



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

SIMULACIÓN DE LA OBTENCIÓN DE METANOL A PARTIR DE BIOGÁS UTILIZANDO DIFERENTES ESQUEMAS DE PRODUCCIÓN

Trabajo de titulación

TIPO: Propuesta Tecnológica

Presentado para optar el grado académico de:

INGENIERA QUÍMICA

AUTOR: RUBI MARICELA BASANTES HERRERA

DIRECTOR: Ing. HANNIBAL LORENZO BRITO MOINA

Riobamba – Ecuador

2021

© 2021, Rubi Maricela Basantes Herrera

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho del Autor.

Yo, Rubi Maricela Basantes Herrera, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor/autora asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 05 de marzo del 2021

**RUBI
MARICELA
BASANTES
HERRERA**

Firmado digitalmente por RUBI
MARICELA BASANTES HERRERA
Nombre de reconocimiento (DN):
cn=RUBI MARICELA BASANTES
HERRERA,
serialNumber=0504381906,
ou=AUTORIDAD DE CERTIFICACION
ESPOCH DTIC, o=ESPOCH DTIC,
l=RIOBAMBA, c=EC
Fecha: 2021.03.01 16:20:36 -05'00'

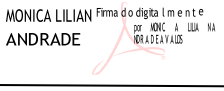


Rubí Maricela Basantes Herrera

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de titulación; tipo Propuesta Tecnológica, SIMULACIÓN DE LA OBTENCIÓN DE METANOL A PARTIR DE BIOGÁS UTILIZANDO DIFERENTES ESQUEMAS DE PRODUCCIÓN, realizado por la señorita: Rubi Maricela Basantes Herrera, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Mónica Lilián Andrade Avalos	 MONICA LILIAN ANDRADE	19-10-2021
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		
Ing. Hannibal Lorenzo Brito Moina DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN	 HANNIBAL LORENZO BRITO MOINA	19-10-2021
Ing. Cesar Arturo Puentes Guijarro. Phd MIEMBRO DEL TRIBUNAL	 CESAR ARTURO PUENTE GUIJARRO	19-10-2021

DEDICATORIA

Con infinito amor dedico esta tesis y toda mi carrera universitaria a Dios y la Virgen por darme la fuerza y la voluntad para culminar con éxito, a mis Padres, pilar fundamental en mi vida quienes me brindaron su apoyo incondicional para poder concluir con uno de los objetivos fundamentales dentro de mi caminar estudiantil, quienes han sido fuente de inspiración y de lucha constante para terminar con este trabajo que será el comienzo de nuevos triunfos en mi vida profesional. De manera especial a Antony quien con su ejemplo y paciencia a velado día a día mi vida personal y estudiantil, el cual se ha convertido en mi cómplice de vida y a otros amigos que han estado ahí cuando les he necesitado para salir adelante en todo este proceso de mi vida y cada una de las personas que a lo largo de mi vida y carrera profesional estuvieron junto a mí y me brindaron su apoyo para que no desmaye y hoy esté cumpliendo con un objetivo en mi vida. Con mucho cariño para todos ustedes.

AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento muy sincero a la Escuela Superior Politécnica De Chimborazo, y en especial al Personal Docente de la Carrera de Ingeniería Química, por brindarme la oportunidad de superarme, quienes con cariño y convicción impartieron sus sabios conocimientos a lo largo de nuestra formación profesional. Especialmente al Ing. Hannibal Brito M , en calidad de Director de tesis, por orientarme, dirigirme y brindarme sus valiosos conocimientos para la cristalización de la tesis.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	XIII
--------------	------

SUMMARY.....	XIV
--------------	-----

CAPÍTULO I

1 INTRODUCCIÓN	1
----------------------	---

1.1 Antecedentes.....	1
-----------------------	---

1.2 Planteamiento del Problema.....	2
-------------------------------------	---

1.3 Justificación del Proyecto.....	3
-------------------------------------	---

1.4 Objetivos.....	4
--------------------	---

1.4.1 <i>Objetivo General</i>	4
-------------------------------------	---

1.4.2 <i>Objetivos Específicos</i>	4
--	---

1.5 Alcance	4
-------------------	---

CAPITULO II

2. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	5
-----------------------------------	---

2.1 Estado del Arte.....	5
--------------------------	---

2.2 Bases teóricas.....	7
-------------------------	---

2.2.1 <i>Biogás</i>	7
---------------------------	---

2.2.1.1. <i>Digestión anaerobia</i>	8
---	---

2.2.2. <i>Metanol</i>	9
-----------------------------	---

2.2.2.1 <i>Proceso de producción de metanol</i>	10
---	----

CAPITULO III

3. METODOLOGÍA	11
3.1 Etapas del desarrollo.....	11
3.2 Determinación de los parámetros de operación	12
<i>3.2.1 Proceso piloto (Santos, Santos y Prata (2018)).....</i>	<i>12</i>
<i>3.2.2 Proceso industrial (Ghosh et al. (2019)).....</i>	<i>14</i>
<i>3.2.3 Proceso industrial con un segundo reactor.....</i>	<i>16</i>
3.3 Simulación en DWSIM.....	17
<i>3.3.1 Planta piloto</i>	<i>17</i>
<i>3.3.2 Planta industrial.....</i>	<i>23</i>
3.4 Validación de resultados	29
3.5 Corridas de sensibilidad.....	29
3.6 Análisis de resultados.....	30
 CAPITULO IV	
4. GESTIÓN DEL PROYECTO	31
4.1 Cronograma	31
4.2 Recursos y materiales: Humanos, Equipos y Financiamiento	32
<i>4.2.1 Presupuesto del proyecto</i>	<i>32</i>
<i>4.2.2 Talento humano</i>	<i>32</i>
<i>4.2.3 Recursos Materiales</i>	<i>32</i>
4.3. Resultados y Discusión	33
<i>4.3.1 Validación de los resultados</i>	<i>33</i>
<i>4.3.1.1 Validación planta piloto</i>	<i>33</i>
<i>4.3.1.2 Validación planta industrial</i>	<i>34</i>

<i>4.3.1.3 Validación de esquema industrial con dos reactores</i>	35
4.3.2 Análisis de sensibilidad	36
<i>4.3.2.1 Efecto de la relación CH₄/CO₂</i>	36
<i>4.2.3.2 Efecto de la presión de separación</i>	37
<i>4.2.3.3 Efecto de la temperatura del reformador</i>	38
<i>4.2.3.4 Influencia del porcentaje de recirculación respecto a la corriente de salida</i>	39
<i>4.2.3.4 Influencia del flujo de entrada</i>	41
4.3.3 Comparación de desempeño de los esquemas	42
5 CONCLUSIONES	44
6 RECOMENDACIONES	45
GLOSARIO	
BIBLIOGRAFÍA	

INDICE DE TABLAS

Tabla 1-2: Composicion del Biogás.....	7
Tabla 1-3: Parámetros de operación planta piloto	13
Tabla 2-3: Parámetros de operación planta industrial.....	15
Tabla 3-3: Parámetros cinéticos del modelo de producción de metanol	21
Tabla 1-4: Cronograma del proyecto	31
Tabla 2-4: Presupuesto del proyecto	32
Tabla 3-4: Talento humano para el desarrollo del proyecto	32
Tabla 4-4: Recursos materiales para el proyecto	32
Tabla 5-4: Validación de resultados de planta piloto.....	33
Tabla 6-4: Comparación de corriente de metanol planta industrial	34
Tabla 7-4: Validación de planta industrial	35
Tabla 8-4: Validación para proceso industrial con dos reactores	36
Tabla 9-4: Resultados influencia de la relación CH_4/CO_2	37
Tabla 10-4: Resultados para variación de presión de separación	38
Tabla 11-4: Influencia de la Temperatura de Reformado	39
Tabla 12-4: Influencia del porcentaje de recirculación	40
Tabla 13-4: Influencia del flujo de alimentación.....	41
Tabla 14-4: Conversión y producción obtenidos para esquemas.....	42
Tabla 15-4: Necesidades energéticas para los esquemas de producción.....	43
Tabla 16-4: Pureza de metanol Obtenido	43

INDICE DE FIGURAS

Figura 1-2: Esquema del Proceso de Digestión Anaerobia.....	9
Figura 1-3: Metodología general de desarrollo de trabajo	11
Figura 2-3: Esquema de producción de metanol (piloto).....	13
Figura 3-3: Esquema de producción de metanol (industrial).....	15
Figura 4-3: Proceso industrial con un segundo reactor.....	16
Figura 5-3: Configuración de un intercambiador de calor simple (Heat-01)	17
Figura 6-3: Configuración de un compresor(Comp-02)	18
Figura 7-3: Ventana de ingreso de reacciones.....	19
Figura 8-3: Configuración de una nueva reacción.....	19
Figura 9-3: Configuración de un reactor de lecho empacado en DWSIM.....	20
Figura 10-3: Configuración de reacción heterogénea	22
Figura 11-3: Configuración de un intercambiador de calor	24
Figura 12-3: Configuración de válvula de expansión	24
Figura 13-3: Configuración del modelo termodinámico del módulo CHEM SEP.....	25
Figura 14-3: Esquema de planta piloto	26
Figura 15-3: Esquema de planta industrial.....	27
Figura 16-3: Esquema de planta industrial con dos reactores	28
Figura 17-3: Configuración de análisis de sensibilidad DWSIM.....	29

INDICE DE GRÁFICOS

Grafico 1-4: Resultados para el análisis de sensibilidad	37
Grafico 2-4: Resultados de variación de la presión de separación	38
Grafico 3-4: Resultados de la variación de la temperatura del reformador	39
Grafico 4-4: Resultados de la variación del porcentaje de recirculación	40
Grafico 5-3: Resultados de la variación del flujo de alimentación	41

RESUMEN

El presente trabajo de titulación tiene como objetivo el simular el proceso de obtención de metanol partir de biogás mediante el proceso de hidrogenación directa del gas de síntesis producido a partir del reformado de biogás. Para el desarrollo de este trabajo se realizó una revisión bibliográfica completa de donde se seleccionó tres esquemas de producción, dos esquemas complejos basados trabajo de Ghosh y otro más simple basado en Santos, Santos y Prata . Se realizó la simulación de los tres esquemas de producción en el software DWSIM con los parámetros especificados por cada autor. Posteriormente se validó los resultados en base al flujo de metanol obtenido en cada planta mediante el cálculo del error porcentual de cada uno. Luego se realizó el análisis de sensibilidad en la planta piloto donde se modificó distintos parámetros relacionados con el proceso para verificar la influencia que estos presentan sobre la producción de metanol. Finalmente se compararon las conversiones, flujos de metanol, pureza del metanol y consumos energéticos para los diferentes esquemas. Se encuentra que la planta que opera a nivel industrial utilizando dos reactores presenta un mayor desempeño dentro de los tres esquemas analizados, esto en base a su mayor producción y pureza de metanol obtenidas como resultado de la simulación. Se recomienda realizar un análisis pitch sobre el esquema básico de producción para analizar la posibilidad de disminuir los consumos de calentamiento dentro del esquema.

Palabras clave: < INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA QUÍMICA >, < DWSIM (SOFTWARE) >, < BIOGÁS >, < PRODUCCIÓN DE METANOL >, < SIMULACIÓN >

LUIS
ALBERTO
CAMINOS
VARGAS

Firmado digitalmente por
LUIS ALBERTO CAMINOS
VARGAS
Nombre de reconocimiento
(DN): c=EC, o=ROBAMBA,
serialNumber=0602766974,
cn=LUIS ALBERTO CAMINOS
VARGAS
Fecha: 2021.06.21 17:12:38
-05'00'



1235-DBRA-UTP-2021

SUMMARY

The aim of this work is to simulate the process of obtaining methanol from biogas by means of the direct hydrogenation of synthesis gas produced from biogas reforming. To carry out this work, a complete bibliographic review was implemented, where three production schemes were selected, two complex schemes based on Ghosh's work and a simpler one based on Santos, Santos and Prata. The simulation of the three production schemes was carried out in the DWSIM software with the parameters specified by each author. Subsequently, the results were validated based on the methanol flow obtained in each plant by calculating the percentage error of each one. Then, the sensitivity analysis was carried out in the pilot plant where different parameters related to the process were modified in order to verify the influence that these parameters present on the production of methanol. Finally, conversions, methanol fluxes, methanol purity and energy consumption were compared among the different schemes. It is found that the plant that operates at an industrial level using two reactors presents a higher performance within the three schemes analyzed, this based on its higher production and purity of methanol obtained as a result of the simulation. It is recommended to carry out a pitch analysis on the basic production scheme in order to analyze the possibility of reducing heating consumption within the scheme.

Keywords: <ENGINEERING AND CHEMICALTECHNOLOGY>, <DWSIM (SOFTWARE)>, <BIOGAS>, <METHANOL PRODUCTION>

EDISON
HERNAN
SALAZAR
CALDERO
N

Firmado digitalmente por
EDISON HERNAN
SALAZAR
CALDERON
Fecha:
2021.11.23
22:07:04 -05'00'

CAPÍTULO I

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La búsqueda por el desarrollo de fuentes limpias de energía y materiales han ido creciendo de manera considerable en el territorio ecuatoriano. Como un ejemplo del primero podemos tomar las instalaciones de energías alternativas desarrolladas hasta el 2012, estas se presentan en forma de centrales hidroeléctricas y parques eólicos, de estos las hidroeléctricas de Paute Molino (1 100MW), Mazar (160MW), San Francisco (230MW), Marcel Laniado de Wind (213MW), Agoyán (156MW) y Pucará (73MW) representan el 83 % de la capacidad energética del país(Soria et al. 2013). Por otro lado en cuanto a la obtención de materiales limpios no se han desarrollado procesos a gran escala considerables, únicamente se han implementado proceso de reciclaje a escalas piloto, llegando a reciclar un poco menos del 10% de los desechos generados(Vistazo 2020).

La agricultura es la sexta actividad económica más importante para el país, representando el 8% del producto interno bruto. Cada día esta actividad crece más y con ella crece los desechos generados por esta actividad, así como los residuos generados por los consumidores finales de los productos de esta. Estos desechos son difíciles de manejar y muchas veces únicamente terminan en un relleno sanitario donde no se les dará un ningún uso en especial. Estos desechos pueden ser utilizados para obtener biogás mediante un mecanismo de digestión anaerobia contribuyendo de esta forma al desarrollo de energías alternativas(Chiriboga 2010).

Si bien el biogás puede contribuir al desarrollo energético del país este también puede ser utilizado como fuente para obtener otros compuestos químicos como el metanol, lo que podría reducir de manera considerable las importaciones de este compuesto al país y ayudar a mejorar la economía de este.

1.2 Planteamiento del Problema

El crecimiento de la población mundial trae consigo una elevación en el consumo de los recursos naturales. Estos últimos son utilizados para satisfacer las necesidades de los seres humanos, para lograr esto último se hace un alto uso energético, así como compuestos químicos especializados (Navarro Puyuelo et al. 2017). El petróleo ha sido el principal recurso natural explotado por el ser humano ya que su versatilidad permite obtener compuestos químicos de gran valor industrial y también combustibles que aportan energía para las actividades humanas (Muñoz et al. 2011a).

A pesar de ser un valioso recurso natural el petróleo es un recurso no renovable y su disponibilidad cada vez es menor, se prevé que solo estará disponible por un par de décadas más (Im-orb et al. 2020). Por otra parte, el uso de combustibles fósiles contribuye al efecto invernadero debido a que su combustión genera principalmente monóxido y dióxido de carbono principalmente, junto con trazas de otros compuestos como NO_x y SO_x los cuales provocan efectos adversos a la capa atmosférica. A las emisiones producidas por el uso de combustibles fósiles se le suma los desechos generados por las actividades humanas. Dentro de estas la industria agrícola y ganadera generan un alto impacto ambiental ya que a las emisiones relacionadas con el uso de combustibles se les debe añadir las emisiones relacionadas con el uso de fertilizantes, desechos generados tanto por animales como por vegetación muerta y finalmente los desechos que genera el consumidor final (Navarro Puyuelo et al. 2017; Arce 2011). Por todos estos motivos se ha buscado a partir de la década de los 2000 crear procesos más eficientes que minimicen los impactos ambientales (Stürmer et al. 2021).

Dentro de las estrategias más estudiadas para la minimización de las emisiones atmosféricas se encuentra el desarrollo de biogás. Este producto es altamente valioso ya que se obtiene directamente por la digestión anaerobia de la materia orgánica, por lo que es posible obtenerlo a partir de desechos agrícolas. Otra ventaja que presenta el biogás es que es rico en metano y dióxido de carbono por lo que puede ser utilizado como un vector energético, la cual es prácticamente su única aplicación actualmente (Augelletti et al. 2020). A pesar de los beneficios que presenta el biogás este no puede competir directamente con grandes petroleras, pues estas producen compuestos adicionales a más de combustibles lo cual representa una gran ventaja de inversión frente al desarrollo de una instalación de producción de biogás. Por lo que se vuelve necesario el diseñar procesos en los cuales se pueda convertir el biogás en otros compuestos químicos además de aquellos con alto potencial energético.

1.3 Justificación del Proyecto

El diseño de procesos industriales eficientes es una rama de aplicación directa del ingeniero químico. Este último se encarga mediante el modelamiento matemático y simulaciones con software asistido puede evaluar el desempeño de los procesos sin necesidad de realizar grandes inversiones y el gasto de materias primas valiosas y de difícil obtención con una precisión razonable.

Tal como se ha mencionado anteriormente los trabajos enfocados a la utilización del biogás como materia prima para la obtención de otros productos químicos es escaso. Es por esto que el desarrollo de este proyecto está enfocado a la obtención de metanol, el cual es un compuesto químico de alto valor industrial. Este es utilizado ampliamente tanto para obtener otros compuestos químicos como el dimetil éter, el cloro metano y ácido acético(Leonzio et al. 2019). También puede ser utilizado como vector energético o como un acumulador de hidrogeno. A pesar de ser obtenido principalmente a partir del gas natural lo cierto es que el metanol puede ser obtenido a partir de cualquier fuente de carbono, por lo que es posible su obtención a partir del biogás ya que este es tiene un alto contenido de carbono (60% CH_4 y 40% CO_2)(Fu et al. 2020)(Santos et al. 2018).

A pesar del potencial uso que presenta el biogás para la obtención de metanol es necesario evaluar diferentes rutas de obtención de metanol mediante el uso de diferentes esquemas. Desde el punto de vista de la ingeniería es necesario el desarrollo del esquema de producción óptimo de tal forma que se obtenga el máximo rendimiento posible, lo cual es el objetivo de este trabajo. De esta forma este proyecto puede ser utilizado como una fuente de consulta para la implementación de una planta a escala piloto o industrial, así como una fuente de consulta para profesionales o estudiantes interesados en el desarrollo de futuras propuestas tecnológicas relacionadas con el uso de biogás.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Simular un proceso de obtención de metanol a partir de biogás utilizando diferentes esquemas de producción.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Determinar los parámetros de operación para los distintos esquemas de producción de metanol.
- Analizar el desempeño de los distintos esquemas mediante los cuales se produce metanol.
- Validar los resultados obtenidos por la simulación con base a información bibliográfica.
- Realizar un análisis de sensibilidad para determinar las variables de diseño que más afectan a la producción de metanol.

1.5 Alcance

Este proyecto tiene como finalidad la evaluación de porcentaje de conversión a metanol de diferentes esquemas de producción de metanol a partir de biogás, así como el análisis de la influencia de diferentes parámetros de proceso que mayor influencia presentan dentro de la producción de metanol mediante una simulación en el software DWSIM.

CAPITULO II

2. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

2.1 Estado del Arte

La obtención de metanol a partir del biogás es posible mediante el uso de microorganismos que utilicen el metano como fuente de carbono. Patel et al. 2018 utilizando cultivos de los metanotrofos: *methylocella tundrae*, *methyloferula stellata*, y *methylomonas methanica*, estudian los efectos de utilizar estos cultivos de manera individual y combinada para poder mejorar la obtención de metanol a partir de biogás. Para realizar este estudio se utilizó biogás simulado, es decir una mezcla de metano, dióxido de carbono e hidrogeno con una concentración en volumen de metano del 30%. Por otra parte, las colonias de bacterias metanotrofas se utilizaron de dos formas, en una incubación libre y en una incubación encapsulada. Para la incubación encapsulada se empleó 2% de alginato con silica-gel. El estudio realizado muestra que se obtuvo una producción máxima de metanol para las colonias combinadas de metanotrofos, obteniendo una producción máxima de metanol mejoró a 8,66, 8,45 y 9,65 mM.

Patel et al. (2020), en un segundo estudio utiliza *methyloferula stellata* encapsulados en alginato y en alcohol polivinílico para mejorar la producción de metanol a partir de biogás simulado. Se realizó una variación en la composición de la matriz del material encapsulante lo cual arrojó una composición de alginato del 2% y alcohol polivinílico del 10%, obteniéndose un rendimiento del 80.6% y 88.7%. Para el estudio de la producción de metanol se utilizó biogás simulado, una corriente de alimento que contiene metano y dióxido de carbono a diferentes proporciones (4: 1, 3: 1, 2: 1, 3: 2 y 1: 1) y se incubó durante 24 h a 30 ° C y a velocidad de agitación de 150 rpm. Además, se evaluó el efecto de la concentración de vectores de CH₄ (aceites de parafina y silicona, 2,5-15%) con un tiempo de incubación de 96 horas con biogás simulado en proporción 2:1. El uso de estos vectores muestra un incremento de 1.7 veces en cuanto a la producción de metanol, y la máxima producción obtenida fue de 7.46 mM.

Baena-Moreno et al. 2020, realizan un estudio de la posibilidad de mejora del biogás, removiendo CO₂ para posteriormente ser transformado en metanol, esto como una alternativa al proceso que más ampliamente se ha aplicado para el uso de biogás, en el cual únicamente se remueve el dióxido de carbono para obtener biometano (98% metano). El proceso base estudiado involucra la producción de metanol a partir del dióxido y monóxido de carbono separado del biogás, de tal forma que se obtiene metano y metanol del proceso. Para esto se estudió diferentes flujos de alimentación de biogas 100, 250, 500, and 1000 m³ /h en 15 escenarios de simulación diferentes, así también se realizó un análisis de sensibilidad donde se analiza la influencia del precio de

la electricidad, precio del biometanol obtenido y el precio del gas natural. Finalmente se analiza la posibilidad de obtener subsidios del gobierno para poder hacer el proyecto económicamente viable. Las simulaciones efectuadas muestran que las plantas con capacidad de procesamiento de 500 y 1000 m³/h son las más adecuadas para operar siempre y cuando se tenga un subsidio energético de 40 y 20 €/MW. También se concluye que para que el proyecto sea rentable es necesario una gran producción de biometanol, por otra parte, el análisis de sensibilidad muestra que los precios de electricidad, gas natural y biometanol influyen considerablemente sobre la rentabilidad del proyecto.

Ghosh et al. (2019), realiza una simulación de un planta a gran escala que procesa biogás, obtenido a partir de desechos de animales, comida y residuos cotidianos, para convertirlo en metanol, en esta planta en primera instancia se realiza una mejora de biogás, removiendo el dióxido de carbono, posteriormente el biogás mejorado se somete a un proceso de reformado con vapor de agua para obtener gas de síntesis, luego el dióxido de carbono separado es mezclado con el gas de síntesis para ser introducido al reactor de metanol. En este estudio se evaluó el desempeño de la planta utilizando dos diferentes catalizadores uno de Cu/ZnO/Al₂O₃, usado para la producción convencional de metanol, y el otro catalizador fue a base Cu/Zn/Al/Zr, el cual es usado para la hidrogenación del dióxido de carbono. Los procesos simulados utilizan hidrogenación directa de dióxido de carbono y remoción de agua en el reactor. La máxima producción de metanol obtenida fue de 2100 ton de metanol a partir de una alimentación de 1.80x10⁶ Nm³/año, conseguido en el esquema que utiliza reformado con vapor de agua seguido con hidrogenación directa de dióxido de carbono empleando el catalizador soportado en Zr.

Vita et al. (2018), realiza un análisis termodinámico del proceso de la síntesis de metanol a partir del biogás, para esto se realizó un análisis mediante la minimización de la energía libre de Gibbs en cada proceso. Se estudia la posibilidad de transformar el biogás en gas de síntesis mediante el reformado seco de biogás, reformado oxidativo y también mediante reformado con vapor de agua. En este trabajo se utilizó diferentes proporciones de CH₄/CO₂ (1-2.3) y temperatura (400-900 °C). La subsecuente transformación del gas de síntesis a metanol también fue estudiada para obtener las condiciones óptimas en las cuales se obtiene un mayor rendimiento de metanol. Esto último produjo un rendimiento máximo cuando la proporción H₂/ CO era igual a 2, a una temperatura de 250 °C y 100 bar de presión. Vita et al, sugiere que este resultado muestra que la cantidad de dióxido de carbono presente en la corriente de alimentación no tiene un alto impacto sobre el rendimiento de metanol. En cuanto a los esquemas de reformado el análisis termodinámico de equilibrio muestra que la ruta más adecuada para este proceso es el reformado con vapor de agua, en el cual la composición del biogás de entrada tiene un gran impacto en el

equilibrio, concluyendo un alto contenido de metano en la alimentación favorece al proceso de reformado, así como el incremento de la temperatura del proceso.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Biogás

Se conoce como biogás a los productos gaseosos obtenidos de la descomposición anaerobia del material orgánico(Martínez 2019). Estos gases son producidos como resultado de la acción de bacterias metanogénicas sobre la materia orgánica. El proceso de digestión anaerobia comprende una serie de mecanismos complejos donde esencialmente las bacterias aprovechan las cadenas hidrocarbonadas presentes en las biomoléculas (lípidos, proteínas e hidratos de carbono) para convertirlos en hidrocarburos ligeros(Arce 2011). Dado que la condición para la obtención de biogás es que la descomposición de la materia se de en ausencia de oxígeno, esta puede ser realizada con relativa facilidad en zonas industriales, así como también en áreas rurales(Stürmer et al. 2021).

Como resultado del proceso anteriormente descrito se obtiene fertilizantes ricos en fosforo y con alta relación C/N, así como una gran variedad de compuestos. Estos productos son variados e incluyen moléculas como: etanol, metanol, amoniaco, gas metano e hidrogeno(Chiriboga Novillo 2010). Todos aquellos compuestos que se encuentran en fase gaseosa formaran parte del biogás final obtenido. La composición final de este dependerá en gran medida de la temperatura a la que se lleve a cabo la digestión anaerobia(Augelletti et al. 2020), es así que se reportan diferentes composiciones de biogás en trabajos de literatura.

Tabla 1-2: Composición del Biogás

Compuesto	% Volumen
Metano	40-70
Dióxido de Carbono	30-60
Hidrogeno	0-1
Nitrógeno	Trazas
Sulfuro de hidrogeno	0-3

Vapor de Agua	0.1-1
---------------	-------

Fuente: (Martínez 2019; Arce 2011)

A pesar de presentar una gran variación entre composiciones, con fines de modelamiento se toma generalmente que el biogás está compuesto únicamente por metano y dióxido de carbono en proporciones variables en rangos promedios de: CH₄: 60-70% y CO₂:30-40% (Omar et al. 2019)(Fu et al. 2020)(Nguyen et al. 2020).

Es de gran importancia mencionar que la calidad combustible de biogás se analiza en función de su porcentaje de dióxido de carbono, un alto valor de dióxido de carbono disminuye significativamente el poder calorífico del biogás, por ejemplo, para la composición 60/40 CH₄/CO₂ se tiene un poder calorífico inferior de 17.7 Mj/Kg mientras que para un biogás compuesto únicamente por metano es de 50.2 Mj/Kg. Adicionalmente un alto contenido de dióxido de carbono podría aumentar las emisiones de gases contaminantes, así como el peligro de corrosión a las instalaciones. (Toledo-Cervantes et al. 2016).

2.2.1.1. Digestión anaerobia

El proceso de digestión anaerobia comprende complejos mecanismos bioquímicos en los que intervienen distintos tipos de bacterias. El proceso general se compone por cuatro subprocesos principales en donde interviene un tipo específico de bacteria (Carlini et al. 2015). El primer proceso es conocido como hidrólisis, en este las bacterias hidrolíticas degradan las biomoléculas principales a sus unidades más simples así los hidratos de carbono se convierten en azúcares simples, los complejos lípidos se transforman en ácidos grasos de cadena larga y las proteínas son degradadas a aminoácidos. Una vez finalizada la fase de hidrólisis comienza la acidogénesis. En esta segunda etapa las bacterias acidogénicas transforman los azúcares solubles y aminoácidos en ácidos carboxílicos. Luego de esta inicia la acetogénesis llevado a cabo por las bacterias acetogénicas (Khalid et al. 2011; Carlini et al. 2020). Los productos resultantes de la acidogénesis y los ácidos grasos provenientes de la fase hidrolítica son transformados en acetato, hidrogeno y dióxido de carbono. En la cuarta fase, llamada metanogénesis, las bacterias metanogénicas utilizan el dióxido de carbono e hidrogeno para producir metano y vapor de agua. Tal como se describe el producto de esta digestión es una fase gaseosa, pero también se obtiene una fase sólida húmeda con alto contenido mineral y de gran valor como fertilizante (Vargas 2013).

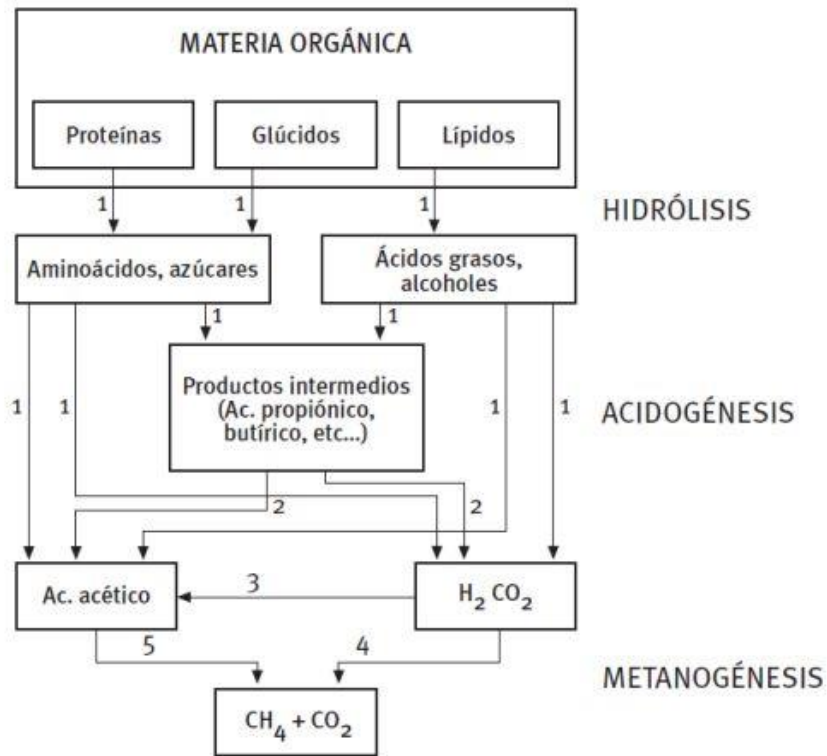


Figura 1-2: Esquema del Proceso de Digestión Anaerobia
Fuente: (Biodisol 2010)

Tal como se observa en la figura 1.3 los principales productos de la digestión anaerobia son el metano y dióxido de carbono, sin embargo, otros subproductos como el sulfuro de hidrogeno y el amoniaco son formados durante todo este proceso(Navarro Puyuelo et al. 2017). El contenido de estos subproductos gaseosos en el biogás usualmente es muy bajo y no supone un gran problema, sin embargo, en el caso del amoniaco y el sulfuro de hidrogeno estos deben ser removidos casi de forma obligatoria para evitar problemas de corrosión y emanación de gases tóxicos durante el uso de biogás. Las técnicas de remoción para la mejora de biogás comprenden desde métodos tradicionales que comprenden el uso de soluciones absorbentes como agua, para la eliminación de amoniaco(Abatzoglou et al. 2009). Se ha propuesto el uso de soluciones iónicas de hidróxido de sodio y soluciones de cloruro de hierro para la eliminación del sulfuro de hidrogeno, así como el uso de adsorbentes solidos como el hidróxido de sodio e hidróxido de potasio(Sun et al. 2015). Finalmente, para la remoción de CO₂ se ha propuesta un esquema de absorción típico con una solución de monoetanolamina y el uso de tecnología de membranas(Petersson et al. 2009).

2.2.2. Metanol

El metanol es el alcohol más simple de todos pues contiene únicamente un átomo de carbono. La estructura química del metanol es similar a la del agua teniendo un Angulo de enlace entre los átomos C-O-H de 108.9°. Se presenta como un líquido incoloro, inflamable y con un ligero olor alcohólico. Forma soluciones con el agua y con compuestos orgánicos como alcoholes, esteres y

cetonas, sin embargo, es insoluble en grasas y aceites(Busto Rojas et al. 2014). Comercialmente el metanol se presenta en tres diferentes grados según su pureza: grado C, denominado al alcohol que es proveniente de la destilación destructiva de madera, metanol e grado A usado como solvente y que contiene hasta un 0.003% de contenido de acetona y 0.15 % de agua. EL metanol grado AA es el metanol utilizado con fines químicos y contiene hasta un máximo de 0.10% de humedad y 0.002% de acetona(Cieza Guevara et al. 2018).

El metanol es un producto químico valioso ya que es utilizado como materia prima para la elaboración de una gran variedad de compuestos como el formaldehído, metil tercbutil eter y ácido acético. Adicionalmente se puede mezclar con dimetil éter y ser utilizado como un combustible alternativo en un motor que opera en el ciclo de Otto(Busto Rojas et al. 2014).

2.2.2.1 Proceso de producción de metanol

El metanol puede ser obtenido a partir de la destilación destructiva de madera sin embargo con el desarrollo de la tecnología de catalizadores es posible aprovechar otras fuentes de carbono para obtener metanol a condiciones relativamente suaves. El proceso predominante para la producción de metanol es el modelo Lurgi. Este método de obtención consta de tres procesos principales en los cuales el gas natural se transforma en metanol(Muñoz et al. 2011b).

El primer paso consta del acondicionamiento del gas natural, en este paso se elimina los compuestos sulfurados de la corriente de alimentación, esto se realiza para evitar problemas asociados a la corrosión y envenenamiento del catalizador. Esto se lleva a cabo hidrogenando el azufre presente y posteriormente se absorbe en un lecho de ZnO. El gas desulfurado pasa a un reformador donde el metano contenido en el gas natural se oxida parcialmente a monóxido de carbono. Este proceso de reformado puede llevarse a cabo mediante vía húmeda utilizando vapor de agua a alta presión o mediante un proceso seco a alta temperatura. El gas producido en este proceso contiene CO, CO₂ e H₂ adicionalmente esta corriente contiene pequeñas cantidades de metano no convertido, así como vapor de agua. Los gases a alta temperatura de 880 °C se utilizan en un sistema de recuperación de calor. Finalmente ocurre el proceso de síntesis de metanol, los gases salientes del reformado son comprimidos a la presión de la síntesis luego entra a un reactor de lecho empacado que utiliza un catalizador a base de aluminio para la producción de metanol. El reactor opera a condiciones de 250 °C y 71 bar, la temperatura del reactor es constante y logra enfriarse mediante el uso de agua a condiciones de ebullición(Busto Rojas et al. 2014).

CAPITULO III

3. METODOLOGÍA

3.1 Etapas del desarrollo

El tipo de investigación adoptado en este trabajo es del tipo descriptivo, pues se pretende comparar diferentes esquemas propuestos para la producción de metanol a partir de biogás. Como parámetro de análisis se empleará el porcentaje de conversión de carbono contenido en el biogás a metanol y la producción de biogás obtenido en cada esquema. A modo general los pasos a seguir se muestran en la figura 1-3.

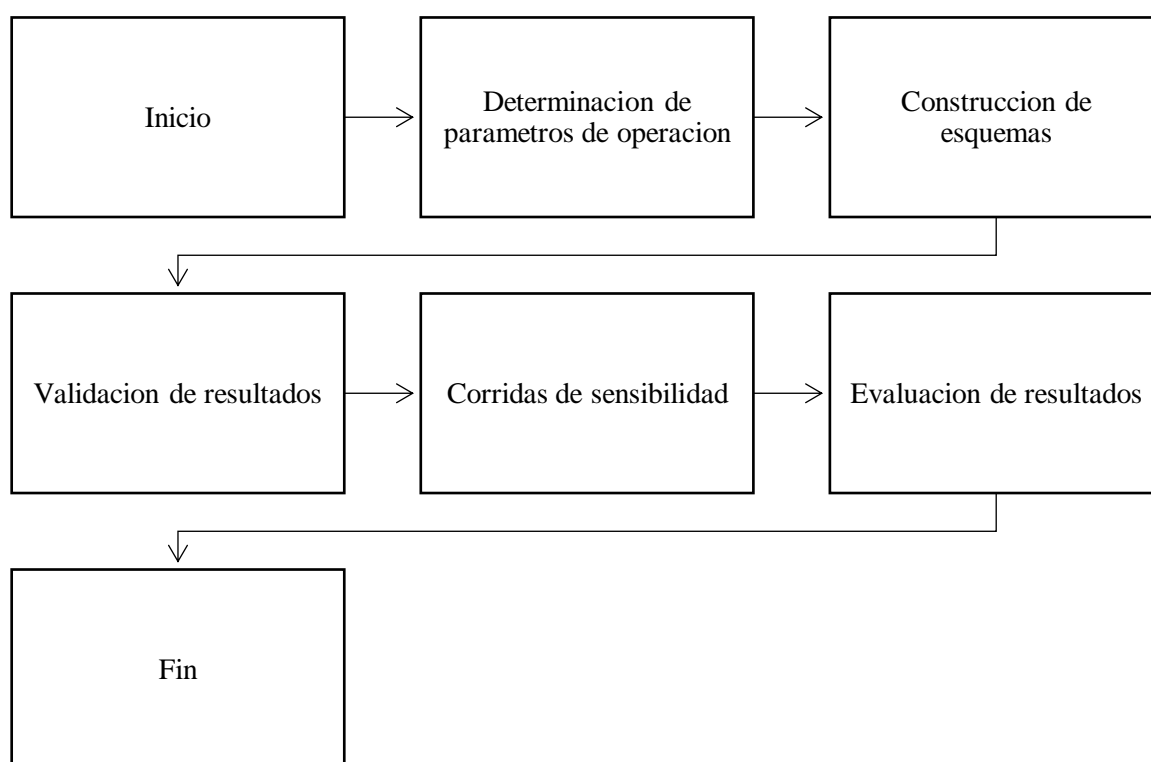


Figura 1-3: Metodología general de desarrollo de trabajo

Realizado por: Basantes Rubí 2021

El trabajo de investigación también tiene un enfoque cuantitativo ya que a pesar de ser descriptivo se basa en los valores obtenidos de los esquemas de producción para evaluar el desempeño de cada una de estas.

Para el desarrollo de esta investigación es de suma importancia contar con una fuente bibliográfica que proporcione información adecuada sobre el proceso que se está estudiando. Las fuentes empleadas en este trabajo son:

- **Fuentes primarias**

- Artículos científicos de alto impacto de donde se extraerá los datos necesarios para la simulación.

- **Fuentes secundarias**

- Artículos científicos indexados con temática relacionada al tema.
- Trabajos de titulación referentes a la composición del biogás.
- Páginas web donde se recabará información referente a los procesos estudiados y al uso de softwares de simulación.

3.2 Determinación de los parámetros de operación

Mediante una revisión bibliográfica exhaustiva se decidió realizar este estudio tomando como partida el trabajo presentado por Santos, Santos y Prata (2018) , en el cual se simula de manera numérica una planta piloto para la producción de metanol partiendo de diferentes tipos de biogás. También se emplearan los procesos descritos en el trabajo Ghosh et al. (2019), en este trabajo se muestra dos esquemas de producción más complejos ya que emplea un mayor número de equipos para su operación. Se escogió estos tres esquemas ya que esencialmente consisten en realizar el reformado del biogás para la producción de gas de síntesis y su posterior hidrogenación directa utilizando el catalizador convencional de $\text{Cu/ZnO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, con la posterior separación de metanol de los gases no convertidos.

3.2.1 Proceso piloto (Santos, Santos y Prata (2018))

El trabajo desarrollado por Santos, Santos y Prata (2018), se lo denomino en el presente trabajo como proceso piloto ya que el esquema es más sencillo. En este esquema el biogás utilizado se asume que fue purificado por alguna tecnología existente y no contiene sustancias sulfuradas. El biogás proveniente de diversas fuentes contiene nitrógeno, metano, dióxido de carbono y monóxido de carbono. La diferencia entra cada biogás es la proporción a la que ingresa las sustancias a la planta de procesamiento.

El proceso consta principalmente de tres equipos estos son: un reformador, un reactor de lecho empacado y un separador donde se recupera el metanol y los gases no convertidos son recirculados a la entrada del reactor de lecho empacado. El proceso también cuenta con compresores e intercambiadores de calor los cuales se utilizan para modificar las condiciones a las que se procesan las diferentes corrientes de la simulación. Los intercambiadores se modelan como calentadores y enfriadores simples, mientras que los compresores se modelan como compresores de tipo axial.

El biogás que previamente fue desulfurado ingresa al proceso donde a través del compresor y calentador se lleva a las condiciones de operación del reformador. En el reformador ocurre el reformado seco de metano, donde se emplea dióxido de carbono para producir gas de síntesis ($\text{CO}+\text{H}_2$). El gas de síntesis convertido pasa al reactor de lecho empacado donde se produce la formación de metanol y agua. El efluente del reactor se enfría y condensa para separar el metanol crudo de los gases no convertidos, estos se recirculan a la entrada del reactor de lecho empacado. Este proceso se puede observar de forma gráfica en la figura 2-3.

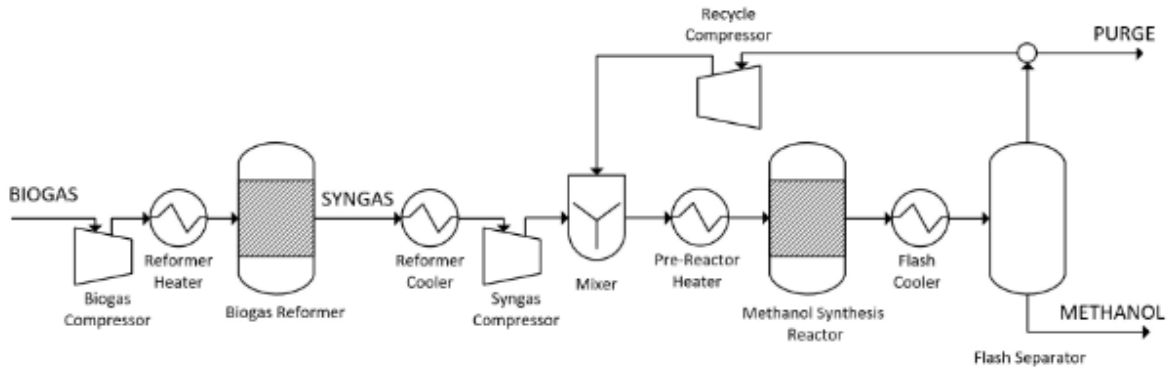


Figura 2-3: Esquema de producción de metanol (piloto)

Fuente: (Santos et al. 2018)

En la tabla 1-3 se pueden observar los parámetros de operación proporcionados por Santos, Santos y Prata (2018), en su trabajo de investigación. Estos parámetros son los utilizados para el biogás proveniente de mazorcas de maíz y con los cuales se trabajará en el presente trabajo de titulación., esto debido a que su composición no contiene nitrógeno y de esta forma se tiene más similitud con los procesos estudiados en el presente trabajo de investigación.

Tabla 1-3: Parámetros de operación planta piloto

Alimentación		Reformador		Reactor de metanol		Separador	
Proporción CH_4/CO_2	0.95	Temperatura (°C)	992.3	Temperatura (°C)	208.6	Temperatura (°C)	28.7
		Presión (Bar)	2.290	Presión (Bar)	80	Presión (Bar)	73.7

Fuente: (Santos et al. 2018)

3.2.2 Proceso industrial (Ghosh et al. (2019))

El proceso mostrado por Ghosh et al. (2019), se denominó como industrial debido a la complejidad del esquema de producción. En este esquema también se asume que el biogás utilizado fue previamente desulfurado por cualquier método ya conocido como la absorción. También se asume que cualquier compuesto nitrogenado fue removido previamente.

El proceso seleccionado fue el proceso que dentro del artículo Ghosh et al. (2019) se denomina hidrogenación directa en un reactor utilizando un catalizador tradicional. Este proceso se escogió debido a que utiliza un catalizador soportado de $\text{Cu/ZnO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ el cual es similar al utilizado por Santos, Santos y Prata (2018), por lo que facilita la comparación entre ambos esquemas. Este esquema consta de una sección de separación, donde el biogás se separa en una corriente rica en metano y otra rica en dióxido de carbono. También cuenta con un reformador donde se produce gas de síntesis, una sección de recuperación de calor donde se recupera el calor de la corriente de reformado para producir vapor de agua. Seguido se encuentra un reactor de lecho empacado en donde se produce el metanol por hidrogenación y finalmente una sección de separación donde se utiliza separadores de fases y una columna de destilación para refinar el metanol producido.

El biogás purificado ingresa al separador, modelado mediante un separador de compuestos, donde se obtiene metano y dióxido de carbono. La corriente de metano pasa al reformador donde se pone en contacto con vapor de agua para producir gas de síntesis mediante reformado húmedo. A continuación, el efluente se enfría al ponerlo en contacto con agua, de esta forma se produce vapor a alta y baja presión para necesidades dentro del proceso o para producción de energía. La corriente enfriada se condensa y se separa el agua contenida en la corriente, esta se pone en contacto con la corriente de dióxido de carbono proveniente del separador e ingresa al reactor de metanol. El efluente del reactor se enfría en un intercambiador de calor que es utilizado para precalentar la alimentación mezclada. Una vez frío el efluente se condensa mediante enfriamiento y se separa el metanol crudo de los gases no convertidos, estos se reciclan al reactor de metanol. El metanol crudo pasa por una válvula para reducir su presión, luego entra a un separador de fases para extraer más gases no convertidos y finalmente es refinado en una columna de destilación. Este proceso se puede observar en la figura 3-3

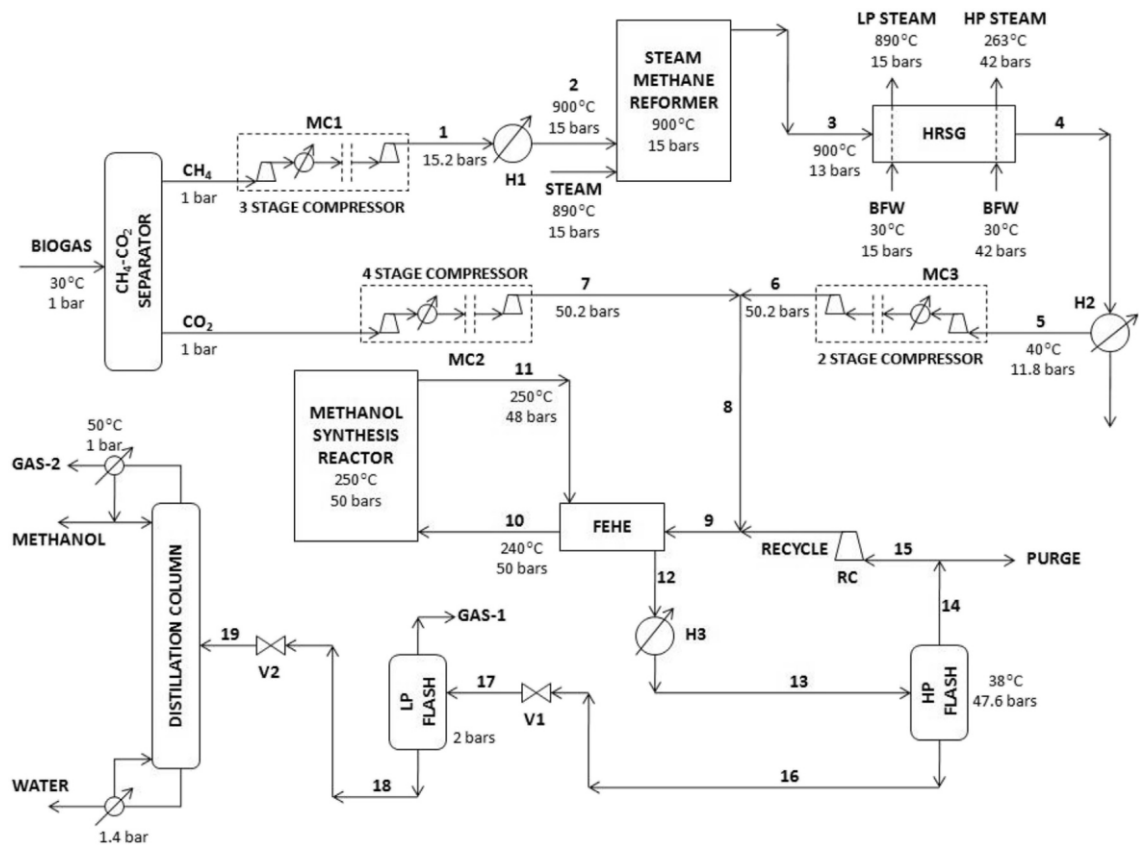


Figura 3-3: Esquema de producción de metanol (industrial)

Fuente: Ghosh et al. (2019)

Los parámetros más importantes para este proceso se muestran en la tabla 2-3 y son los valores indicados por Ghosh et al. (2019), estos parámetros son los seleccionados para la simulación base del esquema previo al análisis de sensibilidad.

Tabla 2-3: Parámetros de operación planta industrial

Parámetro	Alimentación	Reformador	Reactor de metanol	Separador de alta presión	Separador de baja presión
Temperatura (°C)	30	900	250	38	35
Presión (Bar)	1	15	50	47.6	2
Relación CH ₄ /CO ₂	1.5				

Fuente: Ghosh et al. (2019)

3.3 Simulación en DWSIM

3.3.1 Planta piloto

Para el desarrollo de la planta mostrada en la figura 2-3, se utilizó el modelo termodinámico de Peng Robinson. Este modelo fue escogido debido a que es el mismo que el autor emplea en su simulación numérica. Los intercambiadores de calor fueron modelados como calentadores y enfriadores simples utilizando el método corto de diseño y se consideró que la caída de presión a través de estos es despreciable. Estos calientan o enfrían las corrientes a las condiciones que operan los equipos mostrados en la tabla 1-3. Los compresores fueron modelados con una eficiencia isotrópica del 75%. Y definiendo su presión de salida a las condiciones requeridas. En las figuras 5-3 y 6-3 se pueden observar un ejemplo de la configuración para un intercambiador de calor simple y un compresor respectivamente dentro de la interfaz DWSIM

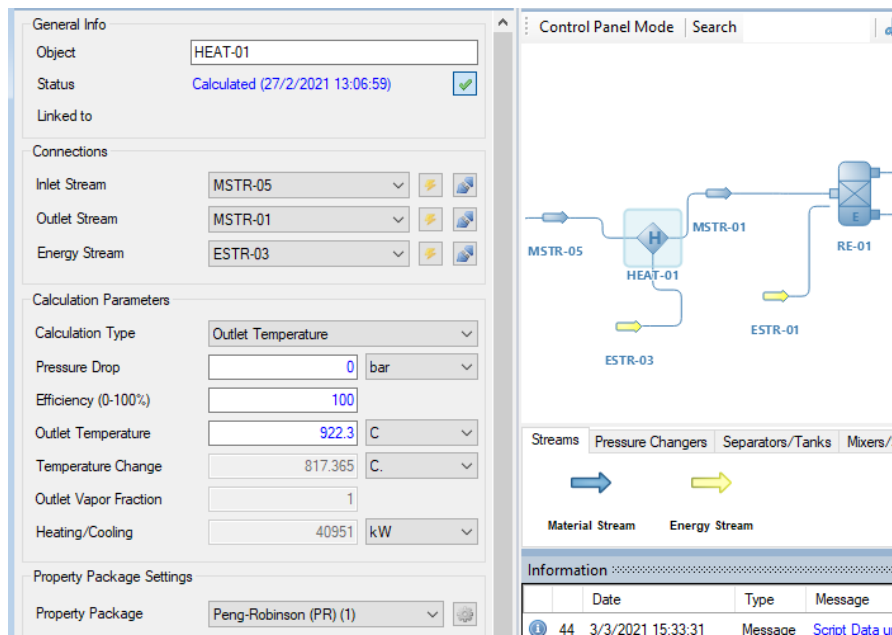


Figura 5-3: Configuración de un intercambiador de calor simple (Heat-01)

Realizado por: Basantes Rubí 2021

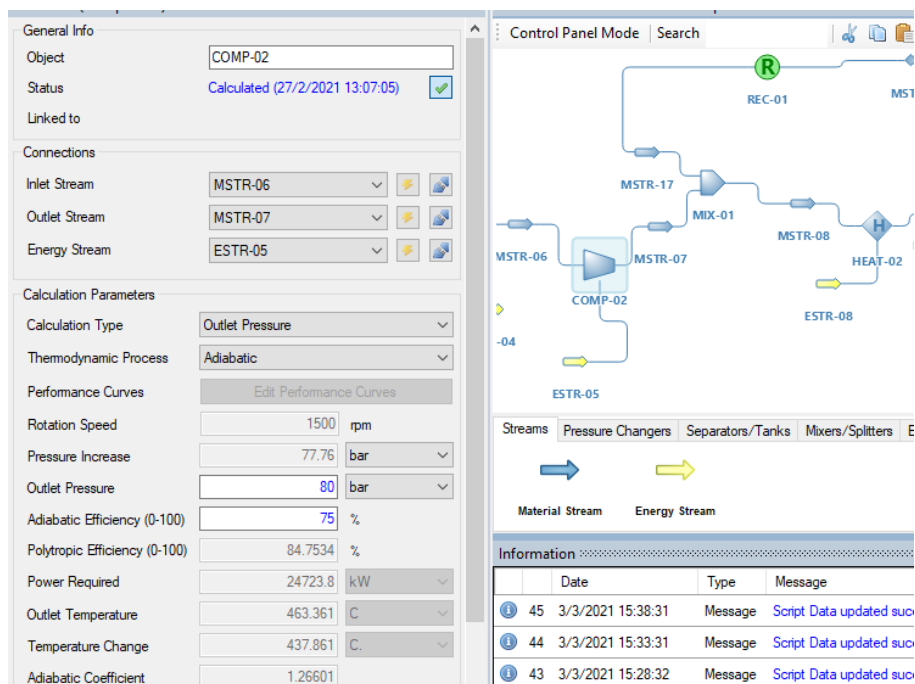
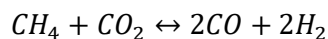


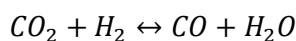
Figura 6-3: Configuración de un compresor(Comp-02)

Realizado por: Basantes Rubí 2021

El reactor donde se lleva a cabo el reformado seco del metano se modelo como un reactor de equilibrio que opera a la temperatura señalada en la tabla 1-3 donde transcurre las reacciones R-1 y R-2, siendo estas reacciones competitivas que ocurre en paralelo.



(R-1)



(R-2)

Para ingresar las reacciones químicas en el módulo DWSIM se lo hace a través de la pestaña “settings” y se selecciona la opción “reactions”-“add” tal como lo muestra la figura 7-3. Posteriormente al añadir la reacción se selecciona reacción de equilibrio y se marca los compuestos que van a participar en la reacción, en la pestaña inferior se puede seleccionar el modo de cálculo de la constante de equilibrio, ya sea proporcionando una función de temperatura, valor constante o configurando la opción para que esta sea calculada a partir de la energía libre de Gibbs. Finalmente se debe seleccionar la fase transcurre la reacción este proceso se muestra en la figura 8-3. Las reacciones ingresadas se añaden a un arreglo de reacciones determinado, mostrado en el lado derecho de la figura 7-3.

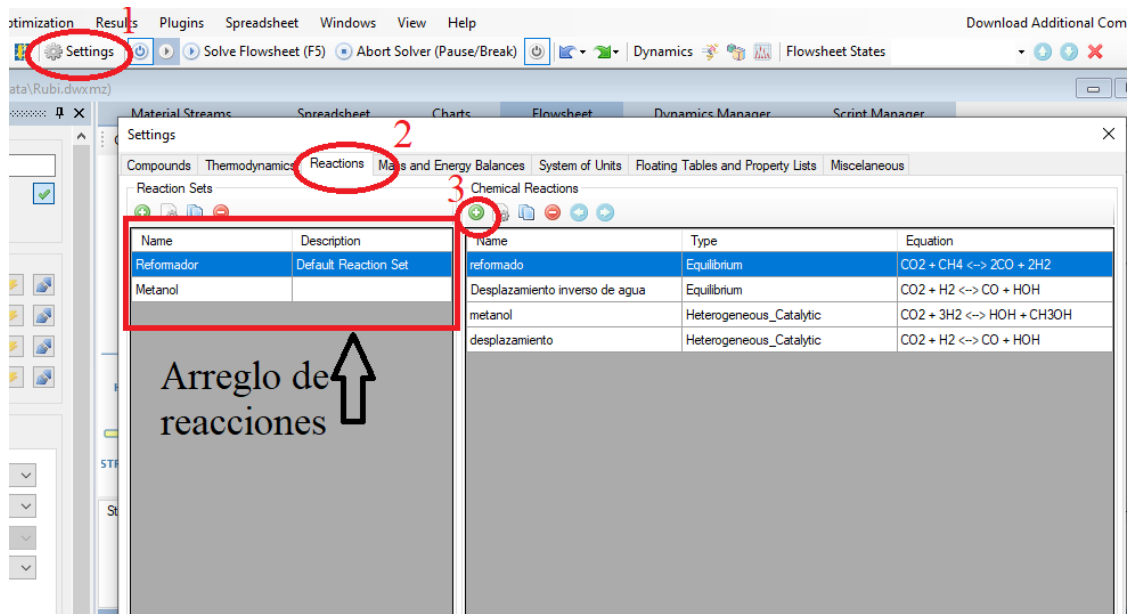


Figura 7-3: Ventana de ingreso de reacciones

Realizado por: Basantes Rubí 2021

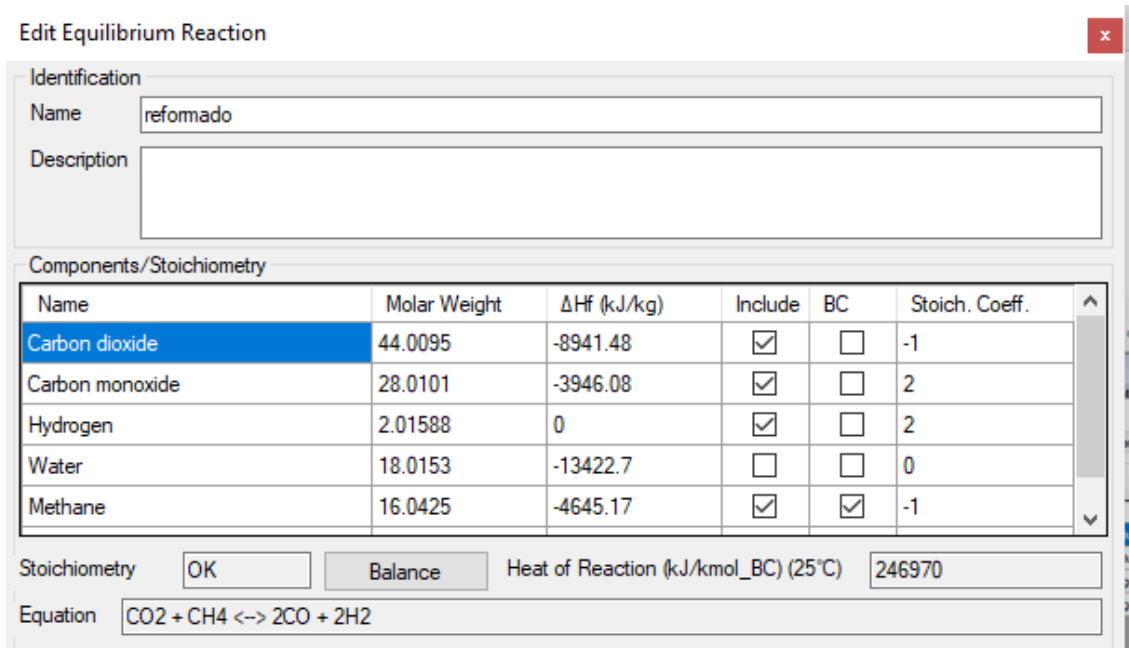


Figura 8-3: Configuración de una nueva reacción

Realizado por: Basantes Rubí 2021

Para el reactor de síntesis de metanol se utilizó el módulo PFR. El reactor opera de manera isotérmica y según los datos de Santos, Santos y Prata (2018), este reactor tiene 7 m de longitud con un diámetro de 0.04m por tubo y una carga de catalizador de 1190 kg/m³. Estas características se

ingresan en la ventana de configuración del reactor tal como se muestra en la figura 9-3. Adicionalmente es necesario crear un nuevo arreglo de reacciones que serán utilizados por el reactor. En este caso se añade dos nuevas reacciones del tipo heterogéneo ya que ocurren sobre la superficie de un catalizador sólido.

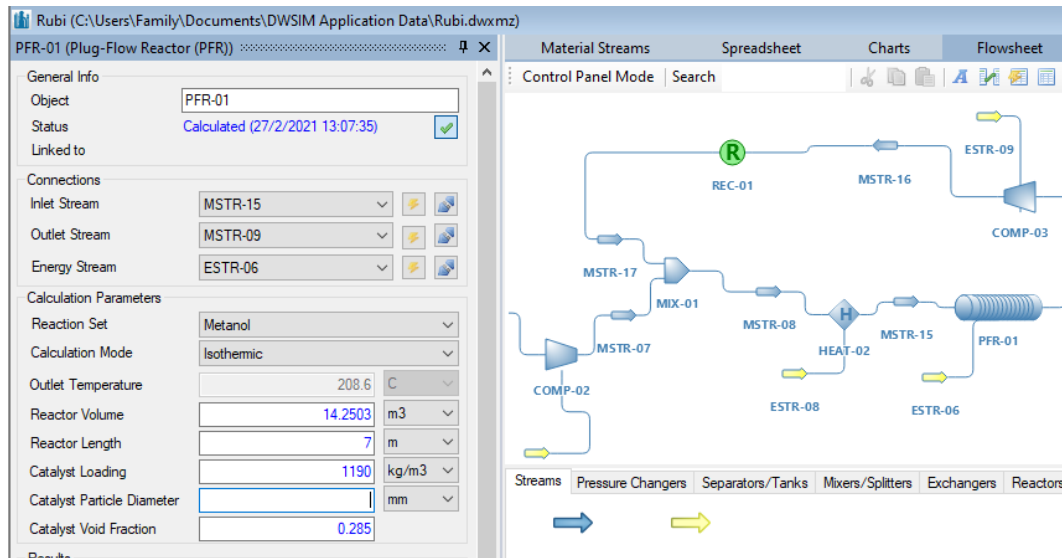
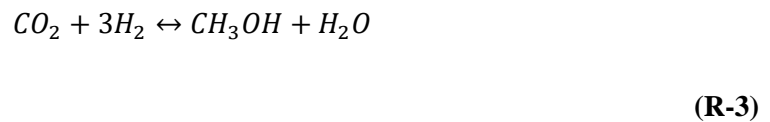


Figura 9-3: Configuración de un reactor de lecho empacado en DWSIM

Realizado por: Basantes Rubí 2021

Dentro del reactor de síntesis de metanol ocurre la hidrogenación del dióxido de carbono, así como la reacción de desplazamiento de agua inverso en forma paralela. Estas reacciones se muestran en las reacciones R-3 y R-4, y el modelo cinético empleado fue el descrito por Bussche y Froment (1996), sin embargo para su fácil implementación en DWSIM se utilizó la forma modificada por Van-dal y Bouallou (2013) en su forma exponencial. El modelo cinético se explica en las ecuaciones 1-3, 2-3 y 3-3, mientras que sus parámetros cinéticos se muestran en la tabla 3-3.



Modelo cinético:

- R-3

$$r_{CH_3OH} = \frac{k_1 P_{CO_2} P_{H_2} - k_6 * \frac{P_{H_2O} * P_{CH_3OH}}{P_{H_2}^2}}{\left(1 + k_2 * \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2}} + k_3 * P_{H_2}^{0.5} + k_4 * P_{H_2O}\right)^3}$$

(Ec.1-3)

- R-4

$$r_{CH_3OH} = \frac{k_5 P_{CO_2} - k_7 * \frac{P_{H_2O} * P_{CO_2}}{P_{H_2}}}{1 + k_2 * \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2}} + k_3 * P_{H_2}^{0.5} + k_4 * P_{H_2O}}$$

(Ec.2-3)

- Constantes cinéticas

$$\ln k_i = A_i + \frac{B_i}{T}$$

(Ec.3-3)

Tabla 3-3: Parámetros cinéticos del modelo de producción de metanol

K ₁	A ₁	-29.87
	B ₁	4 811.2
K ₂	A ₂	8.147
	B ₂	0

K ₃	A ₃	-6.452
	B ₃	2 068.4
K ₄	A ₄	-34.95
	B ₄	14 928.9
K ₅	A ₅	4.804
	B ₅	-11 797.5
K ₆	A ₆	17.55
	B ₆	-2 249.8
K ₇	A ₇	0.1310
	B ₇	-7 023.5

Fuente: Van-dal y Bouallou (2013)

Para insertar las ecuaciones se selecciona modelo heterogéneo y se marca los componentes involucrados en a la reacción. En esta ocasión adicional a los parámetros discutidos en la sección del reformador es necesario añadir la expresión del numerado y denominador, aquí se ingresan los valores siguiendo las ecuaciones 1-3, 2-3 y 3-3. Esto se muestra en la figura 10-3.

Components and stoichiometry

Name	Molar Weight	ΔHf (kJ/kg)	Include	BC	SC
Carbon dioxide	44.0095	-8941.48	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	-1
Carbon monoxide	28.0101	-3946.08	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0
Hydrogen	2.01588	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-3
Water	18.0153	-13422.7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1
Methane	16.0425	-4645.17	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0

Stoichiometry Heat of Reaction (kJ/kmol_BC) -49244

Equation Base Component

Heterogeneous Kinetic Reaction Parameters

Basis Phase Tmin (K) Tmax (K)

Kinetics Specification Simple Advanced

Reaction Rate (Base Component) = Numerator / Denominator

Numerator

Denominator

Expression Variables: Temperature (T) in K, reactant amounts (R1, R2, ..., Rn) and product amounts (P1, P2, ..., Pn) in the selected amount unit, reaction rate (r) in the selected velocity unit.

Amount Unit Velocity Unit

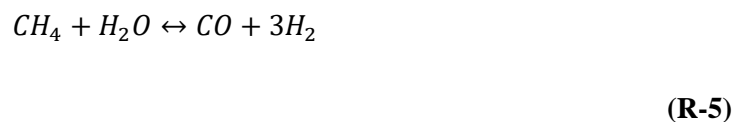
Figura 10-3: Configuración de reacción heterogénea

Realizado por: Basantes Rubí 2021

3.3.2 Planta industrial

Para el modelamiento del esquema mostrado en la figura 3-3, se utilizó el modelo termodinámico de Peng-Robinson. Tal como en el esquema de la sección 3.3.1 los calentadores y enfriadores simples fueron simulados utilizando el método corto de diseño y configurando cada uno para que la corriente de salida salga a las especificaciones de acuerdo a cada esquema. Los compresores se configuran de manera similar a los de la sección 3.3.1, pero cada uno cuenta con un interenfriamiento (enfriador simple) de tal forma que se reduce su consumo energético.

El separador donde ocurre la separación entre el metano y el dióxido de carbono se modela mediante un separador de compuestos al cual se ajustó el porcentaje de recuperación para tener la tasa de separación mostrada por Ghosh et al. (2019). El reactor de reformado con vapor de agua de metano se modela como un reactor en equilibrio que opera a las condiciones especificadas en la tabla 2-3. En el interior del reactor ocurre el reformado húmedo de metano y en paralelo la reacción de desplazamiento de vapor de agua, estas reacciones se muestran en las reacciones R-5 y R-6 respectivamente.



Los generadores de vapor de agua se modelaron como intercambiadores de calor de tubo y coraza. En este trabajo se utilizó el modelo de “cálculo de temperatura de la corriente caliente de salida”, en este se especifica la caída de presión de cada corriente, así como la temperatura de salida del flujo frío, temperatura conocida, de tal forma que DWSIM calcula el área y el coeficiente de calor necesario para resolver el modelo. Esto se muestra en la figura 11-3.

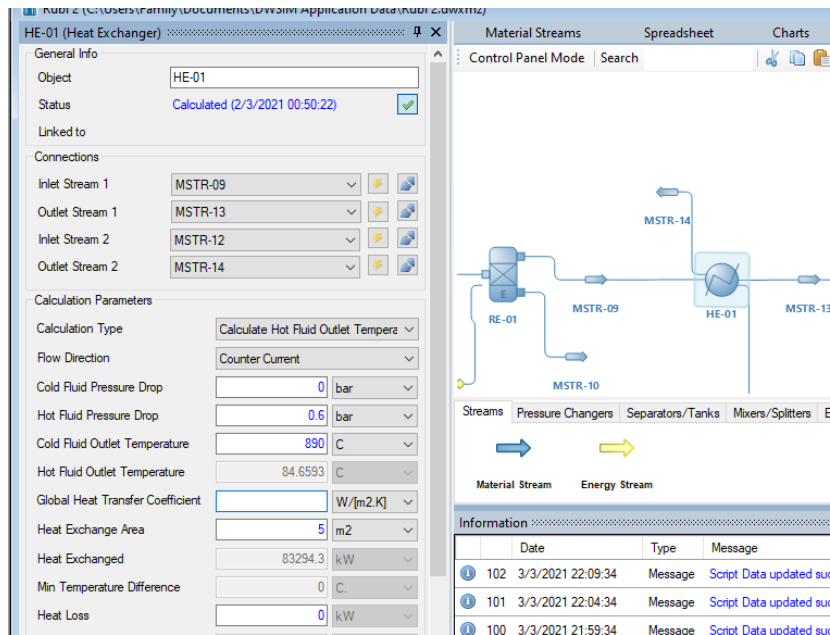


Figura 11-3: Configuración de un intercambiador de calor

Realizado por: Basantes Rubí 2021

El reactor de síntesis de metanol fue modelado como un reactor de lecho empacado que opera a la temperatura de salida especificada en la tabla 2-3. Se asume que el catalizador empleado tiene una fracción hueca de 0.5, la carga de este fue de 1775 kg/m^3 . Debido a que el autor no especifica el volumen del reactor es necesario ajustar este para obtener los resultados que presenta Ghosh et al. (2019). En este reactor ocurren las reacciones de síntesis de metanol y desplazamiento inverso de vapor de agua expresadas en R-3 y R-4, junto con el modelo cinético descrito en la sección 3.3.1.

Como sistema de descompresión se utilizaron válvulas de expansión configurando el modo de salida para definir la presión de la corriente de salida de estas. Este valor fue ajustado para necesidad según lo especifique el esquema, esto se observa en la figura 12-3.

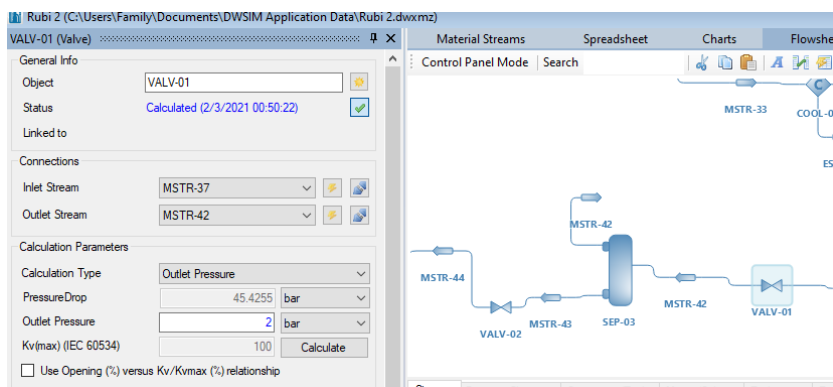


Figura 12-3: Configuración de válvula de expansión

Realizado por: Basantes Rubí 2021

Para la construcción de la columna de destilación se empleó el módulo CHEM SEP, dentro de este módulo es necesario definir nuevamente un modelo terminacho. El modelo termodinámico fue EOS de Peng Robinson 76, tal como se muestra en la figura 13-3. La columna emplea un condensador parcial de vapor. El condensador opera una presión de 1 bar con una relación de reflujo de 2 mientras que el boiler opera a 1.4 bar. La columna se diseñó de tal forma que se tenga un porcentaje inferior a 0.1% de agua en la corriente de destilado. Para el diseño de la columna se especificó el calor removido en el condensador y añadido en el boiler, estos valores fueron obtenidos del método corto de diseño. Para finalizar esta columna contenía 42 platos donde la alimentación ingresa en el número 27.

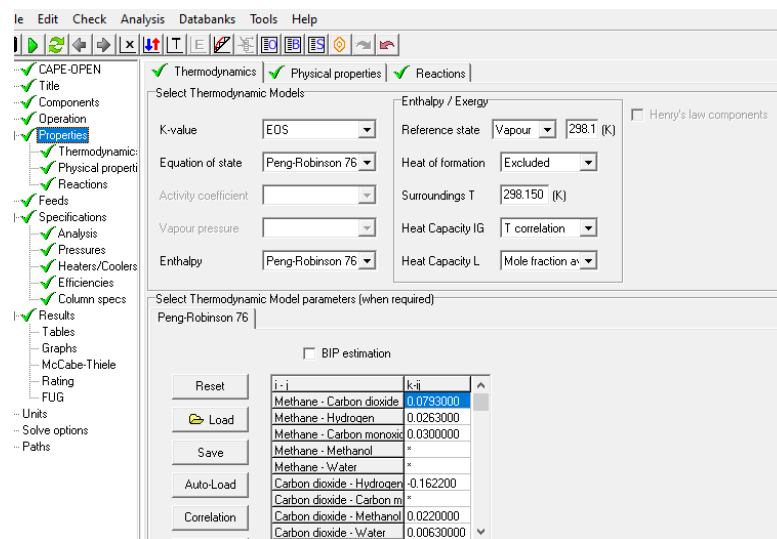


Figura 13-3: Configuración del modelo termodinámico del módulo CHEM SEP

Realizado por: Basantes Rubí 2021

Para el proceso que involucra el uso de un segundo reactor se configuro los equipos de la misma manera que se mostró en esta sección. Para el acoplamiento del segundo reactor se utilizó un reactor de características similares al utilizado en el primer esquema de producción, se debe tener en cuenta que en este esquema la corriente de recirculación es la fase gaseosa que sale del segundo separador de alta presión colocado a continuación del segundo reactor. Los esquemas obtenidos se muestran en las figuras 14-3, 15-3 y 16-3.

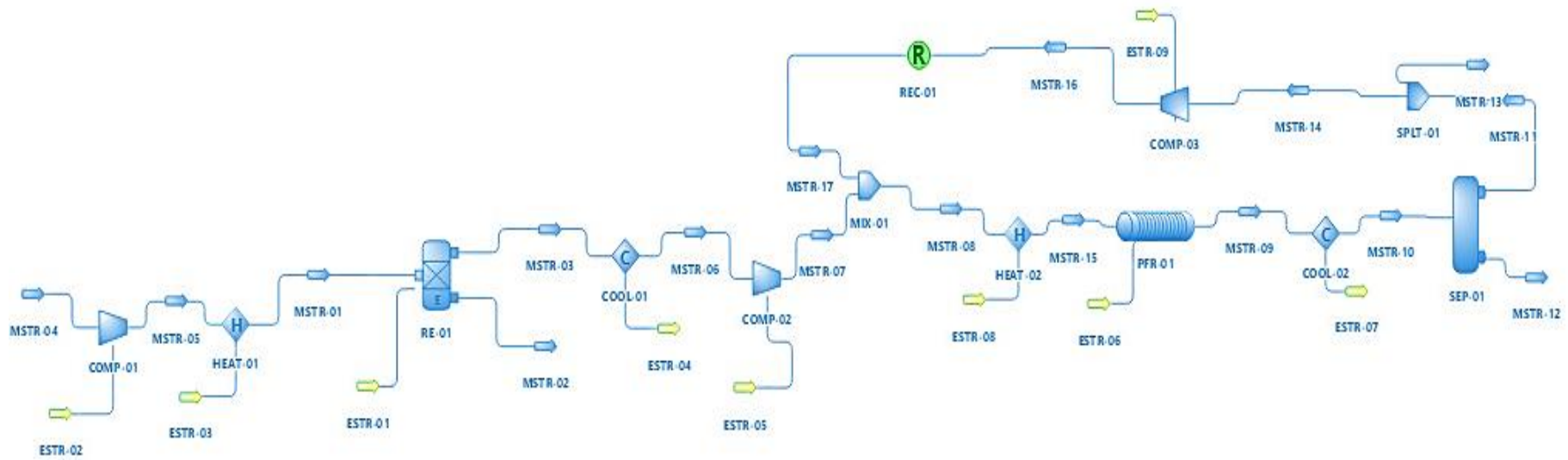


Figura 14-3: Esquema de plana piloto

Realizado por: Basantes Rubí 202

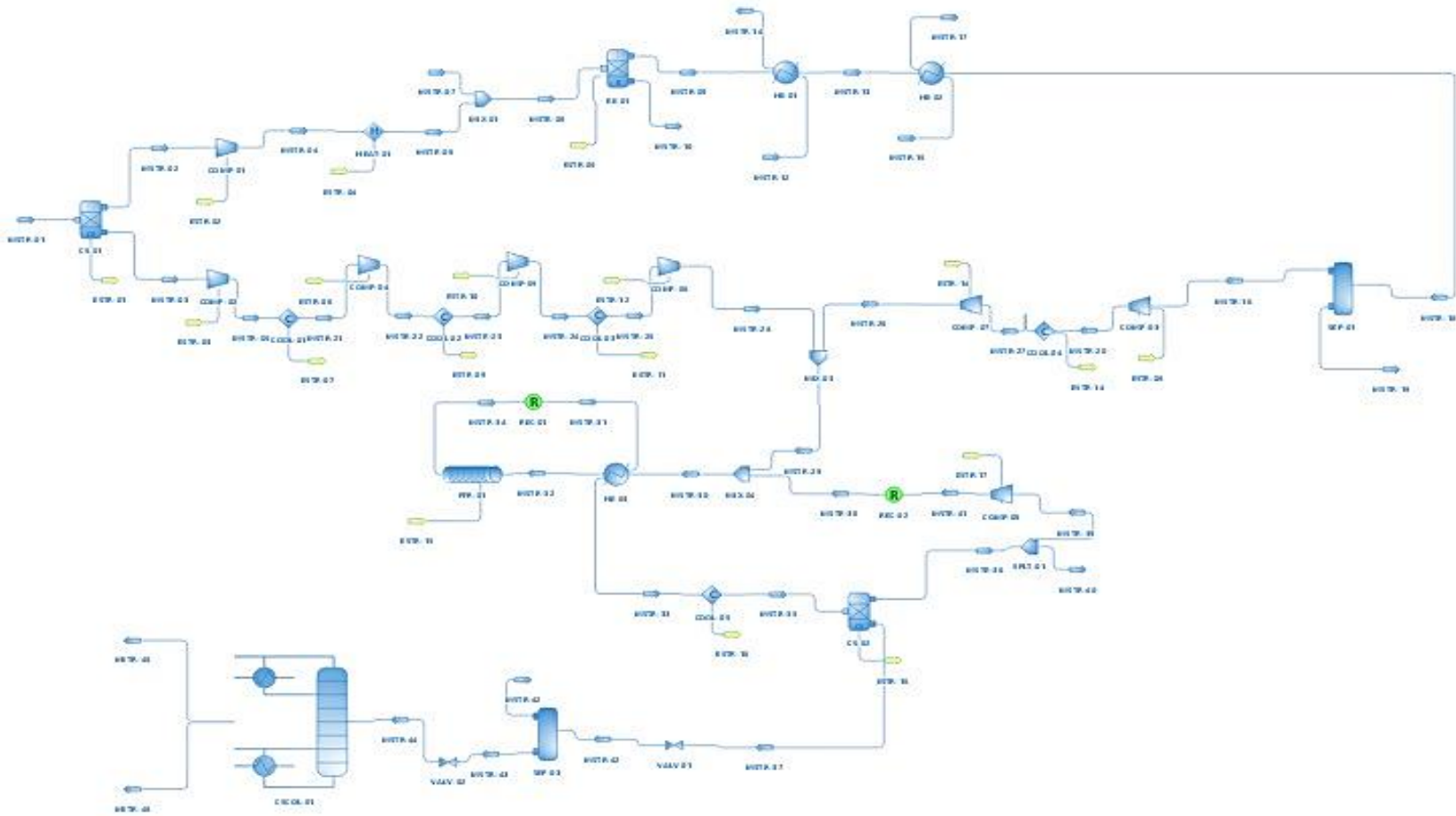


Figura 15-3: Esquema de planta industrial

Realizado por: Basantes Rubí 2021

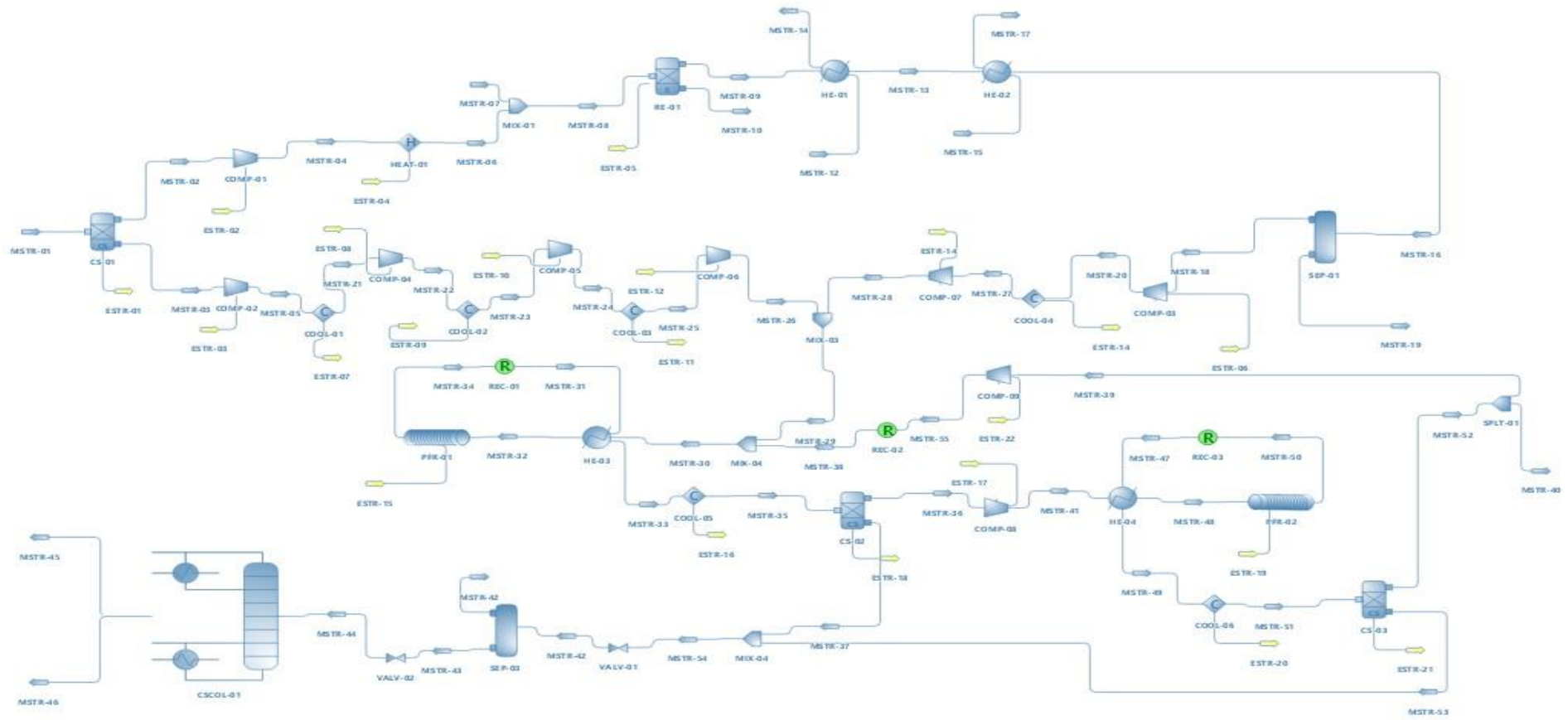


Figura 16-3: Esquema de planta industrial con dos reactores

Realizado por: Basantes Rubí 2021

3.4 Validación de resultados

Los resultados arrojados por los esquemas desarrollados en DWSIM, como lo son el flujo de metanol y porcentaje de conversión de carbón se compararán con el valor reportado por Ghosh et al. (2019) y Santos, Santos y Prata (2018). Para evaluar el porcentaje de error en los resultados obtenidos con los valores de las respectivas simulaciones se empleará la ecuación 4-3, la cual evalúa el porcentaje en que varían los datos obtenidos.

$$\%e = \frac{Vr - Vs}{Vr} * 100$$

(Ec.4-3)

Donde:

%e = porcentaje de error

Vr= Valor reportado por cada autor para la propiedad evaluada

Vs= Valor obtenido por la simulación en DWSIM.

3.5 Corridas de sensibilidad

Para el análisis de sensibilidad se utilizará la herramienta de DWSIM, optimizador análisis de sensibilidad. Para iniciar un caso de sensibilidad se debe seleccionar las variables independientes y seleccionar las variables de estudio. Posteriormente el panel de análisis arrojará la opción de iniciar el análisis de sensibilidad. Una vez concluido las corridas es posible pasar los datos a una hoja de cálculo para su análisis o utilizar el graficador incluido de DWSIM, sin embargo, para este trabajo estos datos fueron exportados a Excel para su posterior análisis.

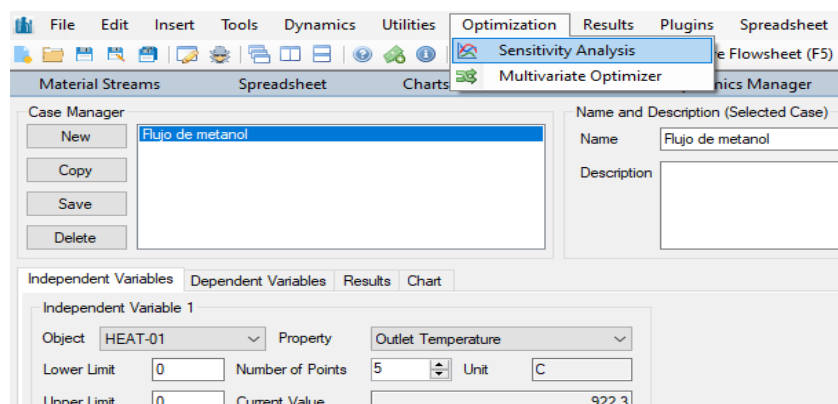


Figura 17-3: Configuración de análisis de sensibilidad DWSIM

Realizado por: Basantes Rubí 2021

Dado que el esquema presentado por Ghosh et al.(2019) y Santos, Santos y Prata (2018), en esencia comprenden el mismo proceso, se optó por desarrollar el análisis de sensibilidad en el esquema presentado por Santos, Santos y Prata (2018). Para el estudio de sensibilidad se escogió como variable dependiente el flujo molar de metanol obtenido a la salida del proceso completo, y como variables independientes la relación metano a dióxido de carbono, la temperatura de reformado, temperatura de operación del reactor de síntesis de metanol y la presión en la sección de separación.

3.6 Análisis de resultados

Para el análisis del desempeño de los esquemas propuestos se evaluó el porcentaje de fuentes de carbón que se transforma a metanol mediante la ecuación 5-3. Por otra parte, se evaluó el flujo de metanol producido a la salida del esquema por cada kmol de biogás alimentado utilizando la ecuación 6-3.

$$\%C = \frac{F_{metanol}}{F_{CO2} + F_{CH4} + F_{CO}} * 100$$

(Ec.5-3)

$$F_{m/b} = \frac{F_{metanol}}{F_{biogas\ alimentado}}$$

(Ec.6-3)

CAPITULO IV

4. GESTIÓN DEL PROYECTO

4.1 Cronograma

Tabla 1-4: Cronograma del proyecto

Actividad	Tiempo															
	Mes 1				Mes 2				Mes 3				Mes 4			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Recolección bibliográfica de esquemas de producción																
Recolección bibliográfica básica																
Desarrollo y simulación de los esquemas de producción																
Validación de resultados																
Realización de los análisis de sensibilidad																
Tabulación e interpretación de datos																
Redacción del trabajo final																

Realizado por: Basantes Rubí 2021

4.2 Recursos y materiales: Humanos, Equipos y Financiamiento

4.2.1 Presupuesto del proyecto

Tabla 2-4: Presupuesto del proyecto

PRESUPUESTO			
ACTIVIDAD	MONTO	FUENTE DE FINANCIAMIENTO	
		INTERNA	EXTERNA
Curso DWSIM	\$200	X	
Papel de impresión	\$20	X	
Copias e Impresiones	\$100	X	
Empastados	\$60	X	
Imprevistos	\$20	X	
TOTAL	\$400		

Realizado por: Basantes Rubí 2021

4.2.2 Talento humano

Tabla 3-4: Talento humano para el desarrollo del proyecto

Nombre	Función que Desempeña
Rubí Basantes	Autora del Proyecto
Hannibal Brito	Tutor Académico del Proyecto
Cesar Puente	Colaborador Académico del Proyecto

Realizado por: Basantes Rubí 2021

4.2.3 Recursos Materiales

Tabla 4-4: Recursos materiales para el proyecto

Materiales Necesarios en el Proyecto	Cantidad
Computador	1

Resma de Papel	2
Impresora	1
Cartón Para Empastar	3

Realizado por: Basantes Rubí 2021

4.3. Resultados y Discusión

4.3.1 Validación de los resultados

4.3.1.1 Validación planta piloto

Tabla 5-4: Validación de resultados de planta piloto

Biogás Relación CH ₄ /CO ₂	flujo de metanol		% error
	Simulado (kg/h)	Santos, Santos y Prata (kg/h)	
0.95	46195	44600	3.576

Realizado por: Basantes Rubí 2021

Santos, Santos y Prata (2018), reportan como resultado únicamente el flujo de metanol en kg/h de la planta propuesta, por lo que este fue utilizado para validar el resultado de la planta de piloto de producción de metanol. Como se observa en la tabla 5-4 el flujo obtenido en el presente trabajo es de 46195 kg/h contra 44600 kg/h reportado por Santos, Santos y Prata (2018). Esta diferencia de resultados puede deberse al hecho de que Santos, Santos y Prata (2018), realiza una simulación numérica y emplea específicas condiciones iniciales para resolver el sistema de ecuaciones formada por los balances de materia., mientras que DWSIM emplea como valores iniciales el valor obtenido en la simulación anterior, esto afecta los resultados especialmente en cálculos que involucran recirculación debido a que el simulador realiza un cálculo de prueba y error utilizando como condiciones iniciales los resultados de la anterior prueba. El porcentaje de error asociado al flujo es de 3.576% lo que para trabajos de simulación es una variación aceptable de resultados, por lo que el flujo de metanol obtenido se encuentra validado con la referencia bibliográfica.

4.3.1.2 Validación planta industrial

Tabla 6-4: Comparación de corriente de metanol planta industrial

Parámetro	Simulado	Ghosh et al	% error
Metano (fm)	9.15E-06	0	0
Dióxido (fm)	0.00939942	0.007	34.277
Hidrogeno(fm)	3.21E-05	0	0
Monóxido(fm)	8.06E-07	0	0
Metanol (fm)	0.98995852	0.992	-0.21
Agua(fm)	1.73E-08	1.00E-03	-99.99
Flujo (kmol/s)	6.78E-01	0.689	-1.59
Flujo de metanol (kmol/s)	6.71E-01	0.683488	-1.799

Realizado por: Basantes Rubí 2021

Ghosh et al.(2019), reporta como resultados el flujo de destilado de la torre. Para las fracciones molares de metano, hidrogeno y monóxido de carbono, matemáticamente el error no se puede calcular ya que involucra el cero como denominador. Sin embargo, como se observa sus valores son del orden de 10^{-5} por lo que prácticamente son cero y corresponden los valores reportados con Ghosh et al.(2019). Los valores para el agua y monóxido de carbono son extremadamente altos, esto puede deberse a que Ghosh et al.(2019), especifica que en su estudio fue necesario aplicar dos tipos de especificaciones de diseño para lograr los valores reportados. Sin embargo, no reporta los parámetros bajo los que se llevó a cabo esta especificación de diseño (variable manipulada).

Dado que de DWSIM requiere del uso de una ecuación matemática para realizar especificaciones de diseño no fue posible implementar esta. Sin embargo, se modificó la torre de destilación para lograr la especificación de que en el destilado la fracción molar de agua sea 0.001.

Tabla 7-4: Validación de planta industrial

Parámetro	Simulado	Ghosh et al	% error
Metano (fm)	1.49379E-05	0	0
Dióxido (fm)	0.006871466	0.007	-1.8362
Hidrogeno(fm)	5.34228E-05	0	0
Monóxido(fm)	1.32535E-06	0	0
Metanol (fm)	0.99205885	0.992	0.00593
Agua(fm)	0.001	0.001	0
Flujo (kmol/s)	0.695611	0.689	0.9595
Flujo de metanol (kmol/s)	0.6875	0.6834	0.9695

Realizado por: Basantes Rubí 2021

Como se observa en la tabla 7-4, se puede observar que los errores no superan el 1% salvo para el dióxido de carbono. Este último valor puede deberse a que solo se ajustó el valor para el flujo de destilado dando importancia a las fracciones de agua y metanol en el destilado, sin considerar la corriente de fondos. Es decir no se realizó los dos ajustes especificados por Ghosh et al.(2019). Sin embargo, ya que en este trabajo de titulación se pretende comparar los flujos de metanol producidos por la planta de producción se da prioridad al flujo de metanol obtenido, por lo que se considera que la planta se encuentra validada en base a este parámetro.

4.3.1.3 Validación de esquema industrial con dos reactores

Tal como ocurre en el primer esquema industrial es necesario realizar un ajuste en la sección de separación para lograr resultados satisfactorios a los reportados por Ghosh et al.(2019). Los valores arrojados por DWSIM se muestran en la tabla 8-4, donde además puede verse el error obtenido respecto a los resultados reportados por Ghosh et al.(2019). Tal como puede observarse los resultados arrojados son bastante cercanos a los datos comparación, así como ocurre con el primer esquema el error asociado con la fracción de hidrogeno, monóxido de carbono y metano no puede determinarse matemáticamente con la ecuación 4-3, sin embargo, los resultados son prácticamente cero por lo que no existe un error asociado con estos. El error asociado al dióxido

de carbono tiene su origen tal como se indicó en la sección 4.1.3.2 en que no se utilizó las dos especificaciones de diseño para las corrientes de la torre de destilado, a pesar de esto, ya que este trabajo se centra en el flujo de metanol se considera este error irrelevante.

Tabla 8-4: Validación para proceso industrial con dos reactores

Parámetro	Simulado	Ghosh et al	% error
Metano (fm)	8.84E-06	0	0
Dióxido (fm)	0.007462	0.007	6.6
Hidrogeno(fm)	3.88E-05	0	0
Monóxido(fm)	9.70E-07	0	0
Metanol (fm)	0.9914	0.992	-0.051788306
Agua(fm)	0.001	0.001	0
Flujo (kmol/s)	0.723	0.725	-0.275862069
Flujo de metanol (kmol/s)	0.7168	0.7192	-0.327507511

Realizado por: Basantes Rubí 2021

4.3.2 Análisis de sensibilidad

4.3.2.1 Efecto de la relación CH_4/CO_2

Para el estudio del efecto de la relación metano-dióxido de carbono se varió las fracciones molares de los respectivos compuestos mientras se mantuvo constante la fracción molar de hidrogeno en el biogás. Los resultados se muestran la tabla 9-4. Se puede observar como el incrementar la relación de metano a dióxido de carbono el flujo de metanol en la planta incrementa, este alcanza máximo local a 1.5 posteriormente se ve reducido. Esto se debe a que una mayor concentración de metano favorece la producción de gas de síntesis en la reacción de reformado, por otra parte, al pasar cierto umbral disminuir la concentración de CO_2 disminuye la producción de metanol ya que no existe la suficiente cantidad para completar el reformado seco de metano.

Tabla 9-4: Resultados influencia de la relación CH₄/CO₂

Relación CH ₄ /CO ₂	Flujo de metanol (kmol/s)
0.95	0.400497642
1.5	0.472369725
2	0.389244382
2.5	0.399805649
3	0.401779026

Realizado por: Basantes Rubí 2021

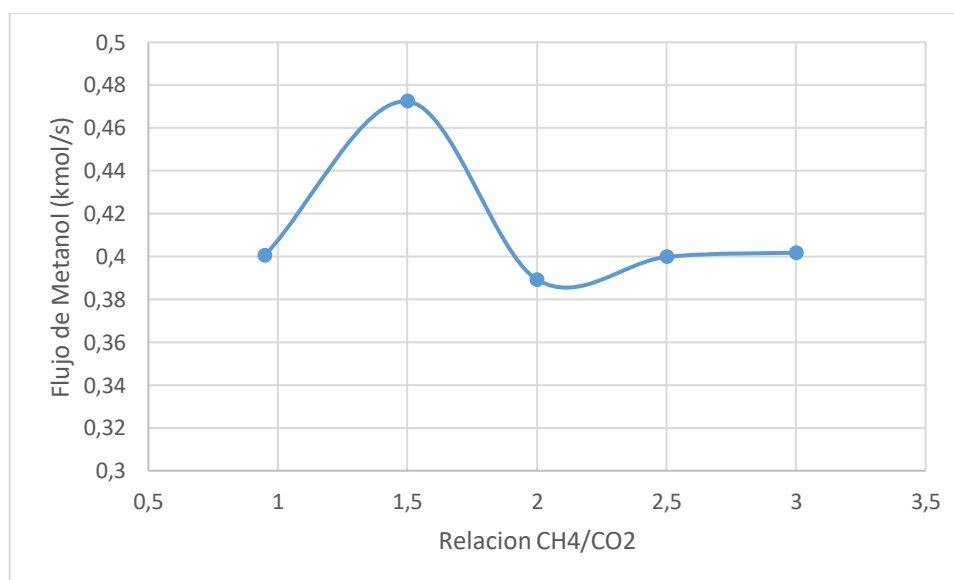


Gráfico 1-4: Resultados para el análisis de sensibilidad

Realizado por: Basantes Rubí 2021

4.2.3.2 Efecto de la presión de separación

Se realizó un análisis de sensibilidad para evaluar el efecto de la presión de separación a la que se obtiene el metanol crudo. Para poder manipular este valor se utilizó una válvula de expansión antes del tanque separador de fases. La válvula se configuro de tal forma que se puede definir su presión de salida. La temperatura de separación se mantuvo constante durante la corrida de sensibilidad. Los resultados se pueden observar en la tabla 10-4 y grafico 2-4. Donde se puede apreciar que a la temperatura de 28.7 °C el aumento en la presión de separación favorece a la producción de metanol. Esto muestra que al incrementar la presión se obtiene una mayor fracción

liquida de metanol en el producto separado, una disminución de esta puede provocar una mayor cantidad de flujo de metanol evaporado.

Tabla 10-4: Resultados para variación de presión de separación

Presión de separación (bar)	Flujo de metanol (kmol/s)
50	0.413848
56.25	0.4259
62.5	0.44066
68.75	0.457751
75	0.478037

Realizado por: Basantes Rubí 2021

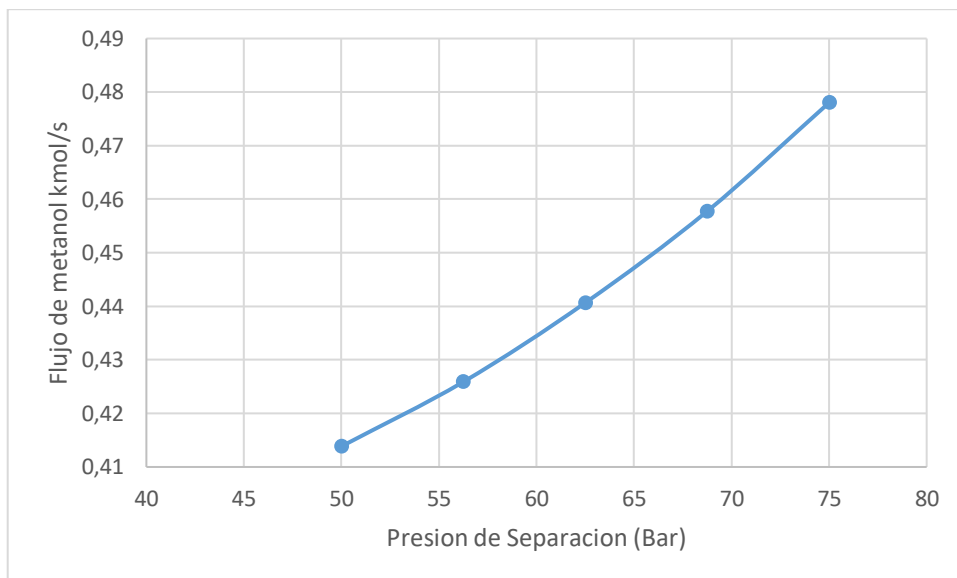


Gráfico 2-4: Resultados de variación de la presión de separación

Realizado por: Basantes Rubí 2021

4.2.3.3 Efecto de la temperatura del reformador

Para el estudio de la temperatura del reformador se analizó la temperatura entre el límite de 850-950 °C, los resultados se muestran en la tabla 11-4 Se puede observar que inicialmente al incrementar la temperatura del reformador incrementa la producción de metanol a la salida del proceso. Sin embargo, al incrementar la temperatura más allá de los 870 °C el flujo disminuye,

luego sufre un ligero incremento y tiende a estabilizarse tal como se muestra en el grafico 3-4. Esto puede ocurrir debido a que llegado a cierta temperatura el calor de reacción se vuelva constante y sea numéricamente inferior al valor del punto crítico.

Tabla 11-4: Influencia de la Temperatura de Reformado

Temperatura del reformador (°C)	Flujo de metanol (kmol/s)
850	0.446427
875	0.458166
900	0.400169
925	0.407477
950	0.417566

Realizado por: Basantes Rubí 2021

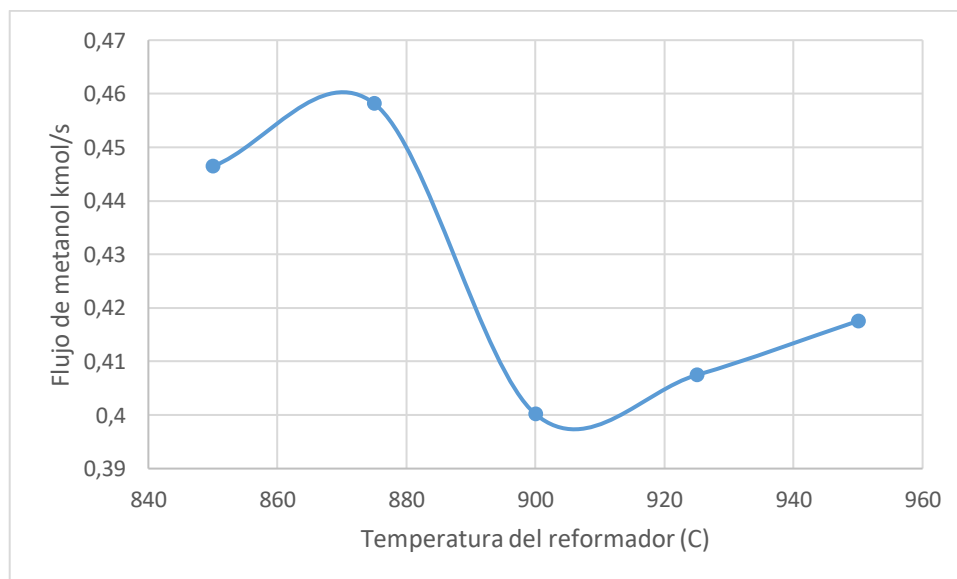


Grafico 3-4: Resultados de la variación de la temperatura del reformador

Realizado por: Basantes Rubí 2021

4.2.3.4 Influencia del porcentaje de recirculación respecto a la corriente de salida

Para el estudio del porcentaje de recirculación respecto a la corriente gaseosa de salida del proceso (corriente superior del separador). Para poder realizar este análisis se manipulo el separador 01 del esquema. De esta forma la fracción que no se recircula pasa a formar parte de la corriente de

purgado que sale del proceso, esta corriente al contener cierta cantidad de metanol y metano puede aún ser utilizada como combustible para generar electricidad o atender necesidades calóricas del proceso (Van-dal et al. 2013), sin embargo esta posibilidad no se estudió en el presente trabajo. En la tabla 12-4 se observa que el incrementar el porcentaje de recirculación aumenta de manera significativa el flujo de metanol a la salida del proceso, esto debido a que existe mayor disponibilidad de materia prima. Por otra parte, se puede observar que a partir del 80% de recirculación este incremento disminuye, mostrando una tendencia a estabilizarse.

Tabla 12-4: Influencia del porcentaje de recirculación

Porcentaje de recirculación (%)	Flujo de metanol (kmol/s)
90	0.377508
80	0.364833
70	0.286303
60	0.198021
50	0.167429

Realizado por: Basantes Rubí 2021

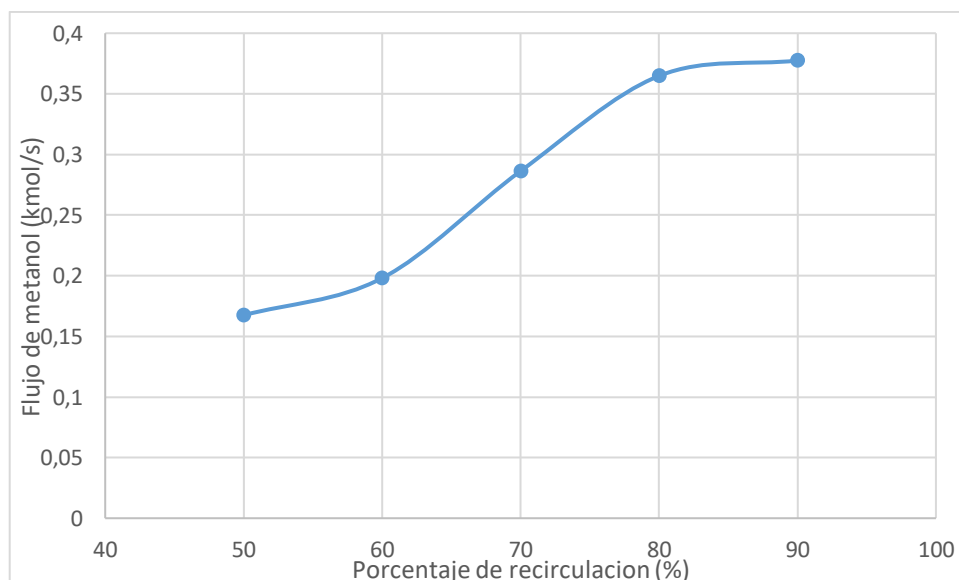


Gráfico 4-4: Resultados de la variación del porcentaje de recirculación

Realizado por: Basantes Rubí 2021

4.2.3.4 Influencia del flujo de entrada

Se evaluó la influencia del aumento del flujo molar de biogás a la entrada del proceso variando la corriente MSTR-04. Tal como se observa en la tabla 13-4, el incremento del flujo de entrada de biogás produce un aumento en la producción de metanol, esto debido a la mayor disponibilidad de materia prima para realizar el proceso en general. El grafico 5-3 muestra un mínimo en la producción de metanol a un flujo de 0.55 kmol/s, a partir de este valor el flujo de metanol tiende a crecer con el aumento de la tasa de alimentación.

Tabla 13-4: Influencia del flujo de alimentación

Porcentaje de recirculación (%)	Flujo de metanol (kmol/s)
0.1	0.453541
0.325	0.428859
0.55	0.418149
0.775	0.490073
1	0.588749

Realizado por: Basantes Rubí 2021

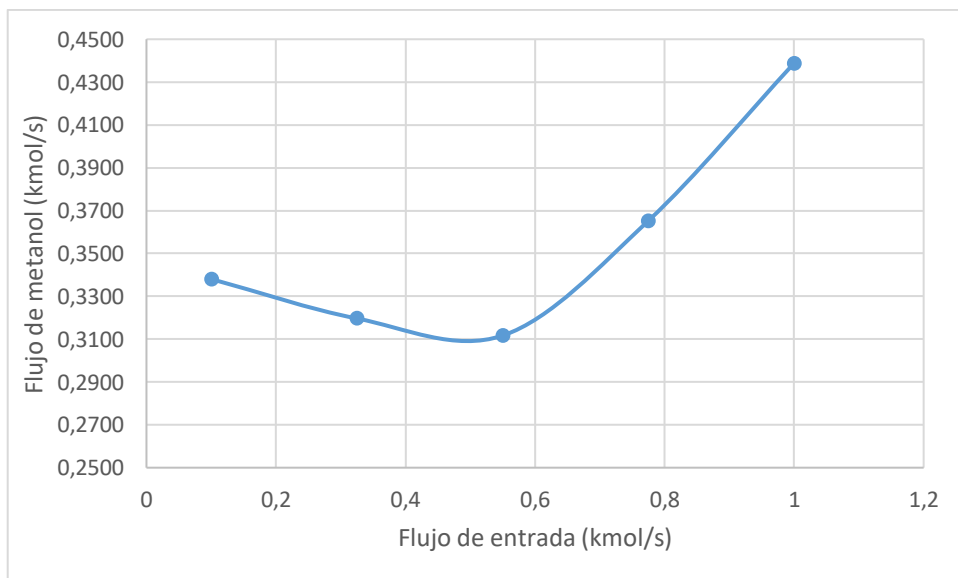


Gráfico 5-3: Resultados de la variación del flujo de alimentación

Realizado por: Basantes Rubí 2021

4.3.3 Comparación de desempeño de los esquemas

Las conversiones de las fuentes de carbón a metanol para ambos esquemas se muestran en la tabla 14-4. Las conversiones son calculadas en base a los flujos molares que es capaz de procesar cada planta de producción. Para la planta industrial el incremento de la producción de metanol es del 57.75 % con respecto a la planta piloto. Por otra parte, la conversión se incrementa en 11. 71%. Cabe mencionar que las conversiones mostradas hacen referencia a todo el esquema en general ya que la conversión por paso en cada reactor es de 3.4% y 4 % para cada esquema respectivamente.

El proceso industrial muestra una producción superior de metanol de entre los tres esquemas, el incremento de producción es del 76.7% con respecto al esquema piloto y del 13.597% respecto al proceso industrial con un único reactor, cabe mencionar que la conversión individual por paso en cada reactor es del 4% tal como ocurre en el esquema simple.

Tabla 14-4: Conversión y producción obtenidos para esquemas

Esquema	% conversión a metanol	Producción kmol metanol/ kmol biogás
Piloto	51.34	0.400
Industrial	63.05	0.631
Industrial dos reactores	67.31	0.7168

Realizado por: Basantes Rubí 2021

Las necesidades energéticas de los esquemas se reflejan en la tabla 15-4. Se puede observar que el esquema industrial a pesar de operar con un mayor número de equipos requiere casi la misma energía mecánica para procesar la misma cantidad de materia. Esto ocurre por el uso del interenfriamiento en las primeras etapas de compresión de la materia prima, por otra parte, en el esquema que usa dos reactores se incrementa el uso de energía mecánica debido al uso de un compresor extra usado para elevar la presión de la alimentación al segundo reactor.

La energía requerida para operaciones de calentamiento es superior para el esquema piloto, fruto de que la tratarse de un esquema sencillo este no aprovecha ninguna corriente caliente para recuperar calor dentro del mismo. Las necesidades de enfriamiento se traducen en un consumo de agua de enfriamiento para los procesos, en el caso de los esquemas industriales este valor es inferior al esquema piloto a pesar del uso del interenfriamiento en las etapas de compresión y la energía requerida para la condensación en la torre de destilación. En el esquema que usa dos

reactores la necesidad de enfriamiento se ve incrementada debido al uso de un condensador extra, así como al uso propio de otro reactor, sin embargo, esto abre la posibilidad de una mayor producción de agua a para suplir necesidades de calentamiento y eléctricas dentro del proceso.

Al evaluar cada equipo de forma individual se pudo observar que los reactores son los que requieren un mayor uso de energía, el reactor de reformado eleva las necesidades de calentamiento debido a la naturaleza endotérmica de las reacciones que se llevan a cabo en él. Los reactores de síntesis de metanol elevan la necesidad de enfriamiento ya que operan de manera isotérmica.

Tabla 15-4: Necesidades energéticas para los esquemas de producción

Esquema	Energía mecánica (kw/kmol)	Calentamiento (kw/kmol)	Enfriamiento (kw/kmol)
Piloto	36 822.14	368 905.1	389 982.9
Industrial	28 553.25	179 208.3	150 456.69
Industrial con dos reactores	33 335.17	179 208.3	187 985.59

Realizado por: Basantes Rubí 2021

El grado de pureza obtenido como producto de las plantas de producción de metanol se muestran en la tabla 16-4. Aquí puede observarse como las plantas a nivel industrial obtienen un metanol con mayor grado de pureza, pudiendo este ser comercializado como un metanol para uso especializado como el utilizado para la elaboración de semiconductores, lo que se traduce en un producto de alto valor de venta. Por otra parte, el metanol producido por la planta piloto contiene la pureza que se esperaría de una planta artesanal, este podría ser destinado como combustible o como aditivo para mezclas anticongelantes.

Tabla 16-4: Pureza de metanol Obtenido

Esquema	% Pureza de metanol(m/m)
Piloto	84.6
Industrial	99.98
Industrial dos reactores	99.91

Realizado por: Basantes Rubí 202

5 CONCLUSIONES

- Se simuló el proceso de obtención de metanol a partir de biogás mediante la hidrogenación directa del gas de síntesis, utilizando dos esquemas distintos de producción, uno piloto y otro industrial.
- En base a bibliografía especializada se determinó los parámetros de presión, temperatura y flujo de alimentación a los que operaba cada esquema para poder realizar la simulación y posterior comparación de estos.
- Mediante un análisis en cuanto a conversión, flujo y pureza del metanol obtenido en cada esquema se demuestra que el esquema de grado industrial con dos reactores muestra un desempeño mejor en el desarrollo del proceso.
- En base a bibliografía y mediante el análisis de sensibilidad se verificó que los parámetros: relación metano a dióxido de carbono, temperatura del reformador, porcentaje de recirculación y flujo de alimentación, tienen mayor impacto en la producción de metanol debido a que presentan valores críticos en la producción de metanol.

6 RECOMENDACIONES

- Emplear otro tipo de reactor como puede ser el reactor adiabático para verificar su impacto en el consumo de energía
- Realizar un análisis Pinch de energía y determinar si en ambos esquemas es posible reducir aún más las necesidades de calentamiento mediante el uso de las corrientes propias del proceso.
- Plantear un esquema de producción de energía a partir de las corrientes de residuo que se extraen de los procesos de producción

GLOSARIO

PFR: Reactor flujo pistón

T: Temperatura

P: Presión

$\text{Kg}(\text{catalizador})/\text{m}^3$: Carga de catalizador al reactor en kilogramos por metro cubico

D (catalizador): Diámetro de partícula del catalizador

E: fracción hueca del catalizador

Kg/h = Flujo másico en kilogramos por hora

Kmol/s = Flujo molar en kilomol componente por cada segundo

%C: Porcentaje de conversión

$F_{\text{m/b}}$: Flujo de metanol por kmol de biogás

A_i : Factor preexponencial de la ecuación cinética

B_i : Energía de activación de la reacción química (dividida entre la constante de gases)

F_m : Fracción molar del componente

Kw : Potencia en kilowatts

m/m : Relación masa a masa

BIBLIOGRAFÍA

- ABATZOGLOU, N. et al., 2009. *A review of biogas purification processes* [en línea]. 1 enero 2009. S.l.: John Wiley & Sons, Ltd. [Consulta: 5 diciembre 2020]. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/bbb.117>.
- ARCE, J., 2011. *Diseño de un biodigestor para generar biogás y abono a partir de desechos orgánicos de animales aplicable en las zonas agrícolas del litoral* [en línea]. S.l.: Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil. Disponible en: <https://www.mendeley.com/viewer/?fileId=530b4e71-f309-2d61-3992-448d5e8d05e2&documentId=4066cb30-ad10-3194-b662-c9cb47779cdb>.
- AUGELLETTI, R. et al., 2020. Biogas upgrading through CO₂ removal by chemical absorption in an amine organic solution: Physical and technical assessment, simulation and experimental validation. *Biomass and Bioenergy* [en línea], vol. 141, no. August, pp. 105729. ISSN 18732909. DOI 10.1016/j.biombioe.2020.105729. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105729>.
- BAENA-MORENO, F.M. et al., 2020. Bio-methane and bio-methanol co-production from biogas: A profitability analysis to explore new sustainable chemical processes. *Journal of Cleaner Production* [en línea], vol. 265, pp. 121909. [Consulta: 15 enero 2021]. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2020.121909. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652620319569>.
- BIODISOL, 2010. Digestión anaerobia. Proceso de producción de biogás. [en línea]. [Consulta: 5 diciembre 2020]. Disponible en: <https://www.biodisol.com/que-es-el-biogas-digestion-anaerobia-caracteristicas-y-usos-del-biogas/digestion-anaerobia-proceso-de-produccion-de-biogas-biocombustibles-energias-renovables/>.
- BUSSCHE, K.M. Vanden et al., 1996. A Steady-State Kinetic Model for Methanol Synthesis and the Water Gas Shift Reaction on a Commercial Cu / ZnO / Al₂O₃ Catalyst. *Journal OF Catalysis*, vol. 10, no. 0156, pp. 1-10.
- BUSTO ROJAS, N. et al., 2014. *Metanol como alternativa para la generacion de combustibles limpios*. S.l.: Instituto Politecnico Nacional.
- CARLINI, M. et al., 2015. Biogas production from poultry manure and cheese whey wastewater under mesophilic conditions in batch reactor. *Energy Procedia*. S.l.: Elsevier Ltd, pp. 811-818. DOI 10.1016/j.egypro.2015.11.817.
- CARLINI, M. et al., 2020. Simulation of anaerobic digestion processes: Validation of a novel software tool ADM1-based with AQUASIM. *Energy Reports* [en línea], vol. 6, pp. 102-115. DOI 10.1016/j.egy.2020.08.030. Disponible en: www.sciencedirect.com.
- CHIRIBOGA NOVILLO, O., 2010. *Desarrollo del Proceso de Producción de Biogás y Fertilizante Orgánico a partir de Mezclas de Desechos de Procesadoras de Frutas* [en

línea]. S.l.: Universidad San Francisco de Quito. Disponible en: <http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/741/1/96311.pdf>.

CIEZA GUEVARA, T. et al., 2018. *Proyecto De Prefactibilidad De Producción De Metanol a Partir Del Gas Natural*. S.l.: Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

FU, S. et al., 2020. In situ biogas upgrading by CO₂-to-CH₄ bioconversion. *Trends in Biotechnology* [en línea], pp. 1-12. ISSN 18793096. DOI 10.1016/j.tibtech.2020.08.006. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2020.08.006>.

GHOSH, S. et al., 2019. Biogas to methanol: A comparison of conversion processes involving direct carbon dioxide hydrogenation and via reverse water gas shift reaction. *Journal of Cleaner Production* [en línea], vol. 217, pp. 615-626. [Consulta: 15 enero 2021]. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2019.01.171. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652619301908>.

IM-ORB, K. et al., 2020. Bio-methanol production from oil palm residues: A thermodynamic analysis. *Energy Conversion and Management* [en línea], vol. 226, no. July, pp. 113493. ISSN 01968904. DOI 10.1016/j.enconman.2020.113493. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113493>.

KHALID, A. et al., 2011. *The anaerobic digestion of solid organic waste*. 1 agosto 2011. S.l.: Pergamon.

LEONZIO, G. et al., 2019. Methanol production by CO₂ hydrogenation: Analysis and simulation of reactor performance. *International Journal of Hydrogen Energy* [en línea], vol. 44, no. 16, pp. 7915-7933. ISSN 0360-3199. DOI 10.1016/j.ijhydene.2019.02.056. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.02.056>.

MARTÍNEZ, R., 2019. *Simulación de la desulfuración de biogás por adsorción en un medio nanoparticulado de alta porosidad*. S.l.: CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS, S.C.

MUÑOZ, J. et al., 2011a. Simulación de la producción de hidrógeno y metanol a partir de la gasificación de cascarilla de arroz con vapor. *Año*, vol. 78.

MUÑOZ, J. et al., 2011b. Simulation of hydrogen and methanol production through rice husk steam gasification. *Dyna*, vol. 78, no. 165, pp. 122-131. ISSN 2346-2183.

NAVARRO PUYUELO, A. et al., 2017. Rutas y retos para la valorización de biogás. *AVANCES
Investigación en Ingeniería*, vol. 14, pp. 211. ISSN 1794-4953. DOI 10.18041/1794-4953/avances.1.1299.

NGUYEN, L.N. et al., 2020. Biomethane production from anaerobic co-digestion at wastewater treatment plants: A critical review on development and innovations in biogas upgrading techniques. *Science of the Total Environment* [en línea], pp. 142753. ISSN 18791026. DOI 10.1016/j.scitotenv.2020.142753. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142753>.

- OMAR, B. et al., 2019. Biogas upgrading and biochemical production from gas fermentation: Impact of microbial community and gas composition. *Bioresource Technology* [en línea], vol. 286, no. May, pp. 121413. ISSN 18732976. DOI 10.1016/j.biortech.2019.121413. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121413>.
- PATEL, S.K.S. et al., 2018. Methanol production from simulated biogas mixtures by co-immobilized *Methylomonas methanica* and *Methylocella tundrae*. *Bioresource Technology* [en línea], vol. 263, pp. 25-32. [Consulta: 15 enero 2021]. ISSN 18732976. DOI 10.1016/j.biortech.2018.04.096. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852418306199>.
- PATEL, S.K.S. et al., 2020. Methanol production by polymer-encapsulated methanotrophs from simulated biogas in the presence of methane vector. *Bioresource Technology* [en línea], vol. 304, pp. 123022. [Consulta: 15 enero 2021]. ISSN 18732976. DOI 10.1016/j.biortech.2020.123022. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852420302911>.
- PETERSSON, A. et al., 2009. Biogas upgrading technologies-developments and innovations Task 37-Energy from biogas and landfill gas. [en línea]. S.l.: [Consulta: 5 diciembre 2020]. Disponible en: www.iea-biogas.net.
- SANTOS, R.O. dos et al., 2018. Simulation and optimization of a methanol synthesis process from different biogas sources. *Journal of Cleaner Production* [en línea], vol. 186, pp. 821-830. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2018.03.108. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.108>.
- SORIA, R. et al., 2013. Biogás: Una Alternativa para la Expansión de Generación Eléctrica en El Ecuador. *Revista Técnica «Energía»*, vol. 9, no. 1, pp. 38-45. ISSN 1390-5074. DOI 10.37116/revistaenergia.v9.n1.2013.131.
- STÜRMER, B. et al., 2021. Agricultural biogas production: A regional comparison of technical parameters. *Renewable Energy* [en línea], vol. 164, pp. 171-182. [Consulta: 14 enero 2021]. ISSN 18790682. DOI 10.1016/j.renene.2020.09.074. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148120314993>.
- SUN, Q. et al., 2015. *Selection of appropriate biogas upgrading technology-a review of biogas cleaning, upgrading and utilisation*. 6 julio 2015. S.l.: Elsevier Ltd.
- TOLEDO-CERVANTES, A. et al., 2016. Photosynthetic biogas upgrading to bio-methane: Boosting nutrient recovery via biomass productivity control. *Algal Research* [en línea], vol. 17, pp. 46-52. ISSN 22119264. DOI 10.1016/j.algal.2016.04.017. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.algal.2016.04.017>.
- VAN-DAL, É.S. et al., 2013. Design and simulation of a methanol production plant from CO₂ hydrogenation. *Journal of Cleaner Production* [en línea], vol. 57, pp. 38-45. ISSN

0959-6526. DOI 10.1016/j.jclepro.2013.06.008. Disponible en:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.008>.

VARGAS, G., 2013. *Simulación de los efectos del transporte de masa con agitación en biorreactores para producir biogás*. S.l.: Universidad central del Ecuador.

VISTAZO, 2020. Ecuador avanza en el camino de la cultura del reciclaje | Vistazo. *Vistazo* [en línea]. [Consulta: 15 enero 2021]. Disponible en:
<https://www.vistazo.com/seccion/vida-moderna/ambiente/ecuador-avanza-en-el-camino-de-la-cultura-del-reciclaje>.

VITA, A. et al., 2018. Methanol synthesis from biogas: A thermodynamic analysis. *Renewable Energy* [en línea], vol. 118, pp. 673-684. [Consulta: 15 enero 2021]. ISSN 18790682. DOI 10.1016/j.renene.2017.11.029. Disponible en:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148117311230>.



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y
RECURSOS DEL APRENDIZAJE



UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y
BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 21 / 10 / 2021

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: <i>Rubí Maricela Basantes Herrera</i>
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: <i>Ciencias</i>
Carrera: <i>Ingeniería Química</i>
Título a optar: <i>Ingeniera Química</i>
f. Analista de Biblioteca responsable: <i>Lic. Luis Caminos Vargas Mgs.</i>

LUIS
ALBERTO
CAMINOS
VARGAS

Firmado digitalmente
por LUIS ALBERTO
CAMINOS VARGAS
DN: cn=LUIS ALBERTO
CAMINOS VARGAS o=EC
I=RIOBAMBA
Motivo: Soy el autor de
este documento
Ubicación:
Fecha: 2021-10-21
16:29:05:00



1235-DBRA-UTP-2021