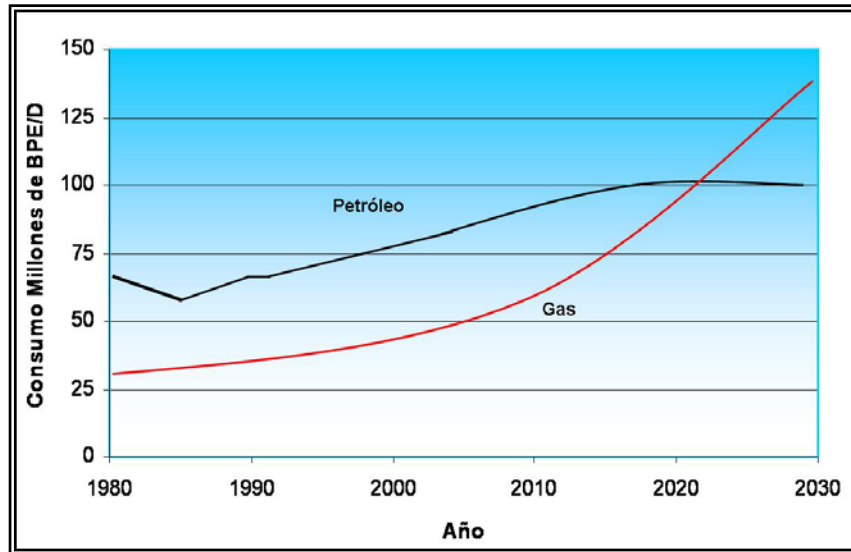
Por su parte el gas natural se proyecta como el combustible más importante del mundo debido a su abundancia, limpieza y diversidad de aplicaciones; se espera que el mundo consuma más gas que petróleo para el año 2025¹, lo que se ilustra claramente en la figura 4.

1.2.1 Reservas Convencionales de gas natural. Según el estudio más reciente realizado por BP², el mundo cuenta con 6,405.48 trillones de pies cúbicos (Tpc) de reservas probadas de gas natural. De estas, aproximadamente un 40.49% se encuentran en el Medio Oriente, 35.34% en Europa y Eurasia, 7.8 % en África, 8.16% en la región del Pacífico Asiático, 4.39% en América del Norte y 3.79% en América del Sur y Central. En la figura 5, se puede apreciar las reservas mundiales en trillones de pies cúbicos, para cada región del mundo.

¹ WATTAS, P. *Building Bridges—Fulfilling the Potential for Gas in the 21st Century*. Ponencia presentada en el Congreso Mundial del Gas. Tokio, Japón. 3 de junio de 2003

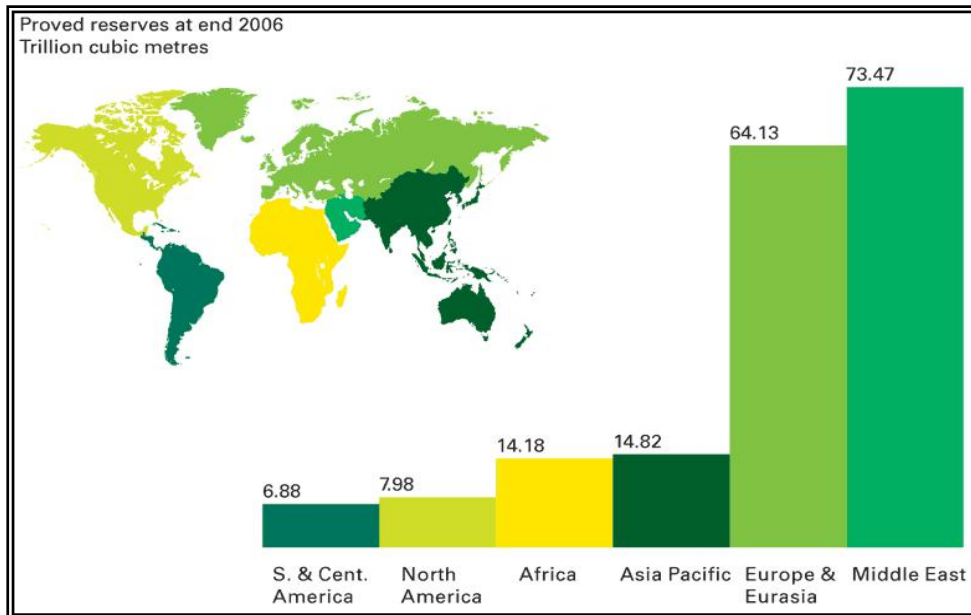
² BP Statistical Review of World Energy. Londres, Inglaterra. Junio, 2007

Figura 4. Consumo esperado de petróleo y gas natural.



Fuente: Watts, P. Building Bridges—Fulfilling the Potential for Gas in the 21st Century

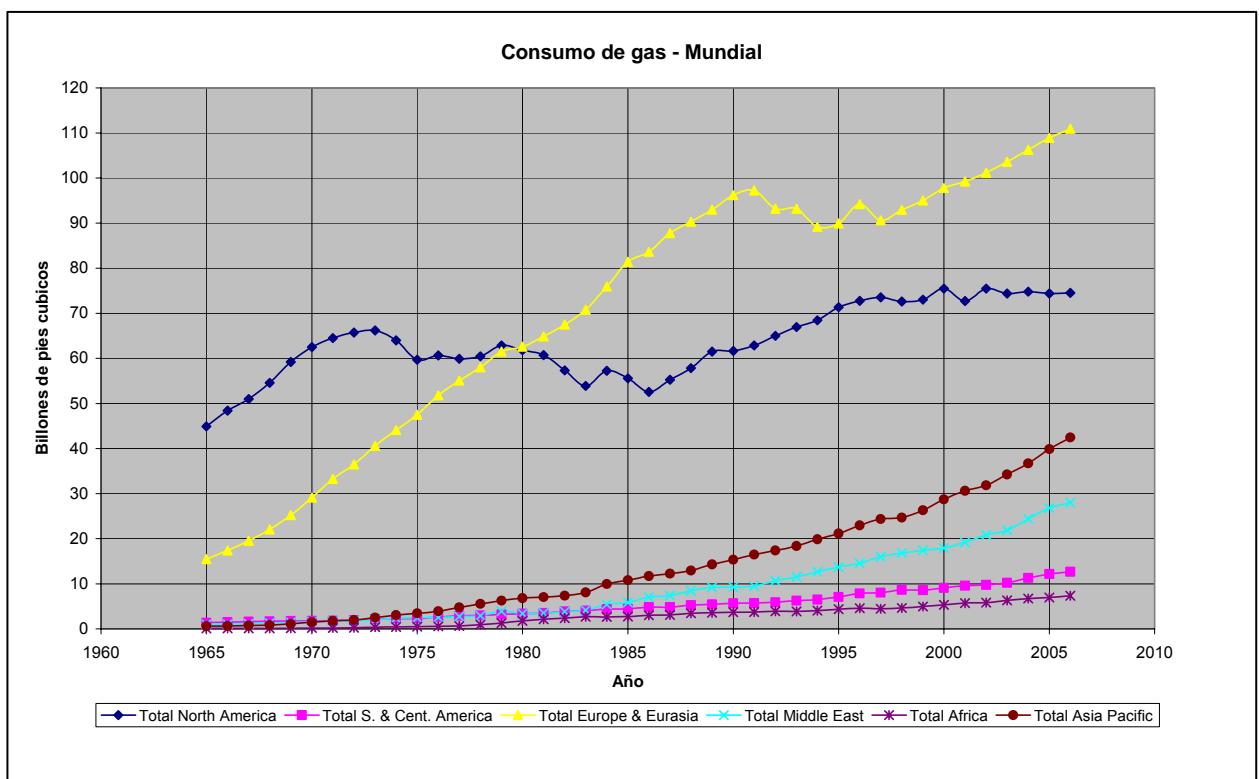
Figura 5. Reservas Probadas de gas natural por regiones a finales del 2006.



Fuente: BP Statistical Review of World Energy

1.2.2 Oferta y demanda de Gas natural. El consumo mundial actual de gas natural (GN) es de unos 275,826 Billones de pies cúbicos por día, y crece rápidamente, sobre todo en la región del Pacífico Asiático y Europa & Eurasia. En la figura 6, se puede apreciar el crecimiento en el consumo de gas natural en las diferentes áreas del mundo; y en la Tabla 1. se puede apreciar que hay casos en los cuales su producción, no es suficiente para abastecer sus necesidades.

Figura 6. Consumo mundial de gas 1965 – 2006.



Fuente: BP Statistical Review of World Energy

Otro caso bastante importante es el de Japón, el cual no produce ni siquiera el 5% de lo que consume, para lo cual requiere el transporte de gas natural en forma de GNL, desde el Medio Oriente y países vecinos.

Tabla 1. Producción vs Consumo de gas – Mundial.

Billones de pies cúbicos por día	2006		
	PRODUCCIÓN	CONSUMO	DIFERENCIA
Total Norte América	73,0	74,5	-1,5
Total S. & Cent. América	14,0	12,6	1,3
Total Europa & Eurasia	103,8	110,9	-7,1
Total Medio Este	32,5	28,0	4,5
Total África	17,5	7,3	10,1
Total Asia Pacific	36,5	42,4	-5,9
TOTAL WORLD	277,2	275,8	1,4

Fuente: BP Statistical Review of World Energy

Toda esta creciente demanda de Gas Natural se debe principalmente a que este se quema en forma más limpia que otros combustibles fósiles, por ejemplo, una central térmica de gas suele emitir mucho menos dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno que las alimentadas a carbón o petróleo.

El gas natural es abundante, pero más de un tercio de las reservas globales se clasifican como no desarrolladas, es decir, reservas que han sido descubiertas pero que se encuentran ubicadas en lugares remotos o que son demasiado pequeñas para justificar su explotación. En el futuro, las nuevas tecnologías pueden ayudar a transformar el gas no desarrollado para que deje de ser un gas pasivo que tendría que ser quemado o reinyectado y pase a ser un activo vendible.

1.2.3 Reservas no convencionales de gas natural. Los yacimientos no convencionales son los que no pueden ser producidos a caudales económicos sin la ayuda de grandes tratamientos de estimulación o procesos especiales de recobro. En Estados Unidos por ejemplo, el 22% del mercado de gas es abastecido por gas en litologías estrechas (“Tight Gas”) y metano asociado a mantos de carbón. El “Tight gas” contabiliza el 18 % de la producción de gas seco en este país, principalmente en areniscas de baja permeabilidad y en shales; en el mundo se estima que existen cerca de 4,000 Tpc de este tipo de recurso.

El gas presente en el carbón se extrae de vetas o minas, principalmente en Rusia, China, Estados Unidos, Canadá, Australia, Alemania, Inglaterra, India, Polonia, Kazajstán, Ucrania y Sudáfrica. Estados Unidos estima que técnicamente existen reservas de metano en mantos de carbón de aproximadamente 50-60 Tpc, de las cuales 17.5 Tpc están incluidas en las reservas convencionales probadas. De este tipo de recurso se estima que pueden ser recuperables a nivel mundial de 3,000 a 9,250 Tpc.

Además de esto se ha comprobado la existencia de grandes reservas de gas en hidratos³, estos son cristales de moléculas de agua que encierran una molécula de metano sin enlace químico. Si estos pudiesen desarrollarse desde el punto de vista económico, el mundo contaría con una enorme fuente de energía. Se estima que In-situ solo en Estados Unidos hay 200,000 Tpc, mientras que en el mundo este valor es muy alto, se habla de 4,900,000 Tpc, pero con una aceptación estimada de alrededor de 700,000 Tpc. Muchas de éstas reservas no son recuperables hasta el momento, pero se está intentando encontrar un camino para extraerlas.

En tabla 2, se presenta un resumen de las reservas no convencionales de gas natural a nivel mundial.

Tabla 2. Reservas No Convencionales de Gas natural.

Depósitos No Convencionales		
710,000 Tpc		
Hidratos	Gas asociado al Carbón	Litologías Estrechas
700,000 Tpc	3,000–9,250 Tpc	4,000 Tpc

³ COLLETT, T.; LEWIS, R.; UCHIDA, T. *El creciente interés en los hidratos de gas. Oilfield Review. 2003*

1.3 PROBLEMÁTICA DE LA REFINACIÓN CONVENCIONAL

1.3.1 Ámbito Internacional. Las estrictas regulaciones de calidad de los productos utilizados como combustibles impuestas por las organizaciones internacionales sobre protección del medioambiente y control de la capa de ozono (Como los protocolos de Kyoto y Montreal), y que ya están siendo implementadas en las principales ciudades industrializadas del mundo, han puesto a los empresarios de la refinación de crudo, en la encrucijada del cumplimiento de esas especificaciones debido al alto costo que éstas representan, a la estigmatización de la comunidad internacional o a los efectos negativos de la comercialización de sus productos. Las especificaciones son tales, que las tecnologías de refinación convencional de crudo se han convertido en obsoletas y las refinerías son forzadas a tratar con moléculas en lugar de rangos de ebullición.

La mejor ingeniería utilizada en las instalaciones existentes les ha permitido, a algunas empresas de refinación, cumplir con las especificaciones para el año 2000 y las que vendrán para los próximos años, sin una gran inversión. Esto se ha logrado, en la mayoría de las veces, solo con las selección de los crudos, manejo del hidrogeno, y mezclas inteligentes⁴. Pero no en todas las refinerías es posible utilizar un petróleo de alta calidad debido a su escasez y a que cada vez se fomenta más la explotación de yacimientos con crudos pesados, por lo cual se deben realizar grandes inversiones para eliminar al máximo el azufre y los aromáticos de los combustibles.

Para el caso de los Estados Unidos, donde no se ha construido una refinería hace 20 años, se requiere una inversión considerable en la mayoría de las existentes, ya que el 58% de ellas producen combustibles con contenidos de azufre por

⁴ RUIZ, Jairo Palacio; ALGORTA, Santiago. Medio ambiente presiona inversión en refinerías. *Petróleo internacional*. Octubre/Noviembre de 2004

encima de las 500 ppm, el 22% se encuentran entre el 300-500 ppm y solo el 8% con niveles menores a 100 ppm⁵.

Por su parte, la industria de refinación Europea está pasando por un proceso de reestructuración, con fusiones de empresas y la desaparición de las menos eficientes. La necesidad de aprovechar las ventajas fiscales ofrecidas por la producción de combustibles (diesel y gasolina) de contenido de azufre inferior a 50 ppm ha llevado a esas industrias a la optimización de sus procesos.

1.3.2 Ámbito Nacional. Esta problemática es mucho más evidente en países tercermundistas donde las especificaciones de los combustibles son menos estrictas comparadas con las de los países industrializados.

Para el caso de Colombia, la refinería de Barrancabermeja, que opera desde 1922, actualmente se encuentra en su mayoría obsoleta, aunque logra cumplir difícilmente con las condiciones de la demanda de derivados del crudo, no ofrece garantías frente a nuevos retos ambientales, no solo nacionales sino internacionales. Por el contrario, la refinería de Cartagena con su Plan Maestro de Desarrollo (PMD) presenta buenos prospectos ya que los compromisos ambientales hacen parte de sus principales objetivos⁶.

Los estudios realizados manifiestan que la gasolina producida en Colombia contiene 1,000 ppm de azufre, el ACPM para motores diesel contiene 4,500 ppm, mientras que el mal denominado “ACPM ecológico” contiene 1,500 ppm.

⁵ SCHULT, Chistopher; LESEMANN, Markus. *Pollution solutions. Hydrocarbon Engineering*. Mayo de 2004

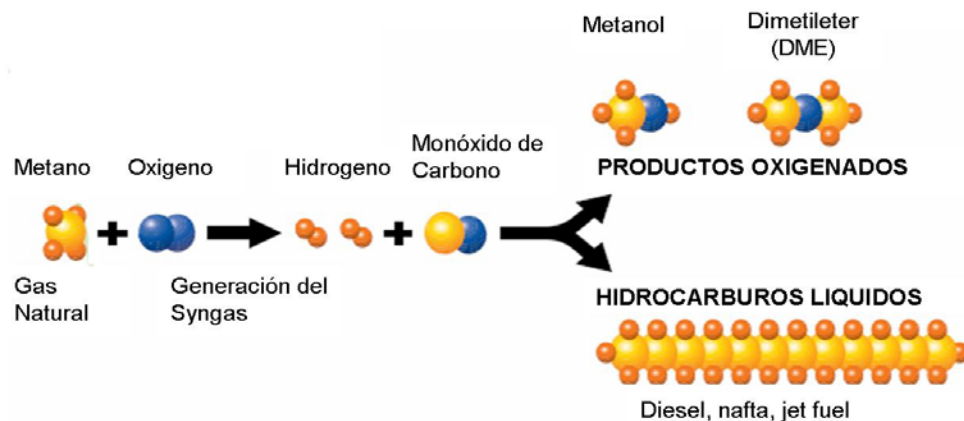
⁶ Pagina de Internet de ECOPETROL. ¿Que es el plan maestro de desarrollo?. Resumen ejecutivo, www.ecopetrol.com.co. 2004

2. TECNOLOGIA GAS-TO-LIQUIDS (GTL)

Por todos los aspectos considerados en las secciones anteriores, es importante definir las diversas alternativas de monetización del gas natural que permitan el desarrollo de las reservas. Entre las alternativas mas importantes se encuentran: Exportación mediante la construcción de Gasoductos, Gas Natural Comprimido (GNC), Gas Natural Licuado (GNL) y Gas to Liquid (GTL), esta última se divide principalmente en dos procesos 1) Fischer-Tropsch, este se explicará a continuación en este capítulo y 2) Plasma No-Térmico, este ultimo se describirá mas detalladamente en el siguiente capítulo.

La Figura 7 muestra en general el proceso de transformación de gas natural a combustibles líquidos ultra limpios – GTL.

Figura 7. Proceso para obtener Combustibles Líquidos a partir de gas Natural.



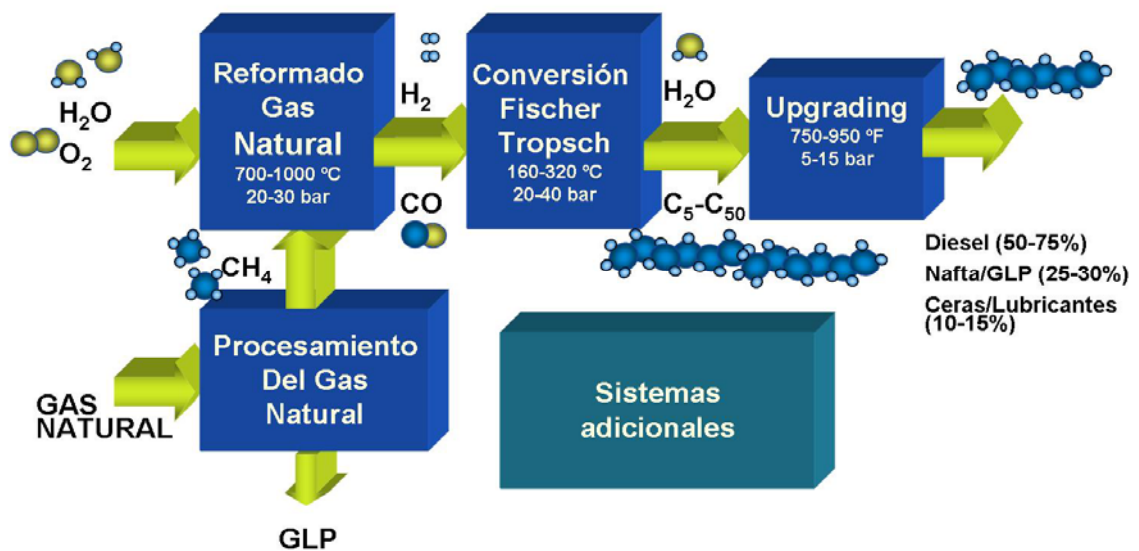
Con esta tecnología se pueden obtener dos tipos de productos principalmente: hidrocarburos líquidos (Diesel, nafta, queroseno, Jet-Fuel, parafinas) y Oxigenados (Dimetileter y Metanol).

2.1 GENERALIDADES DEL PROCESO FISCHER-TROPSCH

La conversión de gas natural a hidrocarburos líquidos es un proceso de pasos múltiples con gran liberación de energía, que inicialmente separa las moléculas de gas natural, predominantemente metano, y las vuelve a unir para dar lugar a moléculas más largas.

En la figura 8, se puede ver que este proceso consta principalmente de tres etapas: Generación del gas de síntesis, síntesis de Fischer-Tropsch y mejoramiento del producto.

Figura 8. Principales Etapas del Proceso Fischer-Tropsch.



2.1.1 Etapas de proceso Fischer-Tropsch

2.1.1.1 Generación del gas de síntesis – Syngas

El gas de síntesis (syngas o Reformado de gas natural) es una mezcla de hidrogeno (H₂) y monóxido de carbono (CO) producida a partir del gas natural (carbón, petróleo, coke o biomasa). Adicionalmente de esta mezcla se produce una pequeña cantidad de dióxido de carbono (CO₂) y agua (H₂O). Las tecnologías para obtener el syngas, son procesos conocidos y han sido usados en muchas aplicaciones comerciales como los primeros procesos para producir hidrogeno, amoniaco y metanol. Actualmente existe una gran variedad de procesos entre los que se destacan, reformado de vapor, oxidación parcial, reformado de CO₂, reformado auto-térmico, y plasma; la diferencia principal entre estos procesos es la fracción de H₂/CO que se obtiene.

2.1.1.2 Síntesis de Fischer-Tropsch (FT)

En esta etapa el syngas es convertido por medio de un catalizador de hierro o cobalto, a crudo sintético siguiendo principalmente la reacción de Fischer Tropsch:

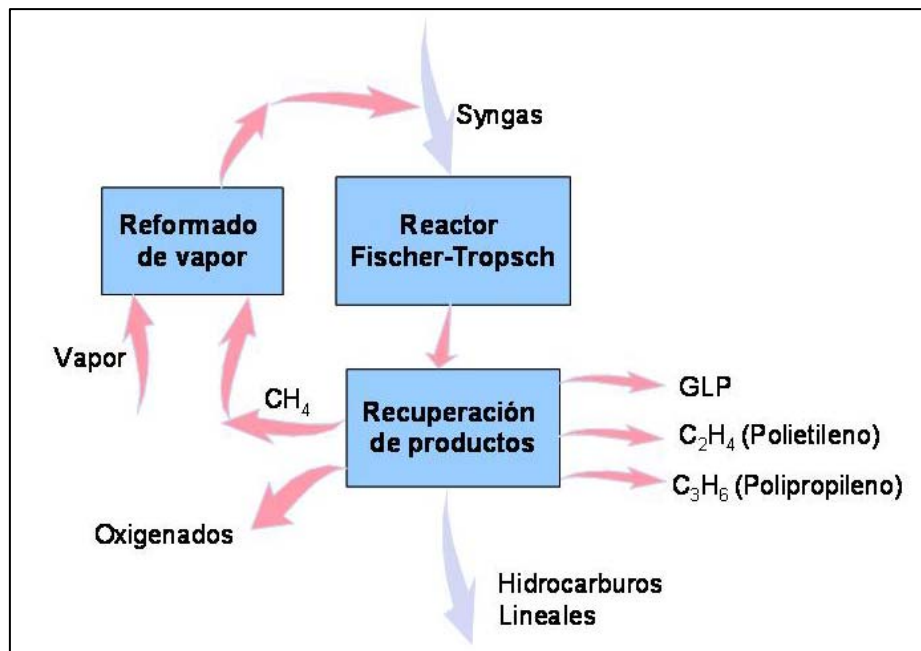


Los productos obtenidos del proceso Fischer Tropsch dependen de gran forma de la composición del gas de síntesis (fracción H₂/CO), del tipo de catalizador utilizado, tipo de reactor, las condiciones de operación (presión y temperatura) y el procesamiento final de la mezcla obtenida en esta etapa. Si las condiciones de temperatura son bajas (200 -240 °C) se obtiene principalmente diesel, y si son altas (300 – 350 °C) se obtiene principalmente gasolina. Los reactores deben ser diseñados de tal forma que se recupere el calor y se tenga el máximo control de la

temperatura, y son generalmente operados en un rango de presiones entre 145 – 580 psia (10 – 40 bar).

La etapa de la síntesis de Fischer-Tropsch (Figura 9) consiste principalmente de: reactor FT, reciclaje y compresión del syngas no reaccionado, remoción del hidrogeno y el dióxido de carbono, tratamiento del metano producido (para generar nuevamente más gas de síntesis) y la separación de los productos Fischer-Tropsch, estos productos consisten en una multicomponente y compleja mezcla de hidrocarburos (lineales y ramificados) y productos oxigenados. Los principales productos son parafinas lineales y α -oleofínicos; es decir, al final se obtiene una mezcla de hidrocarburos lineales para luego ser refinados, y así, obtener productos comerciales.

Figura 9. Representación esquemática de la síntesis de Fischer-Tropsch.



3. SISTEMAS ALTERNATIVOS DE CONVERSION DE GAS NATURAL A COMBUSTIBLES LIQUIDOS POR MEDIO DE PLASMA.

Las tecnologías comunes para la producción de combustibles líquidos a partir de gas natural involucran ya sea procesos Fisher-Tropsch (los cuales requieren una alta inversión de capital) o procesos de catálisis (los cuales tienen una eficiencia limitada para la conversión de un solo paso); teniendo en cuenta los precios actuales de los hidrocarburos líquidos, es urgente la necesidad técnica y económica de desarrollar procesos competitivos para la conversión de gas natural a combustibles líquidos, de tal forma que fuentes de gas remotas puedan ser económicamente producidas y transportadas a los centros de consumo, que campos de aceite y gas puedan ser agresivamente explotados y que puedan utilizarse combustibles líquidos de mejor calidad y ambientalmente amigables.

Una de las tecnologías que esta naciendo a nivel de laboratorio, y se presenta como una alternativa bastante viable para aplicarla a nivel industrial es la utilización de Plasma No-Térmico, ésta entrega líquidos hidrocarburos en un solo paso, lo cual elimina los altos costos de inversión en equipos y además se presenta como una tecnología limpia, lo cual tiene un alto valor agregado.

Este es un método bastante reciente y está siendo desarrollado por Idaho National Engineering y Environmental Laboratory, con el apoyo por Meter C. Kong & Paul A. Lessing; en este se describe un reactor químico para conversión directa de hidrocarburos, el cual incluye una Celda de Descarga de Plasma de Barrera Dieléctrica (DBDP) y una Celda Electroquímica de Oxido Sólido (SOEC), los cuales logran tener comunicación a través de un fluido que fluye por un pasadizo que se encuentra entre ellos (i.e CH_4), lo anterior se describirá en detalle mas adelante.

Los conceptos tecnológicos de este proceso han sido validados a escala de banco de laboratorio y los resultados han demostrado que la tecnología es viable, sin embargo estudios escalados y evaluaciones económicas no han sido desarrollados.

Debido a que estas tecnologías son bastante recientes, los autores de los artículos y publicaciones no entregan una muy detallada explicación del funcionamiento y de las reacciones que ocurren dentro del equipo, ya que es propiedad de las compañías que patrocinan estas investigaciones, las cuales por lo tanto no desean que se conozcan estas innovaciones que pueden cambiar radicalmente el futuro de los combustibles líquidos en el mundo.

Este método y sistema está encaminado a la conversión de hidrocarburos, tales como gas natural, a varios productos líquidos, tales como gasolina o combustible diesel y químicos de interés, tales como alcoholes. Este método elimina los problemas de los procesos de conversión convencional y entrega combustibles líquidos en un solo paso; adicionalmente en este se mejora la tasa de activación de metano para convertirlo en hidrocarburos oxigenados líquidos y otros combustibles livianos.

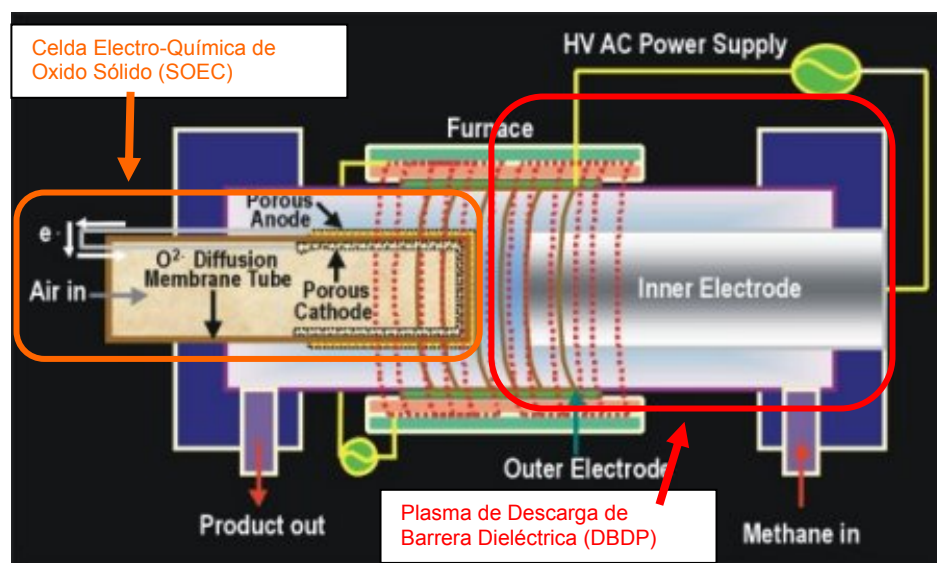
Esta tecnología para la conversión de gas natural y la entrega de líquidos hidrocarburos esta proyectada para ser más grande que las técnicas convencionales de conversión de gas a líquidos.

3.1 DESCRIPCIÓN DE PROCESO CONVERSION ELECTROQUIMICA DE PLASMA DEL GAS NATURAL A LIQUIDOS HIDROCARBUROS.

Esta tecnología demuestra la conversión de Plasma-Electroquímico del gas natural a líquidos combustibles en un solo paso. Esta tecnología combina en un reactor químico una Celda Electro-Química de Oxido Sólido (SOEC) con un celda

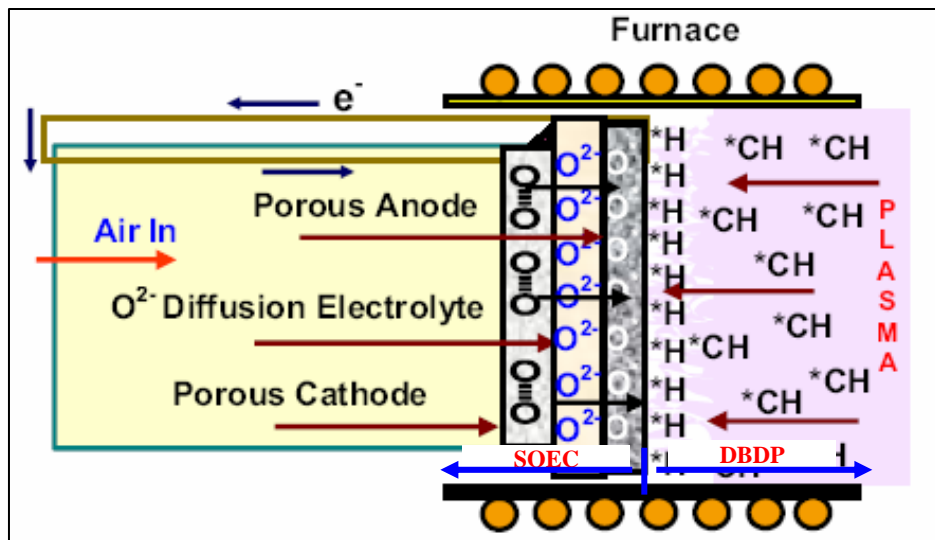
de Plasma de Descarga de Barrera Dieléctrica (DBDP) (Ver figura 10), para la conversión directa de metano a hidrocarburos líquidos. En esta tecnología el DBDP activa el metano para producir altas concentraciones de hidrogeno y radicales hidrocarburos durante un proceso de ionización, estas especies reactivas son llevadas desde la zona de plasma a la superficie de SOEC (Ver figura 11); los radicales de hidrogeno son mucho mas livianos y son llevados mucho mas rápido que los radicales hidrocarburos, por lo tanto en la superficie del ánodo poroso de la celda SOEC hay mucho mas alta concentración de radicales de hidrogeno, estos reaccionan con los radicales de oxigeno provenientes de electrolito de oxido sólido para formar agua; la reacción de eliminación de agua disminuye la concentración de hidrogeno en el sistema y por lo tanto impulsa a que los radicales de hidrocarburos se polimericen para formar hidrocarburos mas pesados (i.e. gasolina, oleofinas, parafinas); una pequeña fracción de radicales hidroxilo también se combinan con los radicales de hidrocarburos para formar oxigenados; la continua síntesis química en la superficie de la celda SOEC produce una energía eléctrica de bajo grado, la cual puede ser aprovechada en otra operación del laboratorio o de la planta de GTL.

Figura 10. Diagrama básico del reactor para transformar gas natural a líquido.



En la Figura 11 se muestran los mecanismos de reacción para formar productos combustibles líquidos. La formación de CO y CO₂ nunca fue observada en este proceso, lo cual es una en comparación con los procesos GTL tipo Syn-Gas.

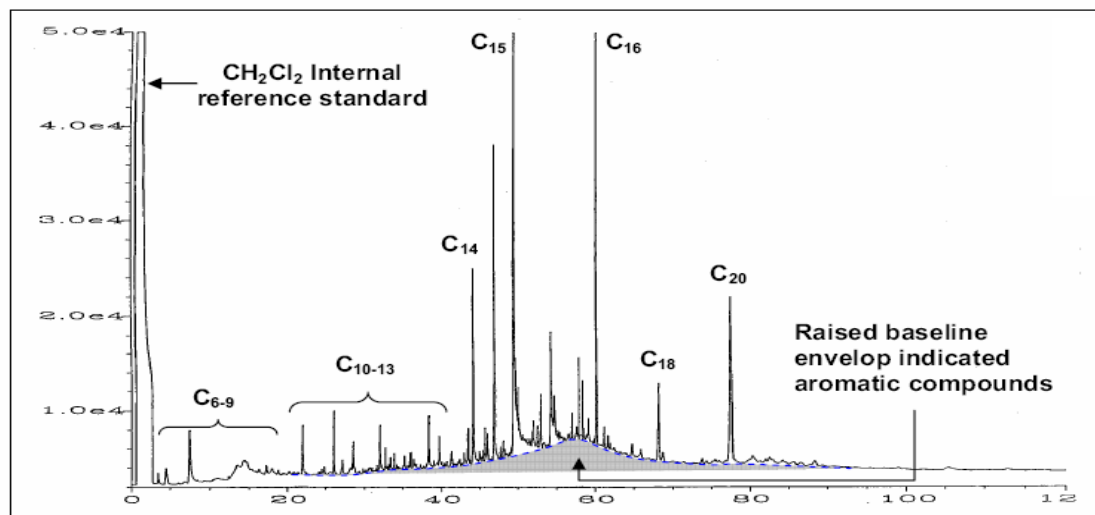
Figura 11. Diagrama de los mecanismos de reacción dentro del reactor.



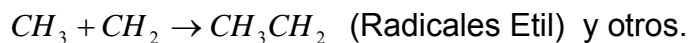
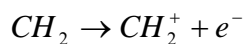
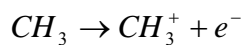
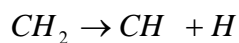
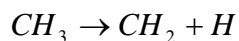
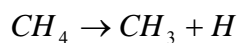
Los productos líquidos obtenidos fueron analizados e identificados por cromatógrafos de gas, entre los productos confirmados se encuentran, alcoholes (C₁ – C₅), componentes del rango gasolina (C₅ – C₁₂) y diesel (C₁₂ – C₂₀), una significativa cantidad de parafinas y oleofinas altamente ramificadas y metano sin reaccionar (Ver figura 12).

Por otra parte, durante los procesos en la DBDP y en la superficie de la celda SOEC, también pueden ocurrir diversas reacciones de formación de oxigenados, las cuales son mostradas a continuación:

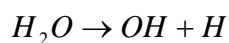
Figura 12. Análisis cromatográfico de los productos obtenidos de la reacción electroquímica de plasma mostrando hidrocarburos líquidos de rango de combustibles.

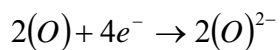
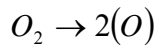
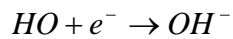


a. Generación de radicales hidrocarburos – DBDP.

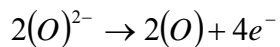
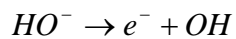


b. Aniones de Hidroxilo y oxígeno y Generación de radicales en la superficie del cátodo – Celda SOEC.



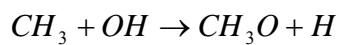
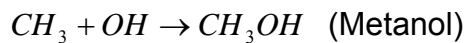


b. En la superficie del ánodo.

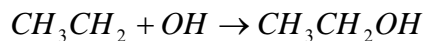


c. Posibles reacciones dentro y cerca del ánodo para producción de alcoholes.

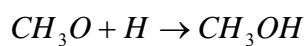
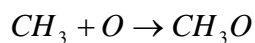
Reacciones de hidroxilo.



Reacciones de protones



Reacciones de oxidación



3.1.1 Plasma de descarga de barrera dieléctrica (DBDP).

DBDP es un plasma de No-Equilibrio o “Cold”, en el cual la temperatura del electrón es muy alta (aproximadamente 10^4 K) mientras el gas permanece a temperatura ambiente, lo anterior significa que la energía inyectada en el reactor de la DBDP es usada para generar electrones energizados y otras especies altamente reactivas y no para calentar el gas natural. DBDP también se puede describir como una descarga uniforme de micro-arcos que son extremadamente efectivos para inducir la disociación e ionización de los gases (metano); la disociación de gases en este tipo de aparato de descarga generan altas concentraciones de radicales libres reactivos a muy altas tasas. Si el gas natural es alimentado a la celda DBDP, los radicales hidrocarburos reactivos serán generados por extracción parcial de hidrogeno $\text{CH}_4 \rightarrow \text{CH}_3^- + \cdot\text{H}$. La temperatura del gas en la DBDP es ambiente y de esta manera no se induce a la formación de carbón sólido.

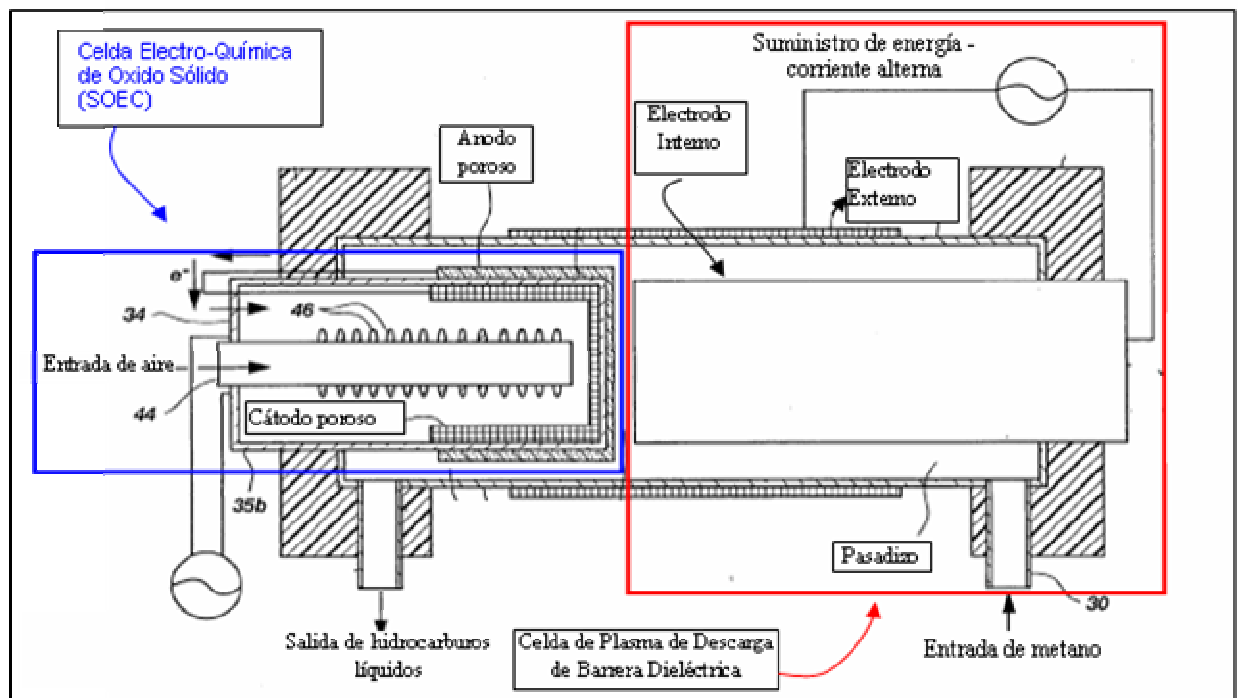
Aunque para la aplicación de convertir gas natural a combustible líquidos no se tienen datos publicados de la cantidad requerida de energía a aplicar dentro del pasadizo de la Barrera Dieléctrica (Ver Figura 13), se obtuvo información que para una aplicación similar de transformación de gas natural a Hidrogeno y Carbon⁷ requiere aplicar una descarga de pulsos eléctricos o corriente alterna, en rangos de Kilohertz y voltajes que se encuentran entre 5 – 15 KV o mayores y entre 50 y 60 Hz, con la cual se crea el plasma no-térmico tal como una barrera de descarga en dicho pasadizo; este plasma es muy denso y cae dentro de un rango de 10^{15} electrones por cm^3 .

⁷ Fletcher, David E. Québec (CA). Production of hydrogen and carbon from natural gas or methane using barrier discharge non-thermal plasma. Patent Application Publication. US2004/0148860. August 5, 2004.

3.1.2 Celda electroquímica de oxido sólido (SOEC).

La celda SOEC consiste de un electrolito de oxido sólido colocado entre dos electrodos porosos (un cátodo interno y un ánodo externo) (Ver figura 12); un conductor que conecta el ánodo y el cátodo completa el circuito; el electrolito de oxido sólido es un tubo de membrana de oxido de cerámica delgado de conducción mixta (conducción electrónica y oxida), este está internamente en corto circuito y la tasa de difusión de oxido es controlada por la difusión de electrones a elevadas temperaturas ($> 600\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Figura 13. Diagrama del reactor para transformar gas natural a líquido.



Durante la operación de la celda SOEC, el O_2 se disocia e ioniza en el cátodo poroso para formar aniones, estos iones migran a través de la membrana del electrolito y son descargados en el ánodo para generar radicales de oxidación que reaccionen con los radicales de hidrogeno o de hidrocarburos; los radicales de hidrocarburos se combinan con O y H para formar combustibles líquidos. La reacción también avanza con la eliminación de agua para formar hidrocarburos de

alto peso molecular a partir de la polimerización de los radicales hidrocarburos. La tasa de suministro de oxidante al ánodo puede ser fácilmente controlada por medio de un circuito externo que conduce el exceso de electrones hacia fuera del ánodo. Se desea que este opere a bajas temperaturas, la operación a baja temperatura también requiere de un electrolito de óxido el cual sea un buen conductor de iones O^{2-} . Durante las reacciones existen corrientes iónicas y electrónicas establecidas en el electrolito óxido, la celda SOEC produce una pequeña cantidad de energía eléctrica, la cual puede ser aprovechada en el mismo sistema para que el total de energía consumida se parcialmente auto-sostenida.

3.2 DESCRIPCIÓN DE LAS PARTES DE LAS DIFERENTES CONFIGURACIONES DEL REACTOR.

Kong y Lessing presentan un sistema y método para la conversión reactiva de hidrocarburos gaseosos a líquidos, el cual se muestra en la Figura 14, en esta figura se encuentran enumeradas las partes del sistema o reactor, las cuales se describirán a continuación:

El reactor químico para conversión directa de hidrocarburos incluye una Celda de Descarga de Plasma de Barrera Dieléctrica (12) alongada longitudinalmente y una Celda Electroquímica de Óxido Sólido (14), los cuales logran tener comunicación a través de un fluido que fluye por un pasadizo (24) que se encuentra entre ellos; la celda de plasma(12) y la celda electroquímica (14) están preferiblemente posicionadas entre capas opuestas (17a) y (17b), las cuales se encuentran dispuestas en dirección hacia el interior del reactor químico; la celda de plasma de descarga comprende un par de electrodos uno externo (20) y otro interno (22) los cuales están operativamente conectados a un suministro de energía; (20) puede tomar la forma de una alongada pantalla cilíndrica hueca, la cual es rodeada parcialmente y soportada por un tubo soporte (26), los materiales apropiados de

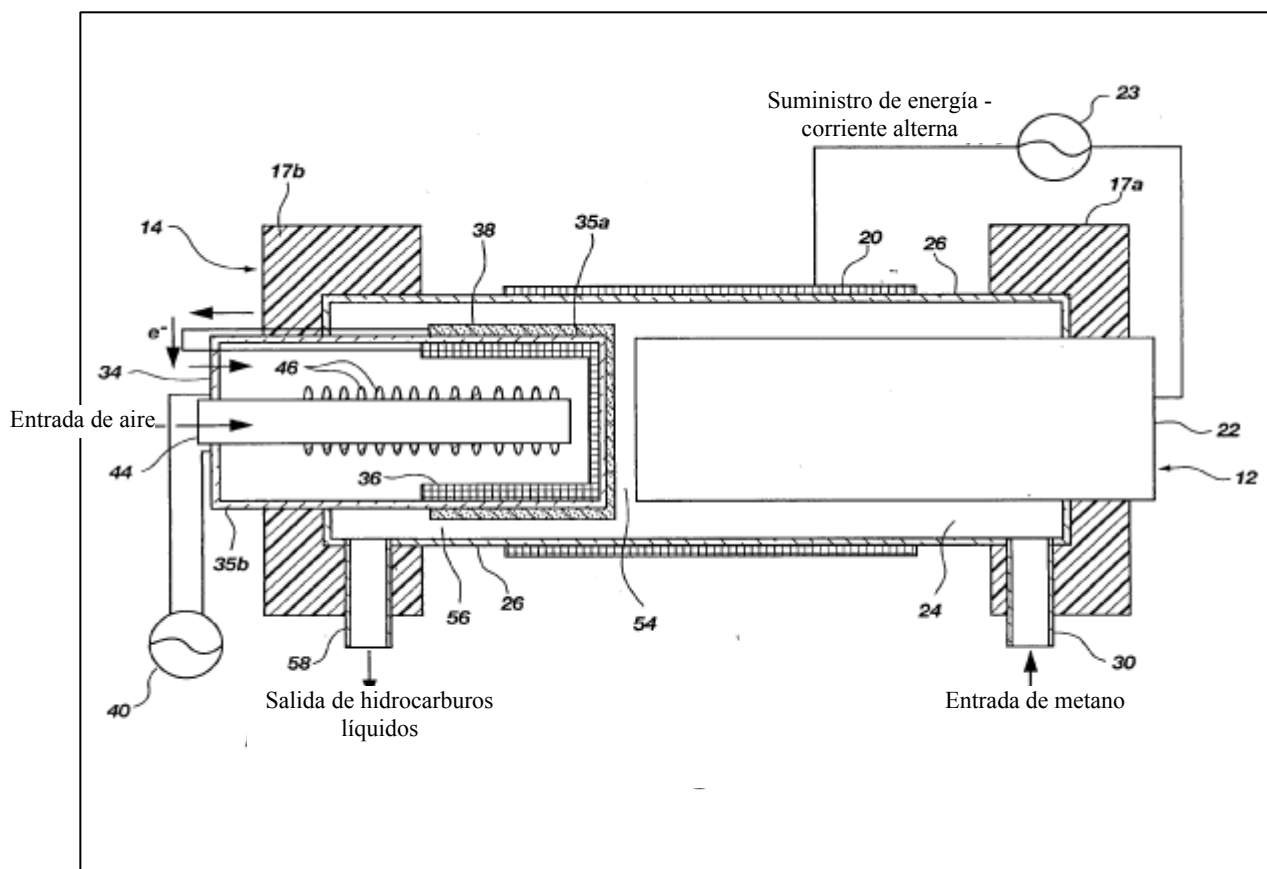
construcción de (20) son acero inoxidable y similares; el electrodo interno (22) puede tomar la forma de una varilla alargada, la cual puede ser sólida o hueca, este electrodo interno (22) está dispuesto concéntricamente al electrodo externo y dentro del tubo soporte (26), los materiales apropiados de construcción de (22) son acero inoxidable, titanio, níquel, oro y similares, este también puede ser construido de material catalítico puede tener un recubrimiento de material catalítico,

El tubo soporte (26) puede ser construido de un material de oxido cerámico, tal como cuarzo, así como zirconio, alumina, vidrio y similares.

Un primer pasadizo (24) en forma de un anular alargado esta definido por el tubo soporte (26) y el electrodo (22). Una entrada de gas de alimento (30) se extiende desde el exterior de la capa (17a), el ancho de ese pasadizo es ajustado para proveer optimas condiciones de descomposición del gas natural; en aplicaciones para transformar gas natural en hidrogeno y CO₂ puede tener desde 0.25 mm a 4 mm de ancho.

La celda electroquímica comprende un tubo de membrana de electrolito de oxido sólido de conducción mixta (34) (iónicamente y electrónicamente) posicionado entre un cátodo poroso (36) y un ánodo poroso (38), este tubo de membrana (34) tiene una capa cerrada (35a) que esta dirigida hacia adentro y una capa abierta (35b) dirigida hacia fuera.

Figura 14. Reactor químico # 1.



El reactor químico # 1 (Figura 14) cuenta con los siguientes componentes:

- ❖ Celda de plasma de descarga de barrera dieléctrica (12).
- ❖ Celda electroquímica de óxido sólido (14).
- ❖ Capa externa a (17a).
- ❖ Capa externa b (17b).
- ❖ Electrodo externo (20).
- ❖ Electrodo interno (22).
- ❖ Suministro de corriente alterna (23).
- ❖ Pasadizo (24).
- ❖ Tubo soporte (26).

- ❖ Entrada de gas de alimento (30).
- ❖ Tubo de membrana electrolítica (34).
- ❖ Final interior del tubo de membrana electrolítica (35a).
- ❖ Final exterior del tubo de membrana electrolítica (35b).
- ❖ Cátodo poroso (36).
- ❖ Ánodo poroso (38).
- ❖ Generador de fuerza electro-motriz (40).
- ❖ Tubo de entrada de O₂ (44).
- ❖ Elementos de calentamiento eléctrico (46).
- ❖ Pasadizo anular [entre (12) y (14)] (54).
- ❖ Pasadizo para salida de productos de reacción (56).
- ❖ Salida de productos de reacción (58).

Otros componentes adicionales de este equipo pueden ser:

- ❖ Sensor de temperatura de gas de entrada.
- ❖ Sensor de temperatura de gas de salida.
- ❖ Sensor de temperatura de la barra dieléctrica.
- ❖ Monitor de tasa de flujo de entrada
- ❖ Monitor de tasa de flujo de salida
- ❖ Cromatógrafo para monitoreo de gas de entrada, gas de salida y productos líquidos de salida.

Una habilidad de este sistema es que el tubo de membrana de electrolito (34) provee un incremento en el área de superficie para las reacciones químicas, dependiendo de la extensión de la membrana cubierta con el material anódico y catódico. Es más, muchos materiales pueden ser usados para proveer las propiedades conductoras iónicas y electrónicas de este tubo (34). Los materiales de cerámica de oxido mezclados que funcionan a suficientemente bajas temperaturas (300 °C – 600 °C) son utilizados como materiales electrolíticos. Un

material electrolítico preferido para formar este tubo es CeO_2 (drogado) “doped” con CaO . Otros materiales electrolíticos apropiados incluyen $\text{SrCe}_{0.95}\text{Y}_{0.05}\text{O}_{3-x}$, $\text{BaCe}_{0.9}\text{Gd}_{0.1}\text{O}_3$, $\text{Sr}_2\text{Gd}_2\text{O}_5$ y óxidos basados en bismuto. Además, el uso de electrolitos de conducción mixta es ventajoso ya que esto permite que la celda electroquímica de óxido sólido (14) funcione sin la necesidad de suministro de energía, ya que opera internamente con un corto-circuito, por ejemplo los electrones y aniones O^{2-} se difunden internamente en el material en direcciones opuestas; sin embargo, un generador de fuerza electro-motriz opcional (40), tal como un generador o batería de voltaje variable puede ser usado para completar el circuito eléctrico o electrónico, esto puede ser usado para mejorar el movimiento de aniones a través del electrolito.

El ánodo poroso (38) preferiblemente incorpora un material catalítico para facilitar la formación de productos de tipo combustible. Materiales catalíticos apropiados para este ánodo incluyen Plata, níquel, platino, cobalto, CaTiO_3 (drogado) “doped”, $\text{La}_{0.85}\text{Sr}_{0.15}\text{MnO}_3$, $\text{La}_{0.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CrO}_3$. El cátodo poroso (36) es formado de una malla formada por platino y plata.

El electrodo interno (22) puede ser construido de un material catalítico o puede tener una capa de material catalítico sobre él, la cual mejore la formación de productos combustibles deseables. Algunos metales son conocidos para ser catalíticos para hidrocraqueo e hidrotratamiento de una corriente de hidrocarburos. Ejemplos de estos metales son cobalto, níquel, platino, renio, molibdeno, tungsteno, y paladio. Estos metales pueden ser manufacturados como polvos finos metálicos o bimetálicos. Otros ejemplos de catalizadores de hidrocraqueo son NiMo , CoMo y CoW . Ejemplos de catalizadores de hidrotratamiento son Ni , Co , Pt , y Re .

Hay varias configuraciones las cuales pueden ser empleadas para un electrodo catalítico, este puede comprender un metal de base no-catalítica (Ej: Acero

Inoxidable) con un catalizador metálico o bimetálico depositado sobre la superficie del electrodo como nanopartículas discretas para hidrocrackeo o hidrotratamiento de los materiales de alimento al reactor.

Alternativamente dos diferentes catalizadores metálicos pueden ser depositados sobre la superficie del electrodo como discretas nanopartículas para sucesivos hidrocrackeos e hidrotratamientos catalíticos de los materiales de alimento. Por ejemplo el electrodo puede ser fabricado de Co o Ni, y el segundo metal tal como Mo, W o Pt, es depositado sobre la superficie del electrodo igualmente como nanopartículas discretas.

Un tubo de entrada de gas interno (44) es suministrado para alimentar gas que contiene oxígeno al lado del cátodo poroso del tubo de membrana electrolítica (34), este tubo (44) está rodeado por una multitud de elementos de calentamiento eléctrico (46) para mantener el oxígeno a la condición de temperatura deseada.

La Figura 15 muestra un reactor químico usado para la conversión de gas a líquido, este reactor incluye componentes similares a los mencionados anteriormente, la diferencia con este radica en la utilización de un catalizador de lecho empacado (70), el cual está ubicado dentro del pasadizo (24), este catalizador puede ser opcionalmente usado en el reactor para incrementar la eficiencia de conversión y para controlar el tipo de productos que el reactor entrega. Los materiales apropiados para este son iguales a los usados en electrodo catalítico interno (22). Este catalizador puede comprender una zona catalítica simple, la cual incluye un solo componente catalítico para hidrocrackeo o hidrotratamiento del hidrocarburo alimentado; o puede comprender una doble zona, la cual incluye componentes catalíticos alternados para sucesivos hidrocrackeos o hidrotratamientos.

Los radicales libres formados aquí, se desplazan hacia el pasadizo anular (54) y en alta proximidad y dentro del ánodo (38). El electrodo cilíndrico (20) preferiblemente se extiende más allá del final del electrodo central (22) para permitir la generación de arcos y radicales más allá de este electrodo dentro del pasadizo (54). Específicamente una mezcla que contiene oxígeno, tal como aire, O₂, o combinaciones de estas, es convertida a aniones de oxígeno en el cátodo poroso y estos son electroquímicamente transportados a través del tubo de membrana electrolítica y descargados dentro y a través del ánodo poroso. Por lo tanto, las especies que contienen oxígeno altamente reactivo capaz de reaccionar con radicales de hidrocarburos y otras especies activadas, forman productos líquidos, tales como metanol, gasolina, diesel u otros productos combustibles, estos fluyen del segundo pasadizo (56) a través de la salida de producto (58).

El reactor químico # 2 (Figura 15) cuenta con los siguientes componentes:

- ❖ Celda de plasma de descarga de barrera dieléctrica (12).
- ❖ Celda electroquímica de óxido sólido (14).
- ❖ Capa externa a (17a).
- ❖ Capa externa b (17b).
- ❖ Electrodo externo (20).
- ❖ Electrodo interno (22).
- ❖ Suministro de corriente alterna (23).
- ❖ Pasadizo (24).
- ❖ Tubo soporte (26).
- ❖ Entrada de gas de alimento (30).
- ❖ Tubo de membrana electrolítica (34).
- ❖ Final interior del tubo de membrana electrolítica (35a).
- ❖ Final exterior del tubo de membrana electrolítica (35b).
- ❖ Cátodo poroso (36).
- ❖ Ánodo poroso (38).

- ❖ Generador de fuerza electro-motriz (40).
- ❖ Tubo de entrada de O₂ (44).
- ❖ Elementos de calentamiento eléctrico (46).
- ❖ Pasadizo anular [entre (12) y (14)] (54).
- ❖ Pasadizo para salida de productos de reacción (56).
- ❖ Salida de productos de reacción (58).
- ❖ Catalizador de lecho empacado (70)

La tasa de oxidantes suministrada al ánodo poroso puede ser controlada por el generador (40) (controlando el suministro de energía para regular el voltaje y la corriente) el cual controla el exceso de electrones fuera del ánodo.

Debido a que la cantidad de radicales oxidantes suministrados al ánodo, una alta tasa de flujo de metano puede ser alcanzada, ya que el sistema no está limitado por tiempos de residencia o disponibilidad de oxígeno, ya que el oxígeno reactivo es generado por mecanismos puramente electroquímicos o por combinación de mecanismos electroquímicos y electrocatalíticos. La operación a temperatura ambiente de la celda de descarga previene la formación de carbón sólido durante la descarga debido a que la extracción completa de hidrógeno de los hidrocarburos no es fomentada, debido a esto hay un mejoramiento en la eficiencia del mejoramiento de la formación de líquidos combustibles.

El proceso antes mencionado produce productos primarios de gasolina y combustible diesel y en menor cantidad productos oxigenados tales como alcohol.

En la Figura 16 se ilustra un reactor químico para transformar gas a líquidos hidrocarburos, que incluye componentes similares a aquellos discutidos anteriormente en el reactor químico 1, excepto que este reactor está adaptado para ser usado con una fuente de luz ultravioleta (UV) (82).

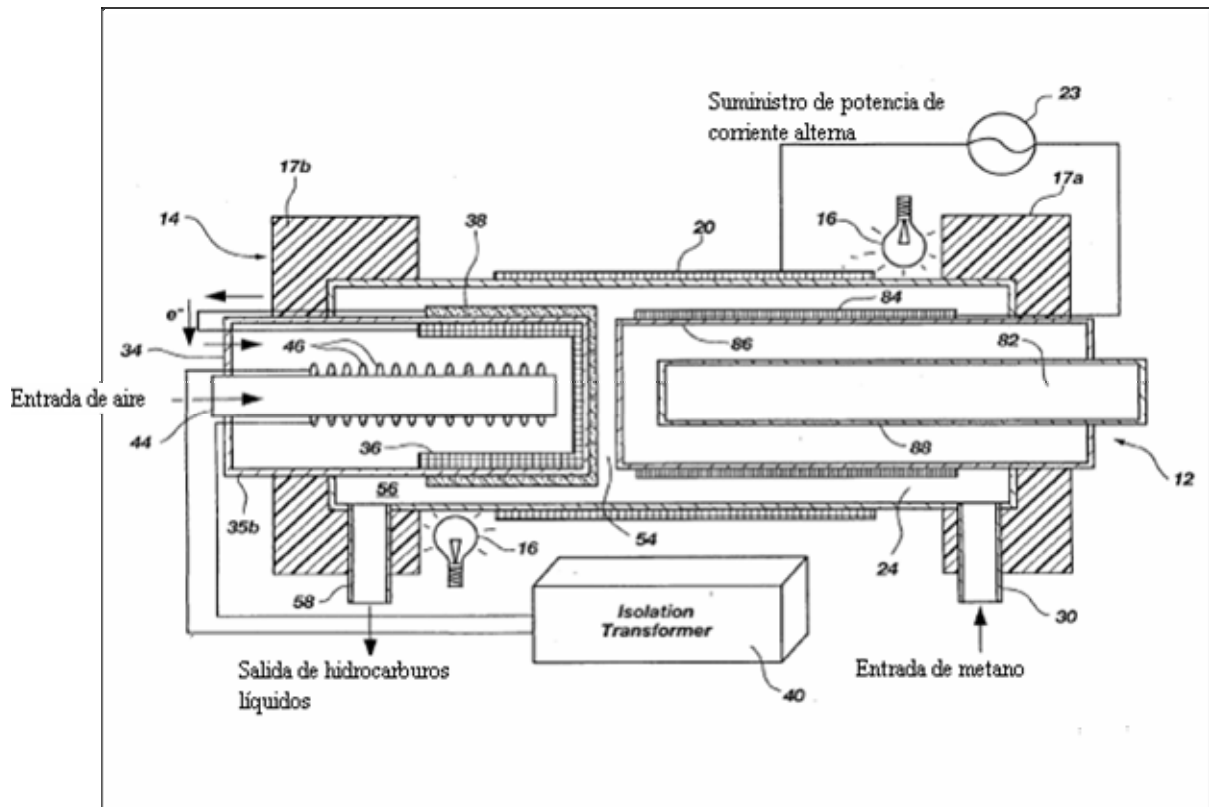
El reactor químico # 3 (Figura 16) cuenta con los siguientes componentes:

- ❖ Celda de plasma de descarga de barrera dieléctrica (12).
- ❖ Celda electroquímica de óxido sólido (14).
- ❖ Capa externa a (17a).
- ❖ Capa externa b (17b).
- ❖ Electrodo externo (20).
- ❖ Electrodo interno (22).
- ❖ Suministro de corriente alterna (23).
- ❖ Pasadizo (24).
- ❖ Tubo soporte (26).
- ❖ Entrada de gas de alimento (30).
- ❖ Tubo de membrana electrolítica (34).
- ❖ Final interior del tubo de membrana electrolítica (35a).
- ❖ Final exterior del tubo de membrana electrolítica (35b).
- ❖ Cátodo poroso (36).
- ❖ Ánodo poroso (38).
- ❖ Generador de fuerza electro-motriz (40).
- ❖ Tubo de entrada de O₂ (44).
- ❖ Elementos de calentamiento eléctrico (46).
- ❖ Pasadizo anular [entre (12) y (14)] (54).
- ❖ Pasadizo para salida de productos de reacción (56).
- ❖ Salida de productos de reacción (58).
- ❖ Fuente de luz ultravioleta (UV) (82).
- ❖ Electrodo (84).
- ❖ Cubierta (88).

La Figura 17, muestra un reactor que puede ser proveído de una o más fuentes de luz UV (16), las cuales pueden ser situadas afuera del reactor, teniendo en cuenta que la cubierta del reactor sea transparente, de tal forma que la luz UV pueda ser

transmitida desde afuera hacia adentro del reactor. Esta configuración de fuente de luz externa puede ser usada en cambio o en combinación con la fuente de luz (82), que se encuentra dentro del electrodo (84). Este reactor esta compuesto básicamente por los mismos componentes del reactor químico # 3.

Figura 17. Reactor químico # 4.

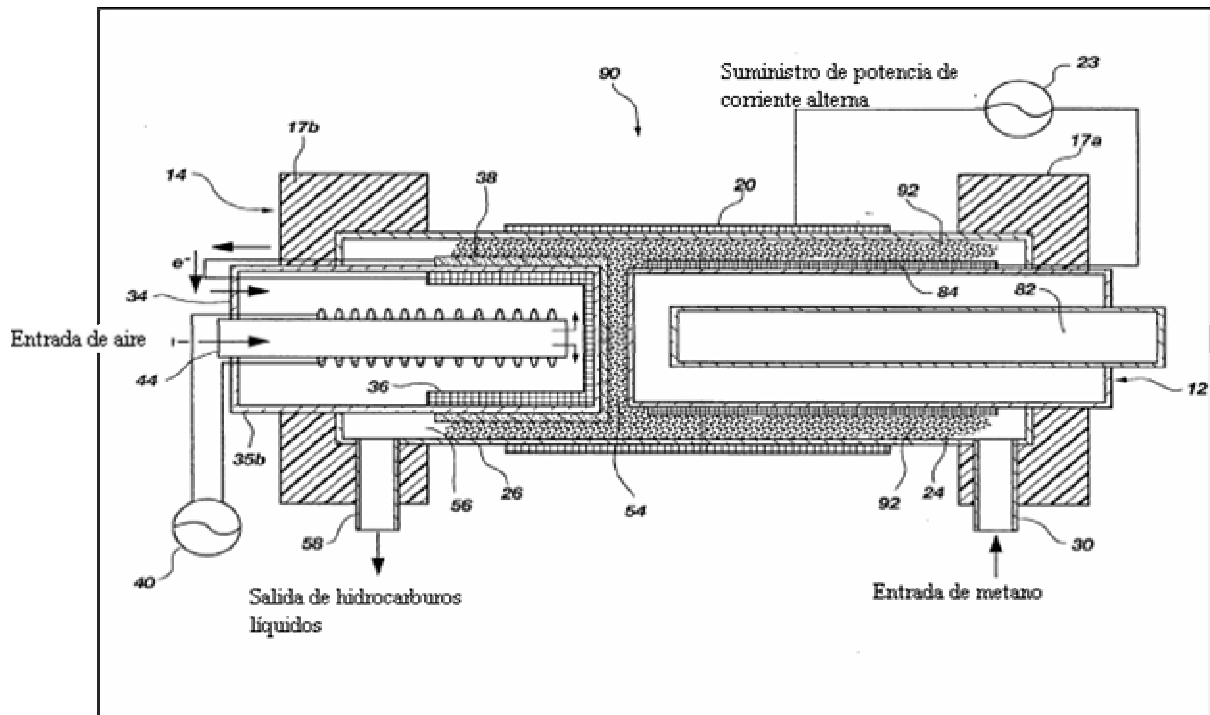


La Figura 18, muestra un reactor que incluye esencialmente los mismos componentes del reactor # 3, pero además de esto incluye un catalizador de lecho empacado, dispuesto dentro del pasadizo (24), (54) y (56), tal como se puede ver en las Figuras 18 y 19; este lecho puede ser utilizado para controlar el tipo de productos entregados por los reactores.

Durante la operación de los reactores químicos # 4, 5 o 6, la fuente de luz ultravioleta (82) se transmite a través del electrodo (84) dentro del pasadizo (24) y

a través de la cubierta y estructura de la cubierta; esta luz mejora el nivel de energía del plasma en el pasadizo, la cual está típicamente por debajo de la presión atmosférica; simultáneamente esta luz UV también excita la adhesión molecular de los reactantes y mas completamente craquea los reactantes a fragmentos moleculares mas pequeños; esta alta energía del estado del plasma y la luz UV activan el metano mas efectivamente y generan hidrocarburos y radicales de hidrogeno de concentraciones altas. La luz UV también mejora la función de la celda electroquímica de oxido sólido permitiendo una producción mas eficiente de radicales de oxigeno.

Figura 18. Reactor químico # 5.



Los reactores químicos # 4 y # 5 y # 6 cuentan con los mismos componentes del reactor químico # 3, con las modificaciones en las siguientes partes:

- ❖ Pasadizo anular [entre (12) y (14)]. (Con catalizador de lecho empacado en reactor químico # 5 y #6) (54).

CONCLUSIONES

- ❖ Las tecnologías del plasma para la industria del gas natural esta todavía en su infancia; por lo tanto, el gobierno y la industria deben invertir significativas cantidades de recursos para apoyar la investigación y el desarrollo en pro de mover la tecnología del plasma hacia una escala comercial.
- ❖ La tecnología del plasma es conveniente para aplicar en la industria de los hidrocarburos para el procesamiento del gas natural. La tecnología es de alto riesgo, sin embargo la retribución tecnológica y económica será significativa si la tecnología puede ser desarrollada comercialmente.
- ❖ Teniendo en cuenta que la tecnología para transformar gas natural a líquidos hidrocarburos por medio de plasma No-térmico requiere de pocos equipos, existe la viabilidad de construirlo e instalarlo en un laboratorio; y posteriormente a su instalación hacer las pruebas requeridas para obtener las mejores condiciones de operación del mismo.
- ❖ Con la instalación en laboratorio del reactor químico antes mencionado se podría obtener información de gran importancia para determinar la viabilidad técnica y económica de un proyecto a nivel industrial.
- ❖ El desarrollo de esta tecnología a nivel industrial mantendría al país por un mayor tiempo en una condición de auto-sostenibilidad energética.

RECOMENDACIONES

- ❖ Realizar un proyecto mas profundo de investigación acerca de la tecnología de plasma No-térmico.
- ❖ Realizar proyecto de la instalación en laboratorio de un reactor químico para transformar gas natural a líquidos por medio de plasma No-térmico.
- ❖ Teniendo el reactor químico instalado, hacer las pruebas requeridas para determinar las mejores condiciones de operación y a partir de estas determinar la viabilidad técnica y económica de instalación de este reactor a nivel industrial.

BIBLIOGRAFIA

- ❖ Archila, Jesús; Yubran, Yamil. Estudio de prefactibilidad técnico-económico para la implementación de un proyecto de GTL en Colombia. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 2005
- ❖ BP Statistical Review of World Energy. Londres, Inglaterra. Junio de 2007
- ❖ COLLETT, T.; LEWIS, R.; UCHIDA, T. El creciente interés en los hidratos de gas. Oilfield Review. 2003
- ❖ Eliasson, Baldur; Killer, Eric; Lui, Chang-Jun. Fuel synthesis. Patent Application Publication US 6,375,832 B1. Estados Unidos. Abril de 2002.
- ❖ Fletcher, David E. Production of hydrogen and carbon from natural gas or methane using barrier discharge non-thermal plasma. Patent Application Publication US 2004/0148860 A1. Estados Unidos. Agosto de 2004.
- ❖ Hall, Kenneth R.; Bulling, Jerry A.; Eubank, Philip T. Method for converting natural gas to liquid hydrocarbons. United States Patent 6,130,260. Estados Unidos. Octubre de 2000.
- ❖ Hoard, John W. Power supply for dielectric barrier discharge plasma. United States Patent 6,156,162. Estados Unidos. Diciembre de 2000.
- ❖ Kong, Peter C. Plasma technology for heavy crude oil and natural gas processing. Idaho National Engineering and Environmental Laboratory. Estados Unidos.
- ❖ Kong, Peter C.; Detering, Brent A.; Grandy, Jon D.; Zuck, Larry D. Plasma processing of hydrocarbons. Idaho National Laboratory. Estados Unidos. Mayo de 2005.

- ❖ Kong, Peter C.; Leasing, Paul. Method and apparatus for producing oxygenates from hydrocarbons. United States Patent 5,427,747. Estados Unidos. Junio de 1995.
- ❖ Kong, Peter C.; Leasing, Paul. Method for direct conversion of gaseous hydrocarbons to liquids. Patent Application Publication US 2005/0241994 A1. Estados Unidos. Noviembre de 2005.
- ❖ Kong, Peter C.; Nelson, Lee O.; Detering, Brent A. Nonthermal plasma systems and methods for natural gas and heavy hydrocarbon co-conversion. Patent Application Publication US 2003/0141182 A1. Estados Unidos. Julio de 2003.
- ❖ Pagina de Internet de ECOPETROL. ¿Que es el plan maestro de desarrollo?. Resumen ejecutivo, www.ecopetrol.com.co. 2004.
- ❖ RUIZ, Jairo Palacio; ALGORTA, Santiago. Medio ambiente presiona inversión en refinerías. *Petróleo internacional*. Octubre/Noviembre de 2004.
- ❖ SCHULT, Chistopher; LESEMANN, Markus. Pollution solutions. *Hydrocarbon Engineering*. Mayo de 2004.
- ❖ WATTAS, P. Building Bridges—Fulfilling the Potential for Gas in the 21st Century. Ponencia presentada en el Congreso Mundial del Gas. Tokio, Japón. 3 de junio de 2003.