

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

Implementación del método LCA en procesos de producción de metanol con gas natural y residuos de materia para la reducción de emisión de gases de invernadero

Yamanua Verónica Arcos Guamán

Ingeniería Química

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de Ingeniera Química

Quito, 15 de mayo del 2024

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

**Implementación del método LCA en procesos de producción de metanol
con gas natural y residuos de materia para la reducción de emisión de gases
de invernadero**

Yamanua Verónica Arcos Guamán

Nombre del profesor, Título académico

José Álvarez, PhD

Nombre del profesor, Título académico

Juan Diego Fonseca, PhD

Quito, 15 de mayo de 2024

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Yamanua Verónica Arcos Guamán

Código: 00208315

Cédula de identidad: 1718544040

Lugar y fecha: Quito, 15 de mayo de 2024

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

RESUMEN

El efecto invernadero es un fenómeno que el planeta está enfrentando en la actualidad, causado principalmente por la emisión de gases contaminantes en varios procesos industriales, entre ellos, la producción de metanol. Dentro del sector energético, el metanol se considera un producto indispensable; este puede participar incluso como subproducto para la elaboración de importantes precursores químicos como; formaldehídos, esterres y ácido acético. Por lo que, en el presente proyecto se propone la implementación del método LCA en el diseño de una de las dos plantas de producción de metanol con materias primas alternativas, siendo estas; residuos de madera (biomasa) y gas natural (combustible fósil). Se establece una producción de 678 kg/h en base a la demanda anual de metanol en el país. Mediante los resultados obtenidos, se opta por realizar una comparación de la eficiencia, factibilidad y rentabilidad de cada una de las plantas; de esta manera, por medio de una matriz de decisión, se determina el proceso que contribuya de mejor manera a la disminución gases de invernadero en la producción de metanol.

Palabras clave: metanol, residuos de madera, gas natural, LCA, gas de síntesis, efecto invernadero.

ABSTRACT

The greenhouse effect is a phenomenon that the planet is currently facing, caused by the emission of polluting gases in various industrial processes, including the production of methanol. Within the energy sector, methanol is considered an indispensable product; It can even participate as a by-product to produce important chemical precursors such as formaldehydes, esters, and acetic acid. Therefore, in this project the implementation of the LCA method is proposed in one of the designs of two methanol production plants with alternative raw materials, these being wood waste (biomass) and natural gas (fossil fuel). A production of 678 kg/h is established based on the annual demand for methanol in the country. Using the results obtained, it is decided to make a comparison of the efficiency, feasibility, and profitability of each of the plants; In this way, through a decision matrix, the process that best contributes to the reduction of greenhouse gases in methanol production is determined.

Key words: methanol, wood waste, natural gas, LCA, synthesis gas, greenhouse gas.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	13
1.1 Antecedentes del proyecto	13
1.2 Justificación del proyecto	13
1.3 Objetivos del proyecto	14
1.3.1 Objetivo general.....	14
1.3.2 Objetivos específicos	14
2. BASES DE DISEÑO.....	16
2.1 Descripción de la materia prima	16
2.1.1 Gas Natural (Combustible fósil).....	16
2.1.2 Residuos de madera (Biomasa).....	17
2.2 Descripción del producto	18
2.3 Método LCA (life cycle assessment).....	19
2.4 Situación actual de la producción de metanol en el Ecuador.....	20
2.5 Limitaciones del diseño de las plantas de producción de metanol	20
2.6 Ubicación de las plantas de producción de metanol	21
2.7 Terminología especializada	21
3. DISEÑO DE UNA PLANTA DE METANOL A PARTIR DE COMBUSTIBLE FÓSIL	
24	
3.1 Definición del caudal de producción	24
3.2 Descripción del proceso en escala industrial	24
3.3 Balance de masa y energía	25
3.4 Selección y dimensionamiento de equipos	25
3.5 Análisis de seguridad y riesgos.....	26

4. DISEÑO DE UNA PLANTA DE METANOL A PARTIR DE BIOMASA	28
4.1 Definición del caudal de producción	28
4.2 Descripción del proceso en escala industrial	28
4.3 Balance de masa y energía	29
4.4 Selección y dimensionamiento de equipos	29
4.5 Análisis de seguridad y riesgos	30
5. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LAS PLANTAS DE PRODUCCIÓN DE METANOL	32
5.1 Estimación de magnitud, presupuesto y costo ISBL	32
5.2 Estimación de componentes de costos del proyecto	33
5.3 Estimación de ingresos del proyecto.....	34
5.4 Análisis de comparación de inversión	35
6. ANALISIS COMPARATIVO	36
6.1 Comparación del rendimiento y la rentabilidad de los procesos estudiados	36
7. METODO LCA EN LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE METANOL.....	37
7.1 Implementación del método LCA en el diseño de la planta de producción de metanol con gas natural	37
7.1.1 Definición del sistema.....	37
7.1.2 Recopilación de datos y elaboración del inventario del ciclo de vida.	38
7.1.3 Evaluación de impactos ambientales.	38
7.1.4 interpretación de los resultados.....	39
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	40
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	41

10. ANEXO A: COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL GAS NATURAL EN DIFERENTES UBICACIONES	43
11. ANEXO B: ARTICULOS INVOLUCRADOS EN LA LEY DE HIDROCARBUROS Y GAS NATURAL.....	44
12. ANEXO C: BALANCE DE MATERIA DE LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE METANOL A PARTIR DE GAS NATURAL	46
13. ANEXO D: AMEF DEL REACTOR DE REFORMACION DE VAPOR DE LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE METANOL A PARTIR DE GAS NATURAL.....	48
14. ANEXO E: REACCIONES ENCONTRADAS EN LOS REACTORES DE LA PRODUCCIÓN DE METANOL A PARTIR DE GAS NATURAL.....	49
15. ANEXO F: DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE METANOL A PARTIR DE GAS NATURAL	50
16. ANEXO G: BALANCE DE MATERIA DE LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE METANOL A PARTIR DE RESIDUOS DE MADERA	51
17. ANEXO H: AMEF DEL REACTOR DE REFORMACION DE VAPOR DE LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE METANOL A PARTIR DE RESIDUOS DE MADERA.....	53
18 ANEXO I: DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE METANOL A PARTIR DE RESIDUOS DE MADERA	54
19 ANEXO J: PLANTA DE METANOL A PARTIR DE GAS NATURAL - EVALUACIÓN ECONÓMICA – MÉTODO FACTORIAL DETALLADO	55
20 ANEXO K: PLANTA DE METANOL A PARTIR DE GAS NATURAL - EVALUACIÓN ECONÓMICA – CALCULO DE EQUIPOS.....	56

21 ANEXO L: PLANTA DE METANOL A PARTIR DE GAS NATURAL - EVALUACIÓN ECONÓMICA – INVERSION DE MATERIAS PRIMAS.....	57
22 ANEXO M: PLANTA DE METANOL A PARTIR DE GAS NATURAL - EVALUACIÓN ECONÓMICA – INGRESOS.....	58
23 ANEXO N: PLANTA DE METANOL A PARTIR DE GAS NATURAL - EVALUACIÓN ECONÓMICA – RESUMEN DE COSTOS.....	59
24 ANEXO O: PLANTA DE METANOL A PARTIR DE GAS NATURAL - EVALUACIÓN ECONÓMICA – DIAGRAMA DE FLUJO DE CAJA.....	60
25 ANEXO P: PLANTA DE METANOL A PARTIR DE GAS NATURAL - EVALUACIÓN ECONÓMICA – VAN Y TIR.....	61
26 ANEXO Q: PLANTA DE METANOL A PARTIR DE RESIDUOS DE MADERA - EVALUACIÓN ECONÓMICA – METODO FACTORIAL DERALLADO.....	62
27 ANEXO R: PLANTA DE METANOL A PARTIR DE RESIDUOS DE MADERA - EVALUACIÓN ECONÓMICA – CALCULO DE EQUIPOS.....	64
28 ANEXO S: PLANTA DE METANOL A PARTIR DE RESIDUOS DE MADERA - EVALUACIÓN ECONÓMICA – INVERSION DE MATERIAS PRIMAS.....	65
29 ANEXO T: PLANTA DE METANOL A PARTIR DE RESIDUOS DE MADERA - EVALUACIÓN ECONÓMICA – INGRESOS.....	66
30 ANEXO U: PLANTA DE METANOL A PARTIR DE RESIDUOS DE MADERA - EVALUACIÓN ECONÓMICA – RESUMEN DE COSTOS.....	67
31 ANEXO V: PLANTA DE METANOL A PARTIR DE RESIDUOS DE MADERA - EVALUACIÓN ECONÓMICA – FLUJO DE CAJA	68

32 ANEXO X: PLANTA DE METANOL A PARTIR DE RESIDUOS DE MADERA - EVALUACIÓN ECONÓMICA – VAN Y TIR.....	69
33 ANEXO Y: COMPARACIÓN DE CRITERIOS IMPORTANTES DENTRO DE CADA UNO DE LOS PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE METANOL A PARTIR DE DIFERENTES MATERIAS PRIMAS.....	70
34 ANEXO Z: FLUJO DE PROCESOS Y LÍMITE DEL SISTEMA PARA EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA PARA LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE METANOL A PARTIR DE GAS NATURAL.	72
35 ANEXO A1: FLUJO DE PROCESO Y LÍMITE DEL SISTEMA DE LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE METANOL A PARTIR DE GAS NATURAL.	73
36 ANEXO B1: INGRESOS Y SALIDAS TOMADAS EN CUENTA EN LA ELABORACIÓN DEL INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA.....	74
37 ANEXO C1: IMPACTOS AMBIENTALES DENTRO DEL PROCESO PRODUCCIÓN DE METANOL A PARTIR DE GAS NATURAL.	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Balance de materia de los equipos más relevantes del proceso.	25
Tabla 2. Equipos más relevantes seleccionados junto con su dimensionamiento.	26
Tabla 3. AMEF realizado para el reactor usado para la reformación a vapor.	27
Tabla 4. Balance de materia de los equipos más relevantes del proceso.	29
Tabla 5. Equipos más relevantes seleccionados junto con su dimensionamiento.	30
Tabla 6. AMEF realizado para el gasificador usado para la formación del gas de síntesis.	31

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes del proyecto

El efecto invernadero es un fenómeno causante de sequías, incendios forestales, olas de calor, inundaciones, lluvias torrenciales y huracanes ¹. Teniendo aumentos de temperatura en variaciones regionales desde el año 1910. A pesar de este ser un fenómeno natural, existen en el campo industrial ciertos procesos que han influenciado el aumento en las concentraciones de los tres principales gases de efecto invernadero, como son, el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el nitrógeno (N₂) ¹. La producción de metanol es uno de los procesos que contribuyen a la emisión de estos gases. Sin embargo, el metanol es un producto fundamental en la industria, este es usado incluso como materia prima en una variedad de procesos.

La demanda mundial de metanol se estimó en 105,8 millones de toneladas métricas en el año 2022, la cual ha aumentado en los últimos años con un 19% ². Este puede ser obtenido por varios métodos, así como materias primas estas pueden ser; gas natural, fracciones de petróleo, carbón, biomasa (materias primas renovables). En muchas de las ocasiones la alta generación de gases es provocada por el procesamiento de la materia prima implementada en el proceso. Por ende, se busca encontrar un proceso que minimice la emisión de gases de invernadero, para esto se realiza el análisis ambiental siguiendo la metodología de Análisis del Ciclo de Vida (LCA) ³.

1.2 Justificación del proyecto

En la actualidad existen varias plantas de producción de metanol alrededor del mundo, cada una de ellas utiliza diferentes métodos, así como materias primas para poder obtener su producto, teniendo el enfoque principal en el campo económico que representa generar dichos

procesos. Dando como resultado que dependiendo del método que utilicen, este pueda convertirse en un proceso sostenible ambientalmente.

El principal obstáculo dentro de este proceso es la emisión de gases de invernadero a la atmósfera debido a las operaciones unitarias requeridas y su funcionalidad dentro de este. Sin embargo, con el tiempo se han implementado el uso de materias primas renovables como la biomasa para, de esta manera, evitar combustibles fósiles como el gas natural. Pese a que se ha visto la disminución de la emisión de gases de invernadero, no se ha realizado una comparación eficiente de la implementación de diversas materias primas dentro del proceso así como la comparación de varias alternativas de procesos.

El análisis del ciclo de vida (LCA), permite la evaluación y cuantificación de los daños ambientales relacionados con este proceso ⁴. Para esto se define el objetivo de la revisión o implementación del método, seguido la preparación del análisis del proceso. Teniendo como objetivo de revisión, evaluar el impacto ambiental del proceso de producción de metanol.

1.3 Objetivos del proyecto

1.3.1 Objetivo general

Definir un proceso que permita la disminución de la emisión de gases de invernadero en la producción de metanol por medio del método LCA

1.3.2 Objetivos específicos

Se establecen los siguientes objetivos específicos, los que se verán desarrollados en los capítulos; 3, 4, 5 y 6 con el fin de alcanzar el objetivo general

- Diseñar de una planta de producción de metanol a partir de gas natural
- Diseñar de una planta de producción de metanol a partir de residuos de madera
- Analizar los resultados obtenidos de los procesos de producción de metanol con gas natural y residuos de madera
- Implementar el método LCA en la planta definida después del análisis de comparación

2. BASES DE DISEÑO

2.1 Descripción de la materia prima

El metanol puede ser obtenido de varias maneras, esto incluye diversos métodos y materias primas. Esta investigación se enfoca en el uso de dos materias primas; el gas natural (combustible fósil), residuos madereros (biomasa).

2.1.1 Gas Natural (Combustible fósil)

El gas natural es una de las fuentes de energía no renovables más usadas dentro de la industria, es una de las fuentes más limpias y seguras obtenidas por medio del petróleo. Está formado por gases ligeros, principalmente por metano a un 95%. Dicha materia prima no se encuentra en estado puro al ser extraído, ya que contiene un porcentaje de agua, ácido sulfúrico, dióxido de carbono, nitrógeno, etc⁵. Es necesario purificar el gas quitando todas las impurezas mencionadas para que este pueda ser transportado y comercializado.

El gas natural tiene como mayor ventaja el aspecto económico en comparación a otras materias primas. En el Ecuador, las reservas de gas natural se estimaron en el 2022 en 3398 millones de metros cúbicos, mientras que la producción de este se estableció en 0,604 millones de metros cúbicos por día². Se lo puede encontrar en varias ubicaciones dentro del Ecuador, sin embargo, existen dos que destacan por la calidad de la materia prima y la facilidad de extracción, estas son; el Golfo de Guayaquil (Guayas) y el Campo Sacha Bloque 60 (Orellana). La composición química del gas natural depende mucho del lugar de extracción, ya que esta puede variar dependiendo de las condiciones de ciertos factores como la temperatura o la presión. En el anexo A se puede encontrar la composición del gas natural de ambas ubicaciones.

2.1.2 Residuos de madera (Biomasa)

La biomasa es conocida como la cuarta fuente energética más utilizada después del carbón, el petróleo y el gas natural, por lo que ocupada una posición de suma importancia en el sector energético. Esta materia prima se ha destacado debido a sus ventajas ambientales, ya que no contribuye al aumento de CO₂ en la atmósfera. Es considerada como la mejor materia prima ya que es abundante, económica y de fácil acceso. Tradicionalmente se emplea el uso de materiales como los desechos de madera, la paja agrícola, residuos de sacarosa y cascarilla de arroz.

Los residuos de madera, dependiendo del uso que se dará como materia prima, debe pasar por un pretratamiento. Para la producción de metanol esta pasa por un secado, triturado y purificación, de esto depende la calidad de la materia prima y por ende del producto final. Dentro de las industrias, los tipos de madera más utilizados son; eucalipto, pino y laurel.

Esta materia prima posee distintas formas y tamaños, debido a que provienen principalmente de los aserraderos, los materiales principales que se obtiene como residuos son; virutas, aserrín y astillas de distintas dimensiones, por lo que el triturado es de gran importancia. Por otro lado, la humedad es una variable importante en el pretratamiento de estos residuos, representando la cantidad de agua que posee el material en función del peso. En términos energéticos se puede decir que el poder calorífico que contiene este compuesto depende del porcentaje de humedad de este.

El almacenamiento y transporte de estos desechos es de suma importancia, sin embargo, la mayoría de los aserraderos y proveedores de dicha materia prima la mantienen a la intemperie, teniendo un mal control de este material.

2.2 Descripción del producto

Metanol (CH_3OH), también denominado alcohol metílico, es un compuesto líquido incoloro, volátil y tóxico cuando se lo manipula en concentraciones mayores a 100 mg/kg, tiene una temperatura de ebullición de 65 grados Celsius, una densidad de 811,6 kg/m³, una presión de vapor de 12,3 kPa a 20 °C². Es una molécula polar la cual es completamente soluble en agua, en combustión completa forma CO_2 , mientras que en combustión incompleta forma aldehído fórmico.

El metanol es una materia prima fundamental dentro de varias industrias, una de ellas es la petroquímica⁶. En el Ecuador el metanol tiene alta demanda dentro de las industrias locales de elaboración de solventes, resinas y tableros aglomerados. En el 2021 las importaciones de metanol se estimaron en 18000 metros cúbicos, para el 2022 se estimó importaciones de 23700 metros cúbicos, esto demuestra un crecimiento alrededor del 32% en este año². Sin embargo, pese a que en este estudio se valoran las diferentes formas de producción de metanol, este no se lo cataloga como el producto final de la investigación.

Debido a que se busca encontrar el proceso con menor cantidad de emisión de gases de invernadero, el producto de esta investigación es la metodología implementada para determinar que el proceso sea sostenible, siendo esta el método del análisis del ciclo de vida (LCA).

La preocupación que existe dentro del proceso de la producción de metanol parte de la significativa liberación de gases de efecto invernadero, tras el reconocimiento de la gravedad de dicho fenómeno se han buscado diversas formas para mitigar la emisión de estos gases ⁴. Por lo que se ha vuelto crucial la exploración de diversas alternativas con materias primas no fósiles para la elaboración de este proceso.

Teniendo esto en cuenta, el análisis de ciclo de vida (LCA) siendo un método estandarizado, basado en la serie ISO 14040/14044 se puede emplear para cuantificar las posibles cargas ambientales relacionadas con toda la vida útil del ciclo de un proceso de producción, donde se incluye el uso, la producción y eliminación del proceso ⁴. Esta metodología se emplea en diversas industrias como son; la producción de alimentos, construcción, industria química, etc. Por tanto, esta metodología se utiliza dentro de la investigación para determinar si el proceso elegido dentro de un análisis comparativo de ambas plantas, es sostenible.

2.3 Método LCA (life cycle assessment)

El método del ciclo de vida, dentro de la investigación se lo implementa para poder evaluar la carga ambiental que existe dentro de la industria del metanol, para de esta manera poder proporcionar recomendaciones para el desarrollo sostenible de esta industria. Este método involucra cuatro etapas cruciales, estas son; la evaluación del ciclo de vida, el análisis del inventario del ciclo de vida, evaluación del impacto del ciclo de vida y la interpretación de los hallazgos.

En la evaluación del ciclo de vida se definen los objetivos y el alcance de la metodología, en el análisis del inventario del ciclo de vida se evalúa las fuentes de datos obtenidos, para la etapa

de la evaluación del impacto se define el efecto ambiental sobre el proceso, por último, en la interpretación de los hallazgos se discute los resultados obtenidos en cada una de las secciones y se expone las recomendaciones necesarias para poder obtener un proceso sostenible.

2.4 Situación actual de la producción de metanol en el Ecuador

Actualmente en el Ecuador no existe una planta de producción de metanol, sin embargo, debido a la gran demanda del producto en el país, se opta por importaciones alrededor de 15 millones de litros anuales para poder cubrir y satisfacer los campos que involucran el uso del metanol, sea como producto o materia prima.

2.5 Limitaciones del diseño de las plantas de producción de metanol

Existen limitación internas y externas, siendo las internas aquellas que están dentro del control de la empresa mientras que las externas son todo lo contrario, aquellas que no están dentro del control de la empresa, como pueden ser, fluctuaciones del mercado, regulaciones gubernamentales, etc. Estas limitaciones pueden influenciar al proceso, pero también al uso adecuado de la materia prima.

En las limitaciones internas se involucra los estándares de la materia prima, en el caso de los residuos de madera existe la Legislación de residuos madereros en donde el Municipio de Quito junto con el de Rumiñahui otorgan las licencias y los permisos necesarios para el manejo de esta materia prima, por otro lado, se trabajó con el gas natural en donde existe para este caso la ley de hidrocarburos y gas natural, en donde se involucran los artículos 31, 32, 34, 35, 36, 37, 39 y 41. Estos artículos se los puede observar en el anexo B.

Por otro lado, en las limitaciones externas para este proceso, la principal, es la seguridad. Debido a que en el Ecuador no existen plantas de producción de metanol, las leyes gubernamentales no controlan el proceso por lo que es necesario confiar en los estándares internacionales.

2.6 Ubicación de las plantas de producción de metanol

La ubicación de las plantas dependerá de la ubicación de la materia prima, para la planta de producción de metanol a partir de residuos de madera, teniendo en cuenta que se obtienen dichos residuos de la empresa “Madersec”, esta se ubicará en Inga Bajo, Quito, debido a sus condiciones climáticas favorables y su facilidad en el transporte en base a la materia prima. Por otro lado, está la planta de producción de metanol a partir de gas natural, en este caso ya que dicho material se lo extrae del Campo Sacha bloque 60, Orellana, esta se Ubicará en dicho sector por la facilidad en el transporte de la materia prima.

2.7 Terminología especializada

LCA: El análisis ambiental se realiza siguiendo la metodología de Análisis del Ciclo de Vida (LCA) utilizando el software GaBi, y ReCiPe como método de evaluación de impacto ⁷, método estándar que permite la recogida, cuantificación y evaluación integrales de los daños medioambientales relacionados con un procedimiento.

Criterios de corte: corte del flujo del material para de esta manera reducir la extensión y complejidad del marco de estudio a un tamaño práctico.

Huella de carbono: mide las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de la actividad humana.

Análisis de sensibilidad: El análisis de sensibilidad estudió la influencia de la fuente de electricidad y el tipo de catalizador en el impacto ambiental de la producción de metanol ⁸.

Efecto invernadero: es la forma en que el calor queda atrapado cerca de la superficie de la Tierra por los gases de efecto invernadero.

Metanol: agente químico de uso industrial que se encuentra en numerosos productos de limpieza, anticongelantes, pinturas y barnices. Un combustible potencialmente neutro en carbono sintetizado a partir de CO₂ y H₂ ⁹.

Gas natural: mezcla de gases livianos que en su mayor parte está compuesta por metano y etano, y en menor proporción por propano, butanos, pentanos e hidrocarburos más pesados. El metanol se produce a partir de recursos fósiles como el gas de coque, el gas natural, el carbón y el petróleo ⁸.

Gasificación: La gasificación es un proceso muy sencillo para convertir combustibles sólidos en combustibles gaseosos ¹⁰.

Biomasa lignocelulósica: materia orgánica utilizada como fuente energética, residuos forestales.

Gas de síntesis: obtenido mediante el proceso de gasificación térmica de materiales orgánicos, principalmente lignocelulósicos (residuos forestales y agrícolas).

3. DISEÑO DE UNA PLANTA DE METANOL A PARTIR DE COMBUSTIBLE FÓSIL

3.1 Definición del caudal de producción

Se define el caudal de producción de la planta tomando en cuenta la cantidad de metanol importado anualmente en el país. Se propone cubrir el 50% de la demanda anual, la cual corresponde a 15 millones de litros. Se estima un caudal de alrededor de 678 kg/h, obteniendo un producto del 95% de pureza. Se considera la cantidad de materia prima que será necesaria para la producción del metanol, para este caso se estaba empezando con 420,51 kg/h de gas natural.

3.2 Descripción del proceso en escala industrial

El proceso se divide en tres secciones importantes, estas son; la formación del gas de síntesis, la síntesis del metanol y por último la obtención del metanol. Comienza con el ingreso de la materia prima (GN) al primer mezclador (M-101) donde también ingresa la corriente de agua con un caudal de 1279,8 kg/h, seguido empieza la primera etapa, esta será realizada por medio de una reformación a vapor (R-101), las reacciones encontradas en este proceso se pueden observar en el anexo E.

La corriente del gas de síntesis debe ser enfriada (I-102) para poder ingresar al reactor donde ocurrirá la síntesis del metanol (R-102) para el cual se utilizará un catalizador de 12% Ni, sin embargo, para poder realizar dicha reacción se debe considerar una presión de 105,4 atm por lo que antes de ingresar al reactor esta corriente pasa por un compresor (C-101), las reacciones necesarias para la síntesis del metano se pueden observar en el anexo E. La corriente de salida debe enfriarse y comprimirse para poder disminuir su presión, de esta manera se llega a realizar

una separación de los gases y los líquidos (SF-101), por último, por medio de una destilación (D-101) se obtiene el producto. En el anexo F se puede observar el diagrama de flujo de la planta.

3.3 Balance de masa y energía

Para la determinación de los flujos másicos y energéticos presentes en la planta de producción de metanol a partir de gas natural se tomó en cuenta la composición química del gas natural extraído, la cual se puede encontrar en el anexo A, y teniendo en cuenta un caudal de entrada de 420,5 kg/h de gas natural y 1279,8 kg/h de H₂O. En la tabla 1 se puede apreciar los valores de los balances de masa de los equipos más relevantes del proceso, siendo estos; reformado a vapor (R-101), Síntesis de metanol (R-102) y destilación para obtención del metanol (D-101). En el anexo C se puede apreciar el balance de masa de toda la planta, incluyendo los compuestos en cada una de las corrientes.

Tabla 1. Balance de materia de los equipos más relevantes del proceso.

Equipo	Entrada [kg/h]	Salida [kg/h]
Reactor – Reformación a Vapor	1700,3	1700,3
Reactor – Síntesis de metanol	2429	2429
Destilador – Obtención del metanol	1599,9	921,9 H ₂ O 678 CH ₃ OH

3.4 Selección y dimensionamiento de equipos

Para la selección de los equipos, se tomaron en cuenta la reacción especialmente en la síntesis del metanol, así como en la formación del gas de síntesis, por otro lado, los compuestos utilizados dentro de los equipos y por ultimo las condiciones termodinámicas. Para el

dimensionamiento se tomaron en cuenta las normas establecidas para cada uno de los equipos y el caudal volumétrico. En la tabla 3 se pueden observar los equipos más relevantes y las características de porque estos fueron seleccionados y su dimensionamiento.

Tabla 2. Equipos más relevantes seleccionados junto con su dimensionamiento.

Etapa	Equipo	Descripción	Dimensionamiento
Reactor – Reformación a Vapor	Reactor de lecho fijo multitubular	Contiene un flujo volumétrico de hasta 3500 m ³ /h, un reactor de reformación catalítica, trabaja a temperaturas de entrada alrededor de 600 °C, 1600 tubos necesarios.	Longitud: 24 m Diámetro: 12 m
Reactor – Síntesis de metanol	Reactor de lecho fijo multitubular	Volumen total del reactor es de 10,3 m ³ , numero de tubos necesarios son 740	Longitud: 24 m Diámetro: 12 m
Destilador – obtención del metanol	Torre de destilación de platos con casquetes de burbujeo	Torre de destilación de 23 etapas, alimentación en el plato 13, eficiencia del 0,8.	Altura: 12 Diámetro: 1,21

3.5 Análisis de seguridad y riesgos

Es fundamental tener en cuenta la seguridad del proceso por lo que se implementó un análisis del modo de efecto y fallas (AMEF) al reactor donde se realiza el reformado a vapor para de esta manera asegurar la eficiencia, seguridad e incluso la calidad del producto. En la tabla 4 se puede observar los puntos más importantes siendo estos determinados por su vapor del número prioritario de riesgo (NPR). En el anexo D se puede observar el AMEF completo para la reformación de vapor.

Tabla 3. AMEF realizado para el reactor usado para la reformación a vapor.

Fallo	Efecto	Causa	NPR
Reflujo inminente	Posible explosión del equipo	Presiones altas a la salida del reactor	490
El catalizador se desactiva	Fallo en la reacción del reformado	Temperatura sobrepasa los valores máximos	196
Temperatura contante en los lechos del reactor	Se detiene el flujo, contraflujo	Catalizador no activo	196

4. DISEÑO DE UNA PLANTA DE METANOL A PARTIR DE BIOMASA

4.1 Definición del caudal de producción

En este caso para la planta de producción de metanol a partir de residuos de madera se busca de igual manera cubrir el 50% de la demanda anual de importaciones en el Ecuador, sin embargo, para poder llegar a cubrir los 678 kg/h se requiere de una cantidad de 7508,2 kg/h de residuos de madera.

4.2 Descripción del proceso en escala industrial

El proceso cumple con tres etapas sumamente importantes, estas son: formación del gas de síntesis por medio de una gasificación, síntesis de metanol y separación de gases y líquidos para la obtención del producto final.

Se empieza con el pretratamiento de la materia prima, los residuos de madera (RM) ingresan al triturador (T-101) en donde se obtiene un tamaño menor a 15mm, seguido se realiza un secado (S-101), esto para poder obtener residuos con una humedad menor al 10%. Empieza la primera etapa del proceso, la formación del gas de síntesis, esta se realiza en un gasificador (G-101) el cual contiene un ciclón y un filtro para poder purificar el gas de síntesis. Seguido se obtiene la formación del hidrógeno debido al exceso de monóxido de carbono en el primer reactor (R-101), seguido se obtiene 4 etapas secuenciales de compresores y condensadores para poder llegar a una temperatura y presión adecuadas para ingresar al segundo reactor en donde se da la síntesis del metanol (R-102).

Por medio de un separador bifásico (SF-101) se separan los gases con los líquidos, para poder realizar una destilación (D-101) en donde se obtendrá el metanol. Sin embargo, en este proceso

también se realiza la purificación del hidrogeno para poder comercializarlo como producto final, igual que el metanol. En el anexo I se puede observar el diagrama de flujo de la planta.

4.3 Balance de masa y energía

Para la determinación de los flujos masicos y energéticos presentes en la planta de producción de metanol a partir de residuos de madera se tomó en cuenta un caudal de entrada de 7508,2 kg/h de residuos de madera, sin embargo, después del pretratamiento de los residuos, al gasificador ingresan 5005,5 residuos secos los cuales se usarán para la formación del gas de síntesis, junto con 6006,5 kg/h de H₂O. En la tabla 4 se puede apreciar los valores de los balances de masa de los equipos más relevantes del proceso, siendo estos; la gasificación (G-101), Síntesis de metanol (R-102) y destilación para obtención del metanol (D-101). En el anexo C se puede apreciar el balance de masa de toda la planta, incluyendo los compuestos en cada una de las corrientes.

Tabla 4. Balance de materia de los equipos más relevantes del proceso.

Equipo	Entrada [kg/h]	Salida [kg/h]
Gasificador – Formación del gas de síntesis	5005,4 residuos secos 6006,5 H ₂ O	10411,3 gas de síntesis 600,6 desechos
Reactor 2 – Síntesis de metanol	8333,7	8333,7
Destilador – Obtención del metanol	678,11	64,42 H ₂ O 678,11 CH ₃ OH

4.4 Selección y dimensionamiento de equipos

Para la selección y dimensionamiento de equipos se tomaron en cuenta los mismos parámetros que en la planta de producción de metanol a partir de gas natural, sin embargo, es fundamental

tomar en cuenta que en esta planta se realiza una gasificación y no un reformado a vapor. En la tabla 5 se pueden observar los equipos más relevantes y las características de porque estos fueron seleccionados y su dimensionamiento.

Tabla 5. Equipos más relevantes seleccionados junto con su dimensionamiento.

Etapa	Equipo	Descripción	Dimensionamiento
Gasificador – Formación del gas de síntesis	Gasificador de lecho fluidizado Down draft	Este fue seleccionado por la poca cantidad de alquitrán que produce en la reacción, por otro lado, su eficiencia es del 80%.	Altura: 40 m Diámetro: 20 m
Reactor – Síntesis de metanol	Reactor PBR packed bed	Requiere colocarse el catalizador para poder reducir el tiempo de residencia y mejorar la eficiencia del proceso.	Altura: 32 m Diámetro: 16 m
Destilador – obtención del metanol	Torre de destilación de platos perforados	Torre de destilación de 23 etapas, 8 platos y una eficiencia del 0,97%.	Altura: 9,55 m Diámetro interno: 0,2 m Diámetro externo: 0,21 m

4.5 Análisis de seguridad y riesgos

Es fundamental tener en cuenta la seguridad del proceso por lo que se implementó un análisis del modo de efecto y fallas (AMEF) al gasificador donde se realiza la formación del gas de síntesis para de esta manera asegurar la eficiencia, seguridad e incluso la calidad del producto. En la tabla 4 se puede observar los puntos más importantes siendo estos determinados por su vapor del número prioritario de riesgo (NPR). En el anexo H se puede observar el AMEF completo para la reformación de vapor.

Tabla 6. AMEF realizado para el gasificador usado para la formación del gas de síntesis.

Fallo	Efecto	Causa	NPR
Exceso de humedad en la biomasa	Aumento de temperatura	Deficiencia en el proceso de secado	343
Incendio en el flujo de salida de desechos	Explosión del equipo	Inicio de una chispa en el flujo de salida	280
Altas cantidades de chips de madera	No se da la gasificación	Fallo en las válvulas	196

5. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LAS PLANTAS DE PRODUCCIÓN DE METANOL

5.1 Estimación de magnitud, presupuesto y costo ISBL

La estimación de la magnitud tiene una precisión de $\pm 30 - 50\%$. Se realizó un estudio de mercado para poder definir el caudal de la planta, en donde se concluye que este será de 7,5 millones de litros anuales ya que existen importaciones de 14000 toneladas anuales de metanol en el Ecuador. Según Hokanson, el costo de inversión de una planta de metanol que produce 50 millones de galones por año es de 64 millones de dólares americanos¹¹.

Por otro lado, la precisión de la estimación del presupuesto es de $\pm 10 - 15\%$, esta es obtenida con ayuda del diagrama de flujo realizado para la planta, Por medio del método factorial detallado se calculó el costo ISBL en donde se tomó en cuenta los costos de cada equipo, este se puede observar en el anexo J para la planta de producción de metanol a partir de gas natural y en el anexo Q para la planta de producción de metanol a partir de residuos de madera.

Los costos que se involucran en la estimación del ISBL incluye la instalación y adquisición de los equipos del proceso, los gastos involucrados en el diseño integral y la ingeniería del proceso, por otro lado, también cubre la estimación de costos de adquisición de materiales, costos laborales (construcción, instalación y puesta en marcha de la planta). El costo ISBL de la planta de producción de metanol a partir de gas natural es de 37,07 millones, mientras que, para la planta de producción de metanol a partir de residuos de madera, el costo ISBL es de 62,62 millones.

5.2 Estimación de componentes de costos del proyecto

Dentro de los componentes de costos del proyecto están; los costos de producción, costos de operación, costos de ingeniería, costos de diseño y construcción, inversión de capital fijo y capital de trabajo.

En los costos de producción, están los costos fijos y variables, los costos variables tienen una relación directa con el caudal de producción del proceso ya que entran costos de materia prima, servicios auxiliares y transporte. Por otro lado, los costos fijos son independientes al caudal de producción por lo que se enfocan en la gestión administrativa, salarios, mantenimiento, alquiler de la tierra, etc. En el anexo L se pueden observar los costos de inversión de la materia prima para la planta de producción de metanol a partir de gas natural, mientras que en el anexo S se encuentran dichos costos para la planta de producción de metanol a partir de residuos de madera.

Por otro lado, están los costos de operación, estos se relacionan con los elementos externos, como pueden ser adiciones a la infraestructura para expansión de la planta, etc. Se calcula también los costos de ingeniería, diseño y construcción, estos están relacionados con el diseño y la construcción de la planta y se los calcula con una proporción del 10% del costo ISBL. Para la planta de producción de metanol a partir de gas natural, el valor del costo de operación es de 14,83 millones y el costo de ingeniería, diseño y construcción fue de 3,71 millones, mientras que, para la planta de producción de metanol a partir de residuos de madera, el valor de los costos de operación es de 25,05 millones y el costo de ingeniería, diseño y construcción fue de 6,29 millones.

Por último, está la capital de trabajo, este valor se lo calcula basándose en el costo de la materia prima, el costo de operación y el costo ISBL. En este caso el costo de capital de trabajo de la planta de producción de metanol a partir de gas natural es de 2,34 millones, mientras que para la planta de producción de metanol a partir de residuos de madera es de 3,69 millones. En el anexo K se pueden observar el cálculo de algunos de los equipos de la planta de producción de metanol a partir de gas natural, mientras que en el anexo R se encuentran estos cálculos para la planta de producción de metanol a partir de residuos de madera.

5.3 Estimación de ingresos del proyecto

El valor de la estimación de los ingresos de las plantas se obtiene principalmente de la venta de los productos finales, siendo estos el hidrógeno y el metanol. Para la planta de producción de metanol a partir de gas natural, los ingresos son; para el metanol es de 12,72 millones y para el hidrógeno es de 1,50 millones. Por otro lado, para la planta de producción de metanol a partir de residuos de madera, los ingresos son; para el metanol es de 12,72 millones y para el hidrógeno es de 13,61 millones. En el anexo M se puede observar los valores relacionados a los ingresos de la planta de producción de metanol a partir de gas natural, mientras que en el anexo T se encuentra los ingresos de la planta de producción de metanol a partir de residuos de madera.

Por último, el resumen de los costos de la planta de producción de metanol a partir de gas natural se lo puede observar en el anexo N, mientras que para la planta de producción de metanol a partir de residuos de manera se lo encuentra en el anexo U

5.4 Análisis de comparación de inversión

Para la planta de producción de metanol a partir de gas natural, el valor actual neto (VAN) es de \$82.94 millones, mientras que para la planta de producción de metanol a partir de residuos de madera, el valor neto (VAN) es de \$89,58 millones. Al obtener un VAN positivo, indica la generación de rendimientos financieros que superaran el valor inicial.

Por otro lado, esta, la tasa interna de retorno (TIR) que para la planta de producción de metanol a partir de gas natural es del 33%, mientras que para la planta de producción de metanol a partir de residuos de madera es de 34%, lo que sirve como un indicador de la rentabilidad de ambas plantas. Por ultimo se obtiene el flujo de caja de cada una de las plantas, este nos sirve para saber en cuantos años se recuperar la inversión realizada. En el anexo O se observa el diagrama de flujo de cada de la planta de producción de metanol a partir de gas natural, mientras que en el anexo V se observa el de la planta de producción de metanol a partir de residuos de madera. En el anexo P se pueden observar las tablas con los datos necesarios para el cálculo del VAN y el TIR de la planta de producción de metanol a partir de gas natural, mientras que en el anexo X se observan las tablas de igual manera del VAN y el TIR de la planta de producción de metanol a partir de residuos de madera.

6. ANALISIS COMPARATIVO

6.1 Comparación del rendimiento y la rentabilidad de los procesos estudiados

Para la comparación de los procesos se utilizó una matriz de decisión, esta tiene la función de comparar ciertos criterios importantes dentro del proceso. Los criterios que se toman en cuenta son; la disponibilidad de la materia prima, costo de materia prima, eficiencia del proceso, rendimiento del proceso, complejidad del proceso, seguridad y fiabilidad de la planta y costo de producción. Esta matriz se maneja con una escala del 1 al 5, dependiendo el criterio que se está evaluando. En el anexo Y se puede observar los resultados de la matriz de decisión implementada.

En este caso con un valor de 31/35 se optó por la planta de producción de metanol a partir de gas natural, de la cual se requiera realizar un análisis ambiental, utilizando el método del ciclo de vida (LCA) para de esta manera poder definir que este proceso es aplicable.

7. METODO LCA EN LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE METANOL

En análisis del ciclo de vida (LCA) es una herramienta que se utiliza para evaluar el impacto ambiental de un proceso, desde la extracción de la materia prima hasta su disposición final. En la producción de metanol, este método se lo puede utilizar para la evaluación y comparación del impacto ambiental de diferentes procesos. Para esto se debe; definir el sistema, realizar un inventario de entradas y salidas, realizar la evaluación del impacto ambiental y, por último, realizar una interpretación de los resultados.

7.1 Implementación del método LCA en el diseño de la planta de producción de metanol con gas natural

7.1.1 Definición del sistema

La definición del sistema en un Análisis del Ciclo de Vida (LCA) en la producción de metanol a partir de gas natural es un paso crucial que establece los límites del estudio y determina qué etapas del ciclo de vida del producto se incluirán en el análisis. Dentro de este punto se definen; el objetivo de estudio, el alcance del estudio y los límites del sistema.

El objetivo del análisis es evaluar el impacto ambiental del proceso de producción de metanol a partir de gas natural, desde la extracción de las materias primas hasta la formación del gas de síntesis mediante un reformado a vapor. Por otro lado, están las etapas que se trataran dentro del análisis, estas son; extracción y transporte del gas natural, pretratamiento del gas natural, formación del gas de síntesis.

Por último, se toman en cuenta los límites del análisis, en el cual se incluyen todas las actividades directamente relacionadas con la producción de la planta, mientras que se excluyen

las actividades no relacionadas con esta, como son la construcción de infraestructuras, la selección o fabricación de equipos, etc. En este caso no se incluyen los usos finales del producto ya que las fronteras del sistema no llegan al final del producto, en el anexo Z se puede observar el sistema que se va a evaluar, por otro lado, en el anexo A1 se observa las fronteras del sistema tomando en cuenta también la síntesis del metanol.

7.1.2 Recopilación de datos y elaboración del inventario del ciclo de vida.

En este punto, se cuantifica todos los flujos de salida y de entrada asociados con cada etapa del ciclo de vida de la producción del metanol. En esto se incluye la extracción y el procesamiento del gas natural. Estos datos se los encuentran a lo largo de la investigación, ya que involucran, balances de masa, energía, transporte, etc. En el anexo B1 se puede observar los ingresos y salidas tomadas en cuenta en la elaboración del inventario del ciclo de vida

7.1.3 Evaluación de impactos ambientales.

Para poder obtener los valores de los impactos ambientales, se trabajó con el software OpenLCA en donde se insertaron todos los datos encontrados en el capítulo anterior, dándonos como resultado los valores encontrados en la tabla del anexo C1. En la misma se puede observar que los impactos ambientales hallados son; el cambio climático, el agotamiento de recursos abióticos, la eutrofización y la oxidación fotoquímica.

7.1.4 interpretación de los resultados.

Por último, se analiza e interpreta los resultados obtenidos del análisis de impacto ambiental. En este caso, se puede observar que uno de los impactos más elevados es; el agotamiento de recursos abióticos y el cambio climático. En este caso para el agotamiento de recursos abióticos, se enfoca en el gas natural ya que este viene a ser la materia prima del proceso, este es un recurso finito y no renovable, por ende, se recomienda poder utilizar una materia prima renovable, como una biomasa.

Por otro lado, está el cambio climático, durante el proceso de producción de metanol a partir de gas natural, se pueden liberar grandes cantidades de gases de efecto invernadero, como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y de nitrógeno (N_2). Estas emisiones contribuyen al aumento de la concentración de GEI en la atmósfera, lo que provoca el calentamiento global y el cambio climático por lo que dentro del análisis de impactos ambientales este viene teniendo uno de los valores más altos.

Por último, la eutrofización ocurre cuando hay un aumento en la concentración de nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo, en cuerpos de agua como lagos, ríos y estuarios. Este aumento excesivo de nutrientes puede desencadenar un crecimiento excesivo de algas y otras plantas acuáticas, lo que a su vez puede agotar el oxígeno en el agua y afectar negativamente la calidad del hábitat acuático. La producción de metanol puede generar desechos líquidos y residuos químicos que, si no se gestionan adecuadamente, pueden contaminar los cuerpos de agua cercanos. Estos contaminantes pueden incluir compuestos orgánicos e inorgánicos que, al entrar en contacto con el agua, pueden promover el crecimiento de algas y plantas acuáticas.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se realizó el diseño de dos plantas de producción de metanol, una a partir de gas natural y la otra a partir de residuos de madera, después de haber realizado un análisis económico de ambas plantas se procedió a un análisis comparativo, por último, se realizó un análisis de ciclo de vida (LCA) a la planta determinada después del análisis comparativo.

Este método se lo implemento en la planta de producción de metanol a partir de gas natural debido a los resultados obtenidos que respaldan su elección como la opción preferida desde una perspectiva económica. Aunque ambas plantas resultaron rentables desde un punto de vista financiero, el análisis ambiental realizado mediante el método LCA demostró que la planta de producción de metanol a partir de gas natural presenta bajos impactos ambientales.

Basándonos en estos hallazgos, se recomienda la continuación y la expansión de la planta de producción de metanol a partir de gas natural como la opción preferida para la producción de metanol. Esto se debe a su rentabilidad económica, respaldada por el análisis financiero, así como a su menor impacto ambiental, demostrado mediante el análisis LCA. La planta de producción de metanol a partir de gas natural se presenta como una opción sostenible y compatible tanto con los objetivos económicos como ambientales del proceso.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. De, U., De Postgrados, G., De, D., De, C. & Tierra, L. A. *ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y VINCULACIÓN CON LA COLECTIVIDAD*.
2. Salvador, M. & Miño, A. Revisión bibliográfica para la producción de metanol a pequeña escala a partir de gas Literature Review for Small-Scale Methanol Production from Natural Gas.
3. Galusnyak, S. C., Petrescu, L., Chisalita, D. A. & Cormos, C. C. Life cycle assessment of methanol production and conversion into various chemical intermediates and products. *Energy* **259**, (2022).
4. Bertino, A., Falasconi, M. B., Mazzeo, L. & Piemonte, V. Life Cycle Assessment of Various Methanol Production Processes. in *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering* (Elsevier, 2024). doi:10.1016/B978-0-443-15740-0.00017-3.
5. Ecuador, S., Automotriz Del Ecuador, M. & Torres, A. L. *UNIVERSIDAD ANDINA SIMÓN BOLÍVAR*. (2008).
6. Osman, A. I., Deka, T. J., Bai, H., Yap, P.-S. & Rooney, D. W. Economics of Methanol Utilization for Fuels. in *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering* (Elsevier, 2024). doi:10.1016/b978-0-443-15740-0.00014-8.
7. Galusnyak, S. C., Petrescu, L., Chisalita, D. A. & Cormos, C. C. Life cycle assessment of methanol production and conversion into various chemical intermediates and products. *Energy* **259**, (2022).

8. Yadav, P., Athanassiadis, D., Yacout, D. M. M., Tysklind, M. & Upadhyayula, V. K. K. Environmental Impact and Environmental Cost Assessment of Methanol Production from wood biomass. *Environmental Pollution* **265**, (2020).
9. Fu, Y., Wang, B. & Shuai, S. Life-cycle Analysis of Methanol Production from Coke Oven Gas in China. in *SAE Technical Papers* (SAE International, 2023). doi:10.4271/2023-01-1646.
10. Muthudineshkumar, R. & Anand, R. Life cycle assessment on biofuel production from biomass gasification and syngas fermentation. in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* vol. 312 (Institute of Physics Publishing, 2019).
11. Hokanson, A. E. & Rowell, R. M. *METHANOL FROM WOOD WASTE: A Technical and Economic Study*. (1977).

10. ANEXO A: COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL GAS NATURAL EN DIFERENTES UBICACIONES

Tabla 1. Composición química del gas natural encontrado en Orellana.

Gas del Campo Sacha bloque 60	
Componente	% Molar
Metano	57,94
Etano	8,54
Propano	13,11
i-Butano	0,81
n-Butano	1,85
i-Pentano	2,67
n-Pentano	1,06
Hexano	0,88
Nitrógeno	3,71
Dióxido de carbono	8,65
Agua	0,75
Ácido sulfhídrico	0,01

Tabla 2. Composición química del gas natural encontrado en el Golfo de Guayaquil.

Gas del Golfo de Guayaquil	
Componente	% Volumen
Metano	94.60
Etano	1.88
Propano	1.32
i-Butano	0.16
n-Butano	0.12
i-Pentano	0.07
n-Pentano	0.05
Nitrógeno	0.27

**11. ANEXO B: ARTICULOS INVOLUCRADOS EN LA LEY DE
HIDROCARBUROS Y GAS NATURAL**

Número	Artículo
Art. 31	Si conviniere a los intereses del Estado, los contratos para la exploración y explotación de hidrocarburos podrán ser modificados por acuerdo de las partes contratantes y previa aprobación del Comité Especial de Licitación (CEL). Para ello se requerirán los informes previos favorables del Procurador General del Estado, del Comando Conjunto de las Fuerzas Armadas, del Consejo de Administración de PETROECUADOR y del ministro de Energía y Minas
Art. 32	El Estado autoriza, de acuerdo con las formas contractuales previstas en esta Ley, la explotación de petróleo crudo o de gas natural libre; por lo tanto, los contratistas o asociados, tienen derecho solamente sobre el petróleo crudo o el gas natural libre que les corresponda según dichos contratos.
Art. 34	El gas natural que se obtenga en la explotación de yacimientos petrolíferos pertenece al Estado, y solo podrá ser utilizado por los contratistas o asociados en las cantidades que sean necesarias para operaciones de explotación y transporte, o para reinyección a yacimientos, previa autorización del Ministerio del Ramo.
Art. 35	El Estado, a través de PETROECUADOR, en cualesquiera de las formas establecidas en el artículo 2 de esta Ley, podrá celebrar contratos adicionales con sus respectivos contratistas o asociados o nuevos contratos con otros de reconocida capacidad técnica y financiera para utilizar gas proveniente de yacimientos petrolíferos, con fines industriales o de comercialización, y podrá, asimismo, extraer los hidrocarburos licuables del gas que los contratistas o asociados utilizaren en los casos indicados en el artículo anterior
Art. 36	Los contratistas o asociados entregarán a PETROECUADOR, sin costo, el gas proveniente de yacimientos de condensado, no utilizado para los casos previstos en el artículo 34, que PETROECUADOR

	<p>requiera para fines industriales, de generación de energía eléctrica, comercialización o de cualquier otra índole. PETROECUADOR pagará solamente los gastos de adecuación que, para dicha entrega, realizaren los contratistas o asociados</p>
Art. 37	<p>Los yacimientos de condensado o de elevada relación gas - petróleo se considerarán yacimientos de gas libre, siempre que, a juicio del Ministerio del Ramo, resulta antieconómica la sólo producción de sus hidrocarburos líquidos</p>
Art. 39	<p>Los excedentes de gas que no utilizen PETROECUADOR ni los contratistas o asociados, o que no pudieren ser reinyectados en los respectivos yacimientos, serán motivo de acuerdos especiales o se estará a lo que dispongan los reglamentos. Los contratistas o asociados no podrán desperdiciar el gas natural, arrojándolo a la atmósfera o quemándolo, sin autorización del Ministerio del Ramo.</p>
Art. 41	<p>Las sustancias que se encuentren asociadas a los hidrocarburos y que sean comercialmente aprovechables, podrán ser recuperadas y explotadas solo por PETROECUADOR, en cualesquiera de las formas contempladas en esta Ley</p>

12. ANEXO C: BALANCE DE MATERIA DE LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE METANOL A PARTIR DE GAS NATURAL

Equipo	Corriente	Flujo [kg/h]	Componente
Caldera (C-101)	Entrada – 1	1279,8	H ₂ O (liquida)
	Salida – 2	1279,8	H ₂ O (gaseosa)
Mezclador (M-101)	Entrada – 2	1279,8	H ₂ O (gaseosa)
	Entrada – 3	420,5	Gas natural
Reactor multitubular (R-101)	Salida – 4	1700,3	Gas natural, H ₂ O
	Entrada – 5	1700,3	Gas natural, H ₂ O
Intercambiador de calor (I-102)	Salida – 6	1700,3	H ₂ O, H ₂ , N ₂ , CO ₂ , H ₂ S, CO, CH ₄
	Entrada – 7	1700,3	H ₂ O, H ₂ , N ₂ , CO ₂ , H ₂ S, CO, CH ₄
Mezclador (M-102)	Salida – 8	1700,3	H ₂ O, H ₂ , N ₂ , CO ₂ , H ₂ S, CO, CH ₄
	Entrada – 8	1700,3	H ₂ O, H ₂ , N ₂ , CO ₂ , H ₂ S, CO, CH ₄
Mezclador (M-102)	Entrada – 12	728,7	H ₂ O, H ₂ , N ₂ , CO ₂ , H ₂ S, CO, CH ₃ OH
	Salida – 9	2429	H ₂ O, H ₂ , N ₂ , CO ₂ , H ₂ S, CO, CH ₃ OH
Compresor (C-101)	Entrada – 9	2429	H ₂ O, H ₂ , N ₂ , CO ₂ , H ₂ S, CO, CH ₃ OH
	Salida – 10	2429	H ₂ O, H ₂ , N ₂ , CO ₂ , H ₂ S, CO, CH ₃ OH
Reactor (R-102)	Entrada – 10	2429	H ₂ O, H ₂ , N ₂ , CO ₂ , H ₂ S, CO, CH ₃ OH
	Salida – 11	2429	H ₂ O, H ₂ , N ₂ , CO ₂ , H ₂ S, CO, CH ₃ OH
Mezclador (M-103)	Entrada – 11	2429	H ₂ O, H ₂ , N ₂ , CO ₂ , H ₂ S, CO, CH ₃ OH
	Salida – 12	728,7	H ₂ O, H ₂ , N ₂ , CO ₂ , H ₂ S, CO, CH ₃ OH
	Salida – 14	2,42	H ₂ O, H ₂ , N ₂ , CO ₂ , H ₂ S, CO, CH ₃ OH
	Salida – 13	1697,9	H ₂ O, H ₂ , N ₂ , CO ₂ , H ₂ S, CO, CH ₃ OH
Compresor (C-102)	Entrada – 16	1697,9	H ₂ O, H ₂ , N ₂ , CO ₂ , H ₂ S, CO, CH ₃ OH
	Salida – 17	1697,9	H ₂ O, H ₂ , N ₂ , CO ₂ , H ₂ S, CO, CH ₃ OH
Separador Bifásico (SF-101)	Entrada – 18	1697,9	H ₂ O, H ₂ , N ₂ , CO ₂ , H ₂ S, CO, CH ₃ OH
	Salida – 19	97,9	H ₂ , N ₂ , CO ₂ , H ₂ S
	Salida – 20	1599,9	H ₂ O, CH ₃ OH
Destilador	Entrada – 20	1599,9	H ₂ O, CH ₃ OH

(D-101)	Salida – 21	678	CH ₃ OH
	Salida – 22	921,9	H ₂ O

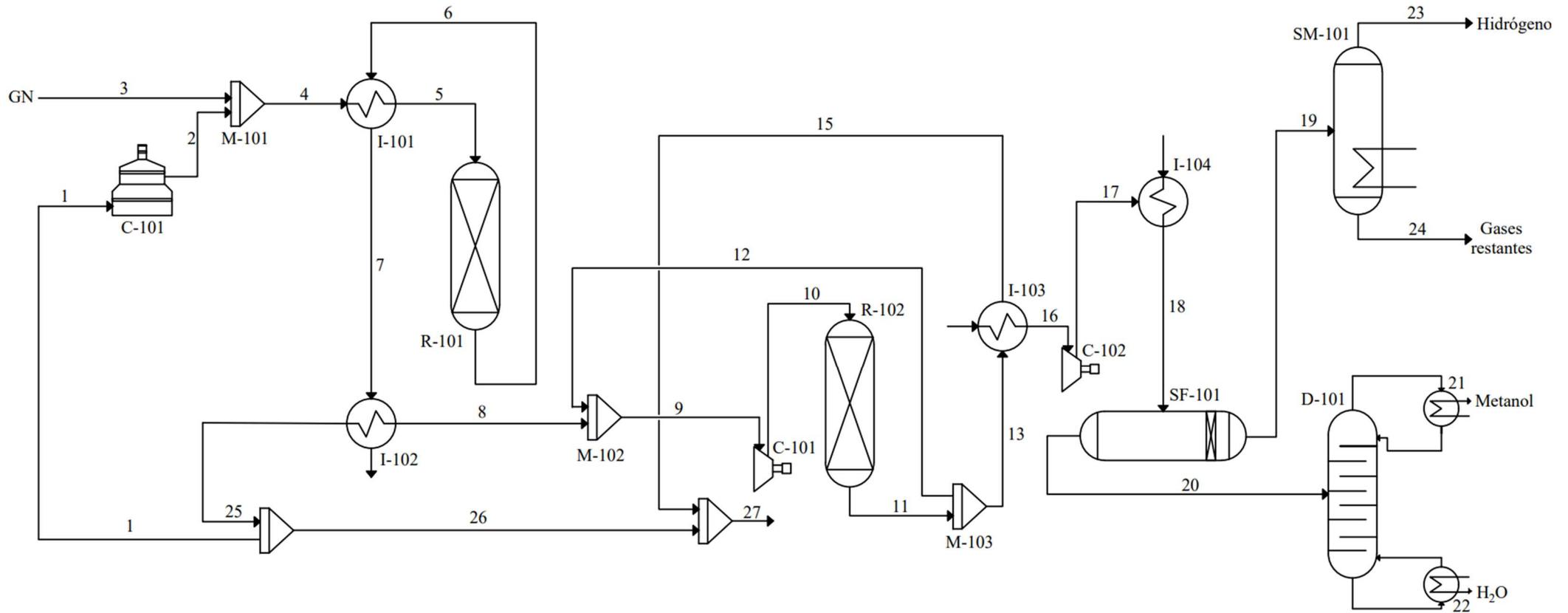
13. ANEXO D: AMEF DEL REACTOR DE REFORMACION DE VAPOR DE LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE METANOL A PARTIR DE GAS NATURAL

Etapa	Fallo	Efecto	Causa				NPR
Reactor multitubular de lecho fijo	Bajas temperaturas en la reacción	Falta de producto (gas de síntesis)	Baja conversión de hidrocarburos	4	7	4	112
	Baja concentración de hidrogeno después de la primera reacción	Falta de producto para la segunda reacción y formación del gas de síntesis	Fallo en la reacción del gas natural con el vapor de agua	4	4	4	64
	El catalizador se desactiva	Fallo en la reacción del reformado	Temperatura sobrepasa los valores máximos	7	7	4	196
	Temperatura contante en los lechos del reactor	Se detiene el flujo, contraflujo	Catalizador no activo	7	4	7	196
	Fallo en la segunda reacción	Baja concentración de gas de síntesis	Falta de oxígeno en la reacción	4	4	4	64
	Altas concentraciones de CO a la salida del reactor	Altas emisiones de CO y para producción de H2	Fallo en la segunda reacción	4	4	4	64
	Bajo rendimiento	Baja concentración y calidad del gas de síntesis	Presiones bajas en la entrada del reactor	4	4	4	64
	Reflujo inminente	Posible explosión del equipo	Presiones altas a la salida del reactor	10	7	7	490

14. ANEXO E: REACCIONES ENCONTRADAS EN LOS REACTORES DE LA PRODUCCIÓN DE METANOL A PARTIR DE GAS NATURAL

Etapa	Reacción
Reactor 1 Reformación a vapor	$\text{CH}_4 (\text{g}) + \text{H}_2\text{O} (\text{g}) \rightarrow \text{H}_2 (\text{g}) + \text{CO} (\text{g}) + \text{CO}_2 (\text{g})$
	$\text{CO} (\text{g}) + \text{H}_2\text{O} (\text{g}) \rightarrow \text{H}_2 (\text{g}) + \text{CO}_2 (\text{g})$
Reactor 2 Síntesis de metanol	$\text{CO} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$
	$3\text{H}_2 + \text{CO}_2 (\text{g}) \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$
	$3\text{CO}_2 (\text{g}) + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}$

15. ANEXO F: DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE METANOL A PARTIR DE GAS NATURAL



16. ANEXO G: BALANCE DE MATERIA DE LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE METANOL A PARTIR DE RESIDUOS DE MADERA

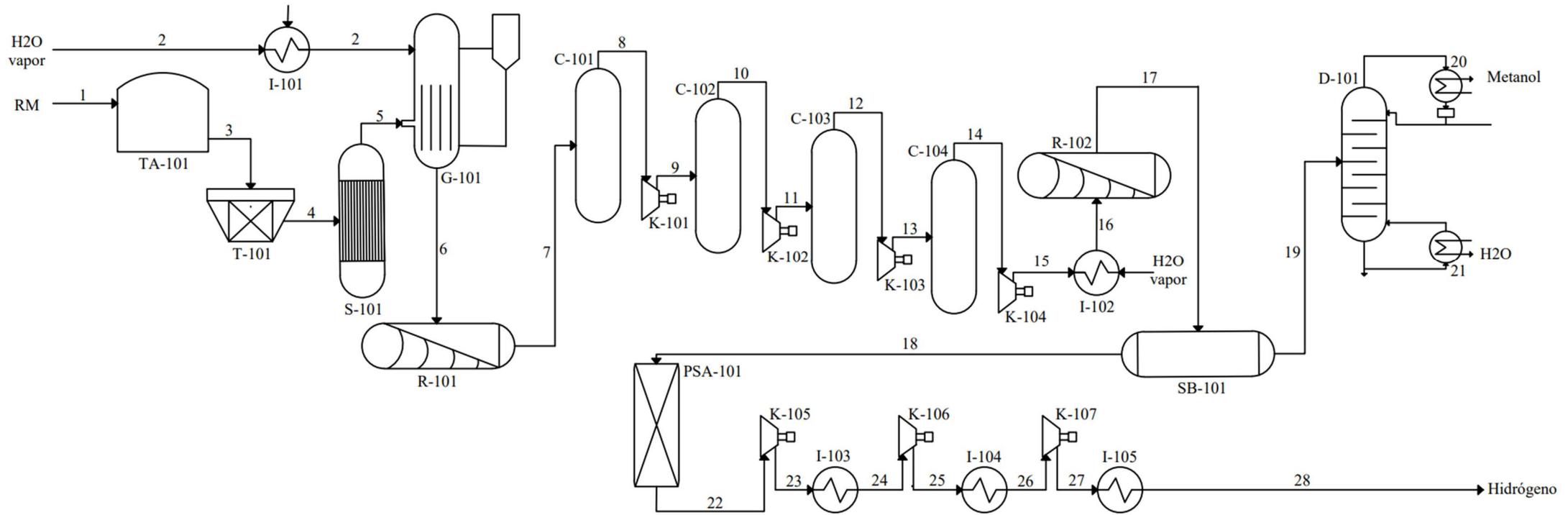
Equipo	Corriente	Flujo [kg/h]	Componentes
Triturador (T-101)	Entrada – 3	7508,2	Residuos de madera
	Salida – 4	7508,2	Residuos de madera < 15mm
Secador (S-101)	Entrada – 4	7508,2	Residuos de madera < 15mm
	Salida – 5	5005,4 2502,8	Residuos secos H ₂ O
Gasificador (G-101)	Entrada – 5	5005,4	Residuos secos
	Entrada – 2	6006,5	Vapor de agua
	Salida – 6	10411,3 600,6	Gas de síntesis Desechos
Reactor 1 (R-101)	Entrada – 6	10357,7	H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O, N ₂
	Salida – 7	10357,7	H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O, N ₂
Condensador 1 (C-101)	Entrada – 7	10357,7	H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O, N ₂
	Salida – 8	9851,7	H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O, N ₂
Condensador 2 (C-102)	Entrada – 9	9851,7	H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O, N ₂
	Salida – 10	9345,7	H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O, N ₂
Condensador 3 (C-103)	Entrada – 11	9345,7	H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O, N ₂
	Salida – 12	8839,7	H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O, N ₂
Condensador 4 (C-104)	Entrada – 13	8839,7	H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O, N ₂
	Salida – 14	8333,7	H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O, N ₂
Reactor 2 (R-102)	Entrada – 16	8333,7	H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O, N ₂
	Salida – 17	8333,7	H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O, N ₂
Separador bifásico (SF-101)	Entrada – 17	8333,7	H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O, N ₂
	Salida – 18	7591,2	H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ OH, H ₂ O
	Salida – 19	742,5	CH ₃ OH, H ₂ O
Absorción (PSA-101)	Entrada – 18	7591,2	H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ OH, H ₂ O

	Salida – 22	621,5	H ₂
Destilador (D-101)	Entrada – 19	742,5	CH ₃ OH, H ₂ O
	Salida – 20	678,11	CH ₃ OH
	Salida – 21	64,42	H ₂ O

17. ANEXO H: AMEF DEL REACTOR DE REFORMACION DE VAPOR DE LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE METANOL A PARTIR DE RESIDUOS DE MADERA

Etapa	Fallo	Efecto	Causa				NPR
Gasificador - Formación del gas de síntesis	Alta temperatura en el gasificador	Concentraciones excesivas de N2	Mayor flujo de residuos madereros	4	7	4	112
	Alta temperatura en el gasificador	Altas presiones en el gasificador	Mayor flujo de vapor de agua	7	4	4	112
	Alta temperatura en el gasificador	Posible explosión del equipo	Altas temperaturas en la entrada de los residuos	10	1	4	40
	Bajas temperaturas en el gasificador	Menor presión, el producto no combustiona de manera efectiva	Menor flujo de reactivos, bajas temperaturas en los reactivos	4	4	4	64
	Alta presión en el gasificador	Fuga de gas	Bloqueo en la tubería de salida	10	1	4	40
	Alta presión en el gasificador	Cambio de las concentraciones en los productos	Mayor flujo en los reactivos	4	7	4	112
	Baja presión en el gasificador	Combustión incompleta	Fugas	4	4	4	64
	Altas cantidades de chips de madera	No se da la gasificación	Fallo en las válvulas	4	7	7	196
	Exceso de humedad en la biomasa	Aumento de temperatura	Deficiencia en el proceso de secado	7	7	7	343
	Incendio en el flujo de salida de desechos	Explosión del equipo	Inicio de una chispa en el flujo de salida	10	4	7	280

18 ANEXO I: DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE METANOL A PARTIR DE RESIDUOS DE MADERA



**19 ANEXO J: PLANTA DE METANOL A PARTIR DE GAS NATURAL -
EVALUACIÓN ECONÓMICA – MÉTODO FACTORIAL DETALLADO**

Equipo	Unidades	a	b	S	n	Ce	Ce Actual
Mezclador	driver power, kW	11000	420	152,33	1,5	800636,93	1365064,2
Reactor adibatico lecho fijo	volumen, m3	14000	15400	1	0,7	29400	50126,201
Compresor	potencia, kW	240000	1,33	450	1,5	252696,1	430839,99
Contenedor Metanol	masa carcasa, kg	-10000	600	9188,325	0,6	133249,48	227186,75
Destilador de platos	m	100	120	2,4	2	791,2	1348,9745
Columna de destilacion fraccionada	kg	-10000	600	29533,071	0,6	278626,64	475050,86
Intercambiador de calor	m2	10000	88	11,46	1	11008,48	18769,159
Contenedor GN	kg	-10000	600	62518,562	0,6	442643,86	754695,76
Separador Bifasico	kg	-10000	600	29533,071	0,6	278626,64	475050,86
Columna absorcion	kg	-10000	600	274,31054	0,6	7421,9494	12654,222
Contenedor de H	masa carcasa, kg	780	62	31181,9	0,8	244849,63	417461,97
Caldera	kg/h	4600	62	110	0,8	7263,8259	12384,626
							4240633,6

Fp	Fm	Fer	Fel	Fi	Fc	Fs	Fl	Factor
0,8	1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,1	3,2
0,8	1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,1	3,2
0,8	1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,1	3,2
0,8	1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,1	3,2
0,8	1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,1	3,2
0,8	1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,1	3,2
0,8	1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,1	3,2
0,8	1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,1	3,2
0,8	1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,1	3,2
0,8	1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,1	3,2
0,8	1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,1	3,2
0,8	1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,1	3,2
0,8	1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,1	3,2
0,8	1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,1	3,2
0,8	1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,1	3,2

Unidades	C_ISBL	OS	D&E	X	Costo capital fijo
5	21841027,6	0,3	0,3	0,3	45429337,41
28	4491307,647	0,3	0,3	0,1	8174179,918
2	2757375,939	0,3	0,3	0,1	5018424,209
1	726997,5885	0,3	0,3	0,1	1323135,611
23	99284,52386	0,3	0,3	0,1	180697,8334
1	1520162,742	0,3	0,3	0,1	2766696,191
4	240245,2401	0,3	0,3	0,1	437246,337
1	2415026,447	0,3	0,3	0,1	4395348,134
1	1520162,742	0,3	0,3	0,1	2766696,191
2	80987,02154	0,3	0,3	0,1	147396,3792
1	1335878,318	0,3	0,3	0,1	2431298,539
1	39630,80275	0,3	0,3	0,1	72128,06101
	37068086,61				73142584,81

**20 ANEXO K: PLANTA DE METANOL A PARTIR DE GAS NATURAL -
EVALUACIÓN ECONÓMICA – CALCULO DE EQUIPOS**

	tW	P	Di	S	E	L	De	Shell Mass (S)	
Contenedor Metanol	7,2695551		0,4	5000	137,8	1	10029	5014,5391	9188,324969
Columna de destilacion fraccionac	49,247795		3,56	2400	88,881	1	9550	2498,4956	29533,07112
Contenedor GN	48,659723		1,71	5000	88,881	1	10029	5097,3194	62518,56175
Separador Bifasico	49,247795		3,56	2400	88,881	1	9550	2498,4956	29533,07112
Columna absorcion	1,3624524		0,1013	2000	74,412	1	4000	2002,7249	274,3105405

**21 ANEXO L: PLANTA DE METANOL A PARTIR DE GAS NATURAL -
EVALUACIÓN ECONÓMICA – INVERSION DE MATERIAS PRIMAS**

Materia Prima	
Gas natural	420,5 kg/h
	70644 kg/2semanas
	77,871588 ton/2semanas
	7064,4 \$/2semanas
Vapor de agua	1279,8 kg/h
	215006,4 kg/2semanas
	215,0064 m3/2semanas
	165,52474 \$/2semanas

Inventario de materias primas	
Gas natural	7064,4 \$/2semanas
Vapor de agua	165,52474 \$/2semanas
Catalizador	817,49547 \$/2semanas
Costo total 2 semanas	8047,4202 \$/2semanas
Costo total anual	209232,93 \$/año

Costos extras	
Electricidad	0,57 \$ - kW/h
Uso	3767 kw/h
	2147,19 \$/h
Transporte	18147,8 \$/año
Catalizador	676,6119 kg/año
	21313,275 \$/año
	817,49547 \$/2 semanas

**22 ANEXO M: PLANTA DE METANOL A PARTIR DE GAS NATURAL -
EVALUACIÓN ECONÓMICA – INGRESOS**

Ingresos				
			Precio - 29,25	
	Producción	Unidad	Precio	Unidad
Metanol	7514065,2	L/año	29,25	\$/gal
	1984283,6	gal/año	58040296,47	\$/año
Hidrógeno	600673,2	Kg/año	2,5	\$/kg
Total			1501683	\$/año
			Precio - 6,41	
	Producción	Unidad	Precio	Unidad
Metanol	7514065,2	L/año	6,41	\$/gal
	1984283,6	gal/año	12719258,13	\$/año
Hidrógeno	600673,2	Kg/año	2,5	\$/kg
Total			1501683	\$/año
		Ing Total	14220941,13	

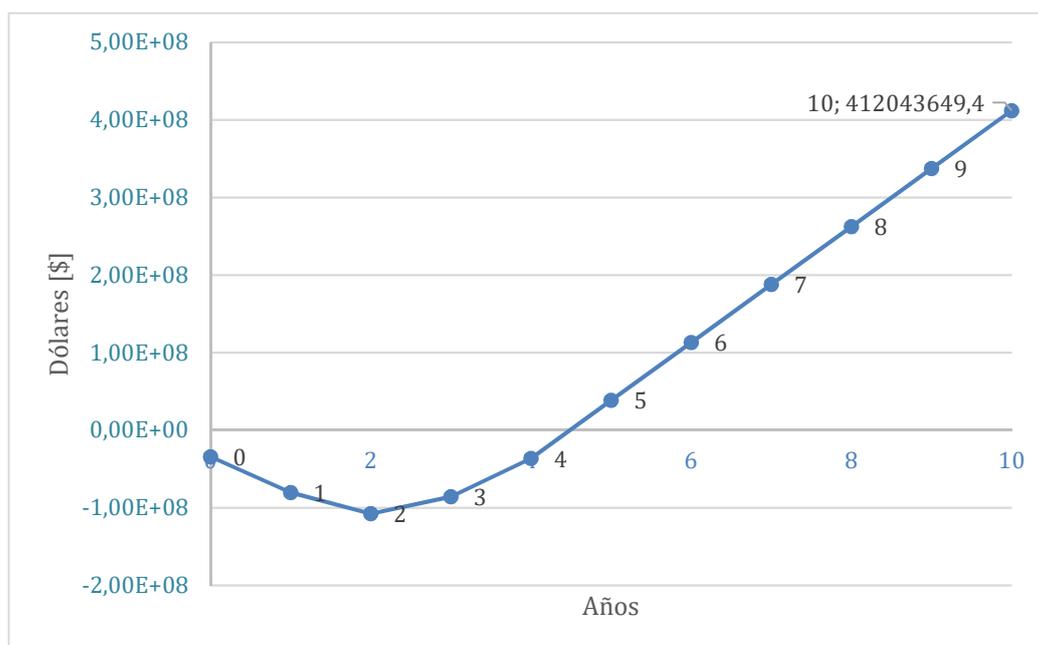
Ingresos		
1	Ingresos netos	59541979
2	Margen bruto	59332747
3	Beneficio bruto	46190298
4	Beneficio neto	37854421

**23 ANEXO N: PLANTA DE METANOL A PARTIR DE GAS NATURAL -
EVALUACIÓN ECONÓMICA – RESUMEN DE COSTOS**

Resumen de Costos		
1	Costo de equipos	4240633,598
2	ISBL	37068086,61
3	OSBL	14827234,65
4	Ingeniería y construcción	3706808,661
5	Imprevistos	18534043,31
6	Inv capital fijo	73142584,81
7	VCOP	9632072,925
8	Csop	5000
9	Csup	1250
10	Costos salariales directos	2500
11	Mantenimiento	1112042,598
12	Impuesto propiedad	3706808,661
13	Alquiler terreno	518953,2126
14	Gastos generales	1116105,098
15	Medioambiental	518953,2126
16	CCOP	13351681,59
17	Cmp 2 semanas	8047,420211
18	CCOP 2 semanas	513526,2149
19	CCOP 1 semana	256763,1074
20	CCOP 4 semanas	1027052,43
21	Cmp 4 semanas	17704,32446
22	Inventario repuestos	518953,2126
23	Capital de trabajo	2340437,225
	Total	88834703,62
	FCOP	3719608,661

24 ANEXO O: PLANTA DE METANOL A PARTIR DE GAS NATURAL - EVALUACIÓN ECONÓMICA – DIAGRAMA DE FLUJO DE CAJA

Año	Egresos	Ingresos	Flujo de caja
0	21942775	0	-21942775,44
1	29257034	0	-51199809,37
2	30892443	17862594	-64229658,73
3	8535645,1	29770990	-42994314,12
4	13351682	59541979	3195983,759
5	13351682	59541979	49386281,64
6	13351682	59541979	95576579,53
7	13351682	59541979	141766877,4
8	13351682	59541979	187957175,3
9	13351682	59541979	234147473,2
10	13351682	59541979	280337771,1



Se puede apreciar el diagrama de flujo de cajas de la planta de producción de metanol a partir de gas natural, en donde se puede observar que en los primeros 3 años del funcionamiento de la planta esta generará pérdidas. Sin embargo, a partir del cuarto año esta comienza a recuperar su inversión, esto sugiere que el proceso es rentable en un periodo de 4 años después de empezar el funcionamiento de este

**25 ANEXO P: PLANTA DE METANOL A PARTIR DE GAS NATURAL -
EVALUACIÓN ECONÓMICA – VAN Y TIR**

Año	Beneficio bruto [MM\$]	Cargas de depreciación n Di [MM\$]	Ingresos gravables [MM\$]	Impuestos pagados [MM\$]	Flujo de caja [MM\$]	Factor de descuento (1+i) ⁻ⁿ	Valor actual del CF [MM\$]
0	0	0	0	0	-114,3712	1	-114,3712
1	46,190298	14,29	31,900298	0	46,190298	0,88	40,52
2	48,374401	24,49	23,884401	11,165104	37,209296	0,77	28,63
3	48,374401	17,49	30,884401	8,3595402	40,01486	0,67	27,01
4	48,374401	12,49	35,884401	10,80954	37,56486	0,59	22,24
5	48,374401	8,93	39,444401	12,55954	35,81486	0,52	18,60
6	48,374401	8,92	39,454401	13,80554	34,56886	0,46	15,75
7	48,374401	8,93	39,444401	13,80904	34,56536	0,40	13,81
8	48,374401	4,46	43,914401	13,80554	34,56886	0,35	12,12
9	48,374401	0	48,374401	15,37004	33,00436	0,31	10,15
10	48,374401	0	48,374401	16,93104	31,44336	0,27	8,48
						VAN	82,94
						Interés	0,14

Año	Beneficio bruto [MM\$]	Cargas de depreciación n Di [MM\$]	Ingresos gravables [MM\$]	Impuestos pagados [MM\$]	Flujo de caja [MM\$]	Factor de descuento (1+i) ⁻ⁿ	Valor actual del CF [MM\$]
0	0	0	0	0	-114,3712	1	-114,3712
1	48,374401	14,29	34,084401	0	48,374401	0,7475222	36,16
2	48,374401	24,49	23,884401	11,92954	36,44486	0,5587894	20,37
3	48,374401	17,49	30,884401	8,3595402	40,01486	0,4177074	16,71
4	48,374401	12,49	35,884401	10,80954	37,56486	0,3122456	11,73
5	48,374401	8,93	39,444401	12,55954	35,81486	0,2334105	8,36
6	48,374401	8,92	39,454401	13,80554	34,56886	0,1744795	6,03
7	48,374401	8,93	39,444401	13,80904	34,56536	0,1304273	4,51
8	48,374401	4,46	43,914401	13,80554	34,56886	0,0974973	3,37
9	48,374401	0	48,374401	15,37004	33,00436	0,0728814	2,41
10	48,374401	0	48,374401	16,93104	31,44336	0,0544804	1,71
						TIR	-3,01
						Interés	0,337753
						% TIR	33%

26 ANEXO Q: PLANTA DE METANOL A PARTIR DE RESIDUOS DE MADERA - EVALUACIÓN ECONÓMICA – METODO FACTORIAL DERALLADO

Equipo	Unidades	a	b	S	n	Ce	Ce actual
Reactor	volumen, m ³	14000	15400	1	0,7	29400	50126,20142
Condensador	flujo L/seg	61000	650	4249,86	0,9	1258983	2146531,172
Contenedor H	masa carcasa, kg	-2500	200	31182	0,6	96896,7	165206,2701
Contenedor CH4O	masa carcasa, kg	-10000	600	9188,4	0,6	133250	227187,8894
Compresor	potencia, kW	240000	1,33	450	1,5	252696	430839,9905
Destilador Platos	diámetro, m	100	120	2,4	2	791,2	1348,974509
Destilador columna	masa carcasa, kg	-10000	600	29533,1	0,6	278627	475050,857
Absorción por oscilación	masa carcasa, kg	-10000	600	3439,61	0,6	69443,2	118398,818
Gasificador	masa carcasa, kg	14000	15400	12,56	0,7	104534	178228,256
Filtro	Capacidad, m ³	76000	54000	1,1	0,5	132636	226140,2279
Intercambiador	area m ²	10000	88	11,45	1	11007,6	18767,65901
Silo	Capacidad, m ³	5700	700	2293,35	0,7	163253	278342,5482
Trituradora	kg/h	3000	390	3754	0,5	26895,3	45855,68596
Secador rotativo	area m ²	-7400	4350	14,4	0,9	40575,1	69179,37015
						2598988	4431203,92

fp	fm	fer	fel	fi	fc	fs	fl	Factor
0,8	1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,1	3,2
0,8	1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,1	3,2
0,8	1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,1	3,2
0,8	1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,1	3,2
0,8	1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,1	3,2
0,8	1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,1	3,2
0,8	1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,1	3,2
0,8	1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,1	3,2
0,8	1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,1	3,2
0,6	1	0,5	0,2	0,3	0,3	0,2	0,1	3,2
0,8	1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,1	3,2
0,8	1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,1	3,2
0,2	1	0,6	0,15	0,2	0,2	0,1	0,005	2,455
0,2	1	0,6	0,15	0,2	0,2	0,1	0,005	2,455
0,2	1	0,6	0,15	0,2	0,2	0,1	0,005	2,455

Unidades	C ISBL	OS	D&E	X	Costo capital fijo
28	4491307,6	0,3	0,3	0,1	8174179,918
5	34344499	0,3	0,3	0,1	62506987,73
1	528660,06	0,3	0,3	0,1	962161,3168
1	727001,25	0,3	0,3	0,1	1323142,268
7	9650815,8	0,3	0,3	0,1	17564484,73
8	34533,747	0,3	0,3	0,1	62851,42032
1	1520162,7	0,3	0,3	0,1	2766696,191
2	757752,44	0,3	0,3	0,1	1379109,432
10	5703304,2	0,4	0,25	0,1	10779244,92
2	1447297,5	0,3	0,3	0,1	2634081,375
5	300282,54	0,3	0,3	0,1	546514,2302
1	683330,96	0,4	0,2	0,1	1243662,34
2	225151,42	0,4	0,2	0,1	409775,5808
13	2207859,6	0,4	0,2	0,1	4018304,469
	62621959				114371195,9

**27 ANEXO R: PLANTA DE METANOL A PARTIR DE RESIDUOS DE
MADERA - EVALUACIÓN ECONÓMICA – CALCULO DE EQUIPOS**

	tW	P	Di	S	E	L	De	Shell mass
Tanque H2	33,43729717	1,77	3318	88,881	1	10962	3384,874594	31181,95967
Tanque CH4	7,269555103	0,4	5000	137,8	1	10029	5014,53911	9188,324969
Columna Destilación	49,24779526	3,56	2400	88,881	1	9550	2498,495591	29533,07112
PSA	1,362452425	0,1013	2000	74,412	1	4000	2002,724905	274,3105405
Gasificador	1,362452425	0,1013	2000	74,412	1	4000	2002,724905	274,3105405

28 ANEXO S: PLANTA DE METANOL A PARTIR DE RESIDUOS DE MADERA - EVALUACIÓN ECONÓMICA – INVERSIÓN DE MATERIAS PRIMAS

Materia Prima		
Madera	7508,21	kg/h
	1261379,28	kg/ 2semana
	1390,430994	ton/ 2 semanas
	13904,30994	precio 2 semanas
Agua	1261379,28	kg/ 2 semanas
	1261,37928	m3/ 2 semanas
	914,6130816	precio 2 semanas

Inventario de materias primas		
Madera	13904,30994	\$/2semanas
Vapor de agua	914,6130816	\$/2semanas
Catalizador	2854,626923	\$/2semanas
Costo total 2 semanas	17673,54995	\$/2semanas
costo total anual	459512,2986	\$/año

Costos extras		
Electricidad	0,57	1kwh
Uso	4424,3	kw/h
	2521,851	\$/h
Transporte	52901,09498	\$/semana
	2750856,939	\$/año
Catalizador	2356,2	kg/año
	74220,3	\$/año

29 ANEXO T: PLANTA DE METANOL A PARTIR DE RESIDUOS DE MADERA - EVALUACIÓN ECONÓMICA – INGRESOS

Ingresos				
	Produccion		precio	
Metanol	7333634,07	L/año	29,25	\$/gal
	1937340,78	gal/año	56667218	\$/año
Hidrógeno	5444701	kg/año	2,5	\$/kg
			13611753	\$/año
	Produccion		precio	
Metanol	7333634,07	L/año	6,4166957	\$/gal
	1937340,78	gal/año	12431326	\$/año
Hidrógeno	5444701	kg/año	2,5	\$/kg
			13611753	\$/año
		ing total	26043079	

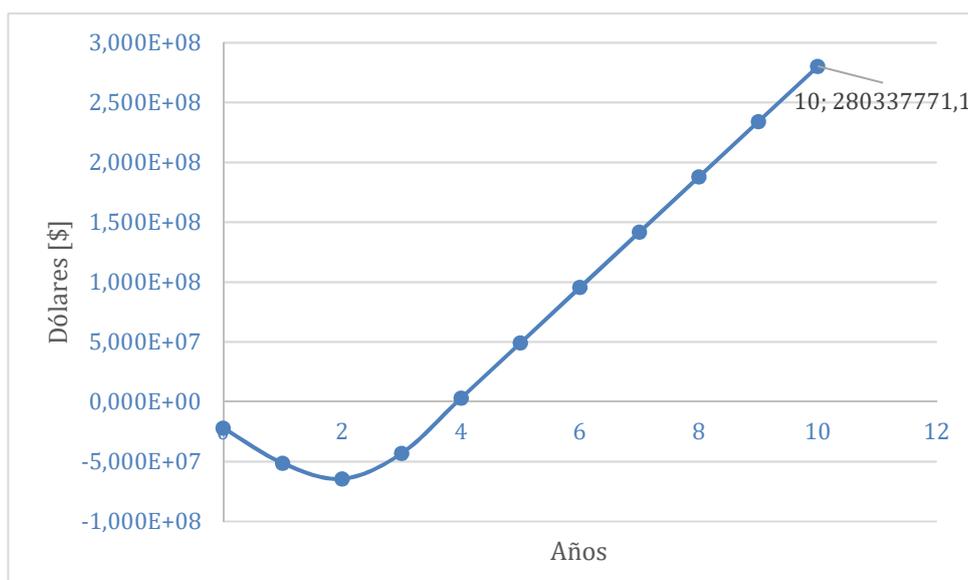
Ingresos		
1	70278970	Ingresos netos
2	70278970	margen bruto
3	49747898	Beneficio bruto
4	39908842	Beneficio neto

30 ANEXO U: PLANTA DE METANOL A PARTIR DE RESIDUOS DE MADERA - EVALUACIÓN ECONÓMICA – RESUMEN DE COSTOS

Resumen de Costos		
1	costo equipos	3023925,4
2	ISBL	62621959
3	OSBL	25048783
4	Ingeniería y construcción	6262195,9
5	Imprevistos	31310979
6	Inv Capital Fijo	114371196
7	VCOP	14256077
8	Csop	5000
9	Csup	1250
10	Costos salariales directos	2500
11	Mantenimiento	1878658,8
12	Impuesto propiedad	626219,59
13	Alquiler terreno	876707,42
14	Gastos generales	1882721,3
15	Medioambiental	876707,42
16	CCOP	20531072
17	Cmp 2 semanas	17673,55
18	CCOP 2 semanas	789656,63
19	CCOP 1 semana	394828,32
20	CCOP 4 semanas	1579313,3
21	Cmp 4 semanas	38881,81
22	inventario repuestos	876707,42
23	Capital de trabajo	3693526,3
	Total	138595795
	FCOP	6274995,9

31 ANEXO V: PLANTA DE METANOL A PARTIR DE RESIDUOS DE MADERA - EVALUACIÓN ECONÓMICA – FLUJO DE CAJA

Año	Egresos	Ingresos	Flujo de caja
0	34311358,8	0	-34311358,78
1	45748478,4	0	-80059837,14
2	48556703,9	21083691	-107532850
3	13403034,2	35139485	-85796398,95
4	20531072,5	70278970	-36048501,1
5	16200037,4	90882063	38633523,98
6	16200037,4	90882063	113315549,1
7	16200037,4	90882063	187997574,1
8	16200037,4	90882063	262679599,2
9	16200037,4	90882063	337361624,3
10	16200037,4	90882063	412043649,4



Se puede apreciar el diagrama de flujo de cajas de la planta, en el cual se observa que en los primeros 4 años del funcionamiento de la planta esta generará pérdidas. Sin embargo, a partir del quinto año esta comienza a recuperar su inversión, esto sugiere que el proceso es rentable en un periodo de 5 años después de empezar el funcionamiento de este.

**32 ANEXO X: PLANTA DE METANOL A PARTIR DE RESIDUOS DE
MADERA - EVALUACIÓN ECONÓMICA – VAN Y TIR**

Año	Beneficio bruto [MMS]	Cargas de depreciación Di [MMS]	Ingresos gravables [MMS]	Impuestos pagados [MMS]	Flujo de caja [MMS]	Factor de descuento (1+i) ⁻ⁿ	Valor actual del CF [MMS]
0	0	0	0	0	-114,37	1	-114,3711959
1	49,7479	14,29	35,45789786	0	49,7479	0,88	43,64
2	49,8221	24,49	25,33211816	12,41026425	37,4119	0,77	28,79
3	49,8221	17,49	32,33211816	8,866241355	40,9559	0,67	27,64
4	49,8221	12,49	37,33211816	11,31624135	38,5059	0,59	22,80
5	49,8221	8,93	40,89211816	13,06624135	36,7559	0,52	19,09
6	49,8221	8,92	40,90211816	14,31224135	35,5099	0,46	16,18
7	49,8221	8,93	40,89211816	14,31574135	35,5064	0,40	14,19
8	49,8221	4,46	45,36211816	14,31224135	35,5099	0,35	12,45
9	49,8221	0	49,82211816	15,87674135	33,9454	0,31	10,44
10	49,8221	0	49,82211816	17,43774135	32,3844	0,27	8,74
						VAN	89,58
						Interés	0,14

Año	Beneficio bruto [MMS]	Cargas de depreciación Di [MMS]	Ingresos gravables [MMS]	Impuestos pagados [MMS]	Flujo de caja [MMS]	Factor de descuento (1+i) ⁻ⁿ	Valor actual del CF [MMS]
0	0	0	0	0	-114,37	1	-114,3711959
1	49,8221	14,29	35,53211816	0	49,8221	0,747522152	37,24
2	49,8221	24,49	25,33211816	12,43624135	37,3859	0,558789368	20,89
3	49,8221	17,49	32,33211816	8,866241355	40,9559	0,417707431	17,11
4	49,8221	12,49	37,33211816	11,31624135	38,5059	0,312245558	12,02
5	49,8221	8,93	40,89211816	13,06624135	36,7559	0,233410471	8,58
6	49,8221	8,92	40,90211816	14,31224135	35,5099	0,174479498	6,20
7	49,8221	8,93	40,89211816	14,31574135	35,5064	0,13042729	4,63
8	49,8221	4,46	45,36211816	14,31224135	35,5099	0,097497288	3,46
9	49,8221	0	49,82211816	15,87674135	33,9454	0,072881383	2,47
10	49,8221	0	49,82211816	17,43774135	32,3844	0,054480448	1,76
						TIR	0,00
						Interés	0,337752998
						% TIR	34%

33 ANEXO Y: COMPARACIÓN DE CRITERIOS IMPORTANTES DENTRO DE CADA UNO DE LOS PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE METANOL A PARTIR DE DIFERENTES MATERIAS PRIMAS

Criterios	Procesos	
	Planta de producción de metanol a partir de gas natural	Planta de producción de metanol a partir de residuos de madera
Disponibilidad de la materia prima	5	4
Costo de la materia prima	5	3
Rendimiento	5	4
Complejidad del proceso	4	4
Seguridad y fiabilidad de la planta	3	5
Costos de producción	4	3
Rentabilidad del proceso	5	5
Total	31/35	28/35

Se pueden observar los criterios estudiados, así como los números asignados en cada uno para las diferentes plantas. Como primer criterio está la disponibilidad de la materia prima, en donde 5 corresponde a la amplia disponibilidad y fácil obtención de la materia prima mientras que 1 corresponde a la poca disponibilidad y difícil obtención de la materia prima. Por otro lado, está el costo de la materia prima, en donde 5 corresponde a “poco costoso”, mientras que 1 corresponde a “muy costoso”.

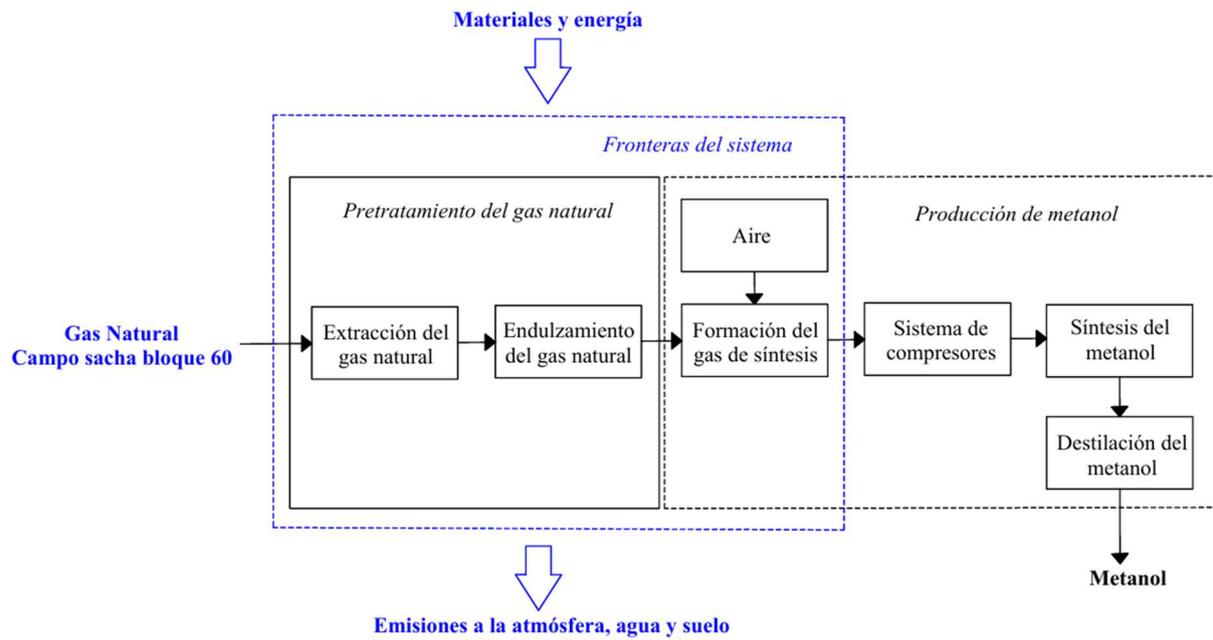
Esta el rendimiento, siendo este la cantidad de metanol producido por unidad de materia prima consumida, en este caso el 5 corresponde a un “alto rendimiento” mientras que 1 corresponde a un “bajo rendimiento”. Para la complejidad del proceso se evalúa al 5 como “baja complejidad” mientras que 1 corresponde a “alta complejidad”.

Esta la seguridad y fiabilidad del proceso, en donde se involucra la confiabilidad operativa del proceso y la capacidad de este de poder garantizar la seguridad de los trabajadores. En este caso se toma en cuenta al 5 como “altamente seguro y fiable” mientras que al 1 como “inseguro

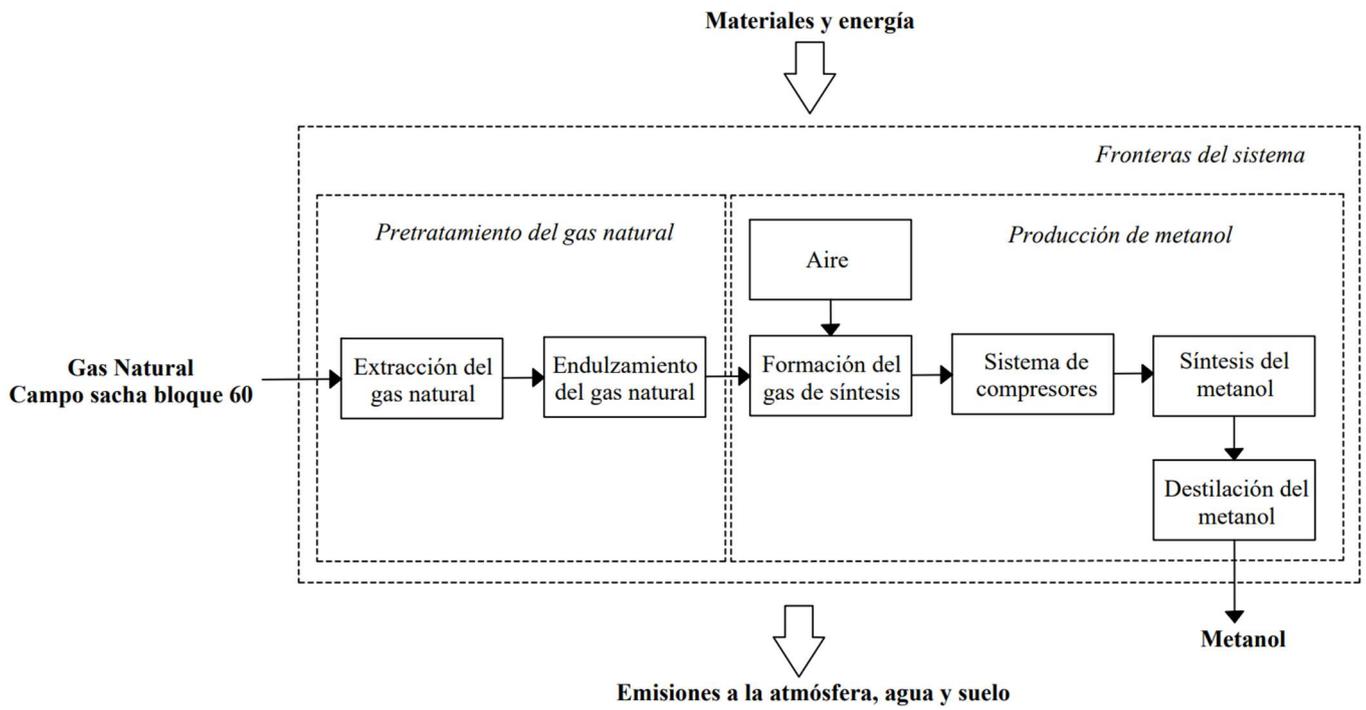
y poco fiable”. Seguido está el costo de producción de proceso, en donde ingresan los costos de materia prima, transporte, electricidad, etc. En este caso, 5 corresponde a “bajos costos de producción” mientras que 1 a “altos costos de producción”. Por último, está la rentabilidad del proceso, en donde 1 corresponde a ‘no-rentable” mientras que el 5 corresponde a “Rentable”.

Al comparar ambos procesos se concluye un 31/35 para la planta de producción de metanol a partir de gas natural, esto nos indica que dicho proceso tiene mejor rendimiento, fiabilidad y rentabilidad que la planta de producción de metanol a partir de residuos de madera

34 ANEXO Z: FLUJO DE PROCESOS Y LÍMITE DEL SISTEMA PARA EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA PARA LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE METANOL A PARTIR DE GAS NATURAL.



35 ANEXO A1: FLUJO DE PROCESO Y LÍMITE DEL SISTEMA DE LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE METANOL A PARTIR DE GAS NATURAL.



36 ANEXO B1: INGRESOS Y SALIDAS TOMADAS EN CUENTA EN LA ELABORACIÓN DEL INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA.

Ingresos				
Flujo	Categoría	Subcategoría	Unidad	Resultados
Vapor de agua	Emisión al aire	alta densidad de población	kg	1279,8
Electricidad, gas natural, en central eléctrica.	gas natural	plantas de energía	MJ	13561,2
Gas natural; 44,1 MJ/kg	Recurso	en el suelo	MJ	18550,5
Transporte, camión >32t, EURO3	sistemas de transporte	Camino camión cisterna	t*km	81,6144
Salidas				
Flujo	Categoría	Subcategoría	Unidad	Resultados
Dióxido de carbono	Emisión al aire	alta densidad de población	kg	4,89463
Monóxido de carbono	Emisión al aire	alta densidad de población	kg	1,17516
Hidrógeno	Emisión al aire	alta densidad de población	kg	0,0695
Metanol	Emisión al aire	alta densidad de población	kg	3,78999
Nitrógeno	Emisión al aire	alta densidad de población	kg	26,74629

**37 ANEXO C1: IMPACTOS AMBIENTALES DENTRO DEL PROCESO
PRODUCCIÓN DE METANOL A PARTIR DE GAS NATURAL.**

Categoría de impacto	Unidad de referencia	Resultado
Potencial de acidificación - media de Europa	kg SO ₂	0
Cambio climático - GWP100	kg CO₂	17,127434
Agotamiento de los recursos abióticos: elementos, reservas finales.	kg	0
Agotamiento de los recursos abióticos - combustibles fósiles	MJ	18,7665
Eutrofización - genérico	kg PO₄	11,2334418
Ecotoxicidad acuática en agua dulce - FAETP inf	kg 1,4-dichlorobenzene	0
Toxicidad humana - HTP inf	kg 1,4-dichlorobenzene	0
Ecotoxicidad acuática marina - MAETP inf	kg 1,4-dichlorobenzene	0
Agotamiento de la capa de ozono: estado estacionario del PAO	kg CFC-11	0
Oxidación fotoquímica - alto Nox	kg ethylene	0,56232792
Ecotoxicidad terrestre - TETP inf	kg 1,4-dichlorobenzene	0