

# ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN PROYECTO DE GTL EN COLOMBIA

Jesus Archila Castro<sup>1</sup>, Yamil Yubran Tobias<sup>2</sup>, Manuel Cabarcas<sup>3</sup>, Julio Perez Angulo<sup>4</sup>

## RESUMEN

Colombia posee un gran potencial de reservas de gas natural principalmente en la Costa Atlántica, las cuales requieren una alternativa para su desarrollo. Por esta razón se decidió realizar este estudio para analizar la viabilidad de un proyecto de conversión de gas natural a combustibles líquidos - "Gas to Liquid" (GTL), por medio del proceso Fischer-Tropsch; que no solo permitirá monetizar estas reservas, sino que también le permitirá al país entrar a la era de combustibles ultra-limpios, debido a las características de los productos que se obtienen (bajo contenido de azufre y aromáticos).

Para este fin se analizaron cuatro ejes temáticos: Unas generalidades de la tecnología GTL; un estudio de mercado de los productos obtenidos (diesel, nafta y productos especializados) y su mercado; un estudio técnico para determinar el tamaño y la localización de la planta, y el proceso más adecuado para desarrollarse según las condiciones de Colombia; por último un estudio económico donde se define la viabilidad del proyecto mediante parámetros financieros como, tasa interna de retorno, valor presente neto y tiempo de pago de la inversión, para un caso base y diferentes escenarios de precios del gas y del crudo.

## ABSTRACT

Colombia has a great potential of natural gas reserves mainly in the Atlantic Coast, which require an alternative for their development. Therefore it was decided to make this study to analyze the viability of a project of natural gas conversion to liquid fuels «Gas to Liquid» (GTL), by means of the Fischer-Tropsch process; that not only it will allow to value these

<sup>1</sup> Ingeniero de Petróleos. Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga. Colombia.

<sup>2</sup> Ingeniero de Petróleos. Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga. Colombia.

<sup>3</sup> Ingeniero de Petróleos. Centro de Investigación del Gas y del Petróleo (CIGP). Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga. Colombia.

<sup>4</sup> Ingeniero de Petróleos. Director Centro de Investigación del Gas y del Petróleo (CIGP) Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga. Colombia.

reserves, but also that will allow to the country to enter in the era of extreme-clean fuels, due to the characteristics of the products that are obtained (low aromatic and sulfur content).

For this objective four thematic axes were analyzed: generalities of technology GTL; a study of market of obtained products (diesel, gasoline and specialized products) and its market; a technical study to determine the size and the location of the plant, and the process adapted to be developed according to the conditions of Colombia; and finally an economic study where the viability of the project by means of financial parameters is defined, (internal rate of return, value present net and time of payment of the investment) for a different case and scenarios of crude and gas prices.

**Keywords:** Prefactibility, Gas to Liquid, natural gas, Fischer-Tropsch, synthetic gas, refining, gas reserves, marketing, plant, conversion, synthetic combustibles.

## INTRODUCCIÓN

Los combustibles fósiles a nivel mundial seguirán siendo por mucho tiempo la principal fuente de energía del planeta; por un lado las proyecciones del petróleo no son muy optimistas, debido a la disminución de las reservas y a la necesidad de fuentes de energías más limpias. Por su parte el gas natural posee un gran potencial de reservas a nivel mundial, y produce un menor impacto en el ambiente, pero presenta la desventaja que las 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”.

Mediante este artículo se pretende, conocer más a fondo la tecnología GTL, y presentar un estudio de viabilidad de un proyecto de este tipo en Colombia, con las posibles reservas de Gas natural de la Costa Atlántica, buscando de esta manera desarrollarlas, y solucionar en cierta parte el desabastecimiento futuro de combustibles en nuestro país.

## GENERALIDADES

El gas natural ha recorrido un largo camino desde la época en que sólo era un subproducto de la explotación petrolera, una molestia que se eliminaba quemándolo. Ahora, dentro del panorama mundial, se proyecta que el gas natural será el combustible más importante del mundo debido a su abundancia, tanto en yacimientos convencionales como no convencionales (Tabla 1) (BP, 2005), limpieza y diversidad de aplicaciones (Petroleum Economics, 2003). Estas grandes reservas requieren de una alternativa para su monetización, entre las que se encuentran: construcción de gasoductos, Gas Natural Licuado - GNL, Gas Natural Comprimido - GNC, Generación Eléctrica, Producción de Hidrógeno, “Gas to Liquids” – GTL, entre otras; este artículo se basa en esta última alternativa.

**Tecnología Gas-To-Liquids (GTL).** La transformación de gas natural a combustibles líquidos ultra limpios – GTL, es un proceso de pasos múltiples (Figura 1), que involucra procesos catalíticos, en algunos casos con una gran liberación de energía, que separa las moléculas de gas natural (predominantemente metano) para formar una mezcla gaseosa de hidrogeno y monóxido de carbono la cual es

denominada gas de síntesis (syngas), y las vuelve a unir para dar lugar a moléculas más largas, debido al reacomodo de las moléculas de hidrógeno y carbono (Ramirez, 2003). Los tres pasos fundamentales de la tecnología GTL, mediante el proceso Fischer Tropsch, se describen a continuación:

1. *Generación del gas de síntesis – syngas.* El gas de síntesis (syngas) es una mezcla de hidrógeno ( $H_2$ ) y monóxido de carbono (CO) producida a partir del gas natural (carbón, petróleo, coke o biomasa). Actualmente existe una gran variedad de procesos entre los que se destacan, reformado de vapor, oxidación parcial, reformado de  $CO_2$ , reformado auto-térmico, y plasma; la diferencia principal entre estos procesos es la fracción de  $H_2/CO$  que se obtiene, además, difieren en condiciones de operación, catalizadores, entre otros (Tabla 2).

2. *Síntesis de Fischer-Tropsch (FT).* En esta etapa el syngas es convertido por medio de un catalizador de cobalto o hierro, a crudo sintético siguiendo la reacción de Fischer-Tropsch, que se muestra en la ecuación 1:



Los productos obtenidos dependen en gran forma de la composición del gas de síntesis, del tipo de catalizador utilizado, tipo de reactor, las condiciones de operación y el procesamiento final de la mezcla obtenida en esta etapa. Si las condiciones de temperatura son bajas (473 – 513 K) se obtiene principalmente diesel, y si son altas (573 – 623 K) 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 1 – 1.5 MPa (Jager, 2003). Siendo más utilizados los reactores a baja temperatura con lechos de burbujeo en tres fases, denominados fase slurry.

3. *Mejoramiento del producto.* La última etapa es la unidad de mejoramiento del producto, en la cual se utiliza un hidrocraqueador, a un costo menor comparado con una refinería convencional, debido a la calidad de las cadenas largas de hidrocarburos. En este proceso se consume una pequeña cantidad de  $H_2$  y se produce una pequeña cantidad de gas. En esta instancia las ceras obtenidas de la etapa anterior se convierten en los productos finales como: nafta, diesel y lubricantes, para luego ser comercializados en mercados internacionales o locales.

Además de las etapas nombradas anteriormente existen una serie de sistemas adicionales. Estos incluyen el tratamiento del agua contaminada; los sistemas de tuberías que se encargan del alto flujo de calor de las unidades de procesamiento de hidrocarburos y el flujo de las unidades de procesamiento del gas; sistemas de bombeo; sistemas de calentamiento para lograr que el hidrocarburo llegue a su punto de burbuja durante la etapa de destilación; tanques de almacenamiento y sistemas de carga de productos y la generación de energía eléctrica que es el sistema adicional más importante (Clarke, 2003).

**Evolución Histórica del Proceso FT.** Después de la primera guerra mundial las sanciones económicas impuestas obligaron a los científicos alemanes a buscar nuevas alternativas para obtener combustibles líquidos, aprovechando las abundantes reservas de carbón del país; es así como en 1923, Franz Fischer y Hanz Tropsch, desarrollaron un método que permitía convertir el metano obtenido de calentar carbón, en combustible diesel de alta calidad, aceites lubricantes y ceras. Para 1945 las compañías químicas alemanas habían construido 9 plantas utilizando el proceso FT (alcanzando una producción de 3.8 millones de  $m^3$  de combustible sintético en el período de 1939-1945 (Stranges, 2003)). Luego de la segunda

guerra mundial países industrializados como Japón y Estados Unidos, comenzaron a evaluar la eficiencia del proceso a diferentes condiciones. En 1950, el gobierno sudafricano crea la empresa estatal Sasol, y más tarde en 1955, inician operaciones en un complejo de combustibles sintéticos de 1,272 m<sup>3</sup> por día en Johannesburgo, convirtiendo bajos bloques locales de carbón en gasolina y diesel sintético. Y más tarde en 1980 se construiría la planta de combustibles sintéticos a partir de carbón más grande del mundo con una capacidad de 23,848 m<sup>3</sup> por día, denominada SECUNDA. Debido a las consecuencias de la crisis internacional de petróleo en 1973 y la revolución Irán de 1979, resurgieron las tecnologías de conversión basadas en gas natural, guardadas momentáneamente en laboratorios de investigación de algunas de las principales compañías, primordialmente de energía, incluyendo BP, ExxonMobil, Shell y Texaco.

**Economía de Proyectos de GTL.** En este tipo de proyectos se aplica la regla de 1:10, lo cual significa que 0.028 Tm<sup>3</sup> (un tera pie cúbico) de reservas de gas durante 25 años producirá 1589,87 m<sup>3</sup> por día [10,000 barriles por día] de combustibles ultra-limpios. Según estudios de factibilidad que se han desarrollado, la inversión es muy dependiente del tamaño de la planta. Además se debe tener en cuenta que este tipo de proyectos son rentables siempre y cuando el precio del petróleo por barril se encuentre entre 15 y 20 dólares (Holmes, 2004). Desde el punto de vista de inversión, la generación del gas de síntesis es el responsable de cerca del 50% del costo de la planta en algunos casos, teniendo en cuenta el requerimiento de una planta separadora de aire; la síntesis de Fischer-Tropsch (FT), requiere cerca del 15% de la inversión; la etapa de mejoramiento del producto requiere un 10% del capital, los sistemas adicionales como generación de energía y la infraestructura necesarias tiene una inversión de aproximadamente 25%.

## ESTUDIO DE MERCADO

Los productos líquidos obtenidos mediante la tecnología GTL utilizando el proceso Fischer Tropsch tienen significantes beneficios con el ambiente, ya que disminuyen las emisiones de componentes contaminantes producidos por los automotores. Además comparados con los productos destilados de una refinería convencional poseen: mayor fracción de hidrogeno a carbón (H:C), lo que significa que se disminuyen las emisiones de material particulado y óxidos de nitrógeno (NOx); menor cantidad de azufre y aromáticos, lo cual disminuye de gran manera las emisiones, no sólo de material particulado sino también de sulfuros, principales generadores de la lluvia ácida.

**Descripción de Productos FT y su Mercado Internacional.** En la tabla 3, se presentan los principales productos FT y el mercado al cual van dirigidos, y se describen a continuación.

*Diesel.* El diesel GTL se puede obtener en una planta de este tipo hasta en un 70%. Este es incoloro, inodoro, y de baja toxicidad, posee un contenido de azufre menor al 5% y aromáticos menor al 1%, posee un número de cetano mayor de 70, comparado con las especificaciones del diesel convencional de aproximadamente 50. Por las características del diesel GTL, este se convierte en un producto con un amplio mercado internacional, ya que presenta mejores especificaciones de calidad, y menor descarga en emisiones de partículas contaminantes.

La demanda de diesel es de unos 14 millones b/d y se proyecta un ritmo de crecimiento del 4% durante los próximos años, Con base en lo anterior, se espera que la demanda de diesel para el año 2010 exceda los 16.2 millones b/d. A diferencia de los otros derivados del petróleo, el mercado del Diesel europeo es más grande que el mercado de Estados Unidos, este mercado cuenta con aproximadamente el 42 % del parque

automotor, esto debido principalmente a que los consumidores Europeos entienden completamente los beneficios del diesel y toman ventaja de incentivos arancelarios y de prestaciones económicas. La demanda en los países de Europa Occidental se estima en 3.5 millones b/d; seguida de Europa se encuentra la región del Pacífico asiático con una demanda de 3 millones b/d y posteriormente por Norte América con 2.8 millones b/d (SasolChevron, 2003).

*Nafta.* La nafta es el segundo producto en cantidad que se produce en una planta GTL y varía entre el 15 y el 25% de la producción total, dependiendo del tipo de proceso que se utilice. Este producto es de muy alta calidad y altamente parafínico; pero con la desventaja que presenta un bajo octanaje y por lo tanto no es adecuado para abastecer motores a gasolina, pero por otra parte es ideal como alimento para la manufactura de etileno y parafina natural. La nafta GTL posee un octanaje (ROM) de 40, mucho menor que el octanaje de la gasolina convencional de 83.

La demanda mundial de Nafta se estima en 5.4 MM b/d, de los cuales 2.4 MM b/d, corresponden a la demanda Asiática, en donde Japón se constituye en uno de los principales consumidores de este producto, con un consumo de 620,000 b/d, teniendo que importar para abastecer su demanda cerca de 500,000 b/d (SasolChevron, 2003).

*Productos Especializados.* Una planta de GTL también puede producir un rango especializado de productos, tales como parafinas normales, ceras y lubricantes base aceite.

En cuanto a los lubricantes, su demanda se proyecta en 850,000 b/d en el 2010. Además se estima que la capacidad de procesamiento de bases de ceras tenga un buen crecimiento, más allá de la demanda actual que se estima en unos 250,000 b/d por día. Debido a que este

mercado es muy pequeño y una planta de GTL a gran escala puede producir un 30% de este producto de su capacidad total, esto generará un gran impacto en el mercado mundial, en el orden del 12%. Por su parte, El mercado global de las ceras está alrededor de 70,000 b/d, de los cuales la mitad la utilizan para obtener ceras de alta calidad. El mercado más grande es el Asiático con el 35 al 40% de la demanda mundial, seguido por los Estados Unidos que está entre el 25 y el 30% (Rahmim, 2005).

**Mercado Nacional.** Según el esquema actual de producción, ECOPETROL se verá obligado a comprar crudo a sus socios para el año 2009 para cargar sus refinerías (Ecopetrol, 2003). Según la Asociación Colombiana del Petróleo (ACP), el consumo de diesel durante el primer semestre del año 2005 aumentó 11,9 %, siendo el de mayor crecimiento dentro del segmento de combustibles. Mientras que el consumo de gasolina (corriente y extra) continúa bajando en cerca de 1,5 % y además posee el 46% del mercado, mientras que el diesel el 37% de los combustibles y con tendencia a seguir creciendo. La demanda del diesel se proyecta en aumento, especialmente en el sector del transporte de carga intermunicipal, seguido por transporte de Carga Urbana.

**Oferta de Productos FT.** En la actualidad existen tres grandes complejos a nivel mundial, que utilizan la tecnología Fischer-Tropsch, presentando una producción total de 200,000 b/d (Figura 2); y también existen dos plantas comerciales que se encuentran en construcción, cada una con una capacidad estimada de 34,000 b/d a partir de gas natural; una ubicada en Nigeria y construida por la compañía SasolChevron, y la otra situada en Qatar, y construida por la unión de las compañías Sasol y Qatar Petroleum. Además, existen una serie de plantas de demostración alrededor del mundo.

En general son muchas las compañías y los países que se encuentran interesados en proyectos de esta envergadura, y por lo tanto son numerosos los proyectos que se tienen vislumbrados, de los cuales unos ya se encuentran en sus etapas de factibilidad por parte de empresas como Shell, ConocoPhillips, ChevronSasol, Syntroleum, entre otras (Figura 3). Siendo como principal país, Qatar, que será la capital mundial del GTL en los próximos años.

**Balance Oferta Demanda.** Como primera medida el mercado de las ceras FT de alta calidad es bastante reducido y se proyecta a ser cubierto con la producción de las plantas GTL de propiedad de las compañías Sasol, Shell y ExxonMobil que se construirán en el futuro; para el caso de los lubricantes el mercado es también reducido, sumado a esto el predominante uso en Suramérica de lubricantes monogrado, en vehículos viejos. Por otra parte el mercado del diesel, presenta proyecciones de crecimiento en la demanda tanto nacional como internacional, y gran potencial debido a sus características de calidad; en el caso de las parafinas, presentan gran demanda como alimento de refinamiento. Por todo esto, se recomienda la selección del proceso que permita una producción máxima de diesel y de parafinas, para el proyecto GTL Colombia que se propone.

**Canales de Distribución.** Estados Unidos y Europa son los mercados potenciales para el diesel, pero este último al encontrarse a una gran distancia de Colombia y por ser el mercado objetivo de los grandes proyectos en Qatar y Nigeria, representaría un potencial inferior al de Estados Unidos, para este proyecto. Por otro lado el mercado de las naftas y productos especializados estaría dirigido a países del pacífico Asiático, como Japón y China; destacando que los proyectos GTL que se localizarán en Australia, no representarían una competencia fuerte, debido a que las capacidades proyectadas son muy

inferiores al mercado de estas regiones. En cuanto al mercado interno colombiano, las zonas objetivos para la comercialización del diesel GTL, serían las grandes capitales donde se concentra la mayor contaminación y demanda, dirigidos especialmente a sistemas de transporte masivo.

**Precios.** En un proyecto de GTL, tanto el precio de venta en el mercado de los productos obtenidos, como el precio del Gas Natural, tienen una importancia significativa en su viabilidad. Las oportunidades reales de factibilidad económica de este tipo de proyectos siempre han estado influenciadas por los precios del gas natural (Tabla 4). En el caso de Colombia y debido a la regulada estructura que existe actualmente, no es difícil predecir el comportamiento de los precios del gas natural en boca de pozo, el cual para las principales zonas del país se proyecta para los próximos años en 1.5 \$US/MMBTU, por tal razón, un proyecto GTL en Colombia estaría limitado a uno de gran escala, además de que se necesitaría que el gobierno muestre buena disposición en materia tributaria y en apoyo económico, o que las empresas que en el futuro posean la reservas de gas natural tomen la decisión de monetizar directamente estas, sin necesidad de que exista otra empresa que opere la planta de GTL.

El panorama actual de los altos precios del crudo permitirá el desarrollo de proyectos GTL. Según analistas internacionales se espera que el precio del petróleo esté por encima de los 30 \$US/b (Garis, 2003), a este precio los proyectos de GTL podrían alcanzar una tasa interna de retorno (TIR) de por lo menos un 15% para el caso más pesimista (Burke, 2003). Los productos Fischer-Tropsch por su alta calidad serán comercializados a precios más elevados que los productos de una refinería convencional de crudo. Por ejemplo para el precio de venta del diesel de bajo contenido de azufre de una refinería, su precio de venta se encuentra entre 6

y 8 dólares por encima del precio del crudo, por su parte el diesel GTL puede ser comercializado entre 8 y 11 dólares por encima del precio del crudo (AL-Saadoon, 2005). Los lubricantes FT pueden ser vendidos entre 20 y 25 dólares por encima del precio del barril de crudo, las ceras entre 30 y 35 dólares, y las naftas petroquímicas entre 10 y 12 dólares por encima del precio del crudo, según las principales ciudades del mundo (ChevronSasol, 2005).

## ESTUDIO TÉCNICO

El estudio técnico permitirá determinar, aspectos de gran trascendencia en el desarrollo de un proyecto de esta envergadura, tales como la determinación del tamaño, localización y selección de la tecnología más adecuada para la planta; buscando que todos estos factores, sean consecuentes con el comportamiento del mercado y las restricciones de orden financiero, en los que un proyecto GTL, se encuentra enmarcado.

**Tamaño de la Planta GTL.** Para su determinación, es necesario tener en cuenta diversos aspectos como: materia prima, mercado de los productos, costos y tendencia tecnológica, lo que impone un alto grado de complejidad.

*Demanda del Mercado.* En el mercado nacional, actualmente se están importando alrededor de 4,000 b/d de combustible diesel; con el aumento de la capacidad de la refinería de Cartagena en 70,000 b/d, se supliría la demanda de este combustible, desde la puesta en marcha del Plan Maestro hasta aproximadamente el 2012, año en el cual la demanda llegará a 100,000 b/d (Zamora, 2004); a partir de este momento, la capacidad de refinación del país no alcanzará para abastecer la demanda interna de este combustible. Según proyecciones de la Agencia Nacional de Hidrocarburos para el 2015 la

demanda de diesel será de 110,000 b/d y de 130,000 b/d para el 2020; lo cual evidencia una demanda por cubrir de 30,000 b/d a esta fecha, parte de la cual se podría suplir con diesel GTL mezclado con el diesel convencional. En cuanto a la demanda internacional, el mercado de estos productos es bastante grande, y la capacidad de producción proyectada al 2020 de las plantas de GTL, de 2 millones de b/d, no alcanzaría a suplir ni el 2% de la demanda potencial de este combustible (Mcneillie, 2001). Con base en lo anterior la capacidad inicial planteada podría estar alrededor de los 50,000 b/d, para suplir en gran parte el desabastecimiento proyectado para el país.

*Disponibilidad de Reservas de Gas Natural en Colombia.* Teniendo en cuenta la disponibilidad de materia prima, existen actualmente en Colombia 2,3 TPC de gas natural, sin ningún esquema de comercialización, ubicados en el interior del país, principalmente en los campos de Cusiana y Cupiagua, y de los cuales 1 TPC sería consumido en la operación propia de los campos; con esto, sólo habría disponibilidad de aproximadamente 1 TPC, lo cual limitaría el tamaño de la planta a 10.000 b/d, dejando al país en un desabastecimiento futuro de gas natural según las proyecciones de consumo, que para el año 2010 será de 800 MMPCD (UPME, 2002); sin embargo, con la gran tendencia hacia la exploración en la Costa Atlántica, por parte de Ecopetrol, ExxonMobil y Petrobrás, se prospecta un potencial de reservas de gas natural en esta zona, alrededor de los 40 TPC (Ecopetrol, 2004). Este potencial de reservas permitiría el desarrollo de un proyecto GTL, a gran escala, el cual podría ser de la capacidad planteada en el factor anterior de 50.000 b/d, con la utilización de 5 TPC de reservas, y un alimento a la planta de 500 MMPCD de gas natural.

*Costos de Inversión.* La tendencia mundial en la tecnología GTL, por parte de las compañías

multinacionales, presenta la construcción de plantas a gran escala, debido a los altos costos de inversión requeridos por barril producido (figura 4). Los costos han evolucionado mucho y actualmente los costos de inversión (CAPEX) en una planta GTL pueden estar entre 20,000 y 40,000 dólares por barril producido diariamente, que depende de la capacidad de la planta.

*Tecnología.* La capacidad de los reactores en la actualidad, se encuentran entre 15,000 y 25,000 b/d los cuales se construyen en paralelo y permiten la configuración de plantas a gran escala. Esta capacidad, ha evolucionado en los últimos 10 años especialmente en las empresas Sasol y ExxonMobil; por lo tanto desde el punto de vista tecnológico la construcción de una planta a gran escala (>50,000 b/d), no representa una limitante.

**Descripción General del Proceso.** El proceso AGC-21 es el resultado de la unión de varios procesos individuales que han sido distribuidos de forma que permitan la mayor eficiencia posible al menor costo (figura 5). En la unidad de separación de aire se obtiene el oxígeno necesario para el reformado auto térmico donde reacciona con el gas natural y vapor, luego el syngas obtenido es enfriado con agua y aire para extraerle los condensados, la corriente obtenida es calentada para entrar al reactor Fischer-Tropsch, el cual posee un sistema de control de temperatura por medio de un serpentín interno alimentado con agua. La corriente gaseosa producida del reactor FT es enfriada para recuperar los condensados (hidrocarburos líquidos y agua) del gas natural, este gas es utilizado como combustible en la planta, recirculado al ATR y como alimento a la planta de hidrogeno. La corriente líquida del reactor FT (principalmente ceras) y los hidrocarburos condensados de la corriente gaseosa se llevan a la unidad de refinación para producir los productos comerciales.

## ESTUDIO ECONÓMICO

El análisis económico se realizó con las siguientes suposiciones: El gas entra a la planta con las características necesarias para el reformado auto-térmico; El costo del gas puesto en la planta se asume de 0.75 \$US/MMBTU con un poder calorífico de 1,000 BTU/PC; el OPEX representa el 7% del CAPEX, con una corrección anual por inflación del 6.8%; impuesto de renta es 38.5%; el tiempo de vida útil del proyecto es de 23 años desde el inicio del desembolso para la construcción de la planta; la construcción de la planta dura 3 años y los 20 siguientes son de producción; la depreciación es a 20 años en línea recta, con valor de salvamento cero; el precio de venta de los productos se supone 10 dólares por encima del precio de WTI, tomando como referencia \$US30/b; los productos obtenidos de la planta son los siguientes: 35,000 b/d de diesel; 10,000 de naftas; 5,000 b/d de ceras. Se tomará el mismo precio de venta para todos los productos; la tasa de oportunidad del inversionista es del 15%.

Los costos de inversión totales para la construcción de la planta son aproximadamente de \$US 1,140 millones (Tabla 5) (Regan, 2005), teniendo en cuenta infraestructura de la planta, obras civiles, instalaciones eléctricas y otros; lo que representaría un costo de inversión (CAPEX) de \$US 22,800 por barril producido diariamente .

**Evaluación Financiera.** Una vez realizados los cálculos correspondientes al flujo de caja del proyecto, se obtuvieron los siguientes resultados:

*Valor Presente Neto (VPN).* Con los cálculos realizados, se obtuvo que el VPN del proyecto base sería de \$US 192 millones, al ser mayor

que cero implica que la tasa de rendimiento del proyecto, es mayor que la tasa de oportunidad del inversionista, por lo cual este proyecto es atractivo.

*Tasa Interna de Retorno (TIR).* Este representa la tasa a la cual rendirá el proyecto. Para el caso base planteado se reporta un TIR del 17.3 %; el cual evidentemente es mayor que la tasa de oportunidad del inversionista que se supuso.

*Tiempo de pago de la inversión (pay back).* La inversión para el caso base se pagará 3 años y medio después de iniciada la producción (6,5 años después de realizar la primera inversión), el cual corresponde a un periodo bastante corto tratándose de proyectos de este tipo.

## CONCLUSIONES

La tecnología más importante en este proceso es a baja temperatura, con la utilización de reactores fase Slurry, y el reformado auto - térmico para la obtención del syngas.

A nivel internacional, Estados Unidos tiene el mejor mercado para el diesel; por su parte el mercado de las naftas petroquímicas se compone principalmente de los países asiáticos; el mercado de las ceras y lubricantes, es bastante reducido, y la demanda futura será abastecida por los proyectos existentes.

A nivel nacional, las grandes ciudades como Bogotá, Cali, Medellín y Barranquilla corresponden al mercado interno de diesel.

El proceso analizado está orientado a la producción de diesel en un 70%, seguido por las naftas y en menor proporción para las ceras.

El proceso a utilizar es el AGC-21 de ExxonMobil, debido a que posee mayor capacidad de reactores, un mayor rendimiento de los productos y además, es la empresa encargada de explotar las reservas de gas de esta zona, si se descubren.

## REFERENCIAS

- Al-Saadoon. Economics of GTL Plants. *SPE 9438*, Texas (April 3–5, 2005).
- BP Statistical Review of World Energy. Londres, Inglaterra. Junio, 2005.
- Briceño, Jesús. GTL Project feasibility for PDVSA gas. Raytheon, Inc. Marzo de 1999.
- Burke, B. Viable GTL in volatile market. *Hydrocarbon Engineering*. (September 2003). Pag. 22.
- ChevronSasol. GTL Products. *5<sup>th</sup> conferencia de GTL*, Doha, Qatar. (Febrero 27, 2005).
- Clarke, S. and Ghaemmaghami, B. Tacking GTL forward—engineering a gas—to—liquid projects. *Paper publicado en www.tcetoday.com*. (Julio, 2003).
- ECOPETROL, *Carta Petrolera*. (Septiembre, 2004); Págs. 33-35
- Fundamentals of Gas to Liquids. Petroleum Economics. Londres, Inglaterra. 2003.
- GARIS, D; OHADI, M. Oil Price Increases and the Energy Industry: What Role for the Majors?. *SPE 93755*. Barhain, Barhain. Marzo de 2005.
- HOLMES, J. GTL: Exploting Remote Gas Discoveries, presented at Howard Weil Energy Conference. Marzo de 2004.
- JAGER, B. Fischer-Tropsch Reactors. paper presentado a AIChE Meeting. New Orleans, USA. 31 Marzo – 4 Abril. 2003.
- MCNEILLIE, Graham. Looking to the Future - BP Amoco's Gas-to-Market Outlook. *SPE 68149*. Bahrain, Marzo de 2001.
- RAHMIM, Iraj. GTL Prospects. *Oil and Gas Journal*. Marzo de 2005.
- RAHMIM, Iraj. Gas-to-liquid Technologies: Recent Advances, Economics, Prospects. E-Metaventure Inc. Texas, USA. 2003.

RAMÍREZ, A. Gas to Liquids (GTL), an Overview. Ingeniería Química, Achema Especial. 2003.

REGAN, Tony. TriZen Internacional. Junio de 2005.

SasolChevron. GTL products: changing paradigms meeting market challenges. Doha, Qatar. 2003.

STRANGES, A. Germany's Synthetic Fuel Industry 1927-45. Paper Presented at the AIChE 2003 Spring National Meeting. New Orleans, USA. Marzo 30- Abril 3. 2003.

TYSON, Steven. Qatar GTL projects. ExxonMobil Development Company. Junio de 2005.

Unidad de planeación Minero Energetica, UPME. Cadena del gas natural 2002.

WAPLES, D. Breaking Paradigms in Colombian Oil and Gas Exploration. Oil and gas investment, ANH. Cartagena, Colombia. Mayo de 2005.

ZAMORA, A. Elementos de un Plan de Acción de Abastecimiento de Hidrocarburos, Derivados y Productos. Agencia Nacional de Hidrocarburos. Diciembre de 2004.

**Tabla 1.** Reservas Totales de Gas natural

Depósitos Convencionales			Depósitos No Convencionales		
<b>Probadas</b>	<b>Potenciales</b>	<b>Sin Compromiso</b>	<b>Hidratos</b>	<b>Gas asociado al Carbón</b>	<b>Litologías Estrechas</b>
176 (Tm <sup>3</sup> )	368 (Tm <sup>3</sup> )	56 (Tm <sup>3</sup> )	19,800 (Tm <sup>3</sup> )	84260 (Tm <sup>3</sup> )	113 (Tm <sup>3</sup> )

**Tabla 2.** Principales procesos para la obtención del gas de síntesis

PROCESO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
REFORMADO DE VAPOR (SR) $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$	Catalizadores de Ni y Al a bajas Temperaturas. Al separar el $\text{H}_2$ en exceso del gas de síntesis (Syngas) puede ser comercializado.	Alta fracción de $\text{H}_2/\text{CO}$ , disminuye el crecimiento de la cadena. Reacción ligeramente endotérmica, muy costoso.
OXIDACIÓN PARCIAL (POX) $\text{CH}_4 + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2$	Reacción ligeramente Exotérmica. Fracción de $\text{H}_2/\text{CO}$ (2:1) ideal para la síntesis de Fischer-Tropsch.	Sin catalizador se requiere alta presión y temperatura. Planta de separación de oxígeno.
REFORMADO DE $\text{CO}_2$ $\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO} + 2\text{H}_2$	Disminución de la contaminación en la planta. Campos con alto contenido de $\text{CO}_2$ .	Alta temperatura y presión. Baja fracción $\text{H}_2/\text{CO}$ . Proceso endotérmico.
REFORMADO AUTOTERMICO (ATR)	Se une la oxidación parcial y el reformado de vapor. Presiones y Temperaturas Moderadas.	Reactores más grandes si se usa aire directamente, pero se disminuye el alto costo de la planta de separación de aire.
PLASMA	La reacción se lleva a cabo por la ionización del gas. A alta temperatura no se requiere Oxígeno.	Alto necesidad de energía, por lo cual solo es comercial a pequeña escala. Baja eficiencia.

**Tabla 3. Productos Fischer-Tropsch y su Mercado**

Fracción	% Peso	Mercado
C <sub>1</sub> - C <sub>4</sub> (Gas + GLP)	5 - 10	- Alimento Petroquímico - Combustibles
C <sub>5</sub> - C <sub>9</sub> (Nafta)	15 - 20	- Alimento para plantas de Oleofinas - Alimento para Reformado Catalítico y producir Aromáticos
C <sub>10</sub> - C <sub>15</sub> (Queroseno)	20 - 30	- Jet Fuel - Parafinas Normales
C <sub>17</sub> - C <sub>22</sub> (Diesel)	10 - 15	- Combustible Diesel - Ceras
C <sub>22</sub> + (Ceras)	30 - 40	- Lubricantes Sintéticos

**Tabla 4. Impacto del Precio del Gas Natural sobre Proyectos GTL**

Costo Gas SUS/MMBTU	Costo Prod. SUS/b	Impacto
0.5 - 1.0	15-20	Oportunidades reales para trabajar y desarrollar tecnología.
1.0 - 1.5	20-25	Viabilidad para proyectos a gran escala.
1.5 - 2.0	25-32	Se necesitan cambios en el costo o el soporte gubernamental.

**Tabla 5. Costos de inversión totales para la construcción de la planta de GTL Colombia.**

Planta de GTL Colombia Capacidad (50,000 b/d)	Costo (MMSUS)
<b>Planta GTL, Proceso AGC-</b>	
Generación del Syngas	400
Unidades Separadoras de Aire	150
Síntesis Fischer Tropsch	180
Utilidades	120
Unidad de Refinación	110
Generación de Energía	100
Otros	80
<b>Costos de Inversión CAPEX (SUS millones)</b>	<b>1,140</b>
Costos anuales de operación OPEX (%Capex)	7%
<b>Costos de Operación (SUS millones)</b>	<b>79.8</b>

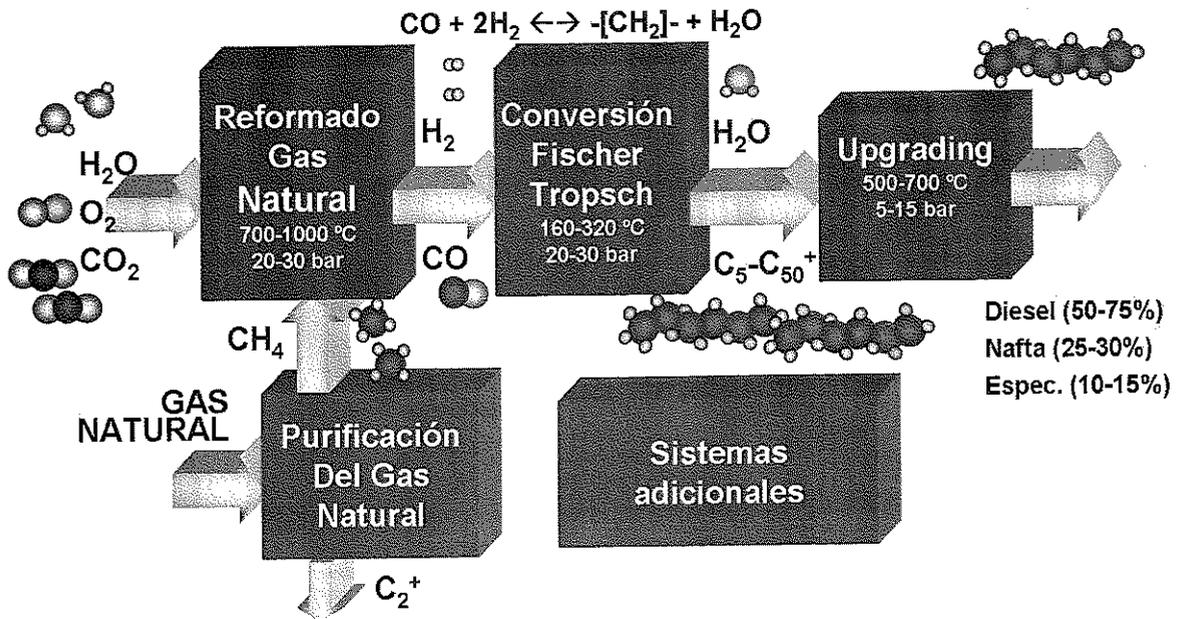


Figura 1. Principales Etapas del Proceso FT

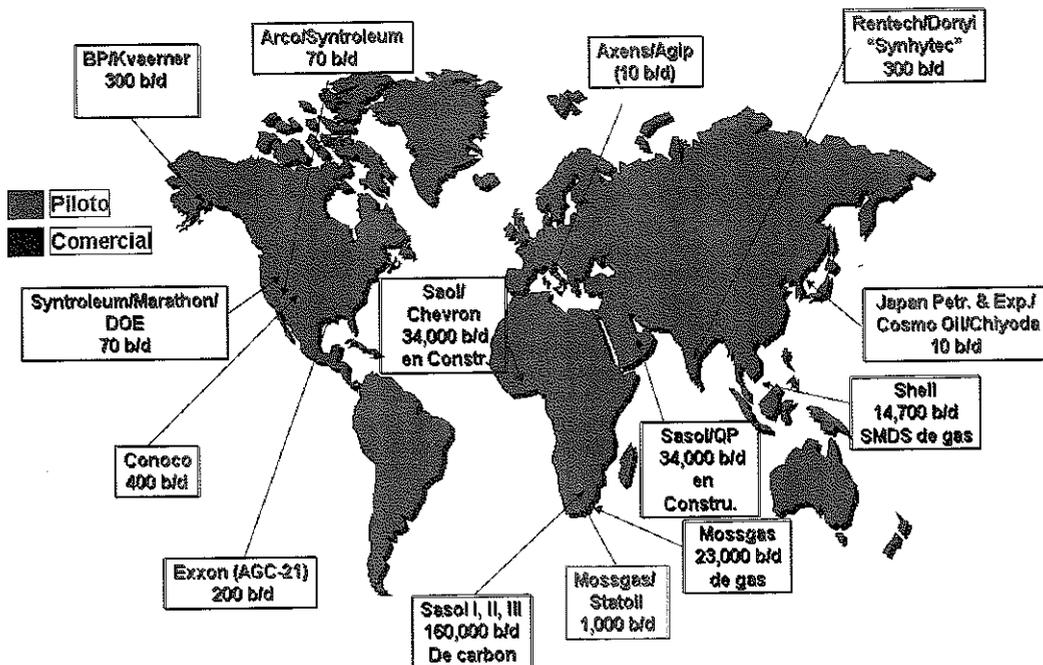


Figura 2. Plantas GTL Existentes en el Mundo



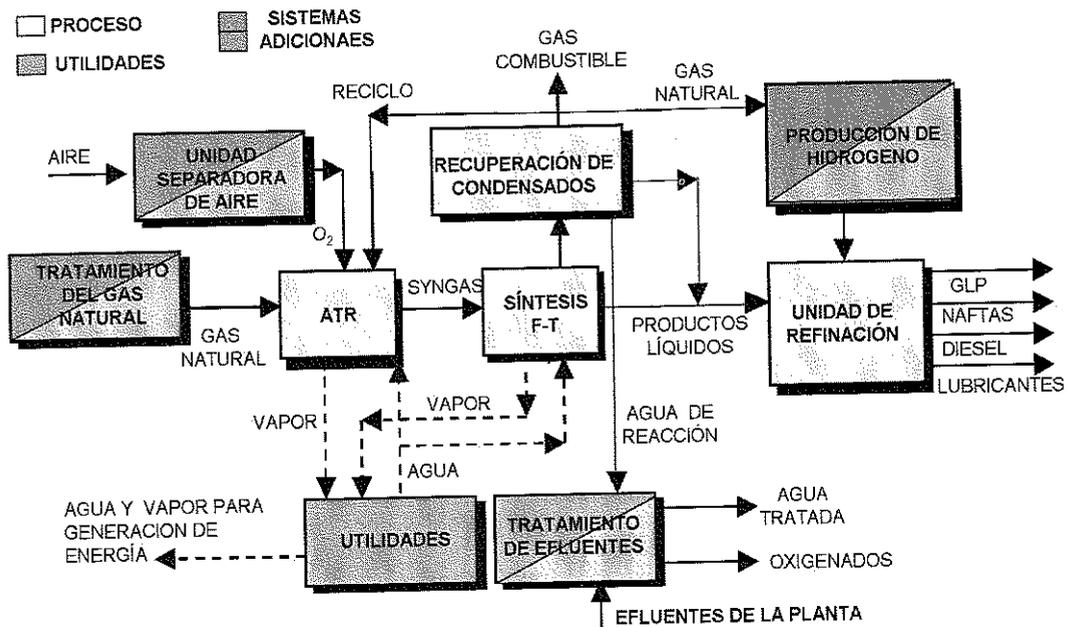


Figura 5. Esquema del proceso AGC-21

Recibido: 2 de noviembre de 2004  
 Aceptado: 10 de abril de 2006