

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA DE PETROLEO, GAS
NATURAL Y PETROQUIMICA**



**“EVALUACION DE LA PRODUCCION DEL DIMETIL ÉTER
COMO COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN EL PERU”**

TESIS

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO PETROQUÍMICO**

PRESENTADO POR:

JULLISSA GIOVANNA MORALES MEJIA

PROMOCION 2004 – I

LIMA - PERÚ

2010

A la memoria de mis abuelos quienes siempre están presentes en mi vida.

A mi familia, mis padres, hermanas y esposo por su apoyo y comprensión.

A la Universidad Nacional de Ingeniería por haberme brindado los conocimientos necesarios para mi formación académica.

A mi hija Luana quien es la razón de mi vida.

RESUMEN

El dimetil éter (DME) se utiliza actualmente como propelente en generadores de aerosoles, pero podría ser un combustible alternativo limpio y económico si se produjera en gran cantidad y a bajo precio. Las propiedades del DME son similares a las propiedades del Gas Licuado de Petróleo (GLP) y puede utilizarse como fuente energética o materia prima en varios sectores: residencial, transporte, generación de electricidad, industria química, etc. Se produce a partir de diversas fuentes, como el gas natural, el carbón o el metano de yacimientos de carbón, a través del gas de síntesis.

El presente trabajo examina las tecnologías de producción y usos del DME, desarrollo de la industria y capacidad de producción a nivel global, además de identificar los mercados potenciales de utilización del DME y la demanda de combustibles a sustituir en el mercado interno.

El capítulo 1 es una introducción acerca de los antecedentes del uso del dimetil éter (DME) como combustible a nivel mundial, además se plantea la utilización del DME como un combustible alternativo en el Perú que permitiría la ampliación de la matriz energética.

En el capítulo 2 se hace una descripción sobre las propiedades, características y las diferentes aplicaciones del DME en diversos sectores.

El capítulo 3 describe las tecnologías para el proceso de producción de DME mediante síntesis indirecta y síntesis directa.

El capítulo 4 abarca las etapas de almacenamiento y transporte del DME desde la planta de producción hasta el punto de entrega del producto.

En el capítulo 5 se mencionan los aspectos medioambientales, salud y seguridad de la utilización del DME.

En el capítulo 6 se presenta una evaluación del mercado del DME a nivel internacional, además una evaluación del mercado a nivel nacional asumiendo que sustituiría un porcentaje del mercado del diesel-B5 y GLP.

En el capítulo 7 se detalla la evaluación económica para la instalación de una planta de producción de DME de una capacidad específica utilizando como materia prima el gas natural, y un análisis de resultados.

El capítulo 8 menciona el aspecto legal del DME, es decir el desarrollo de estándares y normas técnicas del DME como combustible

En el capítulo 9 se describe el proceso del DME operando a condiciones de diseño simulado en ChemCad, incluyendo un resumen de flujos del proceso.

Finalmente en el capítulo 10, 11 y 12, se describen las principales conclusiones, recomendaciones y referencias bibliográficas del estudio.

INDICE

	Pág.
Dedicatoria	ii
Resumen	iii
Índice	v
Lista de figuras	vi
Lista de cuadros	vii
Capítulo 1. Planteamiento del problema	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Planteamiento del problema	2
1.2.1. Objetivo General	2
1.2.2. Objetivos Específicos	2
1.2.3. Hipótesis	3
Capítulo 2. Aplicaciones de usos para el dimetil éter (DME)	4
2.1. Propiedades del DME	4
2.2. Características del DME	5
2.3. Usos del DME	6
2.3.1. Uso en los sectores de Generación Eléctrica e Industrial	6
2.3.2. Uso en el Sector Transporte	12
2.3.3. Uso en el Sector Residencial	18
2.3.4. Uso como materia prima en la Industria Química	20
2.3.5. Uso en Celdas Combustibles	23
2.3.6. Uso como propelente y otros usos	25
Capítulo 3. Tecnologías para la producción del dimetil éter	27
3.1. Introducción	27
3.1.1. Conceptos básicos de la síntesis del DME	27
3.1.2. Síntesis indirecta del DME	30
3.1.3. Síntesis directa del DME	31
3.2. Materia prima para la producción del DME	33
3.2.1. Introducción	33
3.2.2. Tecnologías para la obtención de la materia prima	34
3.3. Tecnologías de producción del DME mediante síntesis indirecta	39
3.3.1. Proceso MGC	39
3.3.2. Proceso TEC	40
3.3.3. Proceso Lurgi	42
3.3.4. Proceso Topsoe	43
3.4. Tecnologías de producción del DME mediante síntesis directa	52
3.4.1. Proceso JFE	52
3.4.2. Proceso Air Products	54
Capítulo 4. Almacenamiento y transporte del Dimetil éter	57
4.1. Almacenamiento del DME	58
4.2. Transporte del DME	63
4.3. Otras instalaciones	64
Capítulo 5. Aspectos medioambientales, salud y seguridad	66
5.1. Aspecto medioambiental	66
5.2. Aspecto salud	68
5.3. Aspecto seguridad	69
Capítulo 6. Evaluación de Mercado	72

6.1. Escenario de mercado internacional	72
6.2. Escenario de mercado nacional	74
Capítulo 7. Evaluación Económica	78
7.1. Introducción	78
7.2. Costos de producción	79
7.3. Otros costos	82
7.4. Sensibilidad de precios	82
7.5. Análisis de resultados	85
Capítulo 8. Aspecto legal	87
Capítulo 9. Simulación del proceso del DME – Caso de diseño	89
Capítulo 10. Conclusiones	95
Capítulo 11. Recomendaciones	98
Capítulo 12. Referencias Bibliográficas	100

LISTA DE FIGURAS

Figura N° 2.1. Equipo de cogeneración diesel – DME de 50 kW (Tsukuba, Japón)	9
Figura N° 2.2. Equipo de cogeneración diesel – DME de 36 Kw (Kitakyushu, Japón)	10
Figura N° 2.3. Equipo de cogeneración diesel – DME de 8.2 kW (Kawasaki, Japón)	11
Figura N° 2.4. Sistema de generación de electricidad diesel – DME 1250 kW (Tsurumi, Japón)	11
Figura N° 2.5. Pruebas de generación de electricidad mediante turbina de gas de 4MW – Proyecto conjunto TEPCO, Mitsubishi Chemicals y JFE	11
Figura N° 2.6. Progreso del DME como sustituto del combustible diesel en DTU, Dinamarca	12
Figura N° 2.7. Vehículos prototipo a DME en Japón	12
Figura N° 2.8. Sistema de suministro de DME en vehículos pesados	18
Figura N° 2.9. Combustibilidad del DME	20
Figura N° 2.10. Vía de reacción para la conversión de metanol/DME a hidrocarburos	22
Figura N° 2.11. Cadena del valor de sistema PEFC reformando DME	24
Figura N° 3.1. Comparación de la conversión de equilibrio de CO entre la síntesis de metanol y la síntesis de DME	29
Figura N° 3.2. Producción del DME utilizando la deshidratación del Metanol	31
Figura N° 3.3. Producción del DME usando síntesis directa	32
Figura N° 3.4. Materias primas para la producción de DME	33
Figura N° 3.5. Diagrama de flujo del proceso MGC	39
Figura N° 3.6. Diagrama de flujo del proceso de TEC	40
Figura N° 3.7. Esquema de producción del DME	42
Figura N° 3.8. Proceso de síntesis del DME de Lurgi	43
Figura N° 3.9. Proceso de DME de Topsoe	51

Figura N° 3.10. Diagrama de flujo del proceso de la planta de 100 toneladas por día	52
Figura N° 3.11. Producción de DME a partir de gas natural (proceso de DME de JFE)	54
Figura N° 3.12. Planta de demostración de la síntesis directa del DME de 100 toneladas por día (en Kushiro)	54
Figura N° 3.13. Flujo del proceso simplificado de AFDU	56
Figura N° 4.1. Proceso de distribución del DME	58
Figura N° 4.2. Tanque cilíndrico de doble casco de fondo plano	59
Figura N° 4.3. Tanque de almacenamiento esférico (adaptado de la tecnología del GLP)	61
Figura N° 5.1. Emisiones de gases de escape utilizando DME	67
Figura N° 6.1. Mercado potencial del DME por sustitución del Diesel 2-B2	76
Figura N° 6.2. Mercado potencial del DME por sustitución del GLP	76
Figura N° 7.1. Sensibilidad con la variación de precios del gas natural	83
Figura N° 7.2. Sensibilidad con la variación de precios de venta del DME	84
Figura N° 7.3. Diagrama de costos de producción del DME	85
Figura N° 9.1. Diagrama de flujo de proceso para la producción del DME	92

LISTA DE CUADROS

Cuadro N° 2.1. Propiedades físicas del DME y otros combustibles	5
Cuadro N° 2.2. Efectos de la utilización del DME en equipos	6
Cuadro N° 2.3. Resultados de la prueba de combustión del DME	19
Cuadro N° 2.4. Resultados de prueba de eficiencia térmica (Japón)	19
Cuadro N° 2.5. Características del proceso de las tecnologías disponibles metano a olefinas	23
Cuadro N° 2.6. Características de los típicos propelantes mezclados de DME y GLP	26
Cuadro N° 3.1. Eficiencias teóricas del gas frío y el valor estimado de la actual planta de producción de DME a partir del metano (100 ton/día)	28
Cuadro N° 3.2. Comparación de los proyectos de desarrollo de la tecnología de síntesis directa del DME	32
Cuadro N° 3.3. Composición y eficiencia del gas frío del gas de síntesis obtenido de varias materias primas	37
Cuadro N° 3.4. Proceso de DME y la composición de gas de síntesis (syngas) correspondiente	38
Cuadro N° 3.5. Proceso de producción del gas de síntesis como carga el gas natural	38
Cuadro N° 3.6. Condiciones de reacción de la síntesis directa del DME de la tecnología JFE	53
Cuadro N° 6.1. Proyección de demanda de DME al 2030 en Japón (Unidad: 10 ⁴ toneladas/año)	73
Cuadro N° 6.2. Cantidad de mercado potencial para el DME grado combustible (Unidad: 10 ⁴ toneladas)	74
Cuadro N° 6.3. Estimación del mercado potencial del DME	

(miles de barriles)	77
Cuadro N° 7.1. Costos totales de producción del DME para un año	79
Cuadro N° 7.2. Resultados de simulación para del balance de energía	80
Cuadro N° 7.3. Asunciones para la materia prima	81
Cuadro N° 7.4. Volumen de producción de la planta de DME	81
Cuadro N° 7.5. Proyecciones de precios de venta de DME (US\$/año)	82
Cuadro N° 7.6. Resumen de otros costos	82
Cuadro N° 7.7. Sensibilidad con la variación de precios del gas natural	83
Cuadro N° 7.8. Sensibilidad con la variación de precios de venta del DME	84
Cuadro N° 7.9. Flujo de caja proyectado para una planta de producción de DME	86
Cuadro N° 9.1. Resumen de flujos para el proceso del DME	92
Cuadro N° 9.2. Resumen de servicios para el proceso del DME	92
Cuadro N° 9.3. Resumen del equipamiento para el proceso del DME	93
Cuadro N° 9.4. Resumen del equipamiento para el proceso del DME (continuación)	94

CAPITULO 1

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Antecedentes

El dimetil éter (DME) es un producto sintético que se produce a través de la deshidratación del metanol o mediante síntesis directa del gas de síntesis.

El DME se utiliza actualmente como propelente en generadores de aerosoles, debido a que es un producto no tóxico, de solubilidad y presión de vapor a temperatura ambiente, adecuadas.

Desde 1999, el dimetil éter atrajo amplia atención mundial en función de su potencial como combustible alternativo y como materia prima para la producción de químicos. Previamente se habían reportado la utilización de pequeñas cantidades de DME en Ucrania o China como un sustituto del Gas Licuado de Petróleo (GLP). Además, en los ochenta, Japón trató de utilizar ampliamente el DME como intermedio en la fabricación de gasolina a partir del gas natural o carbón.

La evolución tecnológica de la producción del DME para la producción de energía (proceso directo), empezó alrededor de mediados de los

años noventas en Japón y EE.UU., cuyos objetivos fueron sustituto del GLP, combustible para el transporte (para motores a diesel) y combustible para las turbinas a gas.

1.2. Planteamiento del problema

1.2.1. Objetivo general

Diversificar la matriz energética del Perú a partir de la producción del dimetil éter.

1.2.2. Objetivos específicos

- Seleccionar la tecnología más adecuada para la producción del DME.
- Identificar los mercados potenciales en el Perú para la utilización del DME.
- Realizar un estudio de mercado en el Perú que determine la viabilidad de la sustitución de energéticos.
- Establecer la capacidad de la planta de producción de DME que satisfaga la demanda de combustibles a sustituir.
- Elaborar un estudio técnico-económico que determine la capacidad de la producción de DME y la cantidad de los recursos necesarios para desarrollar la sustitución de energéticos.

1.2.3. Hipótesis

El diesel B5 (DB5) continuará siendo el combustible de mayor demanda debido principalmente al crecimiento del país (la comercialización del DB5 se estableció en el Reglamento para la Comercialización de Biocombustibles-D.S. N° 021-2007-EM) y a su alto consumo en el transporte y maquinaria pesada. Aunque los sectores eléctrico e industrial, se orientarán al uso del gas natural, este combustible difícilmente sustituirá al DB5.

Se incrementará la demanda de GLP en los próximos años debido a la gran oferta de GLP y a la política de precios que las empresas productoras de GLP establecen para favorecer su consumo. Su mayor demanda se estima que se dará en zonas donde no exista oferta de Gas Natural, por lo tanto la hipótesis es la siguiente:

La producción de dimetil éter como combustible alternativo limpio contribuirá a reducir la dependencia e importación de combustibles contaminantes, otorgará valor agregado al gas natural y extenderá la matriz energética.

CAPITULO 2

APLICACIONES DE USOS PARA EL DIMETIL ÉTER (DME)

2.1. Propiedades del DME

El dimetil éter (DME) es el éter más simple, tiene la fórmula química CH_3OCH_3 . El DME es un gas incoloro, químicamente estable, con un punto de ebullición de $-25,1^\circ\text{C}$ y con presión de vapor de alrededor de 0,6 MPa a temperatura ambiente. El DME es fácilmente licuable. Las propiedades físicas del DME son similares a las propiedades del Gas Licuado de Petróleo (GLP), por lo tanto puede ser distribuido, almacenado, etc. utilizando la tecnología que maneja el GLP.

El DME es un combustible que no contiene componentes de azufre o nitrógeno, tiene extremadamente baja toxicidad para los humanos, y no tiene efecto corrosivo en los metales. El poder calorífico en peso de DME líquido es el 60 % del GLP y el 70 % del gasóleo ligero. Además, el poder calorífico en volumen del DME gaseoso es el 165 % del gas natural y el 65 % del GLP. El DME se quema fácilmente, debido a que su velocidad de combustión es 1,5 más alta y su temperatura de ignición es 280°C más baja en comparación con el metano.

Cuando es usado como sustituto del diesel, el DME tiene un alto valor de cetano, contiene oxígeno, y tiene una estructura química que forma cadenas carbono-carbono, así que su combustión no produce humo negro u hollín. Esta propiedad ha atraído considerable interés en el DME como un combustible limpio.

Las propiedades físicas del DME son mostradas en el Cuadro 2.1, las cuales son comparadas con otros tipos de combustibles.

Cuadro N° 2.1. Propiedades físicas del DME y otros combustibles

Propiedad	DME	Metano	Propano	Butano	Metanol	Diesel
Fórmula química	CH ₃ OCH ₃	CH ₄	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	CH ₃ OH	-
Punto de ebullición (° C)	-25,1	-161,5	-42,0	-0,5	64,6	180-360
Densidad líquida ((g/cm ³), 20 ° C)	0,67	-	0,49	0,57	0,79	0,84
Gravedad específica del gas (vs. aire)	1,59	0,55	1,52	2,00	-	-
Presión de vapor saturado (atm., 25 ° C)	6,1	-	9,3	2,4	-	-
Punto de ignición (° C)	235	650	470	430	450	250
Límite de explosión (%)	3,4-17	5-15	2,1-9,4	1,9-8,4	5,5-36	0,6-7,5
Número de cetano *	55-60	0	5	10	5	40-55
Poder calorífico neto (Kcal./Kg.)	6900	12000	11100	10930	4800	10200
Poder calorífico neto (Kcal./m ³)	14200	8600	21800	28300	-	-

* Propiedad de auto ignición (indicador de combustibilidad de los motores diesel).

Fuente: DME Handbook (2007). Elaboración propia.

2.2. Características del DME

El Cuadro 2.2. presenta un resumen de los efectos, según como el DME sea utilizado, en los equipos existentes.

Cuadro N° 2.2. Efectos de la utilización del DME en equipos

	Turbinas, Calderas (Aparatos de combustión)	Vehículos con motores diesel	Reformación para Gas de síntesis y celdas combustible
Limpieza (sin azufre y aromáticos)	Bajo material particulado.	Bajo material particulado.	Eliminación del proceso de pretratamiento
No emisión de material particulado	-	Mayor velocidad de recirculación de gases de escape es posible para hacer NOx más bajos.	-
Velocidad de combustión más alta	-	Eficiencias térmicas más altas debido a menor tiempo de combustión.	-
Temperatura de ignición más baja	-	Menor ruido, menor vibración.	-
Más bajo poder calorífico en peso y en volumen	-	-	-
Viscosidad más baja	-	-	-
Elasticidad de volumen más baja	-	Sistema a chorro de alta presión es mejor.	-
Punto de ebullición más bajo	-	-	-
Efecto solvente más fuerte	-	-	-
Temperatura de reformación más baja	-	-	Alta eficiencia y tamaño compacto.

Versus gas natural, GLP y diesel

Fuente: DME Handbook (2007). Elaboración propia.

2.3. Usos del DME

2.3.1. Uso en los sectores de generación de electricidad e industrial

El DME es un excelente combustible que puede ser usado directamente para la generación de electricidad sin modificaciones a las turbinas de gas o cámaras de combustión. Los fabricantes de turbinas de gas como Mitsubishi, Hitachi, y General Electric han probado el DME para sus turbinas de gas, reconociendo que es un combustible alternativo eficiente en relación a otras fuentes de energía, como el gas natural licuado. Esta ventaja del DME no es reconocida plenamente, ya que se cree que el gas natural es un combustible aceptablemente limpio para la generación de electricidad. Esto es cierto si se compara con el carbón, pero si compara con el DME no es absolutamente cierto. Las plantas de generación de electricidad a gas natural generan niveles inaceptables

de NO_x, SO_x y CO₂ que causan problemas medioambientales y de salud.

El DME es además más manipulable que el gas natural licuado y, además, la infraestructura existente de GLP puede ser usada; por otro lado, la combustión del DME reduce los costos a través de la cadena de suministro.

La generación de electricidad altamente eficiente se ha logrado mediante la introducción del ciclo combinado de turbina de gas – turbina de vapor, junto con el desarrollo de la tecnología de la turbina de gas. La temperatura de entrada de la turbina de gas ha llegado a los 1500 °C, y la eficiencia ha llegado más allá del 50 %. El ciclo combinado es también realizado como IGCC (Ciclo combinado de gasificación integrada) con la combustión del carbón.

Para el IGCC, la síntesis del DME puede ser insertada entre el proceso de gasificación y el ciclo combinado de turbina de gas, para conseguir un ciclo combinado de turbina de gas de DME – gasificación integrada. La introducción de la síntesis del DME hace posible localizar el proceso de gasificación y la generación de electricidad separadamente en sitios diferentes. Esto reduce el impacto medio ambiental y el costo total así como para la generación de la electricidad. Además, esta estrategia del DME hace posible lograr re potenciaciones de las centrales eléctricas a gas a plantas de

ciclo combinado de turbina gas – DME con eficiencias altas. El DME, tiene un alto potencial de reducir el costo del combustible porque el costo del gas natural y el GLP fluctúan junto con el precio del crudo de petróleo. A pesar de que la infraestructura para el transporte del gas natural ha sido bien prevista desde el campo de gas natural hasta el transporte del gas natural licuado, para un campo de gas natural recientemente desarrollado, el DME tiene el potencial de reducir los costos de transporte.

En el caso de las calderas, el volumen de gas suministrado al quemador se debe incrementar. Además el quemador, desarrollado para el gas natural o GLP, puede ser ligeramente ajustado a fin de lograr una combustión estable. La temperatura de auto-ignición es más bien baja, y la velocidad de combustión es, por el contrario, más alta comparada con otros combustibles gaseosos que son los principales factores a ser tomados en cuenta en el diseño del quemador. Además, la temperatura adiabática de combustión es casi la misma que la del metano y propano; además, la tecnología de combustión de bajo NOx es indispensable en las aplicaciones industriales.

El DME también puede ser usado en calderas industriales, generadores a diesel, sistemas de cogeneración a diesel-DME y sistemas de micro turbinas de gas.

Figura N° 2.1. Equipo de cogeneración diesel – DME de 50 kW (Tsukuba, Japón)



Fuente: DME Handbook (2007).

2.3.1.1. Proyectos de investigación para el uso del DME en la generación de electricidad

2.3.1.1.1. Turbina de gas

- **1995-2000:** BP llevó a cabo pruebas múltiples de cámaras de combustión junto con General Electric y EPDC (Japón); estudios con Siemens Westinghouse (SW).

- **2002-2004:** MHI verificó bajas emisiones en quemadores tanto para la combustión de gas y la combustión de líquido. KHI desarrolló una boquilla de inyección para la turbina de gas.

- **2005-2007:** TEPCO, Mitsubishi Chemicals y JFE llevaron a cabo una corrida de prueba de una turbina de gas de 4 MW con DME.

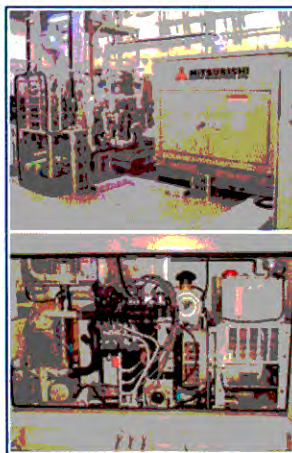
2.3.1.1.2. Motores diesel

- **2002-2006:** JFE llevó a cabo un sistema de generación de electricidad con motor diesel – DME de 1150 kW con Daihatsu y Iwatani.

2.3.1.1.3. Sistemas de cogeneración diesel

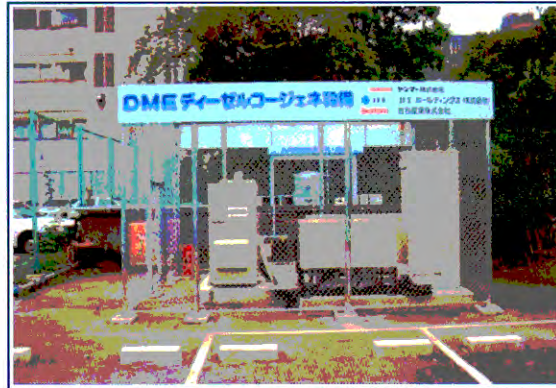
- **2005-2007:** JFE lleva a cabo un sistema de 8 kW con Yanmar y Iwatani.
- **2005:** AIST desarrolló un sistema móvil de 50 kW con Isuzu.
- **2005-2007:** La universidad de Kitakyushu llevó a cabo una prueba con un sistema de 41 kW.

Figura 2.2. Equipo de cogeneración diesel – DME de 36 kW (Kitakyushu, Japón)



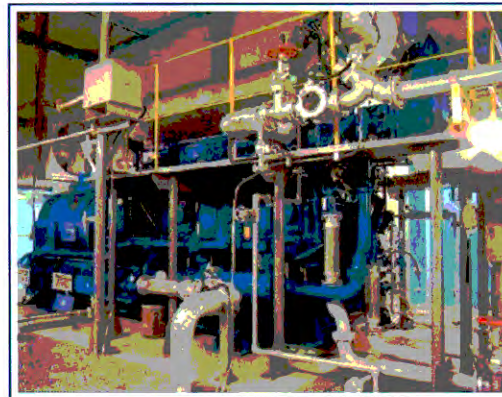
Fuente: DME Handbook (2007).

Figura 2.3. Equipo de cogeneración diesel – DME de 8.2 kW (Kawasaki, Japón)



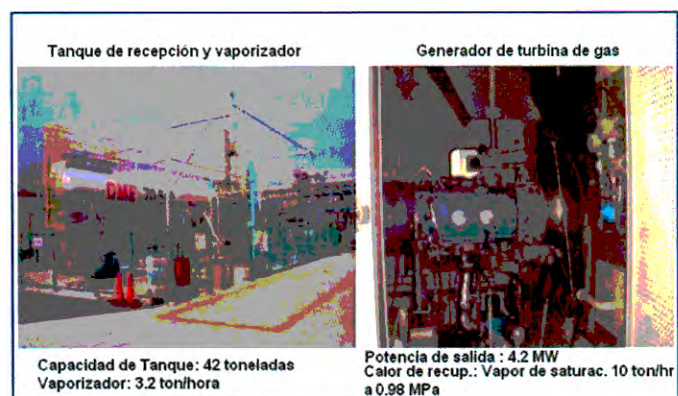
Fuente: DME Handbook (2007).

Figura 2.4. Sistema de generación de electricidad diesel – DME 1250 kW (Tsurumi, Japón)



Fuente: DME Handbook (2007).

Figura 2.5. Pruebas de generación de electricidad mediante turbina de gas de 4MW – Proyecto conjunto TEPCO, Mitsubishi Chemicals y JFE



Fuente: DME Handbook (2007).

2.3.2. Uso en el sector transporte

Volvo Truck Corporation y Volvo Bus Corporation desarrollaron el primer vehículo pesado a DME en el mundo entre 1996-1998. El propósito del desarrollo del proyecto fue demostrar las capacidades de bajas emisiones y alta eficiencia del DME en motores diesel.

El DME, recientemente está siendo considerado activamente como un combustible automotriz medioambientalmente amigable que no produce mucha contaminación durante la combustión, comparado con la combustión del diesel, como la producción de material particulado es muy limitada. Sus cualidades únicas de auto ignición (debido al alto número de cetano) podrían utilizarse mejor mediante la ignición a alta presión del DME líquido directamente dentro del cilindro.

Nissan y Volvo ya han desarrollado camiones con motores de encendido por compresión que utilizan como combustible DME. Volvo ya tiene camiones con tecnología DME de segunda generación con gas de DME en servicio desde 2005.

Volvo se está concentrando en la excelente característica del DME como un combustible de ignición por compresión; el principal trabajo que se ha realizado es sobre el sistema de inyección de combustible debido a la diferente característica de manipulación del gas. Los motores DME de segunda generación de Volvo usan un sistema de

riel común a baja presión, con una presión de inyección menor del 20 % que la presión equivalente para los motores diesel. Una bomba especial para el combustible y los materiales de sellado son diseñados para trabajar con el gas del DME.

La agencia de energía sueca (Energimyndigheten) ha otorgado a AB Volvo una subvención de US\$ 8.4 millones para apoyar el desarrollo técnico de un motor DME de tercera generación para vehículos pesados durante el periodo 2006-2010. La meta del proyecto es entregar la tecnología para una prueba de campo principal con 30 camiones a DME de tercera generación planificados para los años 2009 y 2010.

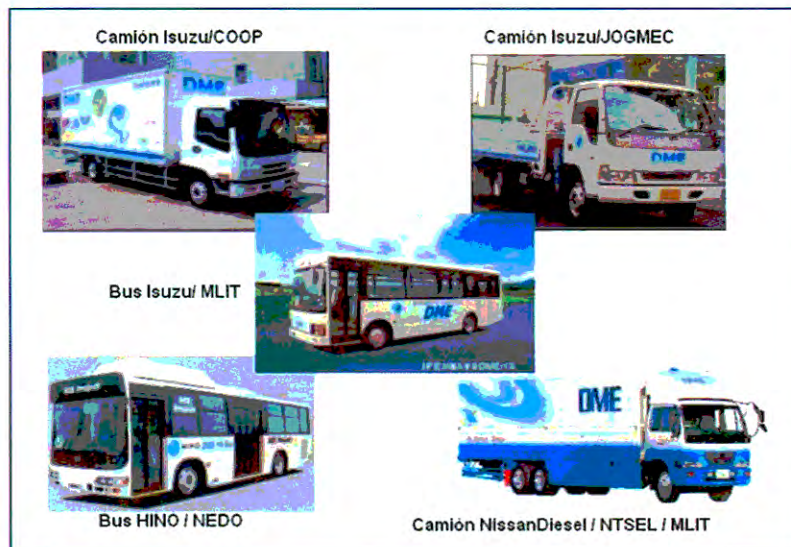
La Unión Europea, Japón y China tienen buses, los cuales técnicamente pueden circular con DME y ya han sido probados. Japón ya ha introducido la tecnología DME para camiones en Estados Unidos para las pruebas pilotos a partir de la tecnología DME de Nissan. La figura 2.6. y figura 2.7 muestran el uso vehicular del DME en Dinamarca y Japón respectivamente.

Figura 2.6. Progreso del DME como sustituto del combustible diesel en DTU, Dinamarca



Fuente: DME Handbook (2007).

Figura 2.7. Vehículos prototipo a DME en Japón



Fuente: DME Handbook (2007).

2.3.2.1. Ventajas y desventajas del uso del DME como combustible vehicular

A continuación se mencionan las ventajas de la utilización del DME como combustible automotriz:

- En comparación con el gas natural y el hidrógeno, el almacenamiento, llenado, y transporte del DME son

comparativamente fáciles, similar al GLP porque este se licua cuando es presurizado hasta alrededor 0,5 MPa a temperatura normal.

- Con el DME, es posible operar una combustión de ciclo diesel con alta eficiencia debido a que la inflamabilidad de compresión es mejor que la del diesel.
- No se genera humo debido a que la cadena carbón – carbón no existe en la molécula del combustible aun si se quema en una mezcla heterogénea de aire – combustible.
- No es generado SO_x porque el DME es un material puro que no contiene azufre.
- Es fácil aplicar catalizadores para el tratamiento posterior de emisiones porque no se generan humos del SO_x.
- La reactividad fotoquímica es baja, y no llega a hacer un precursor del ozono en la atmósfera.
- No hay peligro sobre la salud humana.

Las desventajas de la utilización del DME para el uso transporte son las siguientes:

- El Poder Calorífico, más bajo por unidad de volumen, es alrededor de la mitad del poder calorífico del diesel, y es necesario duplicar la cantidad de inyección del suministro de combustible. Por tanto, es necesario incrementar la capacidad del tanque de combustible.

- Se incrementa el desgaste en las piezas deslizantes del sistema de suministro de combustible porque la viscosidad y lubricidad del DME son bajos.

- Puede producirse hinchazón en los materiales de sellado y piezas de resinas.

- Se gasifica fácilmente porque el punto de ebullición es bajo.

- El número de octano es bajo, y no es adecuado para motores de ignición.

2.3.2.2. Funcionamiento de vehículos pesados a DME

Con la tecnología a aplicar el sistema de suministro de combustible que utiliza la propiedad de DME para el motor diesel base, los vehículos a DME pueden lograr la energía y eficiencia de combustible equivalente al motor base. Con respecto a la reducción de emisiones, la combinación del sistema de recirculación de los gases de escape (EGR) y el

sistema de catalizador de NOx de alta eficiencia han sido adoptados para reducir el NOx y material particulado simultáneamente.

2.3.2.3. Sistema de suministro de combustible DME en vehículos pesados

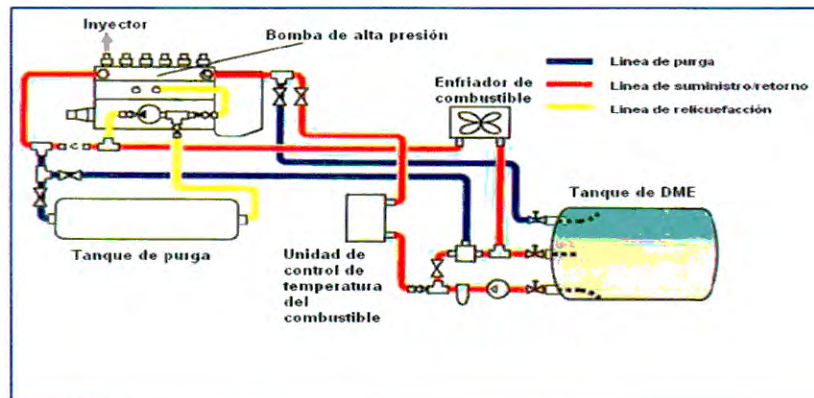
Cuando se utiliza DME en un motor diesel, el sistema de suministro de combustible debe diseñarse tomando en consideración las diferencias de propiedades entre el DME y los combustibles ligeros. Como el DME se convierte en gas a atmosfera y presión normal, los vehículos a DME siempre presurizan las tuberías del combustible para licuar el DME. Además, con el fin de lograr la mayor potencia de salida mucho más que los vehículos diesel mientras utilizan DME cuyo poder calorífico (volumen) es alrededor de la mitad que el del diesel, los vehículos a DME usan un sistema de suministro de combustible capaz de rociar el doble la cantidad de combustible.

2.3.2.4. Eficiencia del DME como combustible vehicular

Mediante la optimización del sistema de combustión y la combinación de las tecnologías de reducción de emisiones, los vehículos a DME logran el mismo nivel de eficiencia del combustible como los vehículos a diesel convencionales,

mientras reducen las emisiones significativamente. En la figura 2.8. se observa un equipo de suministro de DME.

Figura 2.8. Sistema de suministro de DME en vehículos pesados



Fuente: Conference on the Development and Promotion of Environmentally Friendly Heavy Duty Vehicles such as DME Trucks, Marzo 17 (2006).

2.3.3. Uso en el sector residencial

La perspectiva del DME como un combustible alternativo al GLP en aplicaciones de consumo estimuló en Japón a realizar experimentos que investiguen la combustión del DME en equipos de combustión existentes producidos en masa con el fin de obtener una comprensión de sus características de combustión, cuyos resultados se presentan en el cuadro 2.3., cuadro 2.4. y la figura 2.9.

Cuadro 2.3. Resultados de la prueba de combustión del DME

Ítem		Estándar JIS	Resultado
Pruebas bajo condiciones sin viento	-Ignición	-Ignición no explosiva	-Ninguna
	-Estabilidad de la flama -Retorno de llama -Ruido de combustión -Extinción del fuego -Concentración de CO -Emisión de hollín	-Llama constante -No retorno de llama -60 dB o menos -Ruido no explosivo -0,14% o menos -No emisión de hollín	-Paso el estándar -Ninguna -Dentro del estándar -Dentro del estándar -0,05% -Dentro del estándar
Prueba de recipiente de gran tamaño		Flama constante / sin olor	Paso el estándar
Evaluación total			Paso el estándar

Condiciones: Especificaciones gas municipal japonés 13A, apertura de dámper 5/10
Fuente: DME Handbook (2007). Elaboración propia.

Cuadro 2.4. Resultados de prueba de eficiencia térmica (Japón)

Tipo de gas de prueba	DME		13 A	
Gravedad específica del gas	1,59		0,719	
Presión del gas (kPa)	2,0		2,0	
Diámetro del recipiente	26		25	
Apertura del dámper del aire	5/10		8/10	
Temperatura fina (°C)	75,2	75,4	75,4	75,7
Temperatura inicial (°C)	24,8	24,5	24,9	25,2
Aumento de la temperatura (°C)	50,4	50,9	50,5	50,5
Cantidad de agua (l)	4,4	4,4	4,4	4,4
Cantidad de calor de absorción (MJ/h)	0,928	0,937	0,930	0,930
Presión atmosférica (kPa)	101,2	101,2	100,8	100,8
Temperatura del gas (°C)	25,2	25,3	24,4	24,3
Presión de vapor (kPa)	3,21	3,23	3,05	3,04
Coefficiente de corrección	0,903	0,930	0,904	0,904
Tiempo de paso del gas (s)	543,1	547,8	508,4	508,5
Cantidad de consumo (m ³ /h)	0,03289	0,03297	0,04166	0,04146
Cantidad de corrección de consumo (m ³ /h)	0,0297	0,0298	0,0376	0,0375
Poder calorífico del gas (MJ/m ³)	65,44	65,44	49,64	49,64
Cantidad de calor consumido (MJ)	1,944	1,948	1,869	1,861
Eficiencia térmica (%)	47,73	48,11	49,76	49,97
Promedio de cantidad de calor (%)	47,9		49,9	

Fuente: DME Handbook (2007). Elaboración propia.

Figura 2.9. Combustibilidad del DME



Fuente: DME Handbook (2007).

2.3.4. Uso como materia prima en la Industria química

2.3.4.1. Aspectos técnicos

Es importante para la producci3n de las olefinas más ligeras a partir del DME desarrollar un catalizador excelente, de alta selectividad y vida, y el diseño de un único reactor y una configuraci3n del proceso que logre el máximo rendimiento del catalizador. El catalizador debe tener la funci3n de la formaci3n de la cadena carbono-carbono a partir del DME, el cual no tiene la cadena C-C, controlando el crecimiento de la cadena carbonosa de 2 a 4, y evitando la formaci3n de material carbonoso para una larga vida del catalizador. Además, en el

desarrollo del proceso, algunas optimizaciones son examinadas en cada proceso basadas en el funcionamiento del catalizador: condiciones de reacción como temperatura y presión, el tipo de reactor y la estructura que controle el gran calor exotérmico, y la configuración del proceso con reciclado de sub-producto hidrocarburo que alcance mayor rendimiento de olefinas más ligeras.

2.3.4.2. Síntesis de productos químicos a partir del DME

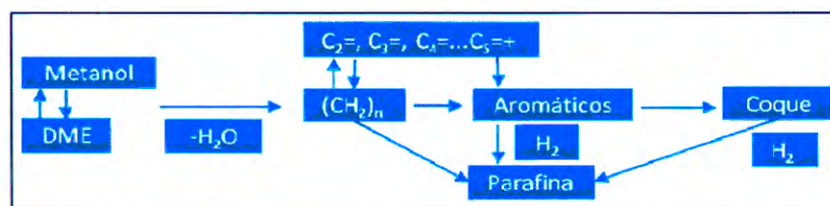
Como la carga de muchos procesos para la producción de olefinas es el petróleo crudo, el precio de las olefinas es directamente afectado por el incremento en el precio del petróleo crudo. Por otro lado, el DME puede ser sintetizado independientemente de las fuentes de materias primas que contienen carbono, no sólo como el gas natural y el carbón, sino biomasa mediante la producción de gas sintético.

En los años 70, la zeolita ZSM-5 con alta relación sílice-alúmina fue descubierta por Mobil Oil. Esta nueva zeolita tiene una excelente habilidad para sintetizar hidrocarburos como gasolina y olefinas a partir del metanol o DME. Desde entonces, varias investigaciones se han realizado acerca del control de la distribución de los hidrocarburos en los productos, el mecanismo y el método de eliminación de la deposición de material

carbonoso, y la comparación entre la zeolita ZSM-5 y otras zeolitas.

En el mecanismo y la vía de reacción, se considera que en un principio el metanol y el DME alcanzan una composición de equilibrio mediante las reacciones de deshidratación e hidratación y luego son convertidos a hidrocarburos mediante la formación y el crecimiento de cadenas C-C. Así se muestra en la figura 2.10, para esta reacción, el metanol y el DME se puede observar que son del mismo material de partida. De acuerdo al mecanismo de reacción, las olefinas más pequeña son generadas a través de $(CH_2)_n$ de los intermedios, y luego las olefinas más grandes son producidas a través de la prolongación de la reacción de carbono como la oligomerización, etc., seguida de la formación de la parafina y los aromáticos con la transferencia de hidrogeno y la deposición de carbonosos al producto final.

Figura 2.10. Vía de reacción para la conversión de metanol/DME a hidrocarburos



Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 2.5. Características del proceso de las tecnologías disponibles metano a olefinas

	UOP/HYDRO MTO	Lurgi MTP	JGC DTP
Catalizador	SAPO 34	ZSM-5	ZSM-5
Características del proceso Materia prima	MeOH (DME)	MeOH/DME (DME)*	DME (MeOH/DME)*
Sistema del reactor	Lecho fluidizado distribuido	Lecho fijo	Lecho fijo
Regeneración del catalizador	Continuo	Modo batch	Modo batch
Reciclo	No	Olefina / agua	Olefina
Conversión (%)	99,6	> 99	>99,9
Condiciones de operación Temperatura (°C)	350 – 550	425	450 – 570
Presión	1-3 bar-G	1,5 bar	2 – 5 bar
Rendimiento de olefinas (%)			
Etileno	48-31	-	-
Propileno	34-45	65	>70

*Mezcla de la deshidratación del metanol
Fuente: DME Handbook (2007). Elaboración propia.

2.3.5. Uso en celdas combustibles

En los últimos años se está dando aplicación al DME como fuente de hidrógeno para las celdas combustible de electrólito de polímero PEFCs (Polymer electrolyte fuel cells); el DME un material atractivo para convertir hidrógeno así, como el metanol, tiene alta densidad de energía y es fácil de almacenar.

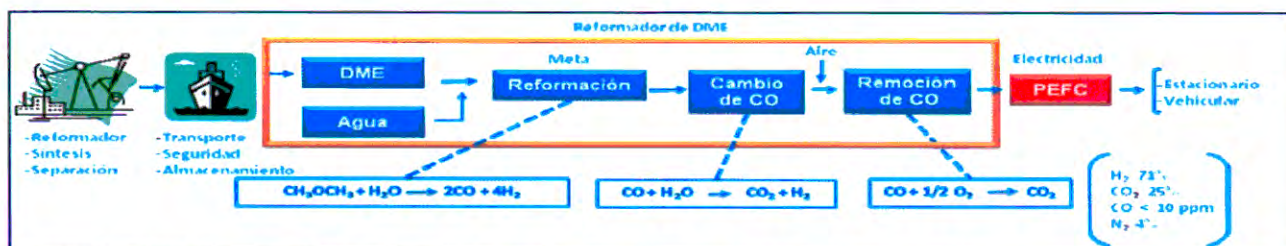
El DME tiene las siguientes características comparadas con otros combustibles considerados como suministros de hidrógeno para el PEFC:

- El DME es fácilmente convertido a hidrógeno a una baja temperatura comparada con los combustibles fósiles como gas natural, GLP y kerosene.
- El DME no tiene las impurezas como los componentes azufrados, etc.

- La toxicidad es extremadamente baja comparada con el metanol, y la penetración en la membrana del electrolito de polímero es pequeña.

Para un sistema PEFC que utiliza como combustible DME, primero el DME es sintetizado en una planta de gas en campo y luego es transportado a través de un buque tanque de DME y luego almacenado. Luego, el DME y el agua son llevados al reformador de DME que sirve como catalizador de tres funciones (reformación, desplazamiento de CO, y remoción de CO), y el gas de reformación rico en H₂ en el rango 10 ppm de CO. Además, el gas de reformación es suministrado a la pila PEFC. Tanto la energía eléctrica y el agua caliente son obtenidas cuando la electricidad es generada. En este caso, si un catalizador de reformación puede ser desarrollado para convertir DME a baja temperatura, el reformador del DME puede ser además construido más compacto, puede tener un tiempo de arranque más corto y eficiencia más alta comparado con el reformador de gas doméstico convencional o GLP.

Figura 2.11. Cadena del valor de sistema PEFC reformando DME



Fuente: DME Handbook (2007). Elaboración propia.

2.3.6. Uso como propelente y otros usos

2.3.6.1. Uso como gas propelente para productos de aerosol

En la actualidad, la más importante aplicación para el DME es como propelente de aerosol. El DME reemplaza a los clorofluorocarbonos que se han eliminado debido a sus efectos nocivos en la capa de ozono. El DME es además un excelente agente de metilación para la producción de sulfato de dimetilo, polialquilbenceno, y N,N-dimetilanilina de alta pureza, así como muchos otros químicos.

Es necesario contar con suficiente presión para empujar el contenido del envase a través de la válvula. Además, es una ventaja para un gas propelente ser no tóxico, estable, sin olor, incoloro, no irritante, buen solvente, económico, etc. El GLP y el DME son usados por estas características.

La elección del propelente depende de las características de un producto individual (rango del modelo de spray y característica de la velocidad, etc. del líquido contenido). Para lograr los requerimientos de cada producto de aerosol específico, el propano, butano y el DME son frecuentemente mezclados.

1.3.6.2. Uso como solvente

Su característica como un fuerte disolvente se plantea como uno de los puntos fuertes del DME. El DME se disuelve en aceites y grasas, y agua. Las solubilidades para el DME son:

- Solubilidad del DME en agua 35,3(% en peso) (a 0,5 MPa)
- Solubilidad del agua en DME 7,0(% en peso) (a 0,5 MPa)

El DME es comúnmente utilizado con los contenidos de resinas como los sprays para cabello y pinturas. El DME también tiene una pequeña reactividad con otros contenidos así que a veces es usado para la formulación de emulsión.

Dado que el DME es miscible con muchas resinas y solventes, está siendo usado como material de limpieza para los sistemas de laboratorio y algunas aplicaciones de limpieza de alto valor agregado, alta precisión, como en los equipos electrónicos.

Cuadro 2.6. Características de los típicos propelantes mezclados de DME y GLP

Proporción de mezcla (% en peso)*	DME 90/ GLP(0.15)10	DME70/ GLP(0.29)30	DME65/ GLP(0.49)35	DME10/ GLP(0.43)90
Mayor aplicación	Spray de cabello, etc.	Insecticidas/pinturas, etc.	Pinturas, etc.	Spray de cabello, etc.
Presión de vapor	0,405±0,02	0,440±0,02	0,51±0,02	0,465±0,02
Gravedad específica	0,656±0,01	0,626±0,01	0,615±0,01	0,548±0,01

*D'DME90' significa 90 % en peso de DME y GLP (0,15) significa 10% en peso de GLP el cual tiene 0,15 MPa.

Fuente: DME Handbook (2007). Elaboración propia.

CAPITULO 3

TECNOLOGIAS PARA LA PRODUCCIÓN DEL DIMETIL ÉTER

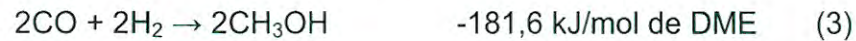
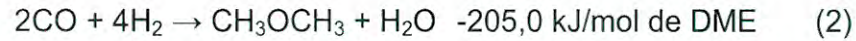
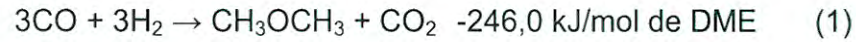
3.1. Introducción

3.1.1. Conceptos básicos de la síntesis del DME

En la síntesis del metanol a alta presión, 0,5 ~ 1% de DME está presente como una impureza que será separada y algo del DME será recolectado como un producto. En el subsecuente método a baja presión, las impurezas del DME disminuyen a 150 ppm. Actualmente, casi todo el DME es producido mediante la deshidratación del metanol, y la cantidad producida es pequeña siendo aproximadamente 10000 toneladas/año en Japón y alrededor 150000 toneladas alrededor del mundo.

Para la utilización del DME como combustible, este debe ser producido en grandes cantidades a bajo costo. Hay dos métodos en fase de desarrollo: el proceso de dos pasos (Método indirecto) de adición de un paso de deshidratación a la última parte del procesamiento industrial del metanol, y el proceso de un paso (Método directo) de síntesis del DME directamente a partir del gas de síntesis (H_2 , CO). El Cuadro 3.1. presenta las eficiencias teóricas de los métodos de producción del DME.

Las ecuaciones y sus correspondientes entalpías para las reacciones de síntesis del DME son mostradas a continuación:



Cuadro 3.1. Eficiencias teóricas del gas frío y el valor estimado de la actual planta de producción de DME a partir del metano (100 ton/día).

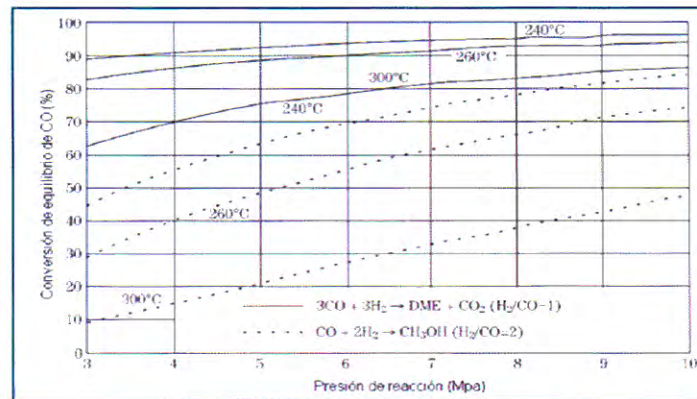
Proceso	Método indirecto	Método directo
Reformación del metano	$2\text{CH}_4 + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CO} + 4\text{H}_2 + \text{H}_2\text{O}$ Eficiencia teórica 95,3% Eficiencia actual 84,4%	$2\text{CH}_4 + \text{O}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow 3\text{CO} + 3\text{H}_2 + \text{H}_2\text{O}$ Eficiencia teórica 98,3% Eficiencia actual 87,0%
Producción de DME	(síntesis de metanol) $2\text{CO} + 4\text{H}_2 \rightarrow 2\text{CH}_3\text{OH}$ Eficiencia teórica 78,2% (deshidratación) $2\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow \text{CH}_3\text{OCH}_3 + \text{H}_2\text{O}$ Eficiencia teórica 98,2 % Eficiencia actual 87,0%	Síntesis de DME $3\text{CO} + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OCH}_3 + \text{CO}_2$ Eficiencia teórica 84,4% Eficiencia actual 80,7%
Global	$2\text{CH}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OCH}_3 + \text{H}_2\text{O}$ Eficiencia teórica 83,0% Eficiencia actual 57,0%	$2\text{CH}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OCH}_3 + \text{H}_2\text{O}$ Eficiencia teórica 83,0% Eficiencia actual 70,2%

(Para la síntesis de metanol a partir del metano: E. teórica 84,2% y la E. actual 66%)
Fuente: DME Handbook (2007). Elaboración propia.

La reacción de la síntesis del DME a partir del gas de síntesis (1) consiste en tres pasos: la reacción de síntesis del metanol (3), la reacción de la deshidratación (4), y la reacción de desplazamiento gas agua (5). Cuando la reacción de desplazamiento es lenta, se cree que la reacción avanza mediante la expresión (2) de la combinación de las reacciones (3) y (4). La reacción general es exotérmica y el calor de reacción para el paso de la síntesis de metanol es grande. La

conversión de equilibrio para la síntesis del DME es más alta a presión baja, como se observa en la figura 3.1.

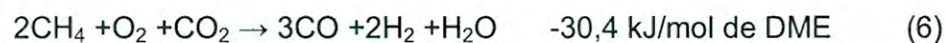
Figura 3.1. Comparación de la conversión de equilibrio de CO entre la síntesis de metanol y la síntesis de DME

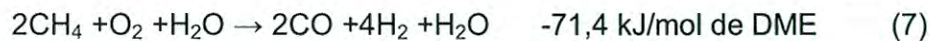


Fuente: DME Handbook (2007).

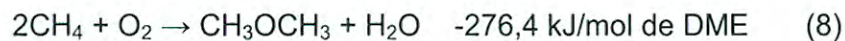
La conversión de equilibrio ($\text{H}_2 + \text{CO}$) (a 260 °C y 5 MPa) de los dos tipos de reacción de síntesis de DME (1), (2), y la reacción de síntesis de metanol (3) cambia como una función de la relación hidrógeno a monóxido de carbono (H_2/CO) del gas de síntesis. Es común para estas tres reacciones que la conversión de equilibrio tenga su máximo valor en las composiciones estequiométricas $\text{H}_2/\text{CO}=1$ (reacción (1)) y $\text{H}_2/\text{CO}=2$ (reacciones (2) y (3)). El máximo valor de la conversión de equilibrio para la síntesis del DME mediante la reacción (1) es más alto que en el caso de las reacciones (2) y (3).

La producción del gas de síntesis del metano se asume que será expresada mediante una de las siguientes fórmulas (6) y (7).





La combinación de (1) y (6), o de (2) y (7) da la misma fórmula de reacción general (8), lo que indica que el DME y el agua se generarán mediante un tipo de oxidación parcial de metano.



3.1.2. Síntesis indirecta del DME

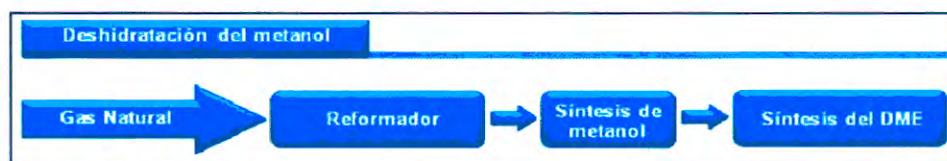
La síntesis indirecta del DME es un proceso de dos pasos que consiste de la síntesis del metanol mediante la reacción (3) a partir del gas de síntesis y la producción de DME por la reacción de deshidratación (4), ver Figura 3.2. La síntesis del metanol se realiza efectivamente a presión de 8-9 MPa porque la conversión de equilibrio de la síntesis del metanol es baja a presión de 5 MPa. Una vez que la conversión es 25-35 %, y la relación de reciclo del gas que no ha reaccionado es 3-5, la eficiencia del gas frío es alrededor de 66%.

La reacción de deshidratación es manejada a temperatura de 250-400 °C y una presión de 1-2,5 MPa. Una vez que la conversión es alta, 60-80%, el requerimiento de energía para la evaporación del metanol líquido y la separación de los tres componentes, (DME, el sub producto agua, y el metanol no reaccionado) es grande. Tomando este requerimiento de energía en cuenta, la eficiencia de

gas frío del proceso de deshidratación disminuye a 87% y la eficiencia general del gas frío de la producción del DME a partir del gas natural es estimada alrededor de 57%. La mejora de esta eficiencia global sería por la integración de los procesos individuales en un proceso de dos pasos.

Mientras una planta de síntesis de metanol a gran escala está en operación produciendo 3000 ton/día, la planta de deshidratación de metanol es pequeña, produciendo sólo 10 ton/día. Una escala de alrededor de 100 veces es necesaria para la producción del DME combustible. Mitsubishi Gas Chemical Ltd., Toyo Engineering Ltd., y Lurgi Co. quienes son los dueños del proceso comercial del metanol están presentando planes para una planta de producción de DME que conecte directamente el proceso de deshidratación con su propio proceso de metanol.

Figura 3.2. Producción del DME utilizando la deshidratación del metanol



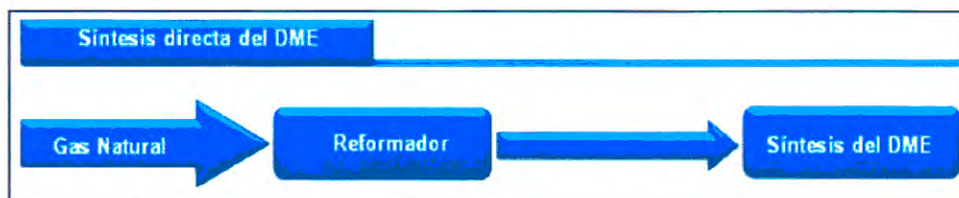
Fuente: Elaboración propia.

3.1.3. Síntesis directa del DME

El propósito de la síntesis del DME directamente a partir del gas de síntesis es incrementar la conversión global incluyendo el reciclo de gas no reaccionado. Por otro lado, la remoción del calor de reacción

de un reactor es un gran reto en la ingeniería porque tanto la velocidad de conversión y el calor de reacción por cantidad de reacción son más grandes que los de la síntesis del metanol. La figura 3.3. muestra el esquema de la producción del DME usando síntesis directa. Mientras que los diferentes proyectos de desarrollo de la tecnología se presentan en el cuadro 3.2.

Figura 3.3. Producción del DME usando síntesis directa



Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 3.2. Comparación de los proyectos de desarrollo de la tecnología de síntesis directa del DME

Proceso	JFE	Air products & Chemicals	Haldor Topsoe
Materias primas	Gas derivado del carbón, gas natural	Gas derivado del carbón	Gas Natural
(H ₂ /CO) del gas de síntesis	1	0,7	2
Tipo de reactor	Fase en suspensión (slurry)	Fase en suspensión (slurry)	Lecho fijo
Condición de reacción			
Temperatura (°C)	240 – 280	250 – 280	210 – 290
Presión (Mpa)	5 – 6	5 – 10	7 – 8
Fórmula de reacción	Reacción (1)	Reacción (1)	Reacción (2)
Conversión (%)	50 – 60	33	18
DME/(DME + MeOH) (%)	91	30 - 80	60 -70

Fuente: DME Handbook (2007). Elaboración propia.

La investigación de la síntesis empezó después de la segunda crisis del petróleo, alrededor de 1980, cuando el DME fue considerado que sería un intermedio en la síntesis de la gasolina. Se realizaron esfuerzos para desarrollar un catalizador de lecho fijo con una mezcla

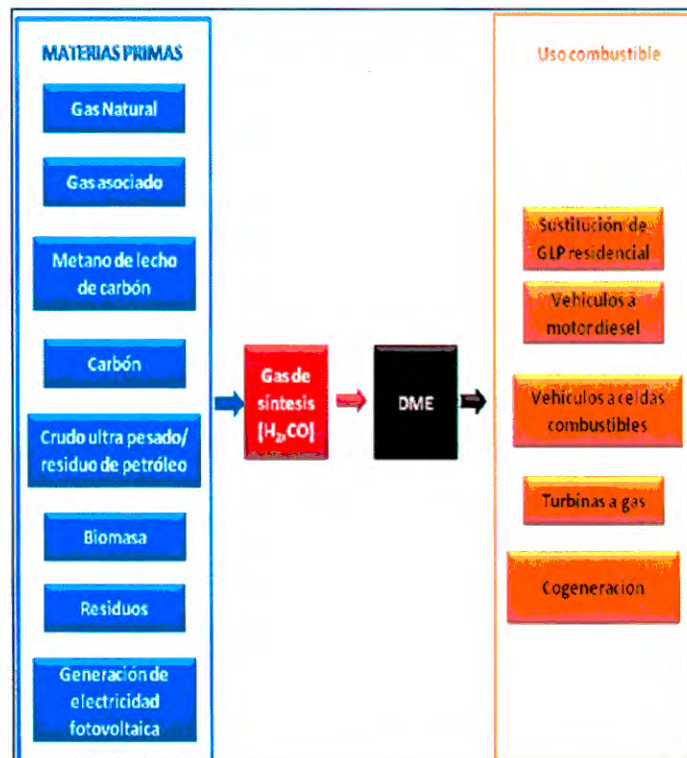
de los catalizadores adecuados para la síntesis del metanol y deshidratación.

3.2. Materia prima para la producción del DME

3.2.1. Introducción

Como el DME es sintetizado a partir del gas de síntesis, varias materias primas, que no son sólo el gas natural, como el carbón, metano del lecho del carbón, y biomasa, etc., ver figura 3.4., pueden ser utilizados como materia prima, y hay pocas restricciones con respecto a las fuentes. Por ejemplo, es posible convertir el hidrógeno producido a partir de la generación de electricidad de la generación fotovoltaica en DME como un combustible fácil de transportar.

Figura 3.4. Materias primas para la producción de DME



Fuente: DME Handbook (2007). Elaboración propia.

En el futuro, el DME podría jugar el rol de un portador común de energía, porque este puede ser producido de un amplio rango de materias primas a partir de fuentes fósiles a fuentes renovables.

3.2.2. Tecnologías para la obtención de la materia prima

3.2.2.1. Materias primas y procesos para la producción de gas de síntesis

El gas de síntesis (gas que está compuesto principalmente de H_2 y CO) puede ser producido de materia prima gaseosa, como gas natural, gas asociado y metano de lecho de carbón, también como de materias primas sólidas como carbón, petróleo crudo ultra pesado de arenas bituminosas, residuos de petróleo, biomasa, etc. Ver cuadro 3.3.

La materia prima gaseosa es reformada en gas de síntesis mediante reacción catalítica con vapor y dióxido de carbono así como agentes gasificantes en un reactor tipo multi tubular. Debido a que la reacción es endotérmica, los tubos del reactor son indirectamente calentados con los gases de combustión. Como la presión del reformador se limita a 2 MPa o más por la durabilidad térmica del tubo metálico, es necesario presurizar el gas de síntesis hasta la presión de reacción de síntesis antes de entrar al reactor de síntesis.

En el caso de un horno de oxidación parcial y un ATR (Auto – Thermal Reformer), las materias primas gaseosas son convertidas en gas de síntesis con vapor, dióxido de carbono, y oxígeno como agentes gasificantes en una cámara de combustión a alta temperatura. En el caso del ATR, hay un lecho de catalizador a la salida del horno donde una reacción final de reformación se lleva a cabo, con el calor necesario que sensiblemente aporta el propio gas. Estos equipos tienen una estructura interna simple que será adecuada para el escalamiento y para que sean operados a presión más alta sin necesidad de una presurización posterior. A pesar de estas ventajas, es necesaria una planta de oxígeno.

En cualquier caso, la prevención de la formación de hollín y polvo metálico, y el control de metano residual son importantes.

Las materias primas sólidas son pirolizadas y gasificadas en el horno de gasificación a alta temperatura con oxígeno. La temperatura de gasificación más alta disminuye la eficiencia del gas frío de la producción de gas de síntesis aunque los contenidos del metano residual y alquitrán son bajos. Las materias primas son cargadas en el horno de gasificación a alta presión como suspensión de agua o por transporte neumático. La ceniza de las materias primas es frecuentemente descargada

como desperdicio líquido. Varios equipos son utilizados para el enfriamiento del gas a alta temperatura y recuperación de calor.

En el caso de residuos, aunque la composición y la cantidad de suministro de la materia prima cambia dramáticamente, un gas producto constante puede ser obtenido por homogenización de la materia prima, y adaptando el método de suministro y el proceso de gasificación.

Se ha propuesto llevar a cabo el proceso usando aire, o aire enriquecido de oxígeno, porque la planta de oxígeno es demasiado costosa. Sin embargo, el contenido de nitrógeno en el gas de síntesis se eleva y la eficiencia de la reacción de síntesis, por lo tanto, disminuye.

La relación (H_2/CO) del gas de síntesis generado cambia dependiendo del tipo de materia prima y reformador. El rendimiento del proceso de producción del gas de síntesis es evaluado tanto por la eficiencia del gas frío y la eficiencia térmica, es importante para la síntesis del combustible que la eficiencia del gas frío sea alta.

Cuadro 3.3. Composición y eficiencia del gas frío del gas de síntesis obtenido de varias materias primas

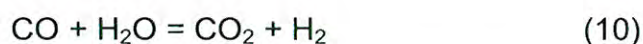
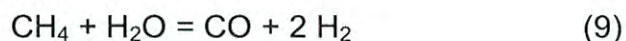
Materia prima	Proceso	Composición del gas de síntesis	Eficiencia de gas fría (%)
Gas natural	Tipo multi tubular	3~5	80-90
	ATR	1~3	80-90
	Oxidación parcial	1,7~2,5	80-87
Carbón	Gasificación a alta temperatura	0,5~1	70-80
Biomasa de madera	Gasificación a alta temperatura	Alrededor 1	67
Residuos plástico	Gasificación a alta temperatura	1,3	65

Fuente: DME Handbook (2007). Elaboración propia.

Como para los residuos de agricultura, ganadería, y pesca, el contenido de agua de cada residuo es tan alto que la energía requerida para el secado es muy grande; la tecnología combina la evolución del gas por la fermentación del metano con el uso del residuo como fertilizante es adecuado. En este caso, el metano es reformado como el gas natural.

3.2.2.2. Producción de gas de síntesis a partir del gas natural

La producción de gas de síntesis o hidrógeno a partir del gas natural está basada en la reacción de reformación de metano con vapor (9). La reacción de desplazamiento de CO (10) y la reacción entre el etano y los hidrocarburos saturados más grandes y el vapor (11) también se producen.



En el cuadro 3.4 y en el cuadro 3.5., los procesos de producción son agrupados en tres categorías de acuerdo al tipo de reactores empleados. Ellos son, los procesos de reformación con vapor usando un reactor de calor suministrado externamente de un reformador de vapor, el proceso de reformación combinado usando tanto un reformador a vapor y un reactor de calor suministrado internamente, y el proceso de reformación auto térmica (ATR) usando sólo un reactor de calor suministro internamente.

Cuadro 3.4. Proceso de DME y la composición de gas de síntesis (syngas) correspondiente

Proceso DME	Síntesis directa	Coproducción de metanol y DME	Deshidratación del metanol
Propietario del proceso	JFE	Topsoe	Mitsubishi Gas Chemical, Toyo Engineering
Carga	Gas natural/Carbón	Gas natural	Gas Natural
Syngas Proporción de H ₂ /CO	1,0	Alrededor 2,7	3,6 – 4,0

Fuente: DME Handbook (2007). Elaboración propia

Cuadro 3.5. Proceso de producción del gas de síntesis como carga el gas natural

Proceso	Reformación con vapor	Reformación combinada	Reformación auto térmica
Reactor	Reformador de vapor (calor suministrado externamente)	Reformador primario (calor suministrado externamente) Reformador secundario (calor suministrado internamente)	Reformador auto térmica (calor suministrado internamente)
Temperatura de reacción (°C)	500 – 900	500-800 900-1350	900-2000
Presión de reacción (MPa)	Presión atmosférica ~3,0	~4,5	~8,0
Calor de reacción	Grandemente endotérmica	Totalmente endotérmica	Balanceada
Composición del gas H ₂ /CO	Rico en hidrógeno = 3-5	=2,5~3,5	Rico en CO =2~3, sin adición de CO ₂ =0,5~1,5, con adición de CO ₂
Ventajas	- Suficiente experiencia comercial - No requiere oxígeno	- Proporción flexible de H ₂ /CO - Alta conversión de metano - Operación a alta presión	- Proporción flexible de H ₂ /CO - Alta conversión de metano - Operación a alta presión.
Problemas	- Reformador costoso	- Consumo medio de oxígeno	- Gran consumo de oxígeno - Riesgo de formación de carbón - Riesgo de polvo metálico

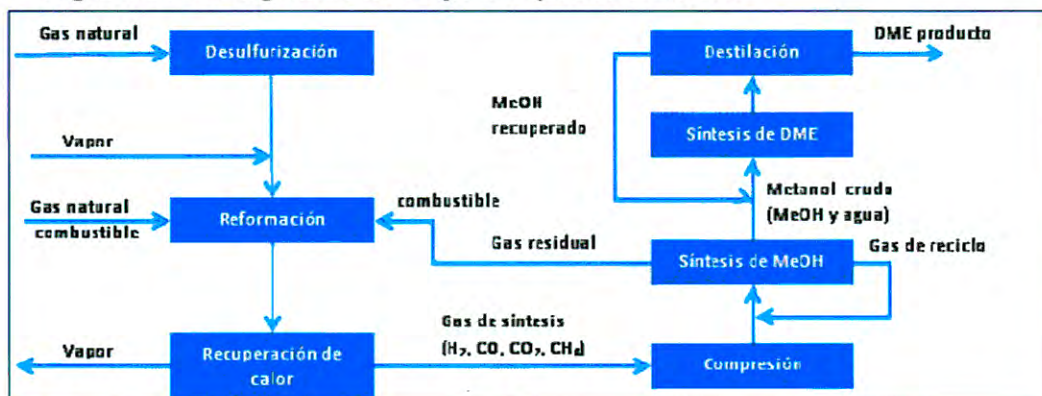
Fuente: DME Handbook (2007). Elaboración propia.

3.3. Tecnologías de producción del DME mediante síntesis indirecta

3.3.1. Proceso MGC

El proceso está compuesto de tres secciones: la producción de gas de síntesis, la síntesis de metanol y la síntesis de DME y la destilación. El proceso MGC se presenta en la figura 3.5.

Figura 3.5. Diagrama de flujo del proceso MGC



Fuente: Elaboración propia.

En la sección de la producción de gas síntesis, el gas natural (materia prima) mezclado con el vapor de proceso es suministrado al reformador y el gas de síntesis que consiste de H_2 , CO y CO_2 se producen.

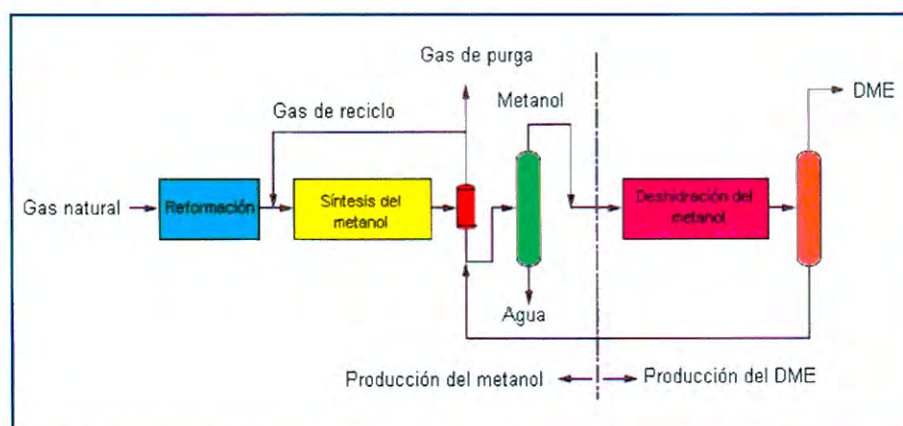
En la sección de la síntesis del metanol, el gas de síntesis presionado hasta la presión de diseño en el compresor es introducido en el convertidor de síntesis del metanol en el cual se llena el catalizador de la síntesis del metanol. El metanol sintetizado es condensado y separado de la fase gaseosa.

En la sección de la síntesis del DME y la destilación, el vapor de metanol del cual el agua e impurezas han sido eliminadas es introducido al reactor en el cual se llena del catalizador de deshidratación del metanol y el DME es sintetizado. El DME es rectificado y se convierte en DME producto. El metanol no convertido a DME en el reactor es recuperado y utilizado otra vez como materia prima de reacción.

3.3.2. Proceso TEC

El proceso TEC de producción del DME es una tecnología de síntesis indirecta basada en tres pasos de reacciones elementales: (a) reformación del gas natural a syngas, (b) síntesis del metanol a partir del syngas, y (c) producción del DME por deshidratación del metanol, en un reactor apropiado bajo condiciones adecuadas de reacción, como se muestra en la figura 3.6.

Figura 3.6. Diagrama de flujo del proceso de TEC



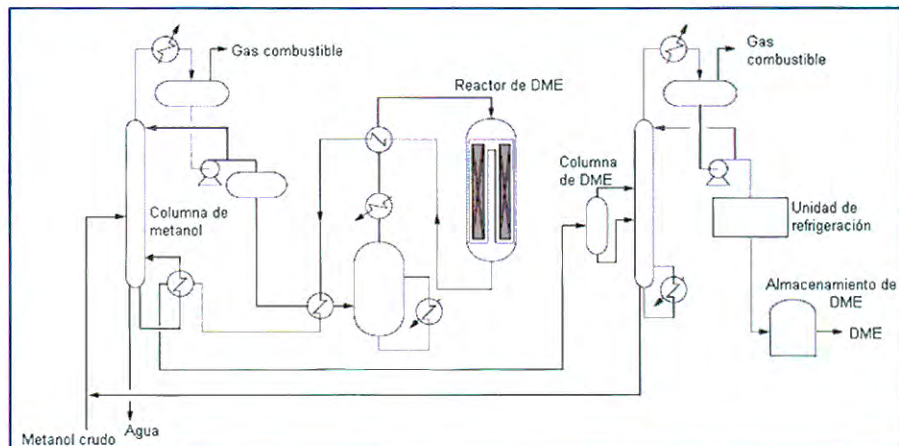
Fuente: DME Handbook (2007). Elaboración propia.

3.3.2.1. Proceso de producción del DME

En la figura 3.7, se observa que el proceso de producción del DME puede ser siempre un proceso de un tren simple que consiste de un reactor y varios fraccionadores. El agua es luego separada del metanol crudo producido de la sección de síntesis del metanol, y subsecuentemente el metanol purificado es cargado al reactor de DME con el fin de convertirlo a DME mediante la reacción de deshidratación. En la columna de DME, un producto final de DME altamente puro es obtenido.

Una de las características del proceso indirecto de la síntesis del DME es la producción flexible de metanol y DME en variadas proporciones de acuerdo a las circunstancias del mercado. Agregando una línea de extracción del producto metanol a la columna del metanol, la velocidad de carga del metanol al reactor del DME puede ser ajustado y la coproducción del DME y el metanol así llega hacer posible en alguna relación. Se cree que es una característica deseable dado que la utilización del DME está en una etapa de planeamiento de proyecto y que el mercado aún no sido establecido. Sin embargo, puede ser posible agregar la unidad de la síntesis del metanol a una planta existente de metanol para la producción del DME intermedio, entonces el costo de planta asociado a esta unidad es sólo entre 10 a 15% de una planta completa de DME.

Figura 3.7. Esquema de producción del DME



Fuente: DME Handbook (2007). Elaboración propia.

3.3.3. Proceso Lurgi

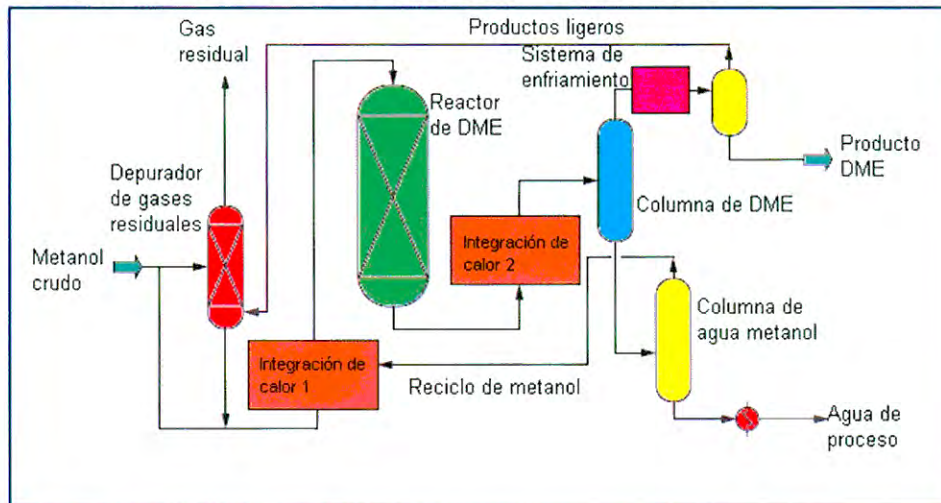
El proceso de DME de Lurgi es un proceso indirecto, como se basa en la deshidratación del metanol, ver figura 3.8. La conversión del metanol fresco en un reactor de lecho fijo adiabático de Lurgi es alrededor de 70% por paso. Una planta comercial basada en la tecnología del DME de Lurgi aún no ha sido construida.

El metanol crudo producido en la sección de síntesis del metanol es enviado a la columna depuradora de gases residuales, donde las impurezas son purgadas a la corriente del gas residual. El metanol fresco, combinado con el metanol reciclado de la columna agua-metanol, es primero vaporizado y luego enviado al reactor de deshidratación.

La corriente del efluente del reactor de deshidratación es enfriada en un tren de intercambio de calor y luego enviada a la columna de DME.

El producto DME es extraído como producto de cabeza, y luego el metanol no convertido es enviado a la columna agua-metanol. El agua es removida como producto de fondos, y la corriente del metanol recuperado es reciclada al reactor de deshidratación.

Figura 3.8. Proceso de síntesis del DME de Lurgi



Fuente: DME Handbook (2007). Elaboración propia.

3.3.4. Proceso Topsoe

3.3.4.1. Preparación de gas de síntesis por el reformador auto térmico

i) Remoción del azufre, sistema saturador y pre reformado

Los componentes azufrados en la carga de gas natural han de ser removidos a fin de no envenenar el catalizador de reformación en el pre reformador y en el catalizador de la síntesis de DME/metanol en el lazo de DME. El gas natural calentado es transferido al hidrogenador, donde el catalizador hidrogena los componentes azufrados orgánicos. Luego el gas hidrogenado es enviado al absorbedor de azufre. El gas natural

del absorbedor de azufre contiene menos de 0,05 ppm de azufre.

Del absorbedor de azufre, el gas de carga es transferido al sistema de saturación, donde es mezclado con el vapor de las corrientes de condensado, el cual es requerido para la reacción de reformación. El propósito del sistema de saturación es utilizar el calor de bajo grado a partir de la sección de síntesis para ahorrar vapor HP (High Pressure/De alta presión) y re usar el condensado del proceso.

La mezcla de gas y vapor es calentada otra vez antes de entrar al pre reformador. El gas de proceso es introducido en el reactor pre-reformador adiabático, para la conversión de los hidrocarburos más grandes, antes de entrar al reformador auto térmico.

ii) **Reformación auto térmica**

El efluente del pre-reformador es más adelante precalentado a través de un horno antes de que sea llevado al reformador auto térmico. El oxígeno que abandona la unidad de separación de aire es calentado en el pre calentador de oxígeno antes de que sea mezclado con la corriente de gas y vapor. La mezcla de oxígeno y vapor es luego transferido al reformador auto térmico junto con la carga de gas natural.

En el reformador auto térmico de quemado de oxígeno, el gas es convertido mediante la reacción térmica combinada y catalítica descrita anteriormente. El gas reformado del reformador auto térmico va hasta la caldera de calor residual alrededor de 1000-1050 °C y 40 kg/cm²g, donde el vapor saturado de alta presión es producido. El gas es luego transferido al recalentador de vapor. Luego, el gas será enfriado a través de un tren de intercambio de calor. Antes de entrar a la sección de síntesis, el gas será enfriado en un enfriador final de agua, y el condensado del proceso es removido en el separador final.

3.3.4.2. Síntesis combinada de metanol y DME

El gas de síntesis de la sección de reformación entra a los compresores del gas de síntesis, y luego es comprimido a 110 kg/cm²g. El gas reciclado de los recirculadores es mezclado con el gas de síntesis comprimido. La síntesis del metanol y DME se lleva a cabo sobre una combinación de metanol y catalizadores de doble función en un lazo de síntesis compuesto de dos pasos de reactor. La reacción del gas de síntesis a DME es una reacción secuencial, participando el metanol como un producto intermedio.

La primera parte de la reacción, del gas de síntesis a metanol, es muy exotérmica, y alcanza el equilibrio a temperatura bastante baja. Por tanto, la primera parte de la reacción se realiza en un reactor enfriador, donde el calor de reacción es continuamente removido y el equilibrio se acerca en condiciones óptimas. La segunda parte de la reacción, del metanol a DME, es mucho menos exotérmica, y el equilibrio se alcanza a temperatura más alta. Por tanto, esta parte de la reacción se lleva a cabo en un reactor de lecho fijo adiabático.

Consecuentemente, la configuración del reactor de dos pasos permite las dos mitades de la reacción secuencial que toman lugar bajo condiciones óptimas, mientras al mismo tiempo, la sección de síntesis llega a parecerse a un lazo de síntesis convencional de metanol. La única diferencia importante entre la síntesis del metanol y DME y la síntesis del metanol es el segundo paso, el reactor adiabático, cargado con un catalizador de función dual.

El gas efluente del reactor es enfriado a través del intercambiador de carga/efluente, en un enfriador de aire y un enfriador de agua. El efluente es llevado a un separador de HP (High Pressure/De alta presión), donde las fases vapor y líquido son separadas. La fase vapor es dividida en dos corrientes. La corriente principal es reciclada a un lazo de síntesis de DME mediante el compresor

recirculador. La corriente más pequeña es purgada a una membrana para la recuperación de hidrógeno. La columna de lavado de la purga es localizada corriente arriba de la membrana. El gas del separador de HP es enfriado por el intercambiador de refrigeración del gas de purga antes de entrar a una columna donde la purga de gas es lavada con metanol frío para obtener casi una recuperación total del DME producido. El gas residual producido es usado como combustible en el horno.

La relación estequiométrica en el gas reciclado necesaria para la síntesis de DME se obtiene controlando la velocidad de reciclo de hidrógeno desde la membrana hasta el gas reciclado.

La corriente cruda de DME/metanol a alta presión es despresurizada en el separador de LP, y la fracción de vapor flash es usada como combustible.

El metanol DME/metanol crudo es llevado al separador de LP (Low Pressure/ De baja presión) y luego a un tanque de producto crudo. El propósito de este almacenamiento es insertar un grado de libertad operacional entre la sección de síntesis y la sección de destilación en caso de contratiempos y el tiempo necesario para llevar los productos a especificación. Con el fin de reducir las pérdidas, el separador de LP (Low Pressure/ De baja presión) está equipado con un lavado de tope (OVHD/overhead), considerando que las pequeñas cantidades de gases liberados de

los tanques de productos crudos son añadidos a otros gases residuales de destilación y enviados al horno.

3.3.4.3. Separación del producto y purificación

La sección de purificación en un proceso directo de DME puede ser considerado como una combinación de la sección de destilación del metanol y la sección de purificación de una planta convencional de DME basada en la deshidratación del metanol. El DME/metanol contiene alrededor de 20 % en peso de agua, 5-7 % en peso de gases disueltos, y pequeñas cantidades de subproductos, principalmente éteres y alcoholes más pesados.

El fraccionamiento del producto crudo se lleva a cabo en tres columnas, la columna estabilizadora, la columna de DME y la columna de MeOH.

Los gases disueltos son removidos del DME crudo en la columna estabilizadora, antes del procesamiento. Además, una corriente efluente del reactor de deshidratación corriente abajo es agregado al tope de la columna estabilizadora (OVHD/overhead) con el fin de remover los gases contenidos en la corriente. Cantidades considerables de DME son liberadas en el tope de la columna estabilizadora, y para reducir las pérdidas de destilación, el lavado de tope (OVHD/overhead) de la columna es instalado

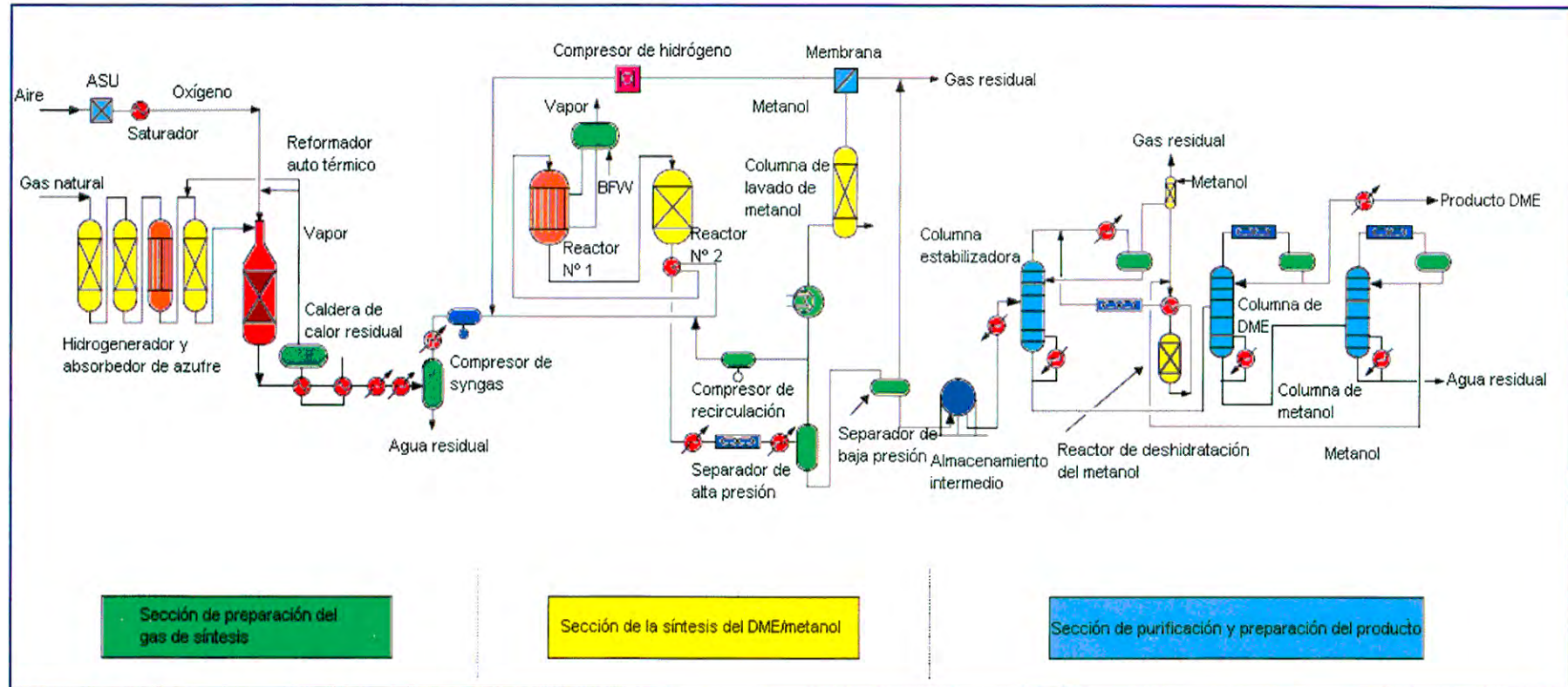
en la corriente de gas de (OVHD/overhead) de la columna estabilizadora.

El producto crudo estabilizado de los fondos de la columna estabilizadora abandona la columna de DME, donde el DME grado combustible es extraído del drum de reflujo de la columna de DME. La corriente de DME es enfriada en el enfriador del producto DME.

La corriente de la columna de DME es luego llevada a la columna de MeOH. La corriente del metanol de la columna de MeOH es reciclada a las columnas de lavado. Después del lavado, las corrientes de metanol son combinadas, evaporadas y sobrecalentadas hasta aproximadamente 290–300 °C antes de entrar al reactor de deshidratación de metanol (MTD), donde el metanol es convertido a DME y agua, y algunos alcoholes más pesados presentes son convertidos a éteres más pesados. El efluente del reactor es enfriado en los intercambiadores, y reciclado a la estabilizadora (OVHD/overhead). El agua excedente de la columna de MeOH es enviada a la sección de preparación del DME, donde el sodio de la sección de neutralización de ácido orgánico es removido en un intercambiador iónico.

Los costos de inversión y operación de la sección de preparación del gas de síntesis son relativamente altos, comparados con otras secciones. El consumo de energía y la velocidad de generación de vapor son altos también. Por tanto, la selección de la tecnología de la preparación del gas de síntesis tiene un gran efecto en las economías no solo de las plantas de DME, también de las plantas de metanol y GTL, considerando que, la selección de la tecnología de la preparación para la sección de síntesis tendrá efectos menos profundos. En consecuencia, la evaluación cuidadosa de la sección de preparación del gas de síntesis, en términos de tanto el proceso y costos, es muy importante. En tanto la evaluación económica, es necesario considerar no sólo el costo del proceso de reformación también los costos de inversión y operación de los sistemas de separación de aire y generación de vapor y otras instalaciones, basadas en la capacidad de planta deseada.

Figura 3.9. Proceso de DME de Topsoe



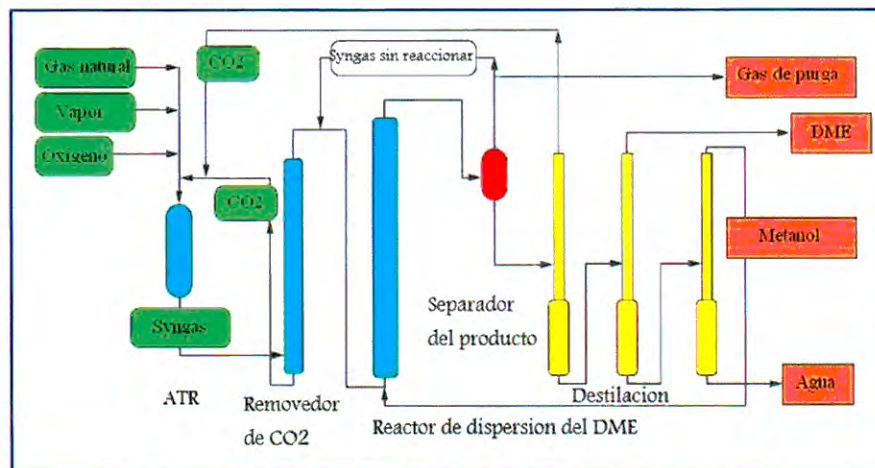
Fuente: DME Handbook (2007). Elaboración propia.

3.4. Tecnologías de producción del DME mediante síntesis directa

3.4.1. Proceso JFE

En la figura 3.10 muestra el diagrama de flujo esquemático del proceso del DME de JFE. El proceso consiste de tres reacciones principales: Preparación del syngas (ATR), síntesis del DME (reactor de dispersión del DME), y la purificación (dióxido de carbono, DME, y destilación del metanol).

Figura 3.10. Diagrama de flujo del proceso de la planta de 100 toneladas por día



Fuente: DME Handbook (2007). Elaboración propia.

Las unidades principales de la sección de la preparación del syngas (gas de síntesis) son una unidad de carga del gas natural, el reactor ATR, y un refrigerador del syngas que genera vapor de alta presión. Este vapor de alta presión es usado en las turbinas en la planta de DME de JFE. El syngas es comprimido y cargado hasta la sección de la síntesis del DME.

Las principales unidades de la sección de la síntesis del DME son el reactor de dispersión del DME, compresores del gas de reciclo y residual, y un separador del producto. Las principales unidades de la sección de purificación son: tres columnas de destilación, un despojador de CO₂, y las columnas de DME y metanol. Los efluentes del reactor de dispersión del DME son el DME producto, otros sub productos (dióxido de carbono, metanol, y una muy pequeña cantidad de agua), tanto como el gas sin reaccionar. El DME y sub productos son enfriados y removidos como líquidos del syngas sin reaccionar. En este proceso de separación, el DME trabaja como un solvente para la remoción del dióxido de carbono a partir del syngas sin reaccionar. El syngas sin reaccionar es reciclado al reactor de dispersión del DME a través del compresor del reciclo.

Cuadro 3.6. Condiciones de reacción de la síntesis directa del DME de la tecnología JFE

	Condiciones de reacción	(Condiciones estándares)
Temperatura (°C)	240-280	(260)
Presión (MPa)	3,0-7,0	(5,0)
Relación H ₂ /CO de la carga (-)	0,5-1,7	(1,0)
W/F (kg-cat*hr/kmol)	3,0-8,0	(4,0)
GHSV (sl/(kg-cat*hr))	8000-3000	(6000)

Fuente: DME Handbook (2007). Elaboración propia.

La carga del producto y sub productos a la sección de destilación son el DME, metanol y dióxido de carbono. El dióxido de carbono es separado en el despojador de CO₂ y reciclado hasta el reactor ATR. La cantidad del metanol sub producto es alrededor 10 a 15 % del DME en la unidad de la relación de mol de carbono. El sub producto metanol es separado del agua en la columna del metanol y reciclada

hasta el reactor de dispersión de DME. El metanol es finalmente convertido a DME en el +proceso de JFE para el DME.

Figura 3.11. Producción de DME a partir de gas natural (proceso de DME de JFE)

(ATR)	$2\text{CH}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OCH}_3(\text{DME}) + \text{H}_2\text{O}$	(18)
(Reactor DME)	$2\text{CH}_4 + \text{O}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow 3\text{CO} + 3\text{H}_2 + \text{H}_2\text{O}$	(19)
(Proceso total)	$3\text{CO} + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OCH}_3(\text{DME}) + \text{CO}_2$	(20)

Fuente: DME Handbook (2007). Elaboración propia.

Figura 3.12. Planta de demostración de la síntesis directa del DME de 100 toneladas por día (en Kushiro)



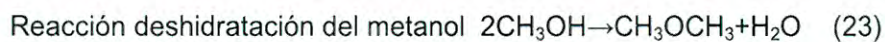
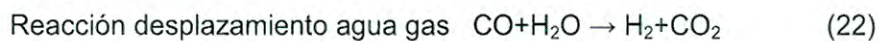
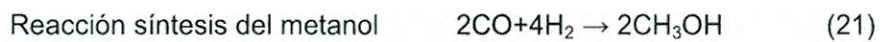
Fuente: DME Handbook (2007).

3.4.2. Proceso Air Products

The Air Products and Chemical Co. (Air Products) desarrolló el proceso de síntesis directa del DME (LPDME™) en un proyecto de desarrollo relacionado con el proceso de síntesis de metanol en fase líquida (LPMEOH™) con el soporte financiero del Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE).

3.4.2.1. Reacción de la síntesis del DME

El proceso de la síntesis directa del DME de Air Products usa dos tipos de catalizadores: el catalizador de la síntesis del metanol y el catalizador de la deshidratación. El catalizador de la síntesis del metanol es un catalizador de síntesis del metanol comercial basado en Cu (BASF S3-86) y el catalizador de la deshidratación es seleccionado de materiales ácidos sólidos como alúmina y zeolitas. Las reacciones (21) y (22) son catalizadas por los catalizadores de la síntesis del metanol, y la reacción (23) es catalizada por los catalizadores de la deshidratación.



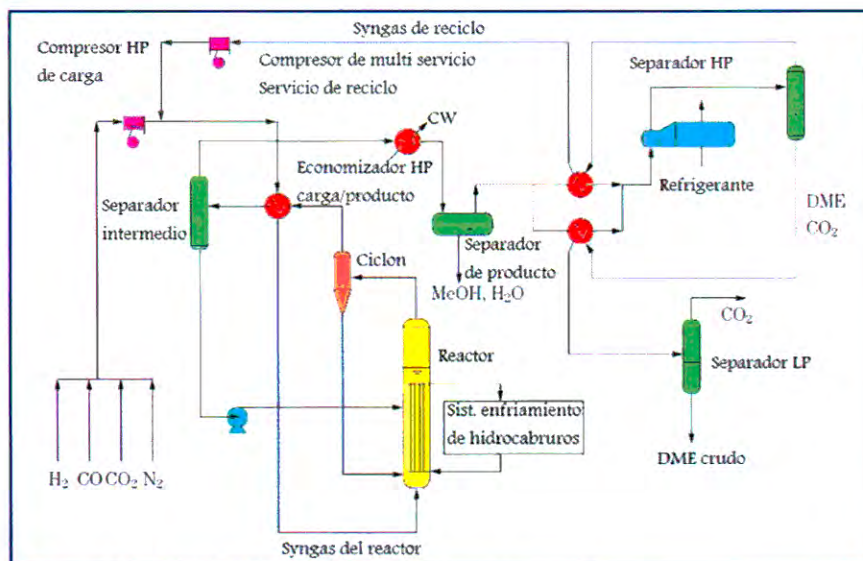
3.4.2.2. Diagrama de flujo de la primera prueba

El hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono y N_2 son mezclados y comprimidos. Esta corriente es mezclada con gas de reciclo y calentada contra el efluente del reactor, y luego suministrado al fondo del reactor.

Como se observa en la figura 3.13, el gas de síntesis reacciona mientras se eleva a través de la suspensión (catalizador y solvente) en el reactor, y el calor de reacción es absorbido por la suspensión y removido a través del intercambiador de calor interno. El gas de salida del reactor es luego enviado a un ciclón

para remover los polvos finos del catalizador, y luego enfriado hasta alrededor de 138 °C mediante el intercambiador de calor con el gas de entrada del reactor para condensar y recolectar el solvente. Esta corriente es subsecuentemente enfriada a 37 °C por agua de enfriamiento, y el volumen de metanol y algo de agua presente son recuperados como líquidos. El gas restante es enfriado por un intercambiador refrigerante a -18 °C y DME y CO₂ son recuperados como líquidos. El gas restante es comprimido otra vez y reciclado al reactor.

Figura 3.13. Flujo del proceso simplificado de AFDU



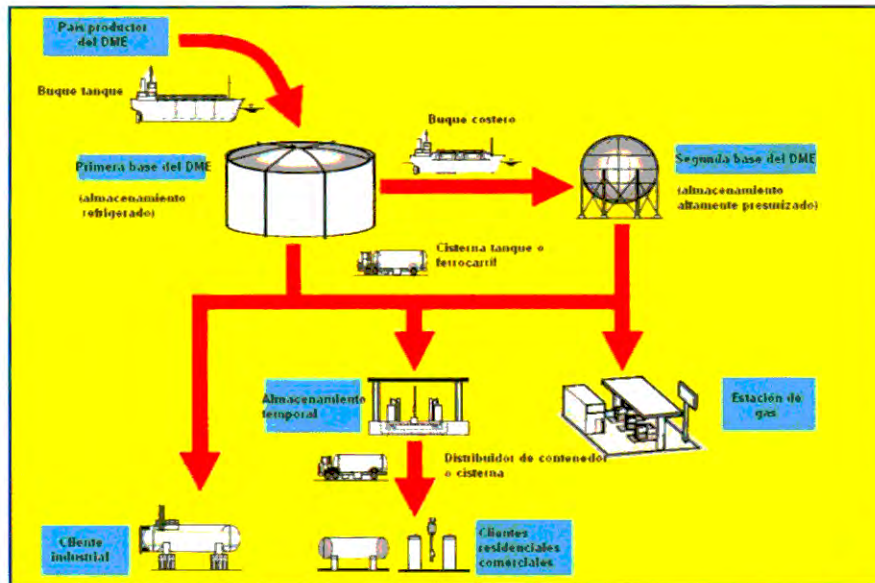
Fuente: DME Handbook (2007). Elaboración propia.

CAPITULO 4

ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE DEL DIMETIL ETER

La figura 4.1. muestra un ejemplo de las partes que comprenden el proceso de distribución del DME; como parte del primer paso en el proceso de distribución, el DME es transportado en un buque tanque (buque: instalación de almacenamiento refrigerado) hasta la primera base o base de importación (instalación de almacenamiento refrigerado). A partir de esta primera base, el DME es enviado en un buque costero (buque costero: un almacenamiento altamente presurizado), hasta una segunda base (un almacenamiento altamente presurizado). A partir tanto de la primera base y segunda base, el DME puede luego ser transportado hasta una instalación de almacenamiento temporal, estación de gas (un almacenamiento altamente presurizado) o un cliente industrial (un almacenamiento altamente presurizado) por una cisterna tanque o ferrocarril (un almacenamiento altamente presurizado), etc. Finalmente, el DME encontrará un uso general, como combustible para el sector residencial, vehicular, industrial, etc.

Figura 4.1. Proceso de distribución del DME



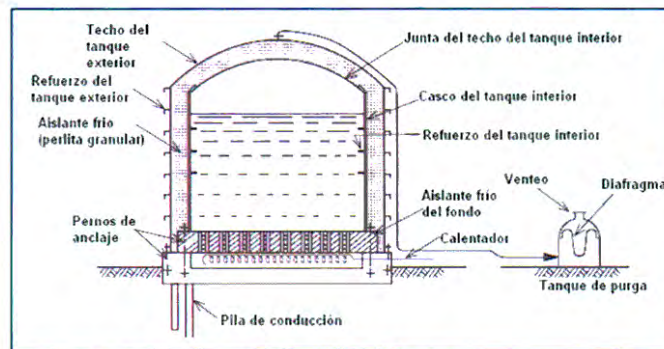
Fuente: DME Handbook (2007). Elaboración propia.

4.1. Almacenamiento del DME

4.1.1. Almacenamiento criogénico

El almacenamiento criogénico es usado para un gran almacenamiento del orden de varios miles a decenas de miles de toneladas. Tanto el tipo de tanque sobre tierra y bajo tierra están disponibles. Los tanques sobre tierra, comúnmente usados para el almacenamiento criogénico de GLP, son clasificados como tanques cilíndricos de simple casco de fondo plano, tanques cilíndricos de doble casco de fondo plano (ver figura 4.2), tanques cilíndricos de cubierta suspendida de fondo plano, y tanques cilíndricos de concreto cubiertos de fondo plano.

Figura 4.2. Tanque cilíndrico de doble casco de fondo plano



Fuente: DME Handbook (2007). Elaboración propia.

4.1.2. Almacenamiento a alta presión

El método de almacenamiento del DME a temperatura normal en la condición presurizada es llamado almacenamiento a alta presión (temperatura normal). El almacenamiento a alta presión es usado para una cantidad almacenada de muchas toneladas a muchos miles de toneladas. Hay tanques sobre tierra y tanque de alta presión subterráneos.

Los tanques de almacenamientos esféricos y los tanques de almacenamiento cilíndricos (tipo horizontal y tipo vertical) son usados para el tipo de almacenamiento sobre tierra, y un tanque de almacenamiento cilíndrico horizontal es utilizado para el tipo de almacenamiento subterráneo.

Se cree que es posible utilizar tanques de GLP para DME bajo condiciones de presión, donde la presión de vapor del DME está entre la del propano y butano. La densidad del líquido del DME es aproximadamente 1,3 veces más grande que la del propano. Por lo

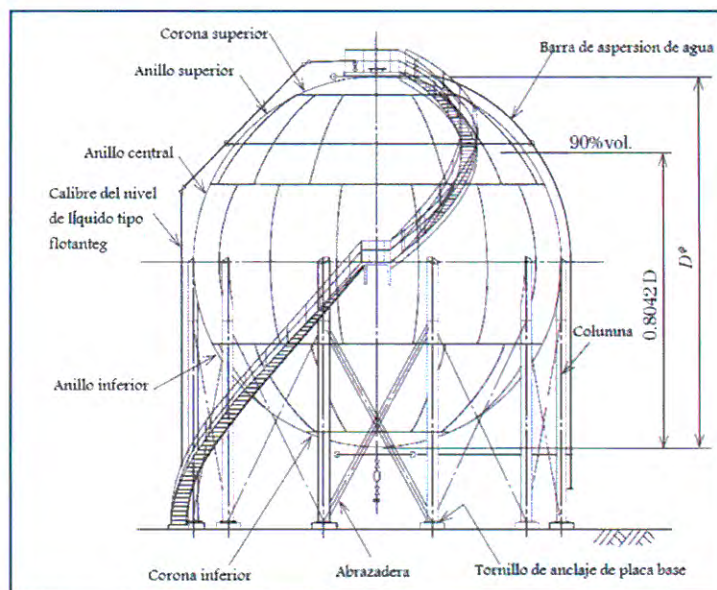
tanto la capacidad de almacenamiento puede estar limitada desde el punto de vista de la fuerza de la columna y la base o la distancia de seguridad.

El tanque cilíndrico tiene la ventaja de ahorros de trabajo en el sitio porque toda la producción de los procesos de producción, prueba, inspección, son hechos en planta y la unidad ensamblada es transportada e instalada en el lugar. La capacidad de almacenamiento es, sin embargo, restringida desde varias decenas o varios miles de toneladas debido a la limitación de la planta de producción o el espesor del plato.

Por otro lado, el tanque de almacenamiento esférico como el tanque de la figura 4.3., es construido en el lugar y requiere un largo periodo de trabajo antes que pueda ser terminado. Tiene la ventaja que un tanque de gran capacidad puede ser económicamente construido, entonces el espesor de la pared puede ser reducida a la mitad de la de un tanque cilíndrico con el mismo diámetro interior.

En general, los tanques horizontales o verticales son principalmente usados para estaciones de servicio y fabricas con un pequeño almacenamiento o consumo. Los tanques de almacenamiento esférico son usados en bases de parada con un almacenamiento relativamente grande, y en refinerías de petróleo.

Figura 4.3. Tanque de almacenamiento esférico (adaptado de la tecnología del GLP)



Fuente: DME Handbook (2007). Elaboración propia.

Los tanques subterráneos son usados para estaciones de GLP los cuales son en su mayoría situados en áreas residenciales o comerciales, debido a las ventajas de seguridad.

Respecto al uso compartido con el DME, solo el tanque de almacenamiento de propano puede ser usado debido a la presión de vapor. Además, la capacidad de almacenamiento es probablemente limitado en términos de la estructura del soporte, la fuerza base y la distancia de seguridad, porque la densidad del líquido del DME es más pesado que la densidad del propano.

Para el DME, la política fundamental de la selectividad de los materiales es similar al del GLP. No hay posibilidad que las impurezas corrosivas como el sulfuro de hidrógeno sea mezclado

con el DME en su proceso de producción, y por lo tanto el DME tiene la ventaja en términos de corrosión bajo presión.

4.1.3. Terminales de almacenamiento

El DME producido en las plantas de producción en países extranjeros es transportado a terminales de importación con servicio criogénico, mientras se mantiene a baja temperatura y presión ambiental en los tanques de almacenamiento del buque tanque.

El DME transportado es descargado en las instalaciones de descarga establecidas en los terminales de importación y almacenado en los tanques de almacenamiento criogénico.

El DME es enviado a temperatura ambiente a alta presión a través de las instalaciones de carga, incluyendo el intercambiador de calor, que utiliza agua de mar para calentar el DME. Se almacena en un tanque de almacenamiento a alta presión en el Terminal de importación o enviado directamente a través del brazo de carga dependiendo de la configuración de las instalaciones.

En cuanto al envío a partir del Terminal de importación, una cisterna tanque se utiliza para la entrega hasta la estación de embotellado dentro de una distancia corta, y un buque tanque es usado para la entrega hasta el Terminal secundario en lugares lejanos.

4.2. Transporte del DME

4.2.1. Transporte marítimo

- **Buque tanque tipo refrigerado**

Un buque tanque tipo refrigerado es un buque que pone al DME que ha sido refrigerado y licuado por debajo del punto de ebullición a presión atmosférica en un tanque aislado instalado en el caso y transportado económicamente. Este tipo de transporte es mejor que un buque tanque tipo presurizado por los siguientes aspectos: El volumen de DME es más pequeño y más ventajoso para el transporte en un estado refrigerado y licuado que a temperatura atmosférica y alta presión. La presión del tanque en un buque tanque tipo refrigerado se mantiene alrededor de la presión atmosférica. Y por último, los terminales de descarga son diseñados para tener almacenamiento tipo refrigerado de acuerdo con los buques tanques tipo refrigerados, permitiendo la reducción en costos para la construcción de instalaciones de almacenamiento de gran tamaño.

- **Buque tanque tipo presurizado**

Un buque tanque tipo presurizado, el cual transporta DME que ha sido presurizado y licuado a temperaturas ambientales, es equipado con tanques esféricos o cilíndricos con paredes más gruesas las cuales son lo suficientemente fuertes para soportar la alta presión. Así, el peso del tanque es más pesado, y espacio inútiles se forman alrededor del tanque, depende de la forma de

los tanques; sin embargo, su capacidad de carga es más pequeña para el tamaño del recipiente que del buque tanque refrigerado.

4.2.2. Transporte terrestre

El camión cisterna es uno de los principales medios de transporte del GLP. La cisterna (menos de 3 toneladas en capacidad) puede disminuir el costo de inversión para el paso inicial de la introducción del DME en el mercado, y tiene una alta posibilidad de suministrar DME a otros vehículos. La cisterna (para el DME) que pueden llenar a las estaciones de gas y vehículos a DME directamente ya se han desarrollado.

4.3. Otras instalaciones

4.3.1. Contenedor

El contenedor puede ser movido del suelo, hay contenedores de tamaño pequeño de 10 kg, 20 kg, 30 kg, 50 kg, 500 kg, etc., y contenedores de gran tamaño como tanques cisternas y cisternas.

Un tanque fijo sobre una base es llamado tanque de almacenamiento en la Ley de Seguridad de gas a alta presión y distinguidos de los contenedores.

El DME es un gas licuado con una baja presión de vapor comparable al GLP a temperaturas normales. Los contenedores soldados son

usados para almacenar DME. Están hechos por soldadura de una placa de acero transformado.

Las mismas especificaciones son adoptadas para el equipo de manipulación del DME como un gas general a alta presión, y la presión de diseño es 1,6 MPa, la cual es más alta que el gas butano y más baja que el gas propano.

4.3.2. Instalaciones de llenado para tanques de DME

Se supone que el DME es transportado desde una cisterna tanque hasta un tanque de almacenamiento usando un equipo de transferencia como una bomba o compresor. La bomba es usada para llenar un contenedor de gas a alta presión, para evitar la influencia del nivel de la superficie del líquido en la operación de llenado.

El equipo de llenado existente para el GLP puede ser usado para el DME, y ese caso, es necesario un ajuste para la medición cuando se utiliza DME, debido a la diferencia de gravedad específica entre el GLP y el DME.

El equipo en la instalación de GLP puede ser usado para el DME, sin embargo la tubería, material de sellado, justas, plásticos, para los cuales se utiliza el caucho, deben ser reemplazadas con materiales adecuados para las propiedades físicas del DME.

CAPITULO 5

ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES, SALUD Y SEGURIDAD

5.1. Aspecto medio ambientales

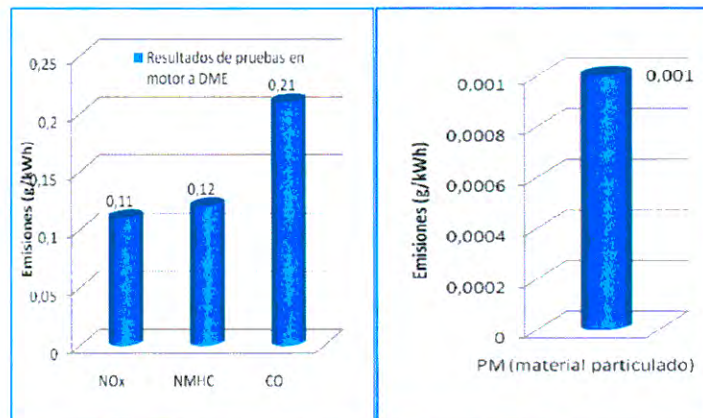
5.1.1. Emisiones de escape y evaporación

La razón por la que hay interés en el DME como combustible alternativo al diesel es que tiene el potencial para reducir las emisiones de los tubos de escape. La formación de particulado es casi eliminada. Se ha reportado que las emisiones de formaldehído son bajas, pero aun no se han realizado pruebas usando un aparato de muestreo volumétrico constante. Independientemente, los resultados parecen estar bien dentro de los estándares establecidos. Las emisiones de hidrocarburos son el metano y el DME que no son quemados. Ambos tienen baja reactividad fotoquímica.

También puede haber ventajas adicionales en condiciones de arranque en clima frío en motores que utilicen DME. Se requiere ayuda especial cuando se arranca en clima frío en motores diesel debido a la mala combustión inicial. En pruebas de DME limitadas que han sido realizadas en el arranque del motor a temperaturas de -24°C no se ha requerido ayuda especial.

El DME emitido en la atmósfera tiene una vida media de horas en la troposfera inferior y días en la troposfera superior y se descompone en dióxido de carbono y agua.

Figura 5.1. Emisiones de gases de escape utilizando DME



Fuente: DME Handbook (2007). Elaboración propia.

5.1.2. Contaminación de suelo

Como el DME es un combustible presurizado almacenado en sistemas cerrados, es difícil que existan derrames de DME. Además, como el DME es vapor a temperaturas arriba de -25°C y a presión atmosférica se vaporizará y no representa peligro para el suelo.

5.1.3. Contaminación de agua

Aunque el DME es soluble en el agua, la probabilidad de un derrame de DME en el agua es baja debido a que el combustible se almacena en un sistema cerrado. Independientemente, se evapora durante un período de horas.

5.1.4. Ruido

Hay una reducción en los niveles de ruido en un motor de encendido por compresión cuando es alimentado con DME.

5.2. Aspecto de salud

5.2.1. Toxicidad por inhalación

El dimetil éter produce un efecto anestésico o narcótico con la inhalación de los vapores. Las concentraciones de 5-20 % de volumen pueden causar irritación, descoordinación, falta de aliento, somnolencia, intoxicación, de visión borrosa, dolores de cabeza, mareos, excitación, y la inconsciencia. El DME en concentraciones mayores, excediendo el 20%, puede incrementar el riesgo de irregularidades cardíacas y la posibilidad de paro cardíaco. En altas concentraciones el DME reemplaza al aire respirante y actúa como un simple asfixiante.

Dependiendo de la referencia, el nivel de toxicidad varía de no tóxico a un bajo orden de toxicidad aguda y crónica.

5.2.2. Contacto con la piel

La exposición a la piel y ojos en altas concentraciones de vapor o líquido puede causar irritación o dermatitis. La exposición a los ojos causa inflamación de las membranas mucosas oculares.

No hay evidencia que el DME sea absorbido a través de la piel a presión atmosférica normal.

5.3. Aspecto de seguridad

5.3.1. Detección

Es un gas y líquido incoloro con un ligero olor etéreo. A pesar de que tiene un olor único, se afirma que puede haber variaciones y, por tanto, un olor será necesario para garantizar un control adecuado y de detección de fugas.

5.3.2. Densidad

La densidad relativa a 20 °C de DME es 1,59. Es más pesado que el aire (densidad aire = 1) y por tanto, se sedimentará en zonas bajas. Un litro del líquido se vaporizará para producir 374 litros de gas (cuando se expande a 15 °C y 100 kPa).

La gravedad específica del líquido es 0,668. El líquido se expande y se contrae con la temperatura. Su punto de ebullición es -25 °C, la densidad es 735 kg/m³. A 50 °C la densidad es 615 kg/m³. La expansión del líquido con la temperatura será crítica para determinar las máximas densidades de llenado de tanto los tanques de almacenamiento para dispensación así como también los tanques de los vehículos. Esta información además será muy útil y dará la corrección de la temperatura para la medición volumétrica del líquido

así como la medición en el almacenamiento de dispensación y la medición en el tanque de los vehículos.

5.3.3. Combustión

Su límite inferior de inflamabilidad en el aire es 3,4 %. Los dos valores más frecuentes usados para los límites superiores de inflamabilidad son 18 % y 27 % en el aire. Los dos valores usados para la temperatura de auto ignición son 235 °C y 350 °C en el aire. Su punto flash es -41°C. Se quema con una llama visible. En la mayoría de las condiciones de combustión requiere una fuente de ignición y una mezcla inflamables de DME y aire. Si estas condiciones existen, la reacción química que se lleva a cabo es la liberación de calor y la formación de otros gases. Si la combustión incompleta se lleva a cabo, es posible conseguir cantidades excesivas de monóxido de carbono el cual es un gas venenoso en concentraciones relativamente bajas.

5.3.4. Presiones

El DME existe tanto como gas y líquido a temperaturas normales. Su punto de ebullición es – 25°C a presión atmosférica normal. Para que exista como líquido por encima de esa temperatura, requiere que el líquido sea contenido bajo presión.

5.3.5. Calor de vaporización

Se debe tener cuidado en la manipulación del líquido. El líquido se vaporiza rápidamente y elimina calor en esas áreas que están en contacto en el proceso de vaporización. Si está en contacto con piel expuesta, hay la posibilidad de quemaduras. El calor de vaporización a 20 °C es 412 kJ/kg.

CAPITULO 6

EVALUACIÓN DE MERCADO

6.1. Escenario del Mercado Internacional

El mercado actual de DME es principalmente para los propelentes de aerosol, y solo una pequeña cantidad (escala de decenas de miles de toneladas) de DME grado combustible se distribuye en las provincias del interior de China para uso residencial, principalmente para la sustitución del GLP.

El DME tiene el potencial para ser usado como un sustituto para varios combustibles. Categorizando los mercados potenciales del DME desde el punto de vista del cliente, está la generación de electricidad centralizada y distribuida, uso comercial y residencial, uso industrial y transporte. En la actualidad, estos clientes están usando combustibles existentes como gas natural, GNL, GLP, diesel, petróleo crudo. Sin embargo, con el fin que el DME llegue a hacer un sustituto para los combustibles existentes, el DME debe tener atractividad desde el punto de vista de precio, estabilidad de precio, estabilidad de suministro, conveniencia y manejo del medio ambiente comparado a los combustibles existentes.

La cantidad de la demanda potencial del DME es una función del tamaño de una zona de distribución del DME y la sustitución del DME para cada cliente en esta zona. La zona de la distribución del DME está relacionada al puerto donde el DME es descargado y el rango de zona para el cual el DME será distribuido.

Desde el punto de vista de mercados globales, la zona de Asia se cree que es prometedora con la demanda de combustible gaseoso y una infraestructura más pequeña para las tuberías de gas natural.

6.1.1. Mercado en Japón

El cuadro 6.1. muestra una proyección de la demanda para el DME en el 2030, de acuerdo al reporte “Progress in Development of Technology and Installation and Dissemination Scenario of DME” (Utilization Subcommittee of Japan DME Forum, Introduction and Dissemination Working Group, 2005).

Cuadro 6.1. Proyección de demanda de DME al 2030 en Japón (Unidad: 10⁴ toneladas/año)

		2010	2020	2030
Generación de electricidad	Concentrada	230	670	1100
	Descentralizada	44	134	317
	Total	274	804	1417
Transporte	Vehículos a diesel	17	334	1002
	Vehículos celda combustible		30	380
	Total	17	364	1382
Combustible general y spray (Para industria y consumidores residenciales)		60	540	640
Suma de la demanda nacional para el DME		351	1708	3439

Fuente: DME Handbook (2007). Elaboración propia.

6.1.2. Mercado en Asia

El mercado del DME en Asia es ampliamente explicado en el reporte llamado "Survey for the potential market of fuel grade DME in Asia" (2002). El cuadro 6.2. presenta la cantidad de mercado potencial para el DME grado combustible en el 2010 y 2020 en ocho países asiáticos.

Cuadro 6.2. Cantidad de mercado potencial para el DME grado combustible (Unidad: 10⁴ toneladas)

	Generación de electricidad		Sustitución del GLP		Transporte		Uso residencial e industrial		Total	
	2010	2020	2010	2020	2010	2020	2010	2020	2010	2020
China	400	600	190	350	300	600	280	380	1170	1930
Corea del Sur	200	300	100	150	100	200			400	650
Taiwán	270	400	10	20		110			280	530
Las Filipinas	200	300	10	10		110			210	420
Tailandia			110	130					110	130
Vietnam	60	60							60	60
Indonesia	150	450	40	40		120	100	240	290	850
India	400	600	270	320	160	320	160	320	990	1560
Total	1680	2710	730	1020	560	1460	540	940	3510	6130

Fuente: DME Handbook (2007). Elaboración propia.

Se asume que el DME puede ser introducido en la sustitución del GLP en los lugares donde los precios de la energía son altos. Además, en el sector transporte, la expectativa para el DME como un combustible limpio vehicular es grande, y la expansión proyectada entre el 2010 y 2020 está creciendo.

6.2 Escenario de Mercado Nacional

Hasta ahora, la escasez de diesel 2 – B5 (DB5) y GLP ha sido compensada por la importación, y se piensa que la misma situación se mantendrá hasta después del año 2011.

El Diesel B5 continuará siendo el combustible de mayor demanda en el período de estudio, se debe principalmente al crecimiento del país y a su alto consumo en el transporte y maquinaria pesada. Si bien los sectores eléctrico e industrial, se orientarán al uso del gas natural, este combustible difícilmente sustituirá al Diesel B5.

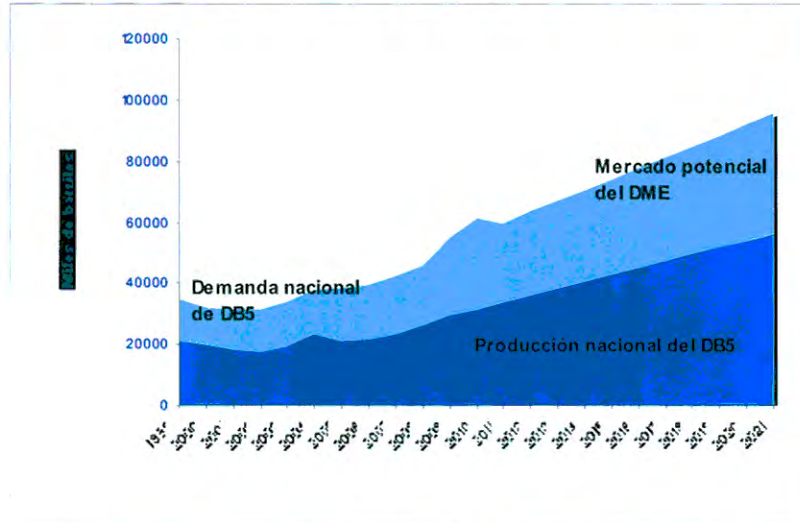
Se espera que el GLP continúe desplazando al kerosene en el sector residencial y a las gasolineras en el sector transporte. El incremento en la demanda en los próximos años se debe principalmente a la gran oferta de GLP y a la política de precios que las empresas productoras de GLP establecen para favorecer su consumo. Su mayor demanda se estima que se dará en zonas donde no exista oferta de Gas Natural.

Para la reducción de los gastos en moneda extranjera y para la protección del medio ambiente, una alternativa a la importación de diesel y GLP sería la producción nacional de DME a partir del gas natural.

En la figura 6.1., figura 6.2. y cuadro 6.3. se presentan las estimaciones de las proyecciones de demanda nacional de diesel B5 y GLP, producción nacional de diesel B5 y GLP utilizando el crecimiento tendencial de los datos históricos de demanda y producción de diesel B5 y GLP, y así obtener el mercado potencial del

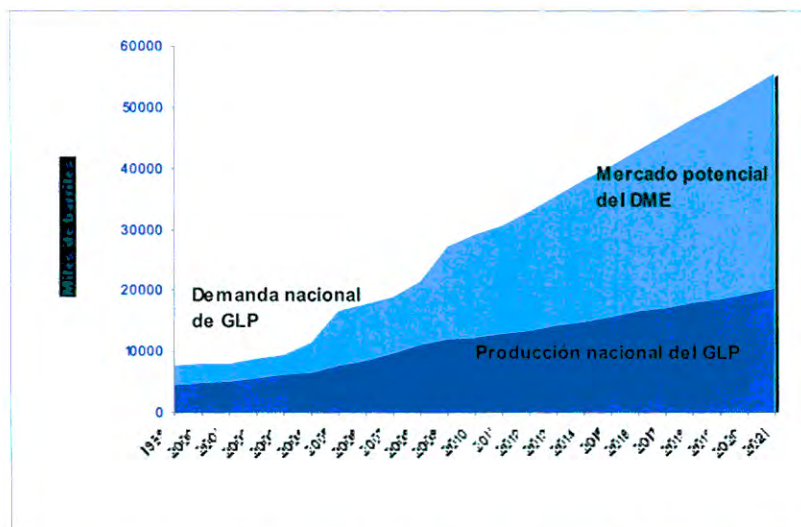
DME. Se asume que el DME podría cubrir el 18% de la demanda potencial nacional total.

Figura 6.1. Mercado potencial del DME por sustitución del DB5



Fuente: Ministerio de Energía y Minas – Dirección de Hidrocarburos, Anuario Estadístico de Hidrocarburos 2008. Elaboración propia.

Figura 6.2. Mercado potencial del DME por sustitución del GLP



Fuente: Ministerio de Energía y Minas – Dirección de Hidrocarburos, Anuario Estadístico de Hidrocarburos 2008. Elaboración propia.

Cuadro 6.3. Estimación del mercado potencial del DME (miles de barriles)

MBLS		2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Diesel B5	Demanda nacional DB5	26684	30004	31748.6	33827	36097	38367	40637	42906	45176	47446	49716	51986	54256	56526
	Producción nacional DB5	19519	25301	29926	26084	27406	28728	30051	31373	32695	34018	35340	36662	37985	39307
	Mercado potencial del DME (sust. DB5)	-	-	-	-	6497	6906	7315	7723	8132	8540	8949	9357	9766	10175
GLP	Demanda nacional GLP	11107	11925	12273.5	12802	13552	14302	15052	15801	16551	17301	18051	18801	19550	20300
	Producción nacional GLP	10561	15339	17079.6	17821	19566	21311	23056	24801	26546	28291	30036	31781	33526	35271
	Mercado potencial del DME (sust. GLP)	-	-	-	-	2439	2574	2709	2844	2979	3114	3249	3384	3519	3654
Total de mercado potencial del DME		-	-	-	-	8937	9480	10024	10567	11111	11654	12198	12742	13285	13829

Fuente: Ministerio de Energía y Minas – Dirección de Hidrocarburos, Anuario Estadístico de Hidrocarburos 2008. Elaboración propia.

CAPITULO 7

EVALUACIÓN ECONOMICA

7.1. Introducción

Existen varias tecnologías para la producción de DME tal como un proceso directo o indirecto, y, en consecuencia, los costos de la planta, los requisitos de la materia prima, y los requisitos de utilidad son diferentes.

En cuanto a los costos de construcción de la planta, están muy afectados por la localización de la planta y la disponibilidad de la infraestructura, y el precio y el costo de transporte de la materia prima e instalaciones también dependen fuertemente de la localización de la planta y capacidad de producción.

Para el presente informe se tomaron los datos del análisis económico presentado en el artículo publicado por Industrial & Engineering Chemistry Research (2009) "Optimal Gas-To-Liquid Product Slection from Natural Gas under Uncertain Price Scenarios". El análisis se basa en la tecnología del proceso indirecto porque ha sido mucho más comercializado que el proceso directo que aún la tecnología esta en desarrollo.

7.2. Costos de producción

Un resumen del análisis económico para la producción del DME es presentado en el cuadro 7.1. En el artículo anteriormente mencionado, el método de Turton fue usado para calcular el costo de capital $C_{BM}=C^0_P F_{BM}$. El tamaño de cada instalación debe ser estimado a partir del caudal, área de intercambio de calor y energía simulados. C^0_P , el costo de compra en condiciones básicas puede ser calculado a partir de estos parámetros de tamaño. F_{BM} , el factor de costo “bar module” relacionado con la presión y los materiales de construcción, pueden ser estimados a partir del factor de presión, y factor del material de la unidad de proceso. Se asume que el acero al carbono es el principal material de construcción. Además los costos de producción estimados en el cuadro 7.1. son para una planta de producción de DME de 3742 toneladas/día, y un requerimiento de gas natural 200 MMPCD con un costo de US\$ 3,0/MMBTU.

Cuadro 7.1. Costos totales de producción del DME para un año

Costos	US\$
Costos directos de producción	315642100
Materia prima	229950000
Servicios	17250000
Mantenimiento	37800000
Insumos operativos	5670000
Mano de obra	1546000
Supervisión directa	309200
Gastos de laboratorio	231900
Regalías	22885000
Gastos fijos	28350000
Gastos generales de planta	23793120
Costos de producción anual	367785220

Fuente: Industrial & Engineering Chemistry Research.
Elaboración propia.

7.2.1. Cálculos de los costos de producción del DME

a. **Costo directo de producción** = costo de materia prima + servicios + mantenimiento + insumos operativos + mano de obra + supervisión directa + gastos de laboratorio + regalías

b. **Servicios** (se utilizó los datos del cuadro 7.5 para el costo de servicios)

$$\text{-costo anual} = Q \times C_{\text{vapor}} \times t = Q \times \$9,83/\text{GJ} \times 24 \times 365 \times 0,95$$

$$\text{-costo anual} = Q \times C_{\text{agua de enfriamiento}} \times t = Q \times \$0,354/\text{GJ} \times 24 \times 365 \times 0,95$$

$$\text{-costo anual} = \text{Electricidad} \times C_{\text{electricidad}} \times t = Q \times \$0,354/\text{GJ} \times 24 \times 365 \times 0,95$$

Cuadro 7.2. Resultados de simulación para del balance de energía

	Modelo de la unidad	Unidad	Valor
Parte - syngas	HX-PRE-V	kW	16560
	CO2-HX	kW	47447
	COOL1	kW	-430350
	COOL2	kW	-258366
Parte - CO ₂	Cooler	kW	-431128
	HX	kW	294163
Parte - Reacción del DME	Pump	kW	143
	COMP	kW	32969
	HX	kW	44747

Fuente: Industrial & Engineering Chemistry Research. Elaboración propia.

c. **Costo de mantenimiento** = 0,04 x costo de capital fijo

d. **Insumos operativos** = 0,15 x costo de mantenimiento

e. **Costo de mano de obra:** P = 0, N_{np} = 24 para el caso del DME

Mano de obra operativa = 4,5 (al menos número de operadores por turno) x N_{OL}

donde:

$$N_{OL} = \text{número de operadores por turno} = (6,29 + 31,7P^2 + 0,23 N_{np})^{0,5}$$

P = número de etapas que involucran la manipulación de partículas sólidas

N_{np} = número de número de etapas de procesamiento de no partículas manipulando etapas

f. Supervisión directa = $0,2 \times$ costo de mano de obra

g. Gastos de laboratorio = $0,15 \times$ costo de mano de obra

h. Regalías = $0,03 \times$ costo de producción total

i. Gastos fijos = $0,03 \times$ costo de capital fijo

j. Gastos generales de planta = $0,72 \times$ costo de mano de obra + $0,024 \times$ costo de capital fijo

Para realizar el flujo de caja proyectado se hicieron las siguientes asunciones:

Cuadro 7.3. Asunciones para la materia prima

Volumen de Gas Natural	200	MMPCD
	76650000	MMBTU/año
Pder Calorífico del GN	1050	MMBTU/MMPC
Precio del GN	3	US\$/MMBTU
Costo de Gas Natural	229950000	US\$/año

Fuente: Industrial & Engineering Chemistry Research.
Elaboración propia

Cuadro 7.4. Volumen de producción de la planta de DME

Producción de Planta	3742	ton/día
	1365830	ton/año

Fuente: Industrial & Engineering Chemistry Research.
Elaboración propia

Se asumió que el precio de venta del DME en el Perú inicial debe ser igual al GLP y tendría un incremento de anual de 0,5 %

Cuadro 7.5. Proyecciones de precios de venta de DME (US\$/año)

2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
500	503	505	508	510	513	515	518	520	523	526	528

Fuente: Industrial & Engineering Chemistry Research. Elaboración propia.

7.3. Otros costos

En el cuadro 7.6. se presenta un resumen de otros costos necesarios para el proceso del DME, considerando las mismas asunciones utilizadas para la estimación de los costos de producción.

Cuadro 7.6. Resumen de otros costos

Costos	US\$
Costo de Capital fijo	945000000
Costo de Capital	1289015597
Costo de arranque	945000000
Depreciación	10%
Depreciación anual	128901560

Fuente: Industrial & Engineering Chemistry Research
Elaboración propia

7.4. Sensibilidad de precios

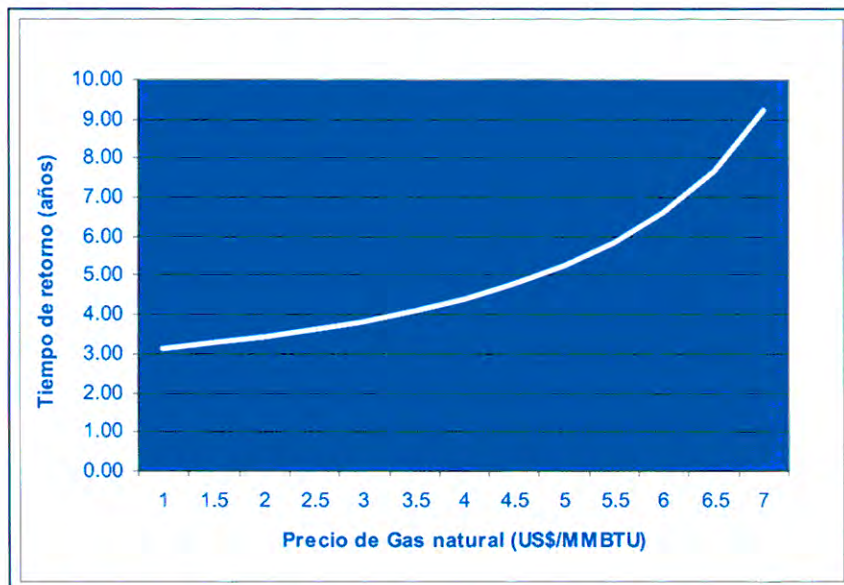
Se realizaron análisis de sensibilidad con la variación del precio del gas natural y variación del precio de venta del DME obteniendo los siguientes resultados:

Cuadro 7.7. Sensibilidad con la variación de precios del gas natural

Precio de GN (US\$/MMBTU)	Tiempo de retorno (años)
1	3.13
1.5	3.27
2	3.43
2.5	3.62
3	3.84
3.5	4.10
4	4.41
4.5	4.78
5	5.25
5.5	5.85
6	6.63
6.5	7.69
7	9.22

Fuente: Elaboración propia

Figura 7.1. Sensibilidad con la variación de precios del gas natural



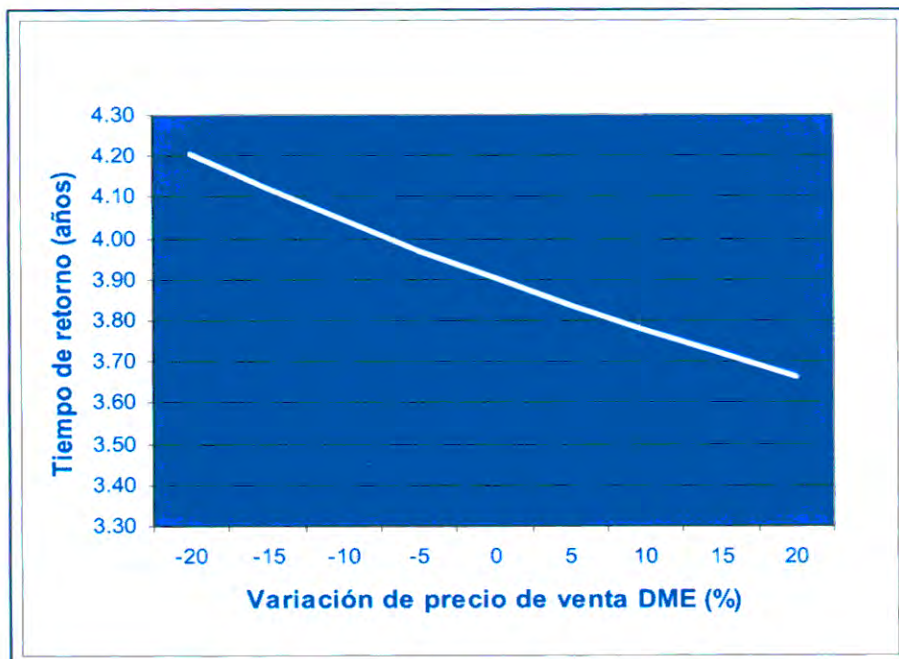
Fuente: Elaboración propia

Cuadro 7.8. Sensibilidad con la variación de precios de venta del DME

Var. de precio de DME (%)	Tiempo de retorno (años)
-20	4.20
-15	4.12
-10	4.04
-5	3.97
0	3.90
5	3.84
10	3.78
15	3.72
20	3.66

Precio del GN: 3 US\$/MMBTU
Fuente: Elaboración propia

Figura 7.2. Sensibilidad con la variación de precios de venta del DME

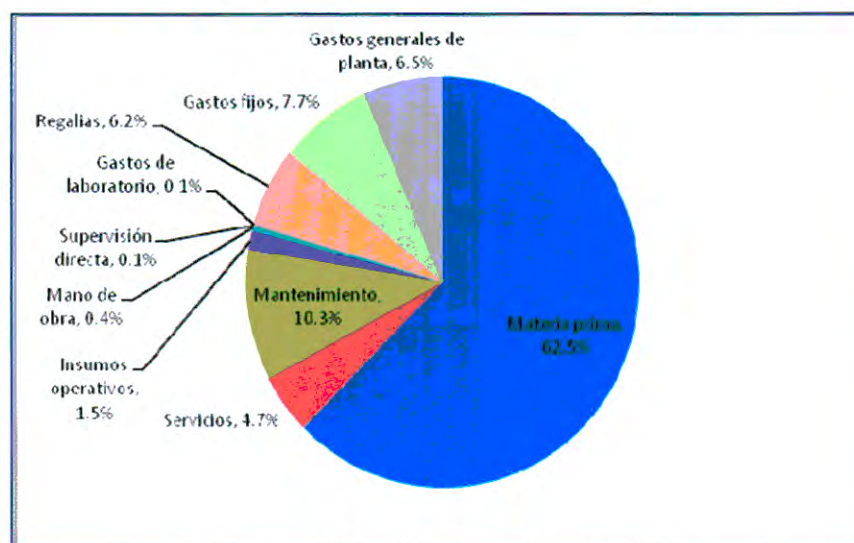


Fuente: Elaboración propia

7.5. Análisis de resultados

Como se observa en la figura 7.3., el costo de gas natural tiene la mayor participación de los costos de producción del DME, lo cual significa que las economías de la producción del DME son muy dependientes del precio de suministro del gas natural.

Figura 7.3. Diagrama de costos de producción del DME



Fuente: Industrial & Engineering Chemistry Research. Elaboración propia

Para un análisis sólido, se debe evaluar la variabilidad de los precios del DME. Además, es más razonable considerar el precio futuro del DME, que el precio del DME en el presente, en el tiempo en que la planta comercial real será construida. Ya que el precio del DME es muy influenciado por el mercado actual, es crucial cubrir las incertidumbres de las fluctuaciones del precio.

En el cuadro 7.9. se muestra el flujo de caja proyectado.

Cuadro 7.9. Flujo de caja proyectado para una planta de producción de DME

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
INVERSION	1289015597										
INGRESOS		689761223	693210029	696676079	700159460	703660257	707178558	710714451	714268023	717839363	721428560
EGRESOS	1289015597	367785220	367785220	367785220	367785220	367785220	367785220	367785220	367785220	367785220	367785220
Depreciación		128901560	128901560	128901560	128901560	128901560	128901560	128901560	128901560	128901560	128901560
UTILIDAD BRUTA	-1289015597	321976003	325424809	328890859	332374240	335875037	339393338	342929231	346482803	350054143	353643340
IMPUESTOS		96592801	97627443	98667258	99712272	100762511	101818001	102878769	103944841	105016243	106093002
UTILIDAD NETA	-1289015597	225383202	227797366	230223601	232661968	235112526	237575337	240050462	242537962	245037900	247550338
FLUJO NETO	-1289015597	450877563	454326369	457792419	461275799	464776597	468294898	471830791	475384363	478955703	482544900
FLUJO ACUMULADO	-1289015597	-838138034	-383811666	73980753	535256552	1000033149	1468328047	1940158837	2415543200	2894498903	3377043803

Fuente: Elaboración propia

T. de retorno	3.8
TIR	33.7%
VAN	1329230888
Tasa descuento	12.0%

CAPITULO 8

ASPECTO LEGAL

Como un nuevo combustible, no tiene normas y estándares relacionados a la distribución y aplicación del DME. Los estándares y guías deben regular la fabricación del combustible, las instalaciones y equipos necesarios para la distribución del DME. Los estándares y regulación están siendo desarrollados por tres organizaciones principales, The DME forum, The British Institute of Engineers, y The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology.

Desde 2005 se viene desarrollando en Japón un proyecto de estándares de especificaciones técnicas (TS) para el uso del DME como combustible, este es el TS K 0011:2005, "Dimetil éter (DME) para combustible". Este documento está relacionado con el DME para uso como combustible donde no se requiere alta pureza como para la industria química, y una pureza menor es permitida para el DME uso combustible. Esta especificación técnica da especificaciones para el DME sintetizado a partir del gas natural, carbón, y biomasa. Sin embargo el equipamiento de combustión del DME excluye el equipo de combustión interna como motores diesel, etc., pero incluye quemadores externos.

Los estándares del DME serán discutidos en el TC28 de ISO (comité técnico para productos de petróleo y lubricantes, que ha tratado los estándares para el gas natural licuado (GNL) de acuerdo a su característica que licua a baja temperatura. El DME además está relacionado al TC47, el cual trata los productos químicos.

El TC28-SC5 es una reunión del subcomité para la medición de los métodos de los hidrocarburos ligeros licuados a baja temperatura. El grupo de trabajo N° (WG1) está preocupado con los procedimientos de medición, cantidad de contenidos en los tanques, el WG2 está relacionado al equipo de medición y los procedimientos de muestreo, y el WG3 trabaja en el calculo de cantidad de transporte. Además ellos establecen estándares internacionales indispensables para la importación y exportación del GNL, GLP, y DME en el futuro para buques tanques de licuefacción a baja temperatura.

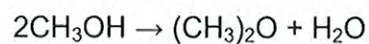
Se cree que las propiedades y manipulación en el transporte del GNL pueden ser aplicadas al DME, sin embargo el DME no es exactamente como los productos de hidrocarburos, ya que tiene oxígeno en su estructura molecular. Recientemente ISO TC28 decidió empezar los esfuerzos de la estandarización del DME en los subcomités SC4 y SC5.

En el Perú, las normas legales relacionadas al DME, son los límites máximos permitidos de productos químicos en los centros laborales, las normas relacionadas al uso del DME como combustible aún no existen.

CAPITULO 9
SIMULACION DEL PROCESO DEL DME
CASO DE DISEÑO

La siguiente información se presenta para el proceso del DME operando a condiciones de diseño simulado en ChemCad. El diagrama de flujo del proceso del DME se muestra en la figura 9.1., el resumen de las corrientes del proceso del DME se incluyen en el cuadro 9.1 y cuadro 9.2.

La producción del DME es vía deshidratación catalítica del metanol sobre un catalizador de zeolita ácida. La principal reacción es la siguiente:



En el rango de temperatura de operación normal, no hay reacciones secundarias significativas.

El producto DME es producido en una planta de 50 000 toneladas por año con una pureza de 99,5% del DME. El proceso tiene un factor de corriente de 0,95 (8375 hr/año).

9.1. Descripción del proceso

El metanol fresco, Corriente 1, es combinado con el reactante reciclado, Corriente 14, y vaporizado antes de ser enviado a un reactor de lecho fijo que opera entre 250°C y 368 °C. La conversión de un solo paso del metanol en el reactor es 80%. El efluente del reactor, Corriente 7, es luego enfriado antes de ser enviado a la primera de las dos columnas de destilación, T-201 y T-202. El producto DME es tomado en el tope de la primera columna. La segunda columna separa el agua del metanol no utilizado. El metanol regresa a la fase inicial del proceso, mientras el agua se envía al tratamiento del agua residual para remover las trazas de los componentes orgánicos.

9.2. Cinéticas de reacción y configuración del reactor

La reacción que tiene lugar es ligeramente exotérmica con un calor estándar de reacción, $\Delta H_{\text{reac}}(25\text{ °C}) = -11770\text{ kJ/kmol}$. La constante de equilibrio para esta reacción a tres diferentes temperaturas está dado por: $K_p(200\text{ °C}) = 34,1$; $K_p(300\text{ °C}) = 12,4$ y $K_p(400\text{ °C}) = 6,21$.

Las correspondientes conversiones de equilibrio para la alimentación del metano puro en el rango de temperatura superior son mayores al 83%. Esta reacción es cinéticamente controlada en las condiciones usadas en este proceso.

La reacción tiene lugar sobre un catalizador alúmina amorfa tratada con 10,2% sílice. No hay reacciones secundarias debajo de 400 °C. Arriba

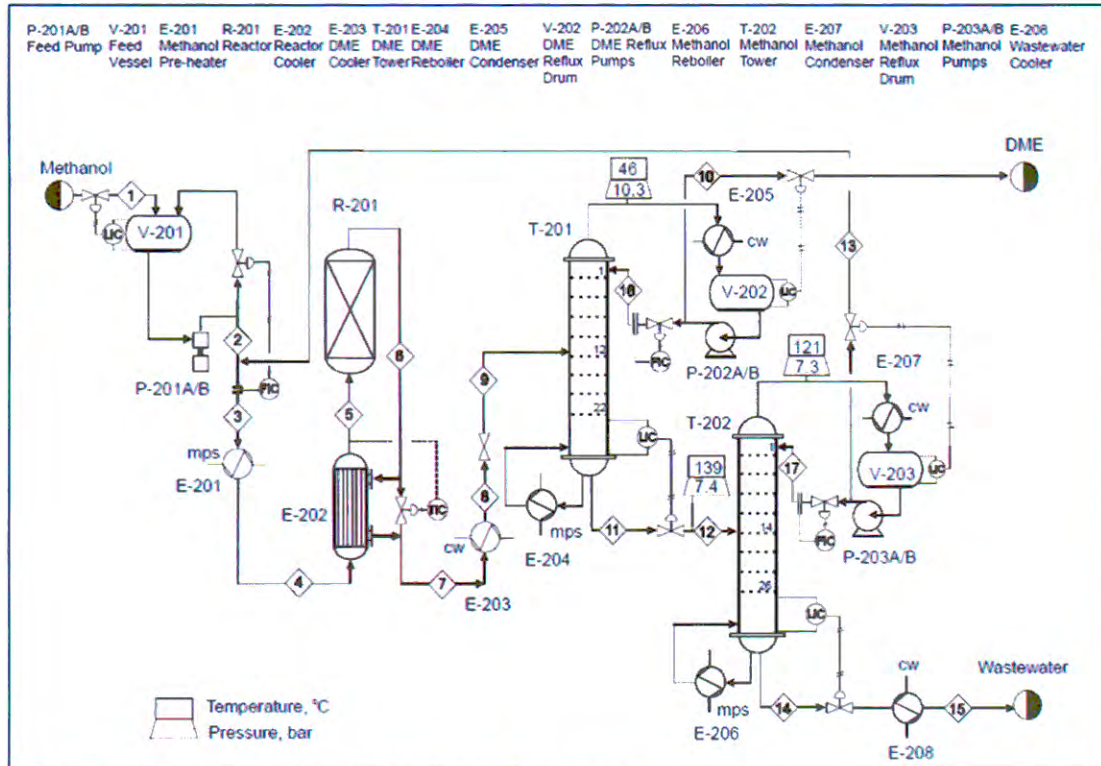
de 250 °C la velocidad de la ecuación está dada por Bondiera and Naccache (Kinetics of Methanol Dehydration in Dealuminated H-Mordenite: Model with Acid and Basic Active Centres, 1991):

$$-r_{\text{metanol}} = k_0 \exp(-E_a/RT) P_{\text{metanol}}$$

Donde $k_0 = 1,21 \times 10^6 \text{ kmol}/(\text{m}^3 \text{ reactor.h.kPa})$, $E_a = 80,48 \text{ kJ/mol}$, y P_{metanol} = presión parcial del metanol (kPa).

La desactivación significativa del catalizador ocurre a temperaturas mayores de 400 °C y el reactor es diseñado para esta temperatura no se exceda en ninguna parte en el reactor. El diseño dado en la figura 9.1. usa un lecho empacado simple de catalizador, el cual opera adiabáticamente. La temperatura exotérmica de 118 °C, ocurre en el reactor, es alta y da una temperatura de salida de 364 °C. Sin embargo, la conversión de un solo paso es muy alta (80%), y la baja concentración del reactante en la salida del reactor tiende a limitar la posibilidad de una fuga.

Figura 9.1. Diagrama de flujo de proceso para la producción del DME



Fuente: www.che.cemr.wvu.edu/publications/projects/dimethyl/dme1.zip

Cuadro 9.1. Resumen de flujos para el proceso del DME

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
;))	25	25	45	154	250	364	278	100	89	46	153	139	121	167	50	46	121
car)	1	15,5	15,2	15,1	14,7	13,9	13,8	13,4	10,4	11,4	10,5	7,4	15,5	7,6	1,2	11,4	7,3
de olar)	0	0	0	1	1	1	1	0,0798	0,148	0	0	0,04	0	0	0	0	0
ifico /hr)	8,37	8,37	10,49	10,49	10,49	10,49	10,49	10,49	10,49	5,97	4,52	4,52	2,13	2,39	2,39	2,17	3,62
ar	262,2	262,2	328,3	328,3	328,3	328,3	328,3	328,3	328,3	129,7	198,6	198,6	66,3	132,3	132,3	47,1	113
ar de componentes (kmol/hr)																	
	0	0	1,5	1,5	1,5	130,5	130,5	130,5	130,5	129,1	1,4	1,4	1,4	0	0	46,9	2,4
	259,7	259,7	323	323	323	64,9	64,9	64,9	64,9	0,6	64,3	64,3	63,6	0,7	0,7	0,2	108,4
	2,5	2,5	3,8	3,8	3,8	132,9	132,9	132,9	132,9	0	132,9	132,9	1,3	131,6	131,6	0	2,2

Fuente: www.che.cemr.wvu.edu/publications/projects/dimethyl/dme1.zip

Cuadro 9.2. Resumen de servicios para el proceso del DME

Servicio	mps	cw	Mps	cw	mps	cw	cw
Equipo	E-201	E-203	E-204	E-205	E-206	E-207	E-208
Temperatura interior (°C)	184	30	184	30	184	30	30
Temperatura exterior (°C)	184	40	184	40	184	40	40
Flujo (tonelada/hr)	7,22	297,1	1,37	78,47	3,29	160,1	28,7

mps = vapor de presión media
cw = agua de enfriamiento

Fuente: www.che.cemr.wvu.edu/publications/projects/dimethyl/dme1.zip

Cuadro 9.3. Resumen del equipamiento para el proceso del DME

Equipo	P-201A/B*	P-202A/B*	P-203A/B*	V-202	V-202	V-203	T-201	T-202	R-201
Material de construcción	Acero al carbono	Acero al carbono	Acero al carbono	Acero al carbono	Acero al carbono	Acero al carbono	Acero al carbono	Acero al carbono	Acero al carbono
Energía (kW)	7,2	1,0	5,2	-	-	-	-	-	-
Eficiencia	60%	40%	40%	-	-	-	-	-	-
Tipo/Drive	Recip / Electric	Centrífuga/Electric	Centrífuga/Electric	-	-	-	-	-	-
Temp. (°C)	25	46	121	-	-	-	-	-	-
Presión interna (bar)	1,0	10,3	7,3	-	-	-	-	-	-
Presión externa (bar)	15,5	11,4	16,0	-	-	-	-	-	-
Diámetro (m)	-	-	-	1,0	0,96	0,85	0,79	0,87	0,72
Altura/Longitud (m)	-	-	-	3,0	2,89	2,53	15,8	14,9	10,0
Orientación	-	-	-	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Vertical	Vertical	Vertical
Interiores	-	-	-	-	-	-	*21 bandejas de acero inoxidable Espaciam. 24 pulgadas	*26 bandejas de acero inoxidable Espaciam. 18 pulgadas	Sección de lecho empacado 7,2 m de alto lleno de catalizador
Presión(barg)	-	-	-	0,0	9,3	6,3	9,6	6,3	13,7

*Para todas las bombas excepto P-201 A/B se asume que el máximo head es 15% más grande que el head de diseño, y que el head cero ocurre al 150% del flujo de diseño. Para P-201 A/B (una bomba de desplazamiento positivo) se puede asumir que el máximo head es dos veces el head de diseño, y el head cero ocurre al 105% del flujo de diseño. + Se asume una eficiencia de una bandeja de 70%.

Fuente: www.che.cemr.wvu.edu/publications/projects/dimethyl/dme1.zip

**Cuadro 9.4. Resumen del equipamiento para el proceso del DME
(continuación)**

Equipo	E-201	E-202	E-203	E-204	E-205	E-206	E-207	E-208
Tipo	Vaporizador de cabeza flotante	Cabeza flotante	Condensador parcial de cabeza flotante	Reboiler de cabeza flotante	Condensador fijo TD	Reboiler de cabeza flotante	Condensador de cabeza flotante	Cabeza flotante
Calor(MJ/h)	14400	2030	12420	2730	3140	5790	5960	1200
Área (m ²)	99,4	171,0	101,8	2,0	100,6	83,0	22,7	22,8
Lado de la carcasa								
Max Temp. (°C)	154	250	280	153	46	167	121	167
Presión (barg)	14,2	14,1	12,8	9,5	9,3	6,6	6,3	6,6
Material de construcción	Acero al carbono	Acero al carbono	Acero al carbono	Acero al carbono	Acero al carbono	Acero al carbono	Acero al carbono	Acero al carbono
Fase	Líquido en ebullición	Vapor	Vapor condensado	Líquido en ebullición	Vapor condensado	Líquido en ebullición	Vapor condensado	Líquido
Lado de los tubos								
Max Temp. (°C)	184	368	40	184	40	184	40	40
Pressure (barg)	10,0	12,9	4,0	10,0	4,0	10,0	4,0	4,0
Material de construcción	Acero al carbono	Acero al carbono	Acero al carbono	Acero al carbono	Acero al carbono	Acero al carbono	Acero al carbono	Acero al carbono
Fase	Vapor condensado	Vapor	Líquido	Vapor condensado	Líquido	Vapor condensado	Líquido	Líquido
%Resistencia de la transferencia de calor en el lado del proceso	35%	50%	50%	35%	40%	35%	40%	30%

Fuente: www.che.cemr.wvu.edu/publications/projects/dimethyl/dme1.zip

CAPITULO 10

OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES

- El dimetil éter (DME) es una nueva fuente de energía, que se espera que sea viable comercialmente como un combustible limpio medio ambientalmente amigable.
- El DME es una opción prometedora para monetizar los recursos abandonados como combustibles limpios para múltiples propósitos. Y contribuir a la seguridad del abastecimiento energético y del medio ambiente, y conservación para el desarrollo sostenible.
- El DME puede ser utilizado como un combustible de transporte, y es además aplicable como combustible para la generación de electricidad, combustible residencial, y materia prima de la industria.
- Las tecnologías para la utilización y producción del DME ya están listas o en desarrollo.
- El DME es más fácil de almacenar y transportar que el GLP y mucho más que el GNL. Esta propiedad hace posible transportar el DME mediante

recipientes a costos bajos, y permite a los terminales de recepción preparar las instalaciones necesarias como tanques y tuberías diseñadas para la condición de $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. El DME además ahorra costos porque las instalaciones de GLP existentes pueden ser usados por el DME con algunas remodelaciones.

- El DME no contiene azufre y no produce emisiones de SO_x cuando se quema. Esto elimina la necesidad del control de emisión del SO_x .
- El DME tiene oxígeno entre los carbonos y no causa cadenas de carbono cuando se quema, y por tanto, no genera material particulado u hollín.
- Debido a su alto número de cetano y a la calidad de su combustión, limpia y sin partículas, el DME puede ser un excelente sustituto para el diesel. El GNL y GLP tienen un valor de cetano extremadamente bajo y, por lo tanto, estos combustibles limpios no son aplicables a motores diesel. Las dos principales dificultades a superar son: resistencia de los sellos (existe solución pero a un alto costo) y la lubricación de los inyectores.
- El DME es económicamente competitivo contra los combustibles convencionales cuando es producido a gran escala.
- Las variables críticas de los costos del DME son: el precio del gas a la entrada de la planta de transformación, el precio del combustible al que

sustituiría y el umbral de rentabilidad está en precios de petróleo crudo entre 20 – 30 \$/barril.

- El DME es un nuevo combustible en el mercado. Los riesgos de seguridad en relación con el fuego y explosivos tienen que ser tomadas en serio. Nuevas regulaciones tanto para la distribución del combustible y el sistema del combustible en los vehículos tienen que ser desarrolladas.
- Uno de los principales problemas con el DME es que es un “nuevo combustible”. El conocimiento acerca del DME no está muy generalizado. Otros combustibles alternativos son razonablemente bien conocidos. Por lo tanto, hay siempre un pequeño riesgo que podría haber algunos problemas con la percepción del público en el caso DME. Actividades de información podrían resolver este potencial problema.
- De la evaluación económica se obtuvieron resultados de tiempo de retorno de la inversión, estimación de costos, etc., y se observó que la rentabilidad del proceso de producción del DME depende altamente del costo de la materia prima más que el precio de venta del DME.

CAPITULO 11

RECOMENDACIONES

- Asegurar el suministro estable de un producto barato mediante la producción en masa es la primera premisa principal del DME para ser puesto en práctica como nuevo combustible, y es importante que dos o más proyectos comerciales se estudien ahora. La combinación de la producción en masa y el de los consumidores que van a comprar el combustible es indispensable para garantizar el conocimiento de los factores económicos que afectan el uso de DME.
- Cuando una sociedad en la que el DME es generalizado como un combustible limpio es desarrollado, es muy posible que el DME sea efectivo asegurando un suministro estable de energía, y se convierte en una herramienta fácil de usar, un combustible ecológico tanto para la generación de electricidad y el sector transporte que son dos grandes sectores consumidores de combustibles. Al considerar la posibilidad de suministro de energía más escaso y precios de la energía más altos en el futuro, la era de simplemente comprar el combustible puede estar cambiando a la era de la búsqueda y obtención del combustible. Por lo

tanto, es necesario un esfuerzo especial para promover la comprensión del uso en el DME en la generación de electricidad y sector transporte.

- Es posible producir DME de diversas materias primas como un nuevo combustible de la próxima generación y se espera su uso generalizado. Se estima que el DME será suficientemente competitivo con otros combustibles existentes en la etapa de desarrollo del mercado. Sin embargo, debe haber un plan de apoyo del gobierno que tendrá que ser aprobado durante el período de introducción, cuando el DME está en desventaja solamente por ocupar un nicho de mercado y por la pequeña escala de producción, transporte y la demanda.
- Un proyecto inicial de DME tendrá dificultades para garantizar estabilidad económica, porque la escala del mercado es pequeño en comparación con los combustibles existentes. Un sistema especial de crédito podría ser necesario para soportar dicho proyecto.
- El desarrollo y los costos de fabricación (piezas especiales, etc.) de los vehículos a DME son altos, y el precio de un vehículo a DME es bastante alto como es el caso de otros vehículos "limpios" en el momento de la introducción inicial. Diversas subvenciones y excepciones de impuestos sobre los equipos para el suministro del combustible y adquisición de vehículos son necesarias para promover los vehículos al DME como un tipo de vehículo de baja emisión.

CAPITULO 12

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Japan DME Forum (JDF) (227), **DME Handbook**, Edit. JDF, Japón.
- Osamu Inokoshi, Yotaro Ohno, Takashi Ogawa, Norio Inoue, Nagayasu Tokoeda; (2005). "A New DME Production Technology 100tons/day DME Direct Synthesis Demonstration Plant Project", **Proceedings of The Fifteenth International Offshore and Polar Engineering Conference**, Junio 2005, 19-24, 49.
- Yotaro Ohno, Norio Inoue, Takashi Ogawa, Masami Ono, Tsutomu Shikada, Hiromasa Hayashi (2001). "Slurry Phase Synthesis and Utilization of Dimethyl Ether", **NKK TECHNICAL REVIEW**, N°.85, 23-24, 27.
- Blue fuel energy (ultra low carbon fuels):
<http://www.bluefuelenergy.com/uses-for-blue-fuel-dme/uses-for-blue-fuel-dme/blue-fuel-dme-power-generation.html>
- JFE Holdings, Inc. (DME Project):

<http://www.jfe-holdings.co.jp/en/dme/01-tokucyo.html>

- Yotaro Ohno, (2007). "New Clean Fuel DME", **DeWitt Global Methanol & MTBE Conference**.
- Enzen Global Solutions, DME – The NextGen Fuel.
- Conference on the Development and Promotion of Environmentally Friendly Heavy Duty Vehicles such as DME Trucks, Marzo 17 (2006).
- Andrew P. E. York, Tian-cun Xiao a; Malcolm L. H. Green a; John B. Claridge; (2007). **Methane Oxyforming for Synthesis Gas Production**, 522.
- JGC Corporation (DTP Dominant Technology for Propylene Productions Process):
<http://www.jgc.co.jp/en/04tech/11dme/dtp.html>
- Air Products and Chemicals, Inc.; (2002). "Market Outlook for dimethyl ether (DME)", 5.
- Hydrogen Production – Steam Methane Reforming (SMR), 1 -2.
- U.S. Department of Energy (Energy Efficiency & Renewable Energy):
http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/production/natural_gas.html
- IDybkjær y Jorgen N. Gol, Haldor Topsoe A/S; (2004). "Alternate Use of Natural Gas", 3-4.

- Transportation Development Centre Safety and Security Transport Canada M. Paas Consulting Ltd.; (1997). **Safety Assessment of DME Fuel**, Abril 2007, 4-6
- Ministerio de Energía y Minas – Dirección de Hidrocarburos, **Anuario Estadístico de Hidrocarburos 2008**, Cap. 4, Cap. 5.
- Chul-Jin Lee, Youngsub Lim, Ho Soo Kim, Chonghun Han; (2009). “Optimal Gas-To-Liquid Product Selection from Natural Gas under Uncertain Price Scenarios”, **Industrial & Engineering Chemistry Research**, 794-800.
- College of Engineering and Mineral Resources (Chemical Engineering):
www.che.cemr.wvu.edu/publications/projects/dimethyl/dme1.zip