

*“ Por tanto, al Rey de los siglos,  
inmortal, invisible,  
al único y sabio Dios,  
sea honor y gloria  
por los siglos de los siglos.  
Amén”*

*(1 Timoteo 1,17)*

*Dedicado a:*

*Nuestro Dios Todopoderoso Creador del Universo.*

*Nuestros Padres y Hermanos.*

## *Agradecimientos:*

*A Dios, por darnos la vida, la fé y fortaleza para alcanzar una de nuestras metas en la vida.*

*A la Universidad Mayor Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, a la que debemos nuestra formación profesional.*

*A los docentes de la Facultad de Tecnología, por todos los conocimientos impartidos.*

*El más sincero y profundo reconocimiento al Dr. Stephen L. Matson Ph. D., P.E. (Contechs Associates Inc.; Ex Profesor Worcester Polytechnic Institute; EEUU) por su desprendimiento y cooperación desinteresada, quien facilitó la información bibliográfica necesaria para llevar adelante el presente proyecto, asimismo queremos hacer una mención especial a nuestro asesor, el Ingeniero Edwin Quiroga Sandi (Máster en Ciencias y Tecnología Química; Magíster Scientiarum, Refinación-Petroquímica) quien con dedicación y trabajo aportó significativamente en el desarrollo de este proyecto.*

*A nuestros padres, por su apoyo invaluable y muestras de cariño que nos motivaron para finalizar nuestra carrera profesional.*

*A nuestros amigos y compañeros, por su amistad, grata compañía y por animarnos en todo momento.*

**UNIVERSIDAD MAYOR REAL Y PONTIFICIA DE  
SAN FRANCISCO XAVIER DE CHUQUISACA**

**FACULTAD DE TECNOLOGIA**

**CARRERA DE INGENIERIA QUIMICA**



***“OBTENCION DE GAS DE SINTESIS Y  
PETROLEO SINTETICO POR EL METODO  
FISCHER – TROPSCH A ESCALA CONVENCIONAL”***

**Proyecto de Grado para Optar  
El Título de Licenciado en  
Ingeniería Química**

**POSTULANTES: SIMEON OVANDO GONZALES  
GONZALO VARA ANIBARRO**

**ASESOR: ING. EDWIN QUIROGA SANDI**

**Sucre – Bolivia**

**2004**

Aprobado en nombre de la Universidad Mayor  
Real y Pontificia de San Francisco Xavier de  
Chuquisaca.

Facultad de Tecnología

Por el siguiente Tribunal:

---

Ing. F. Javier Camacho Calderón

---

Ing. Ricardo Gumucio Del Villar

---

Ing. Miguel Ortiz Limón

---

Ing. Félix Zelaya Acuña  
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Nota: .....

Sucre,..... Diciembre del 2004



## INDICE

Índice de Figuras	v
Índice de Tablas	vi
Índice de Anexos	ix
Resumen del Proyecto	x
<b>CAPITULO 1. INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes	1
1.2 Identificación del problema y la ruta de solución	6
1.3 Objetivos	12
1.3.1 Objetivo General	12
1.3.2 Objetivos Específicos	12
1.3.3 Limitaciones del Proyecto	12
1.3.4 Terminología propia del Proyecto	13
1.4 Justificación	13
<b>CAPITULO 2. ESTUDIO DE MERCADO</b>	<b>15</b>
2.1 Disponibilidad de Materia Prima	15
2.2 Mercado Nacional para los Productos	20
2.2.1 Consumo de Diesel	20
2.2.2 Consumo de Gasolina	21
2.2.3 Consumo de otros Derivados	23
2.3 Mercado Internacional para los Productos (Demanda de diesel, gasolina y crudo)	25
2.3.1 Chile	25
2.3.2 Paraguay	29
2.3.3 Brasil	32
2.4 Resumen de las demandas de hidrocarburos líquidos y otros derivados	36
<b>CAPITULO 3. TAMAÑO Y LOCALIZACION</b>	<b>38</b>
3.1. Determinación del tamaño	38
3.2. Localización	41

3.2.1 Conclusiones sobre localización de la planta	43
<b>CAPITULO 4. INGENIERIA DEL PROYECTO</b>	<b>45</b>
4.1 PROPIEDADES DE MATERIAS PRIMAS Y PRODUCTOS	45
4.2 SELECCIÓN DEL PROCESO	49
4.2.1 Selección de la tecnología para la generación de gas de síntesis	51
1.- Reformado de Metano con Vapor de Agua	52
2.- Reformado por Oxidación Parcial	53
3.- Reformado Autotérmico	53
4.- Reformado por Combinación ó de dos etapas	54
4.2.2 Selección de la tecnología para la Producción de Petróleo Sintético	59
4.2.2.1 Principales Tipos de Reactores de Fischer-Tropsch	59
4.2.2.2 Tipos de Catalizadores utilizados	62
4.3 DESCRIPCION DEL PROCESO	67
4.4 REFORMADOR DE METANO CON VAPOR DE AGUA	69
4.4.1 Flujo de Alimentación de Gas Natural	72
4.4.2 Flujo de metano equivalente en la Alimentación	73
4.4.3 Cantidad estequiométrica de vapor requerida	74
4.4.4 Condiciones de Alimentación al Reformador	76
4.4.5 Diseño del Reformador Primario	77
4.4.6 Balance de Materia	81
4.4.7 Balance de Energía	87
4.4.8 Caída de Presión	95
4.4.9 Desarrollo y Metodología de resolución del Diseño	96
4.4.9.1 Características de los Tubos Reformadores	97
4.4.9.2 Características del Catalizador Utilizado	97
4.4.10 Identificación de Variables	98
4.4.11 Reformador de metano con vapor (Incluyendo la recirculación)	102
4.4.11.1 Condiciones de alimentación al reformador: (Incluyendo la corriente de recirculación)	102
4.4.11.2 Características del reformador	103

4.5	SEPARADOR DE FASES BIFASICO (FLASH ISOTERMICO)	104
4.5.1	Ecuaciones fundamentales en el separador	104
4.5.2	Determinación de $T_{BURB}$ y $T_{ROCIO}$ a las condiciones del separador	105
4.5.3	Balance de materia en el separador	106
4.5.4	Determinación del diámetro y longitud del separador	107
4.6	TORRE DE ABSORCION DE $CO_2$	110
4.6.1	Características del MDEA (METIL DIETANOL AMINA)	111
4.6.2	Identificación de componentes	112
4.6.3	Balance de materia en el absorbedor	113
4.6.4	Eficiencia total de platos	114
4.6.5	Determinación del diámetro de la torre	114
4.7	COLUMNA DE REGENERACION DE MDEA (Destilación multicomponente)	116
4.7.1	Condiciones de alimentación	116
4.7.2	Determinación de la eficiencia total de platos	118
4.7.3	Determinación del diámetro y altura de la columna	118
4.8	REACTOR DE LODOS DE COLUMNA BURBUJEANTE (REACTOR DE FISCHER – TROPSCH)	120
4.8.1	Introducción	120
4.8.2	Propiedades de materias primas y productos	123
4.8.3	Condiciones de alimentación al reactor de F-T	125
4.8.4	Diseño del reactor de Fischer-Tropsch (F-T)	125
4.8.4.1	Desarrollo de los balances por componente	126
4.8.5	Estimación de parámetros	129
4.8.5.1	Determinación de $H_e$ , $k$ , y $C_{cat}$ .	130
4.8.5.2	Estimación de la retención gaseosa ( $\varepsilon^\alpha$ ), retención líquida ( $\varepsilon^\beta$ ) y retención sólida ( $\varepsilon^\gamma$ ).	130
4.8.5.3	Estimación de la longitud del lecho fluidizado, $L$	131
4.8.5.4	Estimación de $v_{mf}^\beta$ y $v_t^\beta$	134
4.8.5.5	Velocidad final o velocidad máxima	136



4.8.5.6 Determinación de $k_{LaL}$ y $k_{SaS}$	137
4.8.6 Resultados	138
4.8.7 Determinación de los flujos a la salida del reactor de Fischer – Tropsch	147
4.8.8 Nomenclatura	150
<b>4.9 SEPARADOR DE FASES TRIFASICO</b>	<b>151</b>
4.9.1 Sistemas multifase	151
4.9.2 Método aproximado para sistemas vapor-líquido-líquido	152
4.9.3 Método riguroso para un sistema vapor-líquido-líquido	153
4.9.4 Condiciones de operación en el separador trifásico	156
4.9.5 Determinación del diámetro y longitud del separador	158
4.9.6 Características del Petróleo Sintético y Productos Refinados	160
<b>4.10 HOJA DE ESPECIFICACIONES</b>	<b>166</b>
<b>CAPITULO 5. ESTUDIO ECONOMICO</b>	<b>172</b>
5.1 Introducción	172
5.2 Determinación del monto de inversión	172
5.3 Determinación de costos fijos y variables de operación	175
5.4 Interés del préstamo	177
5.5 Determinación de los ingresos por ventas de productos	178
5.6 Indicadores financieros.	181
A. Valor actual neto (VAN).	181
B. Tasa interna de retorno (TIR).	182
C. Relación beneficio – costo (B/C).	182
5.7 Análisis de Sensibilidad del Proyecto	184
<b>CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>187</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>193</b>
<b>ANEXOS</b>	

## INDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Reservas de Gas Natural	16
Fig. 2 Esquema del proceso GTL	50
Fig. 3 Generación del Gas de Síntesis	50
Fig. 4 Generación de Petróleo Sintético	51
Fig. 5 Esquema de los Reactores de Fischer-Tropsch	59
Fig. 6 Diagrama de Flujo del Proceso	67
Fig. 7 Esquema del reformador	75
Fig. 8 Horno con quemadores en la parte superior	78
Fig. 9 Diagramas de variación de temperatura y de flujo de calor.	78
Fig. 10 Horno con quemadores en la parte inferior	79
Fig. 11 Horno con quemadores laterales	79
Fig. 12 Diagrama de Bloques para el Diseño	100
Fig. 13 Diagrama de Bloques del Método Runge-Kutta	101
Fig. 14 Esquema del Reformador (con recirculación)	102
Fig. 15 Separador Bifásico	104
Fig. 16 Esquema del Separador Bifásico	106
Fig. 17 Esquema de la Torre de Absorción	113
Fig. 18 Esquema columna de regeneración de MDEA-AGUA	117
Fig. 19 Reacción de Fischer-Tropsch en un reactor de lodos de columna burbujeante.	123
Fig. 20 Esquema del reactor de F-T	125
Fig. 21 Caída de presión y altura del lecho en función de la velocidad del fluido	133
Fig. 22 Procedimiento de la solución global para el modelo de la reacción de F-T	139
Fig. 23 Concentración en fase gaseosa, Caso C	143
Fig. 24 Concentración en fase líquida, Caso C	144
Fig. 25 Concentración en fase sólida, Caso C	144
Fig. 26 Conversiones $X_{H_2}$ , $X_{CO}$ , Caso C	145
Fig. 27 Siete fases en equilibrio	152
Fig. 28 Condiciones para un flash isotérmico de tres fases	154
Fig. 29 Algoritmo para un flash isotérmico de tres fases	156
Fig. 30 Esquema del flash isotérmico de tres fases	157
Fig. 31 Distribución de los productos de Fischer – Tropsch	160
Fig. 32 Gasolina Sintética	163
Fig. 33 Propiedades de Fischer – Tropsch, diesel sintético y convencional	165
Fig. 34 VAN (Millones de \$us) Vs $\Delta$ Precio (%)	185
Fig. 35 TIR (%) Vs $\Delta$ Precio (%)	185

## INDICE DE TABLAS

TABLA 1 Informe de Análisis (Crudo Normal)	1
TABLA 2 Reservas de gas natural y petróleo-condensado	2
TABLA 3 Importación de diesel	3
TABLA 4 Reservas de gas natural (trillones de pies cúbicos)	3
TABLA 5 Composición del gas natural	5
TABLA 6 Numero de vehículos convertidos	7
TABLA 7 Ventas de GNC por ciudades (metros cúbicos)	8
TABLA 8 Población boliviana	11
TABLA 9 Reservas de gas natural (Trillones de pies cúbicos)	15
TABLA 10 Reservas de gas natural y petróleo-condensado por campos (gestión 2002)	18
TABLA 11 Diesel en Bolivia (Miles de Barriles)	20
TABLA 12 Gasolina en Bolivia (Miles de Barriles)	22
TABLA 13 Ventas de GNC anuales	23
TABLA 14 Aceites lubricantes en Bolivia (Miles de barriles)	23
TABLA 15 Grasas lubricantes en Bolivia (ton)	24
TABLA 16 Demanda de diesel en Chile	27
TABLA 17 Demanda de gasolina en Chile	27
TABLA 18 Demanda de crudo en Chile (Miles de barriles)	28
TABLA 19 Demanda de diesel en Paraguay (Miles de barriles)	30
TABLA 20 Demanda de gasolina en Paraguay (Miles de barriles)	31
TABLA 21 Demanda de crudo en Paraguay	32
TABLA 22 Demanda de diesel en Brasil	34
TABLA 23 Demanda de gasolina en Brasil	35
TABLA 24 Demanda de crudo en Brasil	36
TABLA 25 Demanda de Diesel (Bolivia, Brasil, Chile y Paraguay)	36
TABLA 26 Demanda de Gasolina (Bolivia, Brasil, Chile y Paraguay)	37
TABLA 27 Demanda de aceites y grasas lubricantes en Bolivia	37
TABLA 28 Cantidad de diesel requerida para cubrir la demanda nacional y el 20% de la demanda de países vecinos (Brasil, Chile y Paraguay)	38
TABLA 29 Cantidad de gasolina requerida para cubrir el 20% de la demanda de países vecinos (Brasil, Chile y Paraguay)	39
TABLA 30 Tamaño de la planta de GTL	40
TABLA 31 Costos de producción de plantas de GTL	41

TABLA 32	Localización de la planta valoración por puntos	43
TABLA 33	Composición del gas natural	46
TABLA 34	Propiedades del diesel sintético y diesel convencional	47
TABLA 35	Características de las emisiones de los motores diesel	48
TABLA 36	Propiedades típicas del Producto S-2	49
TABLA 37	Comparación de las tecnologías para la generación de gas de síntesis	57
TABLA 38	Características de los reactores de F-T	59
TABLA 39	Dimensiones del reactor de F-T en plantas existentes	60
TABLA 40	Plantas de F-T con procesos integrados	61
TABLA 41	Empresas que operan con la tecnología Fischer-Tropsch	61
TABLA 42	Características generales del catalizador de F-T	62
TABLA 43	Otras características de estos catalizadores	63
TABLA 44	Balance global de Materia y Energía en el proceso de Fischer – Tropsch	68
TABLA 45	Gas de entrada al reformador para la cantidad Estequiométrica de vapor	75
TABLA 46	Flujos y composiciones de alimentación al reformador	76
TABLA 47	Constantes de los factores de efectividad, para CH <sub>4</sub>	86
TABLA 48	Constantes de los factores de efectividad, para CO <sub>2</sub>	86
TABLA 49	Constantes de la ecuación de conductividad térmica	90
TABLA 50	Punto normal de ebullición de los componentes	91
TABLA 51	Coefficientes de la ecuación de calor específico	92
TABLA 52	Propiedades críticas de los componentes	94
TABLA 53	Balance de materia en el Reformador	103
TABLA 54	Balance de materia en el Separador	107
TABLA 55	Balance de materia en el Absorbedor	114
TABLA 56	Balance de materia en el Regenerador	117
TABLA 57	Flujos y composiciones en el Reactor de F-T	125
TABLA 58	Valores de $v_z^\beta$ y k para los casos A – H	140
TABLA 59	Valores de los parámetros para los casos A – H	141
TABLA 60	Concentración final de CO e H <sub>2</sub> , C <sub>i</sub> , y conversión total, X <sub>i</sub>	142
TABLA 61	Resultados para el Caso C	143
TABLA 62	Tabla estequiométrica	148
TABLA 63	Flujos obtenidos a lo largo del reactor (Fischer – Tropsch)	149
TABLA 64	Flujos y composiciones en el Separador Trifásico	157
TABLA 65	Probabilidad de crecimiento de la cadena para diferentes temperaturas	161
TABLA 66	Distribución de Productos para tres temperaturas de reacción diferentes	161

TABLA 67	Productos de Fischer-Tropsch (Catalizador de Fe)	162
TABLA 68	Comparación entre la gasolina convencional y sintética (Fischer – Tropsch)	163
TABLA 69	Propiedades de los combustibles de procesos Fischer-Tropsch	164
TABLA 70	Comparación entre el diesel convencional y sintético	164
TABLA 71	Costo de maquinaria y equipo (Puesto en FOB, \$us)	173
TABLA 72	Monto de inversiones (\$us)	174
TABLA 73	Costos fijos de operación (\$us)	175
TABLA 74	Costos variables de operación	176
TABLA 75	Servicio a la deuda (\$us/año)	178
TABLA 76	Precios internacionales promedios	179
TABLA 77	Precios proyectados de hidrocarburos	180
TABLA 78	Cantidad e ingresos totales de productos	180
TABLA 79	Sensibilidad del Proyecto	184
TABLA 80	Flujo de fondos con base efectivo para el proyecto	186

## **INDICE DE ANEXOS**

### **ANEXO A**

Mapas y Tablas de Gasoductos, Poliductos y Oleoductos

### **ANEXO B**

Método de colocación ortogonal para la resolución de ecuaciones diferenciales de segundo orden

### **ANEXO C**

Condiciones de Entrada y Resultados en el Reformador

### **ANEXO D**

Gráficas y Tablas comparativas en la Torre de Absorción

### **ANEXO E**

Gráficas y tablas comparativas en la Columna Regeneradora de MDEA

### **ANEXO F**

Gráficas y tablas comparativas en el Reactor de Fischer – Tropsch. Codificación del programa para este equipo.

### **ANEXO G**

Resultados finales en composición y propiedades emitidos por el software ChemCad versión 5.2 (estos resultados representan el 10% del flujo total del proceso).

### **ANEXO H**

Flujo de Fondos con base efectivo para el Análisis de Sensibilidad del Proyecto

## **RESUMEN DEL PROYECTO**

### **1.- Problema**

El problema esencial es el desabastecimiento de diesel, lubricantes y asfaltos en el mercado nacional y la imposibilidad de producirlos debido a que las reservas de hidrocarburos líquidos son muy pequeñas comparadas a las gasíferas y sobretodo la naturaleza del petróleo boliviano (muy liviano) que no permite obtener esos productos pesados.

### **2.- Objetivo General**

Realizar un estudio técnico- económico para determinar la factibilidad de una planta que permita transformar hidrocarburos gaseosos a líquidos por el método de Fischer-Tropsch; para la producción de diesel como producto principal y gasolina entre otros.

### **3.- Mercado**

El mercado principal que se consideró fue el nacional (se desea cubrir con preferencia toda la demanda de diesel, gasolina y lubricantes en el país), además de llegar a mercados de países vecinos como Brasil, Chile y Paraguay, en los cuales se pretende cubrir el 20% de su demanda en diesel y también abastecerlos con los demás productos (gasolina, lubricantes, asfaltos).

### **4.- Tamaño**

La capacidad de la planta es de 85983 bbl/d (barriles por día) de productos líquidos (diesel y gasolina). Para dicha producción, la alimentación de gas natural es de 901.15 MMPCSD.

### **5.- Localización**

Macrolocalización: Departamento de Santa Cruz

### **6.- Aspecto Técnico**

El proceso por el cual se obtienen combustibles líquidos (GLP, gasolina, diesel), lubricantes y asfaltos a partir del gas natural es conocido como proceso GTL (gas a líquidos) y se caracteriza por utilizar la tecnología de Fischer – Tropsch que consta de tres etapas:

- Generación del gas de síntesis
- Producción del petróleo sintético (Conversión del gas de síntesis)
- Hidrotratamiento (Hidrogenación del petróleo sintético).

Dadas las limitaciones del proyecto se ha desarrollado las dos primeras etapas.

En la primera etapa se empleo el reformador de metano con vapor de agua con catalizador de níquel alúmina (Ni/Mg  $\text{Al}_2\text{O}_4$ ) para la generación del gas de síntesis; seguido de separadores bifásicos que recuperan grandes cantidades de  $\text{H}_2\text{O}$ , torres de absorción para eliminar el  $\text{CO}_2$  con aminas (MDEA); posteriormente se recirculó el  $\text{CO}_2$  a los reformadores, previo tratamiento en las columnas de destilación.

La segunda etapa presenta al reactor de lodos de columna burbujeante de Fischer – Tropsch con catalizadores de Hierro (Fe/CuK en  $\text{SiO}_2$ ), que se encarga de la conversión del gas de síntesis a petróleo sintético, luego con la ayuda de un separador trifásico se obtienen los flujos de gas, petróleo sintético y agua. De este modo se permite la ejecución de la tercera etapa denominada “Hidrogenación del petróleo sintético”.

### **7.- Composición de la Inversión**

La inversión total es de: 948,146,989 \$us

\* Monto préstamo: 805,924,941 \$us (85% inversión total)

\* Inversión Fija (Propia): 142,222,048 \$us (15% inversión total)

### **8.- Presupuesto de Operación al 100% de Capacidad**

- Utilidad Neta: 521.48 millones \$us/año
- Costo de Diesel: 67.67 \$us/bbl
- Costo de Gasolina: 79.07 \$us/bbl

### **9.- Financiamiento**

Las condiciones del préstamo son las siguientes:

- Monto: 85% del monto de inversión total
- Plazo: 10 años con dos años de gracia
- Interés: 13% anual
- Forma de Pago. Cuotas anuales iguales de amortización

### **10.- Evaluación Económica**

- VAN = 1233.029 millones \$us
- TIR = 36.89%
- B/C = 1.105