UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Repositorio Digital USM **https://repositorio.usm.cl**

Tesis USM TESIS de Pregrado de acceso ABIERTO

2017

ESTUDIO SOBRE EL DESARROLLO DE BIOCOMBUSTIBLES EN CHILE E INSTALACIÓN DE MECANISMO PARA MEDIR PROPENSIÓN A LA FORMACIÓN DE HOLLÍN DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

ALARCÓN VILLARROEL, GUSTAVO ARIEL

http://hdl.handle.net/11673/23664

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS

VALPARAÍSO - CHILE

ESTUDIO SOBRE EL DESARROLLO DE BIOCOMBUSTIBLES EN CHILE E INSTALACIÓN DE MECANISMO PARA MEDIR PROPENSIÓN A LA FORMACIÓN DE HOLLÍN DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

GUSTAVO ALARCÓN VILLARROEL

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA : SR. ANDRES FUENTES

PROFESOR CORREFERENTE : SR. GONZALO SEVERINO

AGOSTO - 2017

AGRADECIMIENTOS

En esta etapa cúlmine, agradezco al profesor Andrés Fuentes por darme la oportunidad de formar parte de este proyecto de investigación, a Gonzalo Severino y Gonzalo Olivares por siempre tener la mejor disposición a responder mis dudas y por tratarme como un profesional más del grupo.

Quiero agradecer a quienes me han acompañado todo este tiempo, a mis futuros colegas con quien he compartido más de una tarde de estudio, ayudándome a ganarle el *gallito* a cada una de las asignaturas. Pues el conocimiento es útil solo cuando se comparte con otros.

Quiero agradecer a quienes, sin entender mucho sobre los contenidos de la carrera, me han dado una palabra de apoyo y un gesto de cariño para seguir adelante. A mis padres Lucia y Oscar por darme todo lo que necesité, a mis hermanos; Karim por motivarme a ser cada día mejor, y a Felipe por ser un ejemplo de perseverancia. También a mi compañera incondicional Javiera que siempre estuvo junto a mí, soportando en esas semanas de estrés y compartiendo buenas aventuras juntos. Y por supuesto por darme otro motivo por luchar y salir adelante, nuestra querida Emma.

Agradezco a mis amigos de plan común, aquellos *sangre sucia* con quienes he formado un fuerte lazo de amistad. También a mis amigos *andinos*, que a pesar de los años siguen siendo los mismos, espero que sigan así. Gracias por tantos momentos de compañerismo y alegría.

Como seres sociales, la creación de vínculos nos ayuda a enfrentar desafíos, gracias a estos vínculos podemos conocer nuestras capacidades, podemos valorarnos y ser mejores cada día.

A todos ellos, muchas gracias.

Dedicado a Emma, hija mía esto es por y para ti.

Por nuestro futuro y por nuestros sueños.

RESUMEN

En el siguiente trabajo se determinó que Chile posee una bajo nivel de producción de biocombustibles líquidos, en donde lo que más se produce es biodiésel proveniente de aceite vegetal utilizado en la industria alimenticia. Se tienen avances significativos en materia de investigación de biocombustibles de segunda y tercera generación avalados por financiamiento a emprendedores CORFO y CONICYT. Debido a los niveles de productividad y a los costos asociados, hay pocos motivos para ingresar al mercado como productor de biocombustibles de primera generación, uno estos motivos es el gran dinamismo que tiene la industria y la posibilidad que surjan nuevas tecnologías más baratas en un futuro cercano. Los cultivos más favorables en Chile para la producción de biocombustibles son el maíz (para etanol) y la maravilla (para biodiésel), sin embargo existen otras especies que requieren de mayor análisis como la *jathropa curcas.*

En la producción y uso de biocombustibles, los aspectos ambientales son positivos, principalmente por la reducción de gases de efecto invernadero, sin embargo se debe cuidar la biodiversidad y el bosque nativo, y regularizar el uso de cultivos transgénicos. Los aspectos sociales no están a favor ni en contra, puesto que el número de empleos que se generan son pocos, además se puede fomentar el desarrollo de la economía rural pero la concentración de las ganancias (si las hay) beneficiará en mayor medida a los dueños de los extensos territorios y no a la población propiamente tal. Los aspectos técnicos juegan en contra, considerando la variedad de climas y la poca disponibilidad de tierras, además de los cambios estructurales que se deben realizar a la red de distribución actual de combustibles.

Considerando la poca información que se tiene respecto a la formación de hollín de biocombustibles líquidos, se planificó la construcción de un dispositivo experimental que permita el almacenamiento, inyección, vaporización, calentamiento post-vaporización y

combustión de biocombustibles líquidos, con el fin de analizar la propensión que tienen a formar hollín. Se determinó lo siguiente:

-Se requiere la compra de un módulo de suministro de vapor de la empresa *Bronkhorst* para la vaporización del biocombustible, debido a que la combustión en estado gaseoso representa de mejor manera la realidad.

-No es posible utilizar una bomba peristáltica para la inyección del fluido líquido. La mejor forma de hacerlo es a través de tanques presurizados diseñados para soportar presiones cercanas a 2 *bar*.

-Se utilizara una manguera calefaccionada (*heated line*) con control de temperatura, para evitar la condensación de la mezcla evaporada.

-Se utilizará un quemador tipo Gülder modificado, que permite la creación de llamas de difusión laminar, en donde para evitar la condensación de la mezcla se utiliza una cinta de resistencia eléctrica en el interior del quemador y una cubierta que proteja y aísle el quemador del exterior.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN 1

1.1 Antecedentes 1

1.2 Motivación 3

1.2 Objetivos 4

1.2.1. Objetivo General 4

1.2.2. Objetivos Específicos 4

2. CAPITULO I: BIOCOMBUSTIBLES EN CHILE 6

2.1 Marco Teórico 6

2.1.1 Definición de los combustibles 6

2.1.2 Clasificación de combustibles de acuerdo a su origen 6

2.1.3 Clasificación de combustibles según su grado de preparación 8

2.1.4 Clasificación de combustibles según estado de agregación 9

2.1.5 Industria del transporte en Chile 9

2.1.5.1 Transporte de pasajeros y transporte de carga 9

2.2 Matriz energética chilena 11

2.3 Biocombustibles líquidos 16

2.3.1 Bioetanol 18

2.3.1.1 Bioetanol de maíz: la planta de maíz 22

2.3.1.2 Bioetanol de maíz: proceso de obtención 24

2.3.1.3 Bioetanol de caña de azúcar: la caña de azúcar 26

2.3.1.4 Bioetanol de caña de azúcar: proceso de obtención 27

2.3.2 Biodiésel 30

2.3.2.1 Proceso de obtención de Biodiésel 34

2.4 Situación actual en Chile 41

2.5 Factores que influyen en la industria de biocombustibles 46

2.5.1 Aspectos ambientales 47

2.5.1.1 Emisión de gases 47

2.5.1.2 Bosques nativos y biodiversidad 51

2.5.1.3 Uso de recursos hídricos 51

2.5.1.4 Cultivos transgénicos 52

2.5.1.5 Otros aspectos ambientales 55

2.5.2 Aspectos sociales 56

2.5.2.1 Generación de empleos 56

2.5.2.2 Incertidumbre sobre la seguridad alimentaria 59

2.5.3 Aspectos técnicos 61

2.5.3.1 Existencia de diferentes especies y procesos productivos 61

2.5.3.2 Balance de energía 62

2.5.3.3 Estimación de costos y rentabilidad 64

2.5.3.4 Desventajas operacionales en la incorporación de biocombustibles a la red. 67

2.6 Conclusiones Capítulo I 69

3. CAPÍTULO II: PLANIFICACION Y CONSTRUCCIÓN DE APARATO EXPERIMENTAL 72

3.1 Marco teórico 74

3.1.1 Tipos de llama 74

3.1.2 Producción de hollín 75

3.1.3 Aspectos a medir de la llama de difusión 78

3.1.4 Dispositivo experimental 80

3.1.5 Sistemas de evaporación 83

3.1.5.1 Sistema de burbujeo 83

3.1.5.2 Evaporador de placa caliente 84

3.1.5.3 Mezclador y evaporador controlado (CEM) 85

3.1.6 Impulsión de líquido 86

3.1.6.1 Bomba de jeringa 87

3.1.6.2 Bomba peristáltica 87

3.1.6.3 Estanque presurizado 88

3.2 Diseño y construcción del banco experimental 89

3.3 Diseño y construcción del quemador 90

3.4 Selección del sistema de evaporación 94

3.4.1 Modulo Vaporizador 94

3.5 Selección del sistema de impulsión mediante análisis de configuraciones 99

3.5.1 Pérdidas de carga en el circuito de biocombustible 105

3.5.2 Pérdidas en el flujo de agua 109

3.5.3 Cotización de bombas 110

3.5.4 Pruebas y selección de modelos 111

3.6 Diseño y construcción de tanque presurizado 113

3.7 Funcionamiento del sistema 115

3.8 Conclusiones Capitulo II 118

4. CONCLUSION GENERAL 120

5. REFERENCIAS 122

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Triangulo de fuego en la combustión. 1

Figura 2.1: Capacidad instalada en MW al año 2015 y su descomposición. 12

Figura 2.2: Diagrama Sankey de la oferta y demanda de petróleo en Chile, año 2015. 15

Figura 2.3: Precio del barril de petróleo por año desde 1997 hasta 2016. 16

Figura 2.4: Ciclo de absorción y emisión de dióxido de carbono. 17

Figura 2.5: Rutas para obtener etanol desde distintas materias primas. 19

Figura 2.6: Producción de bioetanol en millones de litros. Fuente: OIA. 20

Figura 2.7: Producción de bioetanol en millones de litros. Fuente OIA. 21

Figura 2.8: Proceso Industrial del bioetanol de maíz. 26

Figura 2.9: Proceso productivo de etanol de caña de azúcar. 30

Figura 2.10: Curva de destilación para biodiésel de aceite de soja (verde) en comparación con las del biodiésel comercial (azul) y diésel N°2 (rojo). 32

Figura 2.11: Proceso de obtención de aceite refinado. 36

Figura 2.12: Reacción de transesterificación metílica. 37

Figura 2.13: Balance de masa en reacción de transesterificación. 38

Figura 2.14: Reacciones indeseadas que ocurren en la transesterificación. 39

Figura 2.15: Proceso productivo para la obtención de biodiésel. 40

Figura 2.16: Desglose del ACV para combustibles fósiles y biocombustibles líquidos. 48

Figura 2.17: Reducción de gases de efecto invernadero en comparación con combustibles fósiles. 50

Figura 3.1: Diagrama de flujo del funcionamiento del dispositivo experimental. 73

Figura 3.2: Esquema de una llama de difusión producida en co-corriente. 75

Figura 3.3: Procesos en la formación de hollín. 77

Figura 3.4: Esquema del montaje de dispositivo. 80

Figura 3.5: Diagrama de evaporador por sistema de burbujeo. 83

Figura 3.6: Diagrama del evaporador de placa caliente. 84

Figura 3.7: Diagrama del Mezclador y Vaporizador Controlado (CEM). 85

Figura 3.8: Funcionamiento de la bomba de jeringa. 87

Figura 3.9: Esquema de una bomba peristáltica. 88

Figura 3.10: Funcionamiento del tanque presurizado. 89

Figura 3.11: Dibujo isométrico del banco experimental (izquierda) y construcción (derecha). 90

Figura 3.12: Diseño del tubo interior del quemador. 91

Figura 3.13: Diseño del tubo exterior del quemador. 92

Figura 3.14: Diseño de la base del quemador. 92

Figura 3.15: Diseño de la funda de aislación térmica para el quemador. 93

Figura 3.16: Módulos vaporizadores. Izquierda: Evaporador y mezclador controlado (CEM). Derecha: Modulo de suministro de vapor (VDM). 95

Figura 3.17: Presión de vapor para distintos hidrocarburos. Fuente: Bronkhorst. 99

Figura 3.18: Diagrama del modelo 1. 101

Figura 3.19: Diagrama del modelo 2. 102

Figura 3.20: Diagrama del modelo 3. 103

Figura 3.21: Diagrama del modelo 4. 104

Figura 3.22: Diagrama del modelo 5. 104

Figura 3.23: Diagrama del modelo 6. 105

Figura 3.24: Puntos de referencia sobre el tablero. 108

Figura 3.25: Diseño de la tapa del tanque presurizado. 115

Figura 3.26: Vista inferior del tanque. 115

Figura 3.27: Interfaz de fluidat. 116

Figura 3.28: Esquema de funcionamiento del sistema. 117

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La forma convencional más utilizada por procesos industriales, comerciales y residenciales en la producción de energía, es la combustión. La combustión es una reacción química exotérmica que se produce entre un combustible y un agente oxidante, es decir, produce energía, generalmente, en forma de calor y luz. Es una reacción que requiere calor para iniciar, así es cómo la madera en presencia de oxígeno y aire no experimenta combustión espontánea. En la figura 1.1 se esquematizan los requerimientos de esta reacción a través del "triángulo de fuego".

Figura 1.1: Triangulo de fuego en la combustión.

En particular, la combustión de materiales fósiles es una preocupación latente de la sociedad, si bien se están desarrollando métodos renovables de energía, estos no eliminarán por completo la dependencia al consumo de combustibles fósiles. Uno de estos métodos renovables es el uso de biocombustibles, los cuales presentan ciertas ventajas en cuanto a la emisión de partículas respecto a los combustibles fósiles.

La combustión, que tiene como característica la formación de hollín, se requiere para la industria del transporte, las actividades de este sector utiliza el 34,8% de la energía total consumida en Chile en el año 2015 (Ministerio de Energía, 2015). Además, este fenómeno está presente en procesos industriales para obtener fuerza motriz e iluminación, y en el uso

doméstico para calefacción, en donde al utilizar la energía proveniente de la combustión se producen pérdidas de efectividad por el mal manejo y poco conocimiento sobre los fenómenos de transferencia de calor en los cuales está involucrado el hollín. El hollín está constituido por partículas sólidas de tamaño muy pequeño, las cuales miden aproximadamente desde 100 nanómetros hasta 5 micrómetros. Estas partículas resultantes de la combustión incompleta están compuestas, en su mayoría, por carbono impuro y pulverizado, y son generalmente de colores oscuros, otorgando el color característico al humo que emana de combustiones incompletas. Es de interés estudiar la producción de hollín en biocombustibles líquidos, ya que existe poca información sobre los factores que influyen en su formación.

En el pasado, los esfuerzos científicos procuraban conocer los mecanismos influyentes en la formación de partículas de hollín. Luego de una serie de trabajos, la línea de investigación busca incorporar nuevos aditivos y técnicas de diagnóstico que puedan entregar información sobre el desempeño de los procesos termodinámicos y químicos que se desarrollan al interior de la zona reactiva, lugar donde se sitúa la llama caracterizada por su alta sensibilidad a la temperatura.

La mayoría de los estudios llevados a cabo hasta ahora en la caracterización de la formación de hollín se han centrado en las llamas de difusión alimentados con combustibles de hidrocarburos gaseosos, como metano, etileno y propano. (Karatas & Gülder, 2012). Incluso se ha estudiado la formación de hollín bajo condiciones de micro-gravedad donde se concluye que ante la variación de la gravedad, la velocidad de formación de hollín se ve afectada (de forma directamente proporcional), no así la temperatura la cual permanece constante. (Mbainguebem, Mouangue & Bianzeube, 2015). Otros estudios recientes han abordado la formación de hollín de combustibles oxigenados y renovables, debido a sus

potenciales beneficios para ayudar a mitigar las emisiones de hollín de los dispositivos de combustión cuando estos combustibles se utilizan como aditivos. Estos estudios pusieron de manifiesto los efectos cinéticos químicos altamente no lineales en la producción de hollín de una mezcla de dos o más compuestos. (McEnally & Pfefferle, 2011).

En general, la combustión se representa a través de una llama de difusión en régimen turbulento, la cual es inestable, esto reduce los tiempos de residencia y la resolución para analizar los fenómenos de transporte y reacciones químicas de interés. Afortunadamente, existen consideraciones adecuadas que permiten analizar la combustión a través de una llama de difusión laminar.

1.2 Motivación

El presente trabajo tiene como motivación e interés fundamental, contribuir al conocimiento y aumentar la información relacionada al proceso de combustión. Si bien el estudio de la combustión a través de modelación numérica puede entregar soluciones aproximadas, éstas deben ser revisadas y validadas con información experimental. En el estudio de la llama producto de la combustión, la formación de hollín adquiere atención del mundo científico por las repercusiones que puede causar en otras variables de interés.

A pesar del consumo de combustibles líquidos, no existe información actualizada ni precisa sobre su propensión a formar hollín, por lo que se levantarán datos de nuestro propio laboratorio. Si bien, el hollín es un producto no deseado por el medio ambiente, éste es precursor de la radiación que emite la llama, siendo un parámetro para analizar la energía liberada y desempeño de la combustión. Antes de ello se deben realizar todas las acciones necesarias para la construcción, programación, calibración y certificación del sistema de inyección, vaporización y combustión de los combustibles líquidos, puros o combinados con

hidrocarburos, basándose en estudios sobre otros combustibles como el diésel (Merchan-Merchan, McCollam, & Pugliese, 2015).

Además la reciente implementación de regulaciones de emisiones de partículas más estrictas, las preocupaciones sobre el cambio climático y los gases de efecto invernadero, la necesidad de abastecer de energía a Chile de forma segura y limpia, reduciendo protagonismo a los combustibles fósiles y diversificando de la matriz energética, son factores sugieren buscar fuentes de energía renovables como los biocombustibles.

Para enfrentar esta problemática se construye un dispositivo que logre la combustión de biocombustibles líquidos previamente vaporizados, y que a la vez permita dopar de humedad el aire utilizado como oxidante.

1.2 Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Planificar y construir un mecanismo que permita introducir líquidos vaporizados, puros o mezclados, a un quemador para crear llamas de difusión laminar y poder medir su propensión a la formación de hollín, evitando la condensación del fluido a lo largo del sistema.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Comparar los tipos de biocombustibles líquidos de acuerdo a su fuente de origen; materias primas y procesos para la obtención de estos, determinando cuál de ellos tiene viabilidad de producción en Chile.

- Identificar los aspectos ambientales, sociales y técnicos que delimitan la capacidad que tiene Chile como productor de biocombustibles líquidos.

- Construir un tablero o panel que permita el anclaje de toda la instrumentación necesaria para medir la propensión a la formación de hollín de combustibles líquidos.
- Lograr introducir combustibles líquidos vaporizados, puros o mezclados con hidrocarburos, en un quemador mediante la instalación de un sistema de suministro de vapor, configurando la recepción y la inyección del fluido.
- Lograr introducir aire humedecido como comburente en un quemador mediante la instalación de un sistema de suministro de vapor, configurando la recepción y la inyección del fluido.
- Lograr el diseño y construcción de un quemador Gülder y su conexión con el sistema de vaporización.
- Realizar cotizaciones y compras de los elementos necesarios justificando científicamente las características que deben tener estos elementos.

2. CAPITULO I: BIOCOMBUSTIBLES EN CHILE

2.1 Marco Teórico

2.1.1 Definición de los combustibles

Combustible es cualquier material capaz de liberar energía cuando se oxida de forma violenta o controlada con desprendimiento de calor. Supone la liberación de energía potencial (energía de enlaces moleculares) y su transformación en una forma utilizable, ya sea directamente a través de energía térmica o mediante energía mecánica a través de motores térmicos dejando como residuo calor, residuos gaseosos como el óxidos de carbono, hidrocarburos sin quemar y óxidos de nitrógeno y partículas sólidas llamadas hollín, que a su vez, se componen de un núcleo de carbón al cual se le adhieren componentes como agua, sulfatos, hidrocarburos y azufre. Para el estudio de la combustión es necesario conocer cuáles son las clasificaciones de los combustibles con los que se trabajarán con el fin de obtener una caracterización más adecuada de ellos. Entre las formas de clasificarlos que existen, son tres las más utilizadas, de acuerdo a su origen, a su grado de preparación y su estado de agregación.

2.1.2 Clasificación de combustibles de acuerdo a su origen

La clasificación de acuerdo a su origen se refiere a los mecanismos y los elementos necesarios para obtener el combustible, de acuerdo a esto se definen combustibles fósiles y combustibles no fósiles:

Fósiles: Se llaman combustibles fósiles aquellos que se han formado a partir de las plantas y otros organismos vivos que existieron en tiempos remotos en la Tierra. El carbón en todas sus variedades, el petróleo y el gas natural son las principales formas de presentarse estos productos. En las últimas dos décadas, la proporción mundial de generación de energía

procedente de fuentes no fósiles ha disminuido del 37% (en 1990) al 33% (en 2010), en cambio, la participación de la generación de energía a partir del carbón ha aumentado del 37% al 42%. Se estima que las reservas[1] probadas de petróleo se sitúan en torno a los 1,7 billones de barriles (25,4% del total), las reservas probadas de gas convencional se estiman en alrededor de 220 billones de metros cúbicos, el equivalente a cerca de 1,4 billones de barriles de petróleo (20,9% del total), mientras que las reservas de carbón son más altas, con reservas probadas estimadas en 730 gigatoneladas, aproximadamente 3,6 billones de barriles de petróleo equivalente (53,7% del total) (Agencia internacional de energía, 2013).

No fósiles: También conocidos como biocombustibles o biocarburantes, son combustibles cuya obtención se realiza a través de tecnología convencional como la fermentación de azúcares y carbohidratos, la transesterificación de aceites y grasas, y la digestión anaerobia de desperdicios orgánicos, obteniéndose bioetanol, biodiésel y biogás respectivamente. Los recursos que se utilizan para la obtención de combustibles no fósiles son muy variados, y su rendimiento dependerá de factores, como la materia prima y los procesos utilizados. También entra en esta clasificación la biomasa, como recurso no fósil que posee renovación tardía (dependiente del periodo del crecimiento de los arboles). Al utilizar estos combustibles se reduce considerablemente el dióxido de carbono que es enviado a la atmósfera terrestre ya que estos materiales lo van absorbiendo a medida que se van desarrollando.

[1] Las reservas son aquellos volúmenes que se espera que se produzcan económicamente utilizando la tecnología actual.

Para los biocombustibles se definen tres categorías dependiendo de la materia prima de donde se obtienen. Existen de primera generación, de segunda generación y de tercera generación:

- Los biocombustibles de primera generación son obtenidos desde cultivos agrícolas destinados a la alimentación humana, como la maravilla y la soya para obtener biodiésel y la caña de azúcar para obtener etanol.

- Los biocombustibles de segunda generación, a diferencia de los de primera generación, no ocupan cultivos destinados a la alimentación humana. Son combustibles líquidos fabricados a partir de la biomasa lignocelulósica de plantas. Su materia prima puede ser cualquier tipo de biomasa vegetal, desde desechos agrícolas o madereros hasta cultivos energéticos específicos.

- Los biocombustibles de tercera generación utilizan mecanismos no convencionales para su producción, como la modificación genética de sus semillas, permitiendo obtener mejores rendimientos del cultivo, por ejemplo a través un crecimiento más veloz. Las especies más comunes en esta clasificación son de algas para obtener biodiésel.

2.1.3 Clasificación de combustibles según su grado de preparación

Esta clasificación se refiere a los procesos preparativos antes de la quema del combustible, es así como se distinguen aquellos que se utilizan sin necesidad de un proceso previo (combustibles naturales) y aquellos que requieren de elaboración y/o procesos de transformación antes de su consumo. En el primer grupo se encuentran combustibles como madera, carbón mineral, esquistos bituminosos, petróleo, gas natural entre otros, mientras

que en el segundo grupo los más conocidos son gasolinas, fuel-oil, alcohol, biodiésel carbón vegetal, GLP, biogás, gas de gasógeno, entre otros.

2.1.4 Clasificación de combustibles según estado de agregación

El estado de agregación es el estado físico en el que está la materia, esta característica influirá en la forma de lograr la combustión de estos elementos, en general mientras mayor sea el estado de agregación del combustible, este presenta menor capacidad de mezclarse con el comburente (aire en la mayoría de los casos) para obtener la liberación de calor. Se distinguen tres estados: sólidos, líquidos y gaseosos (de mayor a menor nivel de agregación).

2.1.5 Industria del transporte en Chile

El transporte es una actividad del sector terciario (servicio) que ha experimentado una gran expansión a lo largo de los últimos dos siglos, es importante estudiar esta industria porque representa el mayor agente de demanda de hidrocarburos y biocombustibles en Chile, y además una industria que aporta gran parte de la contaminación ambiental, el transporte es la mayor fuente de emisiones de CO_2 en Chile, aproximadamente el 36% de las emisiones totales se deben al consumo de energía de este sector (Balance Nacional de Energía 2009, Comisión Nacional de Energía de Chile). Para el año 2020 las emisiones podrían cuadriplicarse si no se toman medidas de mitigación adecuadas. (WorldEnergy Outlook 2010, Asociación Internacional de Energía).

Hay dos propósitos principales por lo que se requiere de esta actividad: transporte de pasajeros y transporte de carga.

2.1.5.1 Transporte de pasajeros y transporte de carga

El transporte de pasajeros es una actividad que puede ser de carácter privado (si el servicio lo entrega una empresa del estado) o público (particular), a la vez puede ser interurbano o

dentro de una misma ciudad, además se distinguen tres formas por las cuales se puede llevar a cabo, las cuales son: transporte por carretera, transporte por tren, transporte aéreo. Durante el 2009 se transportaron 51.462.000 personas por carretera, 23.274.675 por tren y 9.711.882 por vía aérea.

De acuerdo con la Asociación Nacional Automotriz de Chile, ANAC, entre 1990 y 2010 el número de vehículos en circulación se ha triplicado, lo que resulta en una tasa de motorización de 6,1 personas por vehículo. Pasando de un total de 960 mil vehículos en 1990, a 2,8 millones en 2010. La cifra crece junto con el PIB per cápita en el país, que también se ha triplicado en el mismo período.

Por otra parte el transporte de carga se refiere al traslado de objetos, materiales, insumos, y otros elementos que se requieran consumir (dentro de la cadena productiva o como producto final) en un lugar distinto al sector en donde se producen. Se definen cuatro posibles medios para llevar a cabo el transporte de carga, los cuales son: por camión, tren, marítimo (barcos) y aéreo. Es posible identificar en que magnitud son utilizados dichos medios midiendo las toneladas transportadas durante un año de medición (Tabla 2.1).

Tabla 2.1: Toneladas de carga transportada durante el año 2009 por medio.

Medio	Toneladas transportadas
Camión	669.984.892
Tren	25.492.418
Marítimo	106.683.050
Aéreo	262.053

Fuente: Anuario del Instituto Nacional de Estadísticas, INE 2009.

Una vez estudiado la principal fuente de demanda de combustibles en Chile, es necesario llevar el proceso de combustión a nivel de laboratorio, con el fin de obtener resultados y conclusiones de los factores que influencian la formación de hollín.

2.2 Matriz energética chilena

La Matriz Energética Chilena hace alusión a la representación cuantitativa de la energía disponible en el país para fines productivos y de consumo. El estudio de la matriz energética es elemental para dirigir la planificación del sector energético, de esta forma se puede garantizar la producción, la seguridad energética y el uso adecuado de la energía disponible.

En términos generales, existe una directa correlación entre consumo eléctrico y crecimiento de la economía, la cual es mucho más notoria en países menos desarrollados. En Chile, la correlación de estos factores ha disminuido en los últimos años, en gran parte gracias a las políticas que fomentan el uso eficiente de la energía. Sin embargo, se espera que aumente el consumo eléctrico, de manera de poder acompañar el desarrollo económico de los próximos años. Hay consenso en cuanto a que, para alcanzar en el largo plazo un desacople entre crecimiento económico y consumo energético como el de los países de la OCDE, es imperativo realizar esfuerzos importantes en materia de eficiencia energética.

La matriz energética Chilena está mayoritariamente compuesta por combustibles fósiles, no renovables, entre ellos se destacan el gas natural, el petróleo y el carbón mineral, además de las grandes represas de generación hidroeléctrica. La potencia instalada en Chile neta al año 2015 es de 19.742 MW donde el 58 % la generan las termoeléctricas a carbón, diésel y gas natural, el 30% las centrales hidroeléctricas, 12% las fuentes renovables (biomasa, eólica, mini-hidráulica y solar) (Comisión Nacional de Energía, 2016). En la Figura 2.1 se presenta la capacidad instalada en Chile al año 2015 con su descomposición.

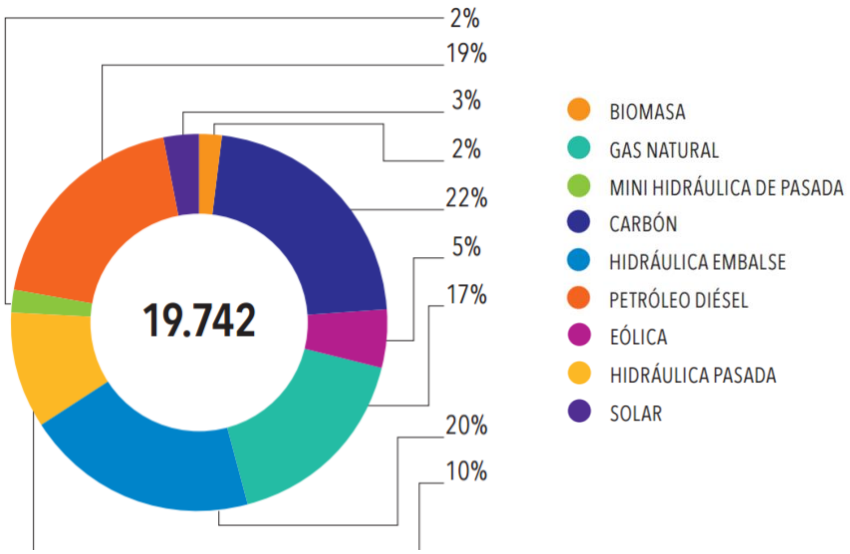

Figura 2.1: Capacidad instalada en MW al año 2015 y su descomposición.

La matriz energética chilena ha presentado un aumento en las energías renovables no convencionales (los biocombustibles son considerados ERNC, alta capacidad de renovación), debido a que en los últimos años se han implementado leyes que apoyan esta iniciativa; a partir del 1 de enero de 2010 entraron en vigencia las exigencias impuestas por la Ley N°20.257 o "Ley ERNC", dicha norma legal, además de introducir la definición de Energías Renovables No Convencionales, define una exigencia respecto a los retiros realizados por empresas de generación para servir sus contratos de suministro, ya sean éstos con un cliente libre o con empresas de distribución, teniendo que acreditar un porcentaje de inyección ERNC en el origen de dicha energía, más tarde en octubre de 2013 se promulga la Ley N°20.698, la cual también se conoce como "Ley 20/25". Realiza cambios sobre las cuotas fijadas por su antecesora, aumentando las exigencias sobre las empresas generadoras que realizan retiros. Los crecimientos definidos en aquel cuerpo legal establecen que al año 2025, los retiros deberán acreditar un 20% de contenido ERNC, como se muestra en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Requerimiento porcentual de ERNC

AÑO	LEY 20.257	LEY 20.698
2010	5,0%	-
2011	5,0%	-
2012	5,0%	-
2013	5,0%	5,0%
2014	5,0%	6,0%
2015	5,5%	7,0%
2016	6,0%	8,0%
2017	6,5%	9,0%
2018	7,0%	10,0%
2019	7,5%	11,0%
2020	8,0%	12,0%
2021	8,5%	13,5%
2022	9,0%	15,0%
2023	9,5%	16,5%
2024	10,0%	18,0%
2025	10,0%	20,0%

Fuente: http://cifes.gob.cl/

Luego de siete años de aplicación de las exigencias, se observa que no sólo hay un cumplimiento sostenido de ésta, sino que es ampliamente superado por las inyecciones de las centrales ERNC reconocidas por ley, lo cual se traduce en la duplicación de los requerimientos e incluso triplicarlos durante algunos meses de 2015.

A pesar del aumento en la producción de ERNC la matriz chilena aún está abastecida principalmente por combustibles fósiles, los cuales son obtenidos principalmente por importaciones (95% del petróleo, 83% del Carbón y 81% del Gas natural son importados), haciendo a Chile altamente dependiente de las condiciones del mercado internacional, considerando las variaciones de precio y los problemas que tengan los proveedores en el abastecimiento.

La matriz energética se utiliza principalmente para abastecer las necesidades energéticas de tres sectores: Comercial, público y residencial (CPR), industrial y minero, y transporte. El

sector CPR consumió durante el 2014 el 22.2% de la energía total, alimentado principalmente por energía eléctrica y por biomasa. El sector industrial y minero requirió durante el 2014 el 42.5% de la energía total, y fue satisfecha por energía eléctrica, diésel y biomasa. El sector transporte requirió durante el 2014 el 35.2% de la energía y fue satisfecho casi en su totalidad por los derivados del petróleo (99%).

Para cuantificar la cantidad de energía que se utiliza en la industria de transporte se analiza el balance energético en el procesamiento del diésel, desde su importación como crudo, hasta su uso final, considerando su refinación en productos fósiles. Los combustibles fósiles disponibles como productos de la refinación del petróleo crudo disponibles en Chile durante el 2015 fueron de 165.135 *Tcal* (considerando las importaciones por 79.702 *Tcal*, la producción nacional en la refinación de petróleo crudo por 92.350 *Tcal*, exportaciones por 5.335 *Tcal* y pérdidas por 1.582 *Tcal*), en donde 94.991 *Tcal* fueron destinadas al sector transporte, lo que representa un 57.52%, es decir más de la mitad de la oferta de productos del petróleo del país es destinada a satisfacer la demanda de este sector. Lo anterior queda representado en la siguiente imagen, en donde se representa el balance energético con un diagrama Sankey[2] (Figura 2.2) (Ministerio de Energía, 2015).

.

[2] El diagrama de Sankey es un tipo específico de diagrama de flujo, en el que la anchura de las flechas se muestra proporcional a la cantidad de flujo.

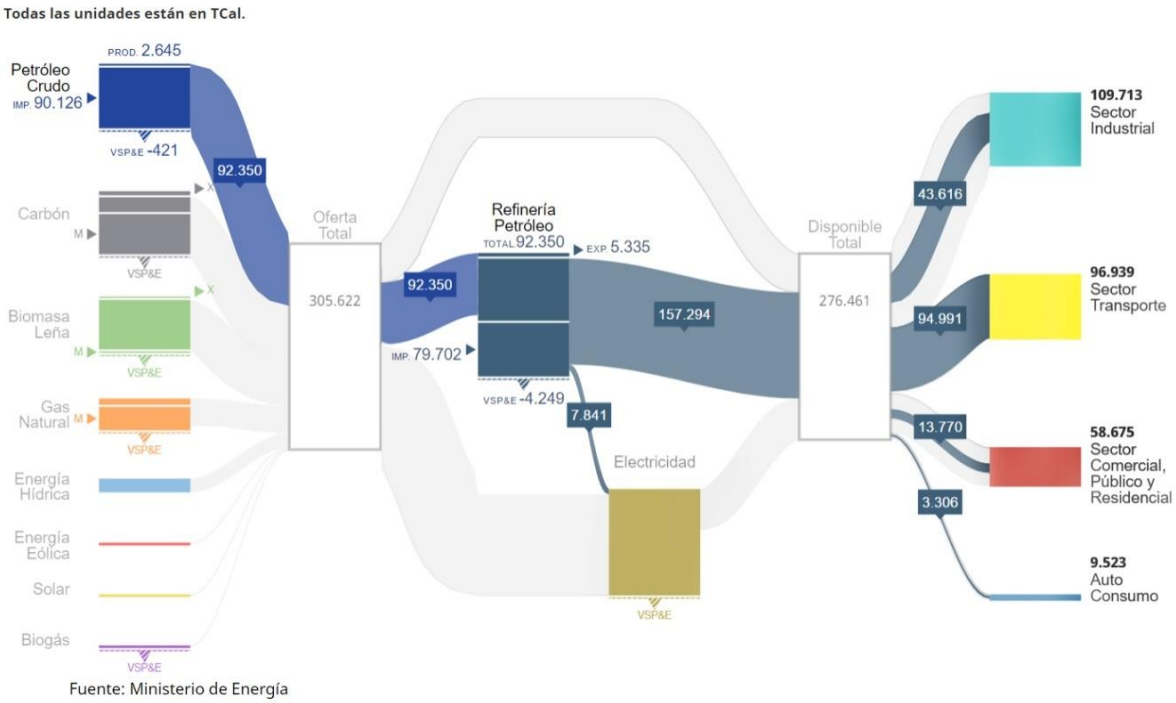

Figura 2.2: Diagrama Sankey de la oferta y demanda de petróleo en Chile, año 2015.

El petróleo ha presentado a través de los años una elevada fluctuación de precios, con tendencia al alza, como se muestra en la Figura 2.3. Durante el año 2008 se registró la mayor fluctuación del petróleo de la historia, en julio el barril de petróleo llegó a un máximo de más de 132 dólares, en parte debido a la fuerte demanda de los mercados emergentes como China. De ahí en adelante comenzó a decaer su precio, en diciembre del 2008 el barril de crudo se valoró en menos de 40 dólares debido a que la desaceleración económica global redujo la demanda. En tan solo 5 meses el barril de petróleo perdió el 70% de su valor.

Figura 2.3: Precio del barril de petróleo por año desde 1997 hasta 2016.

Se estima que las reservas de petróleo en el mundo darán abasto solo por los próximos 50 años[3] debido a los altos niveles de consumo y la creciente demanda de los países en desarrollo, con el pasar del tiempo el proceso de extracción se hace más caro y las reservas irán disminuyendo, hasta el punto en que no habrá retornos positivos para las empresas productoras de petróleo.

Considerando los datos de crecimiento económico y la demanda energética en Chile, los indicadores sugieren la necesidad de modificar la actual composición de la matriz energética y su dependencia de las importaciones. En este sentido se hace importante estudiar la producción de biocombustible como alternativa para ayudar a paliar este problema y otorgar una fuente de energía limpia e ilimitada en el tiempo.

2.3 Biocombustibles líquidos

Los biocombustibles son aquellos combustibles producidos a partir de la biomasa y que son considerados, por tanto, una energía renovable no convencional[4]. Se pueden presentar

[3] Estimación realizada por British Pretoleum.

[4] La cualidad "no convencional" se refiere aquellas formas de producir energía que no son comunes en el mundo y cuyo uso es limitado debido a sus elevados costos para su producción.

tanto en forma sólida (residuos vegetales, fracción biodegradable de los residuos urbanos o industriales) como líquida (bioalcoholes, Biodiésel) y gaseosa (biogás, hidrógeno). En este segmento se le dará mayor énfasis a los combustibles líquidos, conforme al propósito de la investigación.

Tanto los combustibles fósiles como los biocombustibles, tienen su origen en especies biológicas, por lo tanto ambas sustancias al ser quemadas devuelven a la atmósfera el dióxido de carbono que estas especies tomaron del aire anteriormente. El petróleo es energía proveniente de plantas y materia orgánica que se formó hace millones de años (gracias al aprovechamiento de la energía solar), por lo tanto es un recurso limitado. En el caso de los biocombustibles, la sustancia a ser quemada proviene de fotosíntesis reciente, por eso se afirma que la utilización de los biocombustibles no tiene impacto neto en la cantidad de dióxido de carbono que hay en la atmósfera, este proceso de muestra en la Figura 2.4.

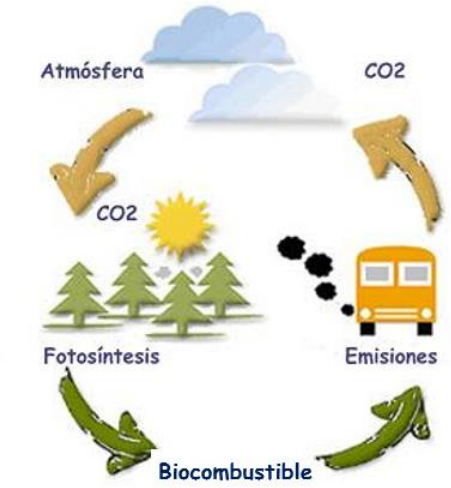

Figura 2.4: Ciclo de absorción y emisión de dióxido de carbono.

Los biocombustibles de primera generación son obtenidos desde especies agrícolas destinados a la alimentación humana, mientras que los de segunda generación no compiten necesariamente con los cultivos con fines alimenticios, y presentan una tecnología de obtención más compleja (lo que eleva sus costos).

También existen biocombustibles de tercera generación, estos son combustibles obtenidos de especies alteradas con diversas tecnologías, tales como la ingeniería genética. Su rendimiento es de diez a cien veces más alto que los biocombustibles de segunda generación (U.S. Department of Energy, 2016). Los árboles bajos en lignina, el maíz con celulasas integradas, la planta Euphorbia lathyris (planta que crece rápido en climas diversos y con poca agua) y las microalgas son algunos de las materias primas para la obtención de biocombustibles de tercera generación.

En los recientes años, bioetanol y biodiésel concentran el interés mundial como sustitutos de petróleo. El biodiésel actualmente se emplea mezclado hasta en un 20% en fracción volumétrica con el diésel, mezcla conocida como B20. El etanol, también se utiliza en diferentes porcentajes de mezcla, por ejemplo en Brasil, la legislación vigente permite utilizar hasta un 25% de etanol en la gasolina (E25), mientras que en Estados Unidos se utilizan mezclas de hasta 85% de etanol (De Oliveira et al., 2005). Sin embargo la legislación chilena solo permite el uso del biodiésel y bioetanol en hasta un 5% de sustitución. A continuación se definen ambos combustibles y se detallan sus procesos de obtención.

2.3.1 Bioetanol

El etanol o alcohol etílico es el combustible más usado dentro de los biocombustibles (sin considerar la leña). Se utiliza en motores de explosión como aditivo o sustitutivo de la gasolina. Se puede obtener de manera sintética a partir del petróleo, o por medio de la fermentación de azucares presentes en la biomasa (bioetanol). En los años 90 cerca del 93% del etanol producido a nivel mundial se obtuvo por medio de la fermentación y cerca del 12% se obtuvo utilizando métodos sintéticos. (Patrouilleau et al., 2006). El bioetanol se puede

producir desde tres fuentes según la materia del que se obtenga (ver Figura 2.5)(BNDES y CGEE, 2008):

- Azúcares (monosacáridos o disacáridos), como la remolacha y la caña de azúcar.
- Almidones, como el maíz y el trigo.
- Biomasa forestal, como compuestos lignocelulósicos.

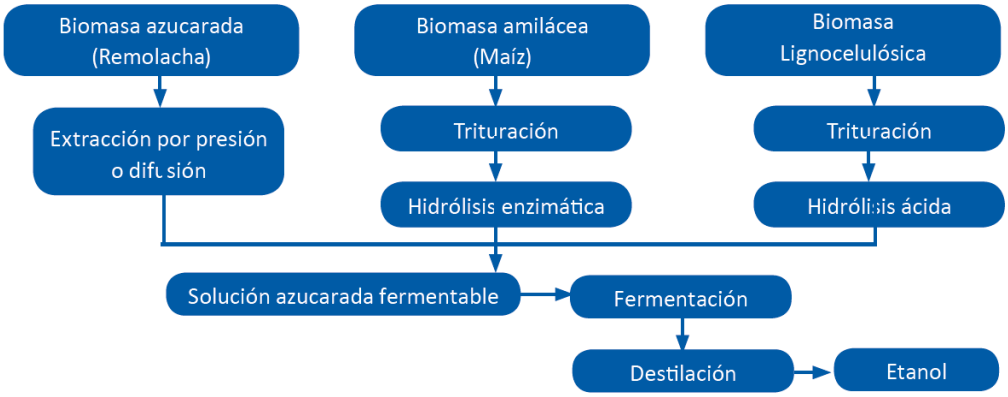

Figura 2.5: Rutas para obtener etanol desde distintas materias primas.

Los mejores rendimientos de la caña de azúcar en relación con los cereales como el maíz y los compuestos lignocelulósicos, hace que el bioetanol obtenido a partir de la caña de azúcar sea más competitivo por sus bajos costos. Algunas de sus propiedades se muestran en la Tabla 2.3, las cuales se comparan con las de la gasolina (Anitescu y Bruno, 2011).

Tabla 2.3: Principales propiedades del etanol y de la gasolina.

Propiedad	Etanol	Gasolina
Formula química	C_2H_5OH	C_8H_{15}
Peso molecular	46	111
Carbono (masa/masa %)	52	86
Hidrogeno (masa/masa %)	13	14
Oxígeno (masa/masa %)	35	~0
Punto de ebullición (°C)	78,5	37–225
Punto de congelamiento (°C)	−114	−40
Viscosidad (mm2/s) a 20°C	1,5	0,5–0,6
Temperatura de auto ignición (°C)	423	257
Punto de inflamabilidad (°C)	13	-
Calor especifico (kJ/kg °C)	2,5	2,4

El bioetanol es el biocombustible con mayor producción mundial, en donde Estados Unidos (con cultivos de maíz y trigo) y Brasil (con cultivos de caña de azúcar) se reparten más del 88% de la producción mundial, seguido por la Unión Europea (5,3%), China (2,8%) y Canadá (1,4%). La producción mundial de bioetanol ha crecido notablemente esta última década (ver Figura 2.6), desde 16.600 millones de litros en 2001 a 83.400 millones de litros en 2011. En Estados Unidos, la producción de bioetanol para uso en el transporte se remonta a 1908, a través de los años su capacidad de producción ha crecido considerablemente, alcanzando su máxima nivel en la actualidad con un crecimiento del 700% respecto a ese año. En el siguiente gráfico se muestra la evolución de la producción de bioetanol medida en millones de litros desde 2010 a 2015, comparando ambos países con el resto del mundo.

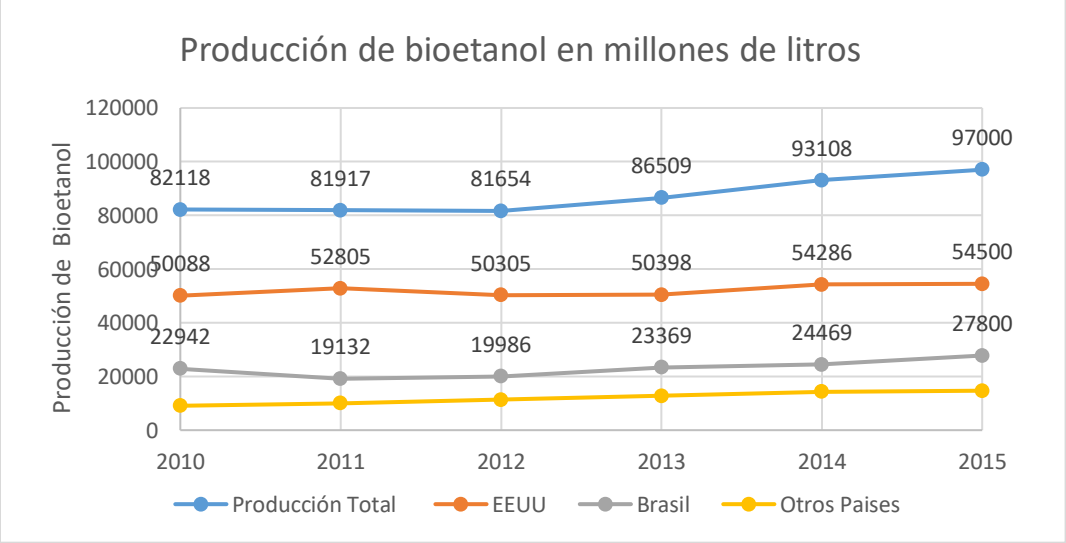

Figura 2.6: Producción de bioetanol en millones de litros. Fuente: OIA.

En Brasil la producción de bioetanol comienza en 1973. Esta industria ha evolucionado de forma positiva, en la actualidad el 45% de los vehículos brasileños son utilizados con bioetanol, con perspectivas de crecimiento hasta el 76% en 2020 (aumento de vehículos Flex-

fuel o FFV[5]). Tanto en Brasil como en Estados Unidos, la utilización del bioetanol es para mezclas con gasolina para el uso en el transporte, siendo por tanto los principales consumidores de bioetanol en el mundo (equivalente al 6% del consumo de gasolina): durante 2015 en Estados Unidos se consumieron 51.500 millones de litros (53,6%), mientas que en Brasil fueron 28.100 millones de litros (29,2%). El consumo de ambos países constituye el 83% del consumo mundial. En el siguiente gráfico (Figura 2.7) se muestra la evolución del consumo de bioetanol medido en millones de litros desde 2010 a 2015, comparando ambos países con el resto del mundo.

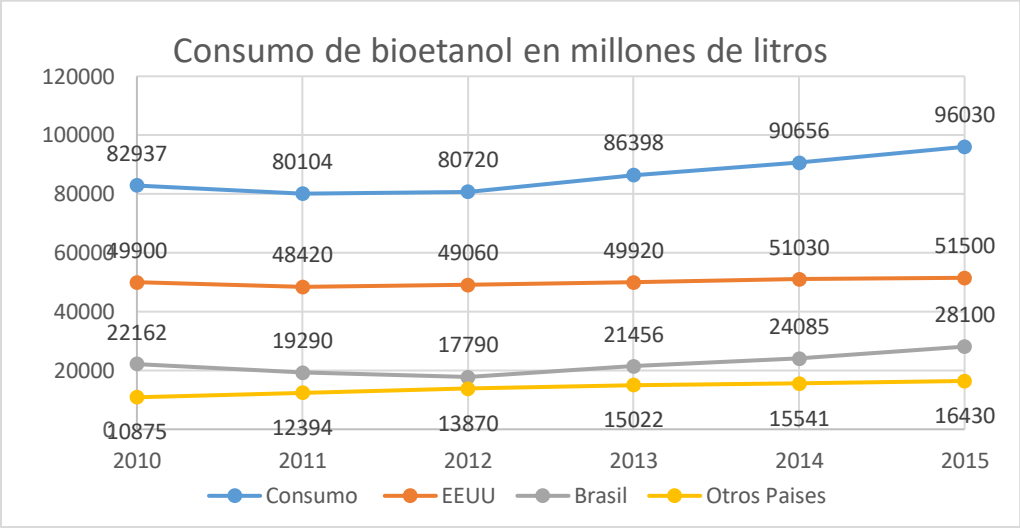

Figura 2.7: Producción de bioetanol en millones de litros. Fuente OIA.

El riesgo de competencia de la producción de etanol por los alimentos ricos en carbohidratos resulta evidente. En cualquier caso, tanto el cultivo propiamente dicho como la posterior transformación industrial requieren el consumo de una cantidad considerable de energía la mayor parte de la se obtiene mediante combustibles fósiles.

[5] Los vehículos FFV pueden utilizar mezclas en cualquier porcentaje hasta un máximo de etanol del 85%, poseen un sensor que adapta los sistemas de inyección e ignición a las características de la mezcla.

El etanol puede utilizarse como único combustible, realizando modificaciones a los motores, o en mezclas con la gasolina desde un 10% hasta mezclas mucho más altas como el E-85. El E-85 es un combustible que contiene hasta el 85% de etanol y sólo un 15% de gasolina, que puede utilizarse en los vehículos Flex-Fuel.

El etanol también se puede transformar en etil terciario butíl éter (ETBE). El ETBE es el producto principal de la reacción en la que interviene una molécula de etanol y otra de isobuteno. El ETBE es una alternativa al MTBE (metil terciario butil éter), que se obtiene a partir del petróleo y se utiliza para mejorar las gasolinas aumentando su octanaje. El ETBE tiene un índice de octano y un poder calorífico ligeramente superior al MTBE, y su rendimiento de fabricación, a partir del isobuteno, también es más elevado.

64% Isobuteno + 36% Metanol → MTBE
55% Isobuteno + 45% Etanol → ETBE

A continuación se estudia el proceso de obtención de bioetanol de las dos materias primas más utilizadas, el maíz y la caña de azúcar.

2.3.1.1 Bioetanol de maíz: la planta de maíz

El maíz es una gramínea que posee fotosíntesis de tipo C4[6]. Su cultivo produce una gran cantidad de biomasa, de la que se aprovecha cerca del 50 por ciento en forma de grano. El resto, corresponde a diversas estructuras de la planta: caña, hoja, limbos y mazorca entre otros. En el grano de maíz, que constituye la materia prima para la producción de bioetanol, un 66% de su biomasa (peso seco, sin el 15% de humedad) corresponde al almidón, un 3.9%

[6] Las plantas C4 usan el agua más eficientemente, conservan la humedad del suelo, y pueden crecer en tierras áridas.

son aceites y cerca de un 29% corresponde al gluten con diferentes proporciones de proteínas. La composición porcentual de la planta de maíz se muestra en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4: Composición porcentual típica de una planta de maíz.

Componente de la planta	Porcentaje del peso seco (%)
Coronta	11,8
Grano	49,7
Total espiga	61,5
Panoja o limbos	12
Tallos	17,6
Brácteas de la espiga	8,9
Total caña	38,5
Total planta	100

Con agricultura mecanizada la producción por hectárea se sitúa, en promedio, alrededor de los 9.000 *kg/ha* (peso fresco de grano, con un contenido del 15% de agua). Naturalmente estas cifras tan elevadas de producción sólo resultan posibles invirtiendo cantidades considerables de energía en el cultivo. En primer lugar el cultivo de maíz requiere grandes cantidades de fertilizantes hasta el punto que el 40% de todo el nitrógeno mundial destinado a fertilizantes se dedica a la producción de maíz.

La producción de maíz sólo se logra invirtiendo una cantidad considerable de energía fósil (petróleo) en forma de fertilizantes, herbicidas e insecticidas, gasoil consumido en la maquinaria agrícola, electricidad utilizada en los regadíos y transporte asociado al cultivo. La energía invertida en el cultivo de una hectárea de maíz asciende a 5.145 *Mcal/ha* (García, 2008).

2.3.1.2 Bioetanol de maíz: proceso de obtención

En la producción industrial de bioetanol por fermentación de la glucosa, hay dos procesos principales: la molienda en seco y la molienda en húmedo. La molienda húmeda es un proceso donde el grano de maíz se debe separar de sus componentes, obteniendo subproductos de mayor valor, debido a que solo el almidón se fermenta. Por otra parte en la molienda seca se fermenta toda la mezcla triturada.

La molienda húmeda se aplica normalmente en plantas con grandes producciones de alcohol y es mayoritariamente utilizada por los productores estadounidenses. El proceso comienza con el secado de los granos, posteriormente se inspeccionan automáticamente y se limpian de posibles impurezas. Posteriormente, el maíz se remoja en grandes tanques en una solución que contiene agua a una temperatura de unos $50^{o}C$ y pequeñas cantidades de dióxido de azufre y ácido láctico. La siguiente parte del proceso consiste en pasarlo a través de un separador que hace que el germen de los granos[7] flote en la parte superior de la mezcla de modo que se pueden recuperar con facilidad. A partir de ahí se obtiene la parte fibrosa y posteriormente se separa el almidón de las proteínas aplicando un proceso de centrifugación.

Por otro lado, en la molienda seca se limpian y muelen los granos de cereal hasta reducirlos a finas partículas por un sistema mecánico. Se produce una harina con el germen, la fibra y la fécula del maíz. La harina es hidrolizada o convertida en sacarosa usando enzimas o una disolución ácida.

Indiferentemente de si se utiliza molienda seca o húmeda, se obtiene el almidón separándolo del resto del grano (proceso llamado licuefacción), este procederá a ser

[7] El germen de cereal es la parte reproductiva que germina para crecer en una planta; es el embrión de la semilla.

fermentado. A la mezcla se le agrega levadura para fermentar los azúcares y con ello obtener el etanol y el anhídrido carbónico. Usando un proceso continuo, la mezcla fluirá a través de varios fermentadores hasta que fermente completamente, este proceso continúa por al menos 48 horas.

La mezcla fermentada, ahora llamada cerveza, contendrá alcohol (cerca del 15%) y agua (al 85%), así como todos los sólidos no fermentables del maíz y de la levadura. La cerveza entonces será bombeada a un flujo continuo hacia un sistema de columnas de destilación, donde se hierve, separándose el alcohol etílico de los sólidos y del agua. El alcohol dejará la columna de destilación con una pureza del 90 al 96%, y el puré de residuo, llamado *stillage*, será transferido de la base de la columna para su procesamiento como subproducto.

El alcohol pasa a través de un sistema que le remueve el agua restante. La mayoría de las plantas utilizan un tamiz molecular para capturar las partículas de agua que contiene el etanol al momento de salir del sistema de destilación. Al alcohol puro, sin el agua, se le denomina alcohol anhidro.

Hay dos subproductos principales del proceso: el anhídrido carbónico y los granos destilados. El anhídrido carbónico se obtiene en grandes cantidades durante la fermentación. Muchas plantas lo recogen, lo limpian de cualquier alcohol residual, lo comprimen y lo venden para ser usado como gasificante de las bebidas o para congelar carne. Los granos destilados, húmedos y secos (DDGS), se obtienen del *stillage*, el cual se centrífuga para separar los sólidos suspendidos y disueltos. Un evaporador se utiliza para concentrar los sólidos suspendidos y disueltos y después se envían a un sistema de secado para reducir el contenido de agua a aproximadamente un 10/12%. Los DDGS contienen el núcleo del maíz menos el almidón y se pueden utilizar como alimento de ganado. El proceso de producción de etanol se resume en la figura 2.8.

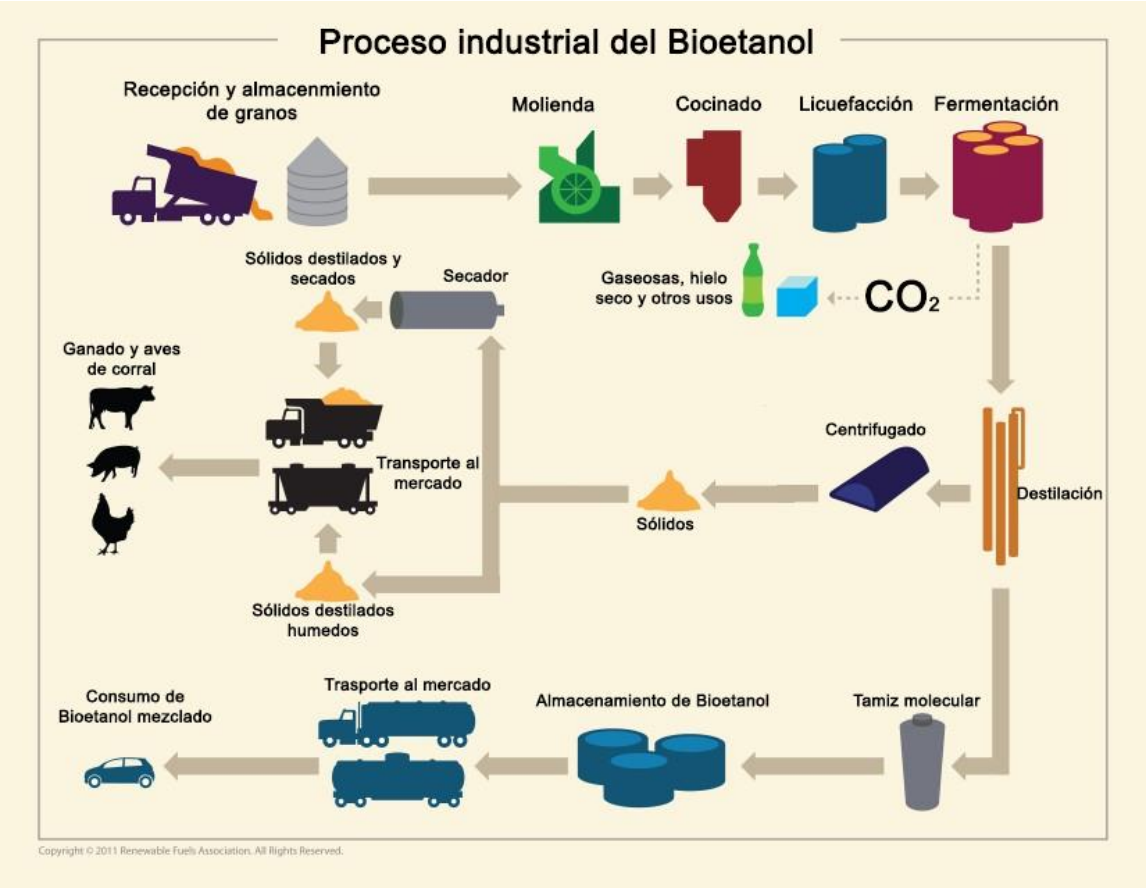

Figura 2.8: Proceso Industrial del bioetanol de maíz.

2.3.1.3 Bioetanol de caña de azúcar: la caña de azúcar

La caña de azúcar o caña, es una planta perteneciente a la familia de las gramíneas, su nombre científico es Saccharum officinarum. En su tallo se forma y acumula un jugo rico en sacarosa, este mide de 5 a 6 metros de alto, y su diámetro es de 2 a 5 centímetros y posee nudos de donde salen las hojas cada 7 a 15 cm.

Su composición varía de acuerdo con la variedad (familia) de la caña, edad, madurez, clima, suelo, método de cultivo, abonos, lluvias, riegos, etc. Valores de referencia, se muestran en la Tabla 2.5 junto a sus respectivos porcentajes de masa.

Tabla 2.5: Composición porcentual típica de la caña de azúcar.

Componente	Porcentaje de masa
Agua	73 - 76
Sacarosa	8 - 15
Fibra	11 - 16
Glucosa	0,2 – 0,6
Fructosa	0,2 – 0,6
Sales	0,3 – 0,8
Ácidos orgánicos	0,1 – 0,8
Otros	0,3 – 0,8

La caña es un cultivo de zonas tropicales o subtropicales. Su periodo de crecimiento varía entre 11 y 17 meses. Requiere agua y suelos adecuados para crecer bien. Es una planta que asimila muy bien la radiación solar, teniendo una eficiencia cercana a 2% de conversión de la energía incidente en biomasa. Un cultivo eficiente puede producir 100 a 150 toneladas de caña por hectárea por año.

La caña se propaga mediante la plantación de trozos de caña, de cada nudo sale una planta nueva idéntica a la original; una vez plantada la planta crece y acumula azúcar en su tallo, el cual se corta cuando está maduro. La planta retoña varias veces y puede seguir siendo cosechada. Estos cortes sucesivos se llaman “zafras”. La planta se deteriora con el tiempo y por el uso de la maquinaria que pisa las raíces, así que se debe replantar cada siete a diez años, aunque existen cañaverales de 25 o más años de edad.

2.3.1.4 Bioetanol de caña de azúcar: proceso de obtención

La cosecha de la caña se suele hacer de forma mecanizada o manual, también hay dos métodos: corte directo de la planta con hojas o bien mediante quema previa de las hojas y luego el corte de la planta, la segunda si bien tiene como beneficio la concentración de azúcares (con lo que se mejora su precio de venta) y la minimización de contaminación microbiana y de desechos foliares, también provoca molestia tales como la diseminación de

las cenizas, esterilización del suelo, eliminación de fauna y riesgo de propagación de incendios.

Una persona puede cosechar entre 5 a 7 toneladas por día de caña quemada y 40% menos de caña sin quemar. La cosecha mecánica se efectúa con cosechadoras que cortan la mata y separan los tallos de las hojas con ventiladores. Una máquina puede cosechar 30 toneladas por hora, pero con el inconveniente de que daña la raíz, disminuyendo en gran medida el nacimiento de nuevas plantas por este método siendo muchas veces necesaria la replantación.

Una vez cortada, la caña debe transportarse rápidamente para evitar su deterioro por levaduras y microbios. Cuando llega a la fábrica, lo primero es lavarla con agua para remover la tierra, arena y otras impurezas.

Después de ser lavada, la caña es cortada en pequeños trozos y se pasa por un electro imán que quita los materiales ferrosos que podrían dañar las maquinarias, luego de eso es triturada, en un proceso de molienda. El 70% de la caña se transforma en un caldo que contiene el azúcar de donde se extraerá el bioetanol, el 30% es el residuo de la caña de azúcar, también llamado bagazo, este material puede ser quemado para generar energía en la fábrica. El caldo contiene aun hasta un 1% de impurezas solidas como arena, arcilla y trozos bagazo, por lo que es tamizado y luego se deja reposar en contenedores para que las impurezas precipiten al fondo de estos.

Desde este punto el caldo es llamado caldo clarificado (está completamente limpio), sin embargo es calentado para esterilizarlo eliminando completamente las impurezas. El caldo es llevado a grandes tanques donde se mezcla con levadura especial para su fermentación. La fermentación es un proceso en el que producen cambios químicos en un substrato orgánico por la acción de catalizadores bioquímicos conocidos como enzimas que son elaborados por hongos; en este proceso se utiliza un hongo en particular llamado *Sacharomicies Servericiae*,

conocido normalmente como levadura de cerveza. A su vez, a la mezcla se le agrega ácido sulfúrico y penicilina como antisépticos para la eliminación de infecciones no deseadas.

Esta levadura tiene la propiedad que para su alimentación, reproducción y desarrollo, por medio de la enzima invertaza desdobla a los disacáridos en dos moléculas de monosacáridos (glucosa y fructosa), como muestra la siguiente reacción:

$$C_{12}H_{22}O_{11} + H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + C_6H_{12}O_6$$

$$Sacarosa + Agua \rightarrow Fructosa + Glucosa$$

Luego, por acción de la enzima zimaza a los monosacáridos se los desdobla en dos moléculas de alcohol y dos de CO_2, es decir que de una molécula de sacarosa se obtienen cuatro moléculas de alcohol y cuatro moléculas de CO_2, los cuales son los productos principales de la fermentación. Como consecuencia, luego de 4 a 12 horas se obtiene el "mosto fermentado" o "vino fermentado" que tiene un contenido alcohólico de 8 a 12 grados, como muestra la siguiente reacción:

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2$$

$$Fructosa\ o\ glucosa \rightarrow Etanol + Dióxido\ de\ carbono$$

El vino fermentado es en su mayoría agua. Aprovechando que el etanol tiene un punto de ebullición menor que el agua (78,3ºC), la mezcla es calentada, evaporada, condensada y separada en sus componentes en columnas de destilación. Se puede obtener alcohol hidratado (con 96% contenido de alcohol) el cual ya se puede comercializar en las estaciones de servicio.

Para obtener un producto de mayor concentración de etanol (más de 99.5% de volumen de alcohol), se utiliza el proceso de deshidratación, en el cual se remueve el agua remanente, bien sea mediante técnicas de adsorción por tamices moleculares, o utilizando otras técnicas

como la destilación azeotrópica, destilación extractiva o pervaporación. El proceso se resume en la Figura 2.9.

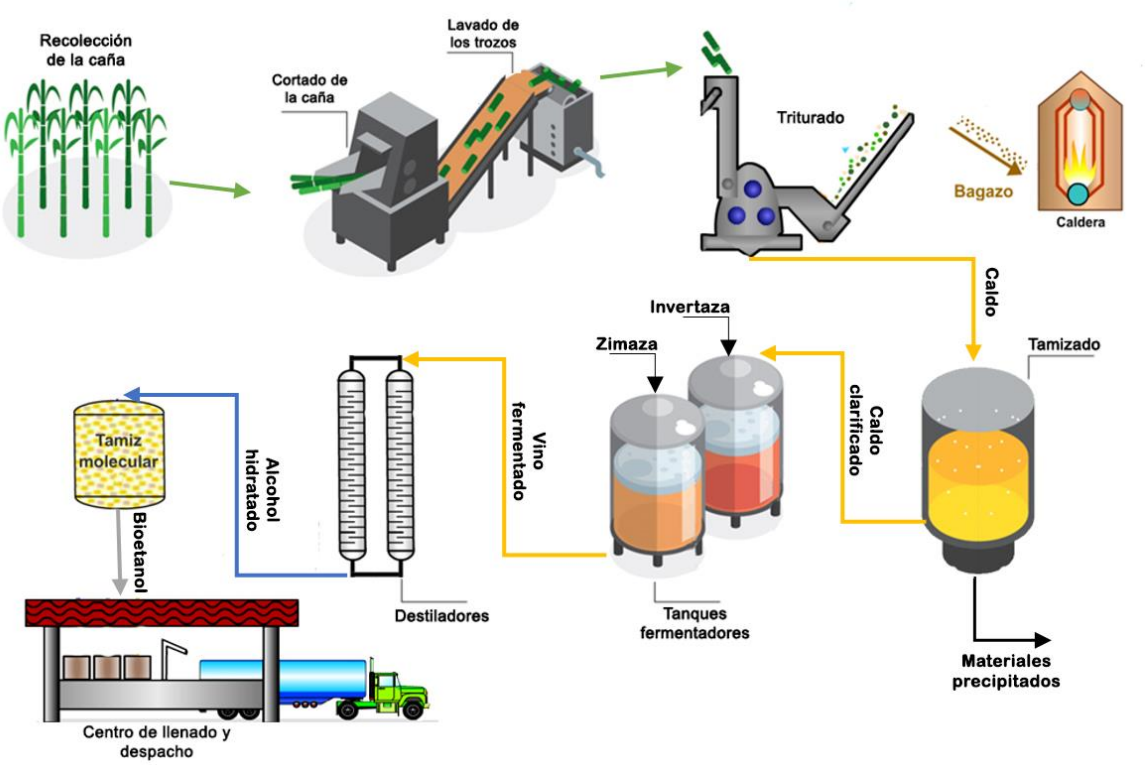

Figura 2.9: Proceso productivo de etanol de caña de azúcar.

2.3.2 Biodiésel

La American Society for Testing and Materials (ASTM) define al biodiésel como un combustible formado por ésteres alquílicos de cadena larga de ácidos grasos, derivados de una materia prima lipídica renovable, como lo son los aceites vegetales o las grasas animales.

El biodiésel se puede emplear en diversos ámbitos. La aplicación con mayor proyección es la utilización del biodiésel en el sector transporte, sin embargo existen otros sectores donde este biocombustible puede emplearse entre los cuales es interesante destacar:

1. Combustión en calderas. Se trata de una aplicación que no precisa de especificaciones especiales, en la que posiblemente pueda emplearse el aceite directamente sin esterificar. El problema reside en el mayor costo relativo a otros combustibles, incluida la biomasa.

2. Aplicación a motores diésel estacionarios para generación de energía eléctrica o para moto-bombas en las propias zonas de cultivo. La ventaja consiste en que estos motores no necesitan combustibles tan sofisticados como los de automoción.

3. Aplicación a tractores agrícolas u otra maquinaria agrícola. Además de contar con la ventaja mencionada anteriormente, se reduce el costo del transporte si el biocarburante es producido en las cercanías del cultivo.

4. Aplicación a motores de barcos marinos o fluviales, con planteamientos similares.

5. Aplicación a vehículos diésel pesados (camiones y autobuses) y ligeros (pequeños camiones o microbuses). A esta aplicación corresponden generalmente las especificaciones del combustible más estrictas.

Entre las propiedades más sensibles del biodiésel se encuentran la viscosidad, la volatilidad y la densidad. La viscosidad es altamente sensible a la composición química del biodiésel. Aunque la mayor parte de las propiedades del combustible biodiésel se comparan favorablemente con las del combustible diésel derivado del petróleo, la mayor viscosidad del biodiésel puede afectar a los parámetros de inyección de combustible. La viscosidad del biodiésel producido comercialmente está fuera del rango permitido por la norma ASTM D975 para el diésel derivado del petróleo. La viscosidad cinemática del biodiésel en general se encuentra entre 4.2 y 4.6 mm^2/s, mientras que en el diésel convencional esta propiedad varía entre 2.5 y 3.2 mm^2/s a 40°C. (Tat & van Gerpen, 1999). De hecho la asociación de normas internacionales tuvo que crear normas específicas para el biodiésel, para definir concretamente el nivel de calidad que asegure un buen su funcionamiento.

La volatilidad es una propiedad fundamental del fluido para el funcionamiento apropiado del motor, cuando el combustible tiene alta volatilidad existe formación de burbujas de vapor en el circuito de alimentación, principalmente durante el verano, mientras que durante el

invierno existe riesgo de formación de hielo en el carburador, impidiendo el funcionamiento del motor. Por otra parte, cuando el combustible tiene baja volatilidad se observa disminución de la aceleración, mayor tiempo para que el motor alcance la temperatura ideal de funcionamiento, mayor formación de carbón en las cámaras de combustión y en la zona superior del pistón y dificultad en el arranque de un motor.

Esta propiedad en combustibles complejos es muy sensible a la variabilidad de la composición y puede determinarse mediante la técnica de la curva de destilación avanzada (ADC). Utilizando esta técnica se puede obtener una curva de destilación para combustibles multicomponentes, usualmente presentado gráficamente como temperatura de ebullición en función de la fracción volumétrica destilada (ver Figura 2.10) (Anitescu y Bruno, documento en preparación), en ella se ve que la volatilidad del biodiésel es mayor a la del diésel N°2.

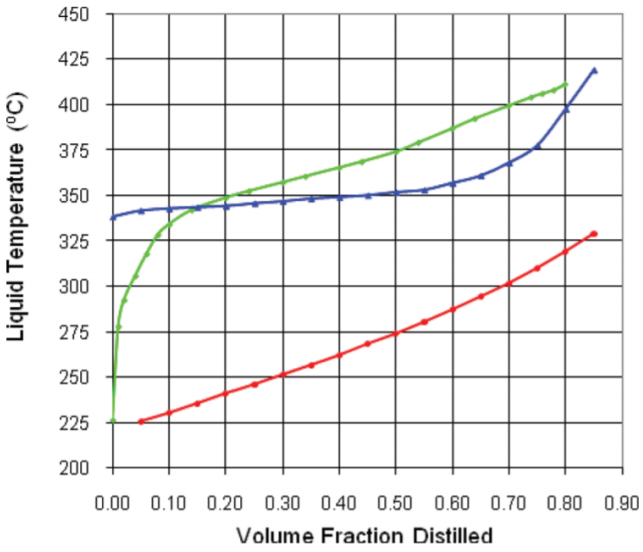

Figura 2.10: Curva de destilación para biodiésel de aceite de soja (verde) en comparación con las del biodiésel comercial (azul) y diésel N°2 (rojo).

La densidad es una de las propiedades más importantes del biodiésel, ya que los sistemas de inyección del motor deben entregar una cantidad de combustible ajustada con precisión para proporcionar una combustión eficiente y limpia (los combustible más pesados producen más energía o potencia en el motor). El efecto de la presión sobre la densidad del combustible

se ha vuelto particularmente importante con el uso creciente de los modernos sistemas de inyección de riel común en motores diésel, donde las presiones pueden ser superiores a 2000 *bar*. Las principales propiedades del diésel y del biodiésel se comparan en la Tabla 2.6 (Sun, Caton & Jacobs, 2010). Además el valor de densidad para distintos esteres se muestra en al siguiente Tabla 2.7 (Busy, 2011).

Tabla 2.6: Principales propiedades del diésel y del biodiésel.

Propiedad	Diésel	Biodiésel
Peso molecular promedio (g/mol)	193,89	291,62
Carbono (masa/masa %)	86,7	77,1
Hidrogeno (masa/masa %)	12,71	11,81
Oxígeno (masa/masa %)	-	10,97
Densidad (g/ml) a 21°C	0,8537	0,8814
Viscosidad cinemática (mm^2/s) a 40°C	28,271	42,691
Punto de ebullición (°C)	384,3	348,9
Punto de inflamabilidad (°C)	67	141
Calor especifico superior (MJ/kg °C)	45,339	39,871
Calor especifico inferior (MJ/kg °C)	42,64	37,388

Tabla 2.7: Densidad para de esteres metílicos.

Nombre	Densidad (g/cm^3)
Metil ester de pescado	0,882526
Metil ester de soya	0,870547
Metil ester de canola	0,885595
Metil ester de maíz	0,867803

El liderazgo en la producción y consumo de biodiésel en el mundo lo tiene Alemania (utilizando raps como materia prima), que ha desarrollado la mejor tecnología de transesterificación desde la década de 1990, durante el año 2011 su producción llegó a 3.200 millones de litros (Bioenergía, 2014). Lamentablemente, los actuales costos de producción de biodiésel de primera generación, obtenidos de cultivos como raps, soya y maravilla, son elevados en todo el mundo y no es competitivo comparado con el costo actual de producción de diésel, salvo que sea subsidiado como ocurre en la Unión Europea y Estados Unidos.

2.3.2.1 Proceso de obtención de Biodiésel

La materia prima utilizada para la producción de biodiésel es muy variada (distintos tipos de aceites vegetales, grasas animales, aceites reciclados, etc.), haciendo que el resultado de la reacción química correspondiente sea una multiplicidad de ésteres de ácidos grasos distintos, en proporciones muy variables, todos ellos agrupados bajo el término "biodiésel".

La materia prima más abundante para la obtención de biodiésel son los aceites vegetales. En este caso las dos etapas necesarias son: primero la obtención de aceite vegetal desde especies vegetales (desde la semilla o la planta), y luego su transformación química en éster.

Entre los principales aceites vegetales utilizados se encuentran los de colza, palma, soya, girasol, jatropha, semilla de algodón y canola. En la Tabla 2.8 se muestran las especies más utilizadas y datos generales referidos a su producción (UPM-Ingeniería Sin Fronteras, 2006).

Tabla 2.8: Principales especies para obtener biodiésel.

Especie (nombre común)	Clima de cultivo	Mayores productores	Extracción del aceite	Proporción de aceite	Tipos de aceites predominantes	kg materia prima/kg aceite	Producción mundial (1000t)
Brassica napus (colza)	Templado	China, Alemania, India	Semilla	36%	Erúcico	2,77	14.141.936 (aceite)
Helianthus annuus (girasol)	Templado	Rusia, Argentina, Ucrania	Semilla	44%	Oleico y linoleico	2,27	10.195.091 (aceite)
Cynara cardunculus (cardo)	Templado	Países mediterráneos	Semilla	25%	Palmítico	4	Sin datos
Glycine max (soya)	Templado	EUA, Brasil, China, Argentina	Semilla	20-22%	Linoleico, oleico	5 - 4,5	33.297.013 (aceite)
Elaeis guineensis (palma africana)	Tropical	Malasia, Indonesia	Fruto y semilla	43-51%	Palmítico, oleico	2,3 - 1,9	34.311.446 (aceite)
Ricinus communis (ricino)	Tropical	Indonesia, China, Brasil	Semilla	40-50%	Ricinoléico	2,5 - 2	1.383.353 (semilla)
Jatropha curcas (jatropha)	Tropical	India	Semilla	25-30%	oleico, linoleico	4 - 3,3	Sin datos

Los aceites vegetales representan entre el 60 y el 75% del costo final del biodiésel, por lo que se investiga permanentemente en busca de materias primas de menor costo, tales como las grasas animales y aceite de cocina usado.

Una vez seleccionado el cultivo agrícola, la extracción de aceite desde los granos y vainas puede realizarse mediante un proceso de extracción mecánica, de extracción con disolvente, o de forma mixta: extracción mecánica seguida de una extracción por disolvente. En cualquier caso, los productos obtenidos a raíz de la extracción son el aceite vegetal bruto y la torta, concentrado del contenido proteico del cultivo, que se suele comercializar como pienso para alimentación animal. La elección de la tecnología aplicada para la extracción dependerá del contenido en aceite en la oleaginosa, de la capacidad requerida de extracción y del valor y aplicación de la torta resultante. Normalmente cuanto mayor sea la capacidad deseada de la planta, cuanto menor sea el contenido en aceite y cuanto mayor sea el valor de la torta, mayor deberá ser la viabilidad de extracción por disolvente, en los casos contrarios se recomienda utilizar el proceso de prensado (proceso de extracción mecánica).

El aceite utilizado para la fabricación del biodiésel debe presentar características determinadas para que el biocombustible final cumpla con las especificaciones deseadas. Así, el aceite bruto es sometido generalmente a desgomado, filtración, neutralización y secado, cuyos procedimientos dependen de la naturaleza del aceite bruto, obteniéndose un aceite refinado sin sólidos en suspensión y con un mínimo de acidez (menor a 1%) y de humedad (menor a 0,5%). Estos procesos se muestran en la Figura 2.11.

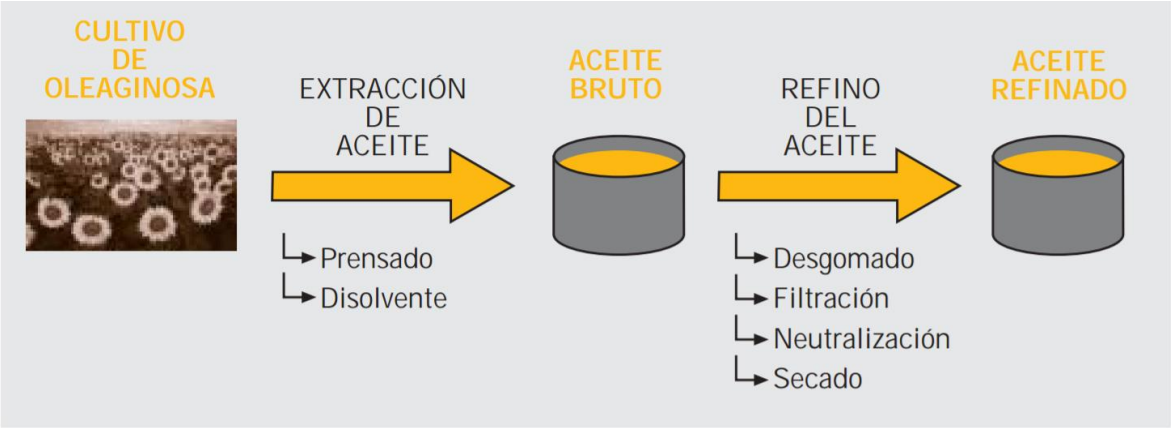

Figura 2.11: Proceso de obtención de aceite refinado.

Una vez obtenido el aceite de calidad adecuada se continúa con el siguiente proceso, la reacción química que mejores resultados ha demostrado tener para obtener biodiésel es la transesterificación. Esta consiste en la reacción entre un triglicérido (compuesto por una molécula de glicerol esterificada por tres moléculas de ácidos grasos), contenido en el aceite vegetal o grasa animal, y un alcohol ligero (metanol o etanol), obteniéndose como productos glicerina y ésteres derivados de los tres ácidos grasos de partida, es decir, biodiésel.

En general se suele usar metanol como alcohol de sustitución, en cuyo caso el biodiésel estará compuesto por ésteres metílicos (ver Figura 2.12). Aunque el metanol tiene mayores restricciones ambientales y de manipulación con respecto al etanol, existe una mayor tendencia a su uso debido a que su precio es más bajo, su tecnología de utilización es altamente conocida, el proceso es de menor complejidad, la mezcla alcohol/agua es más fácil de separar y hay un menor volumen de alcohol que recircula. Aunque el etanol tiene la ventaja de ser materia prima de fuente renovable (biocombustible obtenido de la fermentación de azúcares presentes en materia renovable), su posible utilización, en un futuro, en reemplazo del metanol, requerirá necesariamente del desarrollo de tecnología para obtener un proceso eficiente y competitivo en costos.

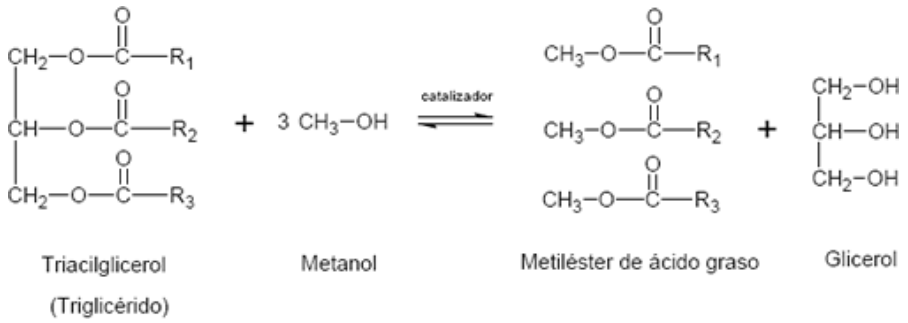

Figura 2.12: Reacción de transesterificación metílica.

La reacción de transesterificación es endotérmica, en consecuencia a mayores temperaturas corresponden velocidades mayores de formación de biodiésel. Sin embargo, la temperatura y la presión óptimas dependen del catalizador empleado.

La reacción catalizada por compuestos alcalinos (transesterificación básica) es la que requiere unas condiciones de presión y temperatura menos exigentes; por ello, suele ser el tipo de catálisis más empleado. La transesterificación con catalizador alcalino, tal como hidróxido de sodio o de potasio, ofrece por lo tanto la ventaja de trabajar en condiciones suaves y temperaturas bajas (aproximadamente la temperatura de ebullición del alcohol). Sin embargo, como los ácidos grasos libres contenidos en el aceite inicial no son esterificados en este proceso, deben ser extraídos antes de la transesterificación, esterificar en una etapa de reacción adicional o bien se debe separar la fracción no esterificable con la fase glicerina.

A medida que se emplean catálisis ácidas y heterogéneas las condiciones de presión y temperatura son cada vez más severas. Los catalizadores ácidos, tales como los ácidos minerales, pueden catalizar tanto la transesterificación como la posterior esterificación de los ácidos grasos libres, pero las condiciones de reacción son más exigentes en cuanto a los reactantes.

A raíz de los inconvenientes planteados por la catálisis homogénea, se están desarrollando otras alternativas, como la catálisis enzimática mediante lipasas o la catálisis heterogénea (resinas de intercambio aniónico o catiónico, catalizadores de titanio o circonio, óxidos metálicos etc.). A pesar de que estos catalizadores requieren unas condiciones de presión y temperatura más severas, ofrecen otras ventajas, fundamentalmente: el rendimiento másico del proceso es mayor que uno (mayor cantidad de biodiésel) y la calidad de la glicerina es superior.

Por otro lado, el tipo de proceso productivo es otro factor que influye en los rendimientos generales de la planta de biocombustible. Se distinguen tres tipos de procesos: proceso continuo, semicontinuo y *batch* (por lotes). Evidentemente, para pequeñas producciones el proceso por lotes es el más indicado. Por el contrario, para grandes producciones se suele diseñar una producción en continuo, que acarrea mayores dificultades técnicas de operación y puesta en marcha. Otro factor determinante, además del tamaño de la producción, es la disponibilidad y calidad de la materia prima, de tal manera que la operación continua es más conveniente para alimentaciones de materia prima con una determinada calidad asegurada.

La estequiometria de la reacción indica que el rendimiento másico es aproximadamente igual a uno, por lo que se obtiene la misma cantidad de biodiésel que de aceite vegetal inicial. Además, la estequiometria entre el alcohol y la glicerina es idéntica, requiriéndose en principio, una cantidad de alcohol igual al 10% de la masa de aceite, como se muestra en la Figura 2.13.

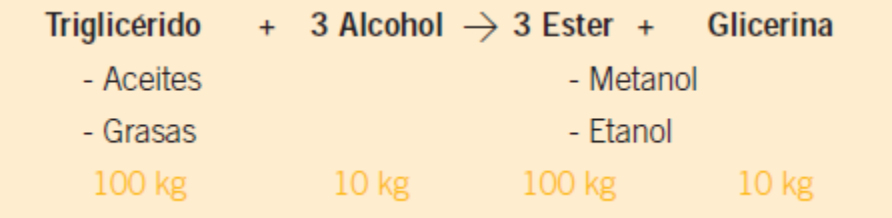

Figura 2.13: Balance de masa en reacción de transesterificación.

El proceso más utilizado entre las empresas productoras de biodiésel es la transesterificación con metanol mediante una catálisis básica (generalmente se utiliza hidróxido potásico KOH), a una temperatura que suele variar entre 40ºC y 110ºC. Durante la reacción de transesterificación se presentan reacciones secundarias que dan lugar a productos indeseables que contaminan los ésteres, por ejemplo los jabones. El jabón se produce a través de la reacción de saponificación de los triglicéridos, reacción que compite con la transesterificación. Además, debido a la presencia de ácidos grasos libres en el aceite refinado, se puede dar la reacción de neutralización, obteniendo así jabón y agua, ambas reacciones representadas en la Figura 2.14. La formación de jabones implica una disminución de la conversión y del rendimiento, la necesidad de etapas posteriores de purificación de los ésteres y el aumento de la posibilidad de que se presenten emulsiones en las etapas de purificación.

Figura 2.14: Reacciones indeseadas que ocurren en la transesterificación.

La siguiente etapa fundamental en el proceso de fabricación de biodiésel es la separación de las fases ester y glicerina y la posterior purificación de los esteres producidos. Al término de la reacción de transesterificación son varios los subproductos que se encuentran en el reactor que habrá que separar de los esteres metílicos o biodiésel. Además de los compuestos del aceite que no han llegado a reaccionar (triglicéridos, diglicéridos, monoglicéridos y ácidos grasos libres), se encuentran en el medio el metanol que se adicionó en exceso, los

restos del catalizador básico, la glicerina, y los productos de las reacciones secundarias (jabón y agua).

Para la obtención del biodiésel se precisa un último proceso de purificación de los esteres, que conlleva la eliminación del exceso de alcohol introducido para aumentar el rendimiento así como el lavado de los ácidos grasos libres y de los triglicéridos, diglicéridos y monoglicéridos que no han esterificado. Generalmente para este proceso se adicionan agua y ácidos minerales, quedando a continuación el ester producido disponible para su utilización como biodiésel. Adicionalmente, y en función de los niveles de impurezas que finalmente presenta el biodiésel (triglicéridos, diglicéridos, monoglicéridos, ácidos grasos libres y agua), se puede someter el producto a una destilación. El agua de lavado que se recupera al término de esta operación contiene principalmente metanol y restos de biodiésel. El proceso productivo queda representado en la Figura 2.15.

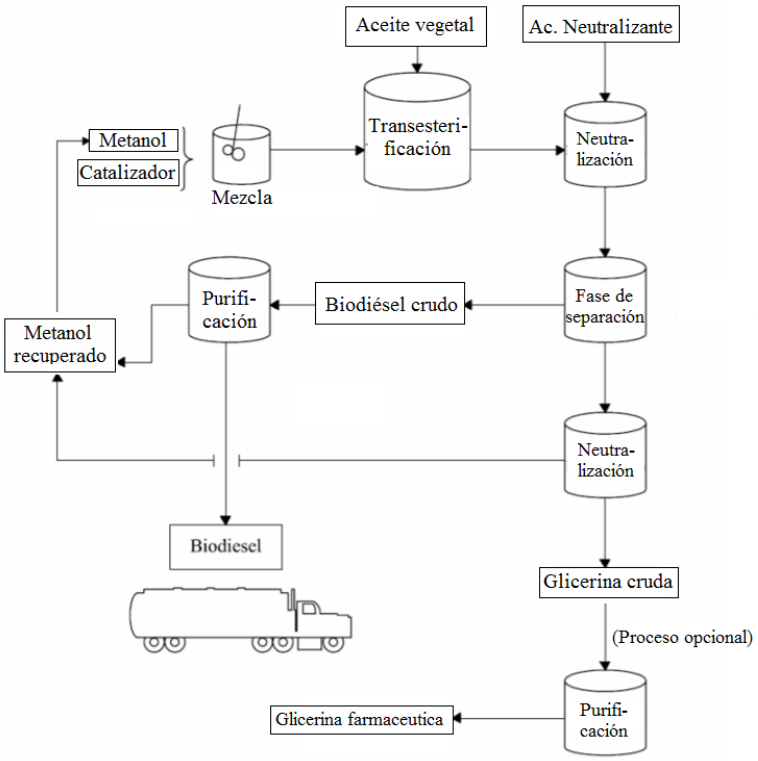

Figura 2.15: Proceso productivo para la obtención de biodiésel.

2.4 Situación actual en Chile

En el año 2006, en el marco del seminario "Agroenergía y Biocombustibles", organizado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), se reconoció la necesidad de buscar alternativas energéticas que puedan complementar y diversificar la actual matriz energética chilena. Dentro de este contexto, se concluyó que los biocombustibles constituyen una opción factible como fuente de energía renovable que permite el desarrollo económico sin deteriorar el medio ambiente, entre otras ventajas.

Así, desde el año 2006, se han iniciado una serie de cambios a nivel nacional que apuntan a aumentar la cuota de participación de las energías renovables no convencionales (ERNC). Ese mismo año se aprobó en el país la "Estrategia Nacional sobre Cambio Climático", la que entrega los lineamientos básicos para abordar e implementar los compromisos establecidos en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, iniciando un proceso que hasta hoy día busca la producción de biocombustibles de manera sustentable.

En el año 2015 Chile participa en "El Acuerdo de París" dentro del marco de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático que establece medidas para la reducción de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) a través de la mitigación, adaptación y resiliencia de los ecosistemas a efectos del Calentamiento Global. El Acuerdo de París establece como una de sus metas contener el aumento de la temperatura media global por debajo de los 2 grados centígrados respecto de los niveles preindustriales hacia fin de siglo y hacer esfuerzos para que este no supere los 1,5 grados centígrados. Chile se compromete al manejo sustentable y recuperación de 100 mil hectáreas de bosque, principalmente nativo, que representará capturas y reducción de Gases de Efecto Invernadero en alrededor de 600 mil toneladas de CO_2 equivalente anuales, y también se compromete a forestar 100 mil hectáreas adicionales de suelos sin vegetación, en su mayoría con especies

nativas, que representarán capturas de entre 900 mil y 1 millón 200 mil toneladas de CO_2 equivalente anuales, ambas acciones a partir del año 2030 (Gobierno de Chile, 2015).

Chile tiene la ventaja de disponer de un amplio espectro de fuentes de energías renovables, las que son limpias, locales y se distribuyen a lo largo de todo el país. Sin embargo, en la actualidad Chile posee un precario desarrollo de biocombustibles, debido principalmente a que no existen cultivos agrícolas que tengan como fin la producción de energía (San Martín et al., 2010), pues la cantidad de suelo disponible en Chile para la producción agrícola es mucho más acotada que en otros países, a diferencia de lo que ocurre en otros países sudamericanos como Brasil y Argentina. En la zona norte del país existen abundantes tierras que no tienen potencial agrícola, que se encuentran con distintos niveles de erosión (González et al., 2000) y que pueden, potencialmente, servir para la producción de biocombustibles de segunda generación.

Los sucesivos gobiernos han avanzado en políticas que ayudan a la producción de biocombustibles y/o investigación en esta materia. A continuación se presentan los principales decretos, resoluciones y leyes que amparan la producción y uso de combustibles en Chile:

- Decreto 11/2008 del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción: Autoriza el uso de biocombustibles en vehículos motorizados, pero establece claras limitaciones en su uso; el Bioetanol solo podrá mezclarse con gasolina automotriz en un 2% o 5%, mientras que el Biodiésel solo podrá mezclarse con petróleo diésel en un 2% o 5%. También define especificaciones de calidad para bioetanol y biodiésel.

- Circular Nº 30 del 16 de mayo de 2007 del Servicio de Impuestos Internos (SII) exime al bioetanol y biodiésel del pago del impuesto específico que afecta a la gasolina y al diésel, según la ley 18.502.[8]

- Ley Nº 20.339/2009 modifica el decreto con fuerza de ley Nº1/1979 del Ministerio de Minería, incorpora los biocombustibles como combustibles líquidos y otorga facultades a la Superintendencia de electricidad y combustibles (SEC) para su fiscalización.

- Resolución Exenta Nº 746 de la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC) establece normas técnicas para el análisis y/o ensayos de bioetanol y biodiésel.

- Resolución Exenta Nº 142/2009 del Ministerio de Economía busca incorporar a los biocombustibles en la cadena de producción, distribución y venta de combustibles líquidos en el país.

- Decreto Nº 160/2009 de del Ministerio de Economía resguarda la seguridad de instalaciones y personas que operan biocombustibles. Establece el reglamento de seguridad para las instalaciones y operaciones de producción y refinación, transporte, almacenamiento, distribución y abastecimiento de combustibles líquido.

- Ley 20.257/08 introduce modificaciones a la Ley General de Servicios Eléctricos respecto de la generación de energía eléctrica con fuentes de energías renovables no convencionales (ERNC), del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción.

[8] El impuesto específico que en el caso de la gasolina automotriz en Chile es de 6 UTM por metro cúbico y en el caso del diésel es de 1,5 UTM por metro cúbico.

Esta modificación a la ley de servicios eléctricos establece la obligatoriedad para las empresas generadoras de electricidad, con capacidad superior a 200 MW, de poseer, al año 2024, al menos un 10% de generación (propia o a partir de otra empresa) proveniente de ERNC.

En Chile se ha fomentado el desarrollo de emprendimientos asociados a la investigación y producción de biocombustibles por medio de fondos concursables CORFO y CONICYT. Innova Chile de CORFO es una de las principales fuentes de financiamiento en proyectos de producción y/o investigación en biocombustibles. Desde el año 2005, la inversión público-privada en esta área ha sido de más de $23.000 millones de pesos concentrándose principalmente en el apoyo a la creación de cinco Consorcios Tecnológicos Empresariales[9], de los cuales dos se enfocan en el desarrollo de los biocombustibles líquidos a partir de material lignocelulósico y tres a partir de algas. Estos se detallan en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9: Consorcios Tecnológicos Empresariales de Biocombustibles

Consorcio	Tipo de materia prima	Integrantes
BIOCOMSA	Lignocelulosa	ENAP Refinerías Universidad de Chile Consorcio Maderero
BIOENERCEL	Lignocelulosa	Universidad de Concepción Universidad Católica de Valparaíso Fundación Chile CMPC Celulosa S.A. Masisa S.A.
ALGAEFUEL	Micro algas	Edelnor Copec Rentapack Bioscan Universidad Católica de Chile
DESERT BIOENERGY	Micro algas	Universidad de Antofagasta Electroandina S.A. Prodalmar Ltda. Molinera Gorbea Ltda. Universidad de la Frontera CICITEM
BAL BIOFUELS	Macro algas	BAL Chile Enap Refinerías Bio Architecture Lab Universidad de Los Lagos

[9] Un Consorcio Tecnológico Empresarial es una empresa formada como una Sociedad Anónima cuyo objetivo es la producción y comercialización de tecnologías en determinados ámbitos del conocimiento.

Los consorcios lignocelulósicos buscan aprovechar la biomasa forestal disponible tanto a nivel de cultivos productivos como el pino y el eucaliptus como a nivel de cultivos no productivos como la lenga (*nothofagus pumilio*) u otros para producir biodiésel y bioetanol. Si bien a nivel mundial la tecnología para transformar la lignina en biocombustibles ya es conocida, aún falta mucho desarrollo para lograr que el proceso sea eficiente, tanto desde el punto de vista del balance energético como de los costos de producción. Algo similar ocurre con el cultivo de algas para la producción de biocombustibles. El proceso tecnológico para la transformación de los lípidos contenidos en algunas especies de algas ya está completamente desarrollado y por lo tanto los desafíos se encuentran principalmente en la determinación de los parámetros de cultivo que optimizan la producción de lípidos (niveles de CO_2, radiación solar, etc.).

Por su parte, la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT), por medio del programa de investigación y desarrollo (I&D) FONDEF, ha invertido más de tres mil millones de pesos en proyectos de bioenergía (Boza, 2011).

Es interesante señalar iniciativas privadas que nacen por la sinergia del negocio, como es el caso de Pullman Bus al construir primera planta de biodiésel de aceite vegetal usado (desde la industria alimenticia) y de aceite vegetal importado, la cual fue inaugurada en noviembre de 2007 en la comuna de Pudahuel (Región Metropolitana). La planta fue construida para producir 200.000 litros al mes con lo cual la empresa espera abastecer el 5% de los requerimientos de su flota de buses.

En general, la producción de biodiésel existente en Chile, se basa principalmente en la utilización de aceite de cocina reciclada y grasas animales. Existen dos antecedentes sobre utilización de cultivos agrícolas para la producción de biodiésel. El primero es el que lleva a

cabo la Universidad de La Frontera en conjunto con el Molino Gorbea y Copec, donde se pretende producir 241.000 litros de biodiésel al año, empleando aceite de raps para su producción. El segundo lo ejecuta la empresa Comercial Bio-Diésel Chile Ltda. quienes pueden producir 50.000 litros de biodiésel al mes utilizando aceite de higuerilla como materia prima.

Otros estudios que se han llevado a cabo demuestran que la guindilla y la camelina, también serían alternativas de segunda generación para la producción de biodiésel. La guindilla es una especie nativa que crece entre las regiones de Valparaíso y del Maule, cuyas semillas poseen alrededor de 38% de aceite (San Martín et al., 2010). La productividad que alcanza la camelina se evaluó bajo las condiciones de algunas ciudades de la zona centro-sur de Chile. Los rendimientos oscilaron entre 420 y 2.314 *kg/ha* de semillas, mientras que el contenido de aceite varió entre 39,8 y 45,4%, constituyéndose como una interesante alternativa para la producción de biodiésel (Berti et al., 2011).

2.5 Factores que influyen en la industria de biocombustibles

Para determinar la conveniencia de la producción de estos combustibles en Chile, se debe analizar la relación que posee esta industria con los distintos agentes involucrados: el sector agrario, el sector forestal, el sector industrial, el sector energético, el sector medioambiental, y las políticas que engloban el quehacer de ellos. Para esto se determinará los factores ambientales, sociales y técnicos que influyen en la producción de biocombustible de forma sostenible en el tiempo considerando los distintos entes relacionados.

2.5.1 Aspectos ambientales

2.5.1.1 Emisión de gases

En esta sección se estudia la influencia que tiene el uso de biocombustibles líquidos en la emisión de gases que favorecen al efecto invernadero y a la acidifación del medio ambiente.

Los gases de efecto invernadero son gases que se encuentran en la atmósfera que contribuyen al efecto del mismo nombre, el cual eleva la temperatura de la superficie terrestre debido a que la atmósfera es casi transparente a la radiación emitida por el sol, permitiendo que esta llegue a la superficie terrestre libremente, pero la mayoría del calor emitido por la tierra es absorbido y regresado a la superficie por gases de efecto invernadero presentes en la atmosfera, impidiendo que se pierda calor hacia el espacio. Estos gases son el vapor de agua, el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O) y el ozono (O_3).

La acidificación del medio ambiente es la pérdida de la capacidad neutralizante del suelo y del agua, como consecuencia del retorno a la superficie terrestre de los óxidos de azufre y nitrógeno descargados a la atmósfera. Los gases que producen la acidificación: óxidos de nitrógeno (NOx) y anhídrido sulfuroso (SO_2), regresan a la superficie en forma de "lluvia acida" que también puede ser rocío, llovizna, niebla y nieve, modificando el equilibrio ecológico. Las consecuencias de este fenómeno ambiental lo podemos observar en los ecosistemas acuáticos, cultivos, bosques y materiales para la construcción, erosionando edificios y monumentos. Asimismo, resulta factible que contribuya a la contaminación de las capas de aguas subterráneas. Además, provoca la acidificación de arroyos, ríos y lagos, aumentando las proporciones de niveles de aluminio y otros metales, y en consecuencia favoreciendo la muerte de peces debido al envenenamiento provocado por la mayor concentración de metales y a la disminución del PH de las aguas. También trae consigo la

aparición de metales en la cadena alimenticia, cuya consecuencia para la salud humana se ve reflejada en la acumulación de plomo en los huesos, riñones e hígado.

Para estudiar la emisión de gases de los biocombustibles se debe realizar una comparación con los combustibles fósiles, considerando el análisis de ciclo de vida (ACV)[10]. Este analiza los impactos acumulativos de la totalidad de la cadena de producción; en biocombustibles desde el cultivo hasta el consumo final y en combustibles fósiles desde la extracción hasta su consumo final, dichas actividades se detallan en la Figura 2.16.

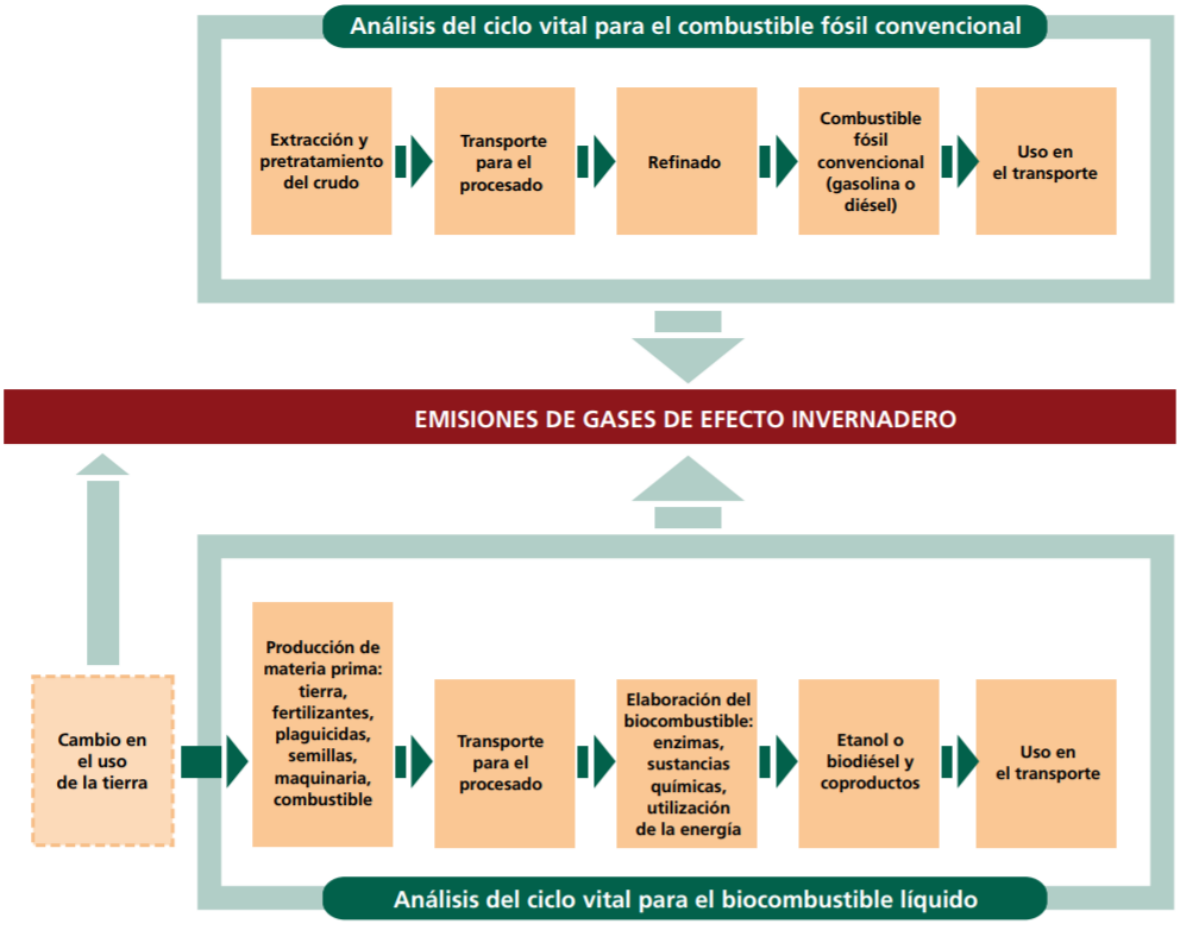

Figura 2.16: Desglose del ACV para combustibles fósiles y biocombustibles líquidos.

[10] El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) es un proceso objetivo que nos permite evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad, identificando y cuantificando tanto el uso de materia y energía como las emisiones al entorno. Este análisis incluye el ciclo completo del producto, proceso o actividad, teniendo en cuenta las etapas de extracción y procesado de materias primeras, producción, transporte y distribución, uso, reutilización y mantenimiento, reciclado y disposición final.

Tanto el etanol de maíz como el de trigo, en mezclas de 2 y 5%, reducen las emisiones de gases de efecto invernadero en relación a los derivados del petróleo (CONAMA, 2007). Sin embargo en vehículos con 10% de etanol se detectan aumentos en la emisión de compuestos tóxicos como acetaldehído (+73%), benceno (+18%) y 1,3 butadieno (+22%) (Ladrón de Guevara, 2006). El etanol también produce acetaldehído, formaldehído (compuestos cancerígenos) y peroxiacetilnitrato (compuesto genotóxico que produce irritación ocular, respiratoria y daño pulmonar).

Por otro lado, dependiendo del tipo de biodiésel (soya, raps o grasa animal) existen diferencias significativas en las emisiones, diésel (Ladrón de Guevara, 2006). El biodiésel obtenido a partir de aceites reciclados reduce las emisiones de dióxido de carbono en 90%, mientras que el biodiésel de raps reduce levemente las emisiones de gases de efecto invernadero, en mezclas de 2 y 5%, a pesar de una mayor producción de N_2O por el uso de fertilizantes (CONAMA. 2007). También, su uso, reduce la emisión de monóxido de carbono, hidrocarburos y material particulado (Ramos, 2006). Sin embargo, aumentan las emisiones de aldehído, benceno y 1,3 butadieno. También aumenta la emisión de amoníaco (NH_3), dióxido de nitrógeno (NO_2) y dióxido de azufre (SO_2), gases que favorecen la acidificación del aire, estos gases se producen principalmente debido al uso de fertilizantes y pesticidas. (CONAMA, 2007).

En la Figura 2.17 se muestran los niveles estimados de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero para diversos cultivos y ubicaciones, excluyendo los efectos del cambio del uso de la tierra[11]. Brasil, un país que cuenta con una extensa experiencia en la

[11] Consiste en la Recuperación del potencial productivo de los suelos agropecuarios degradados para mantener de forma sustentable el estado del suelo.

producción de etanol a partir de la caña de azúcar, presenta unas reducciones incluso mayores. Aunque los biocombustibles de segunda generación siguen resultando insignificantes a nivel comercial, suelen ofrecer reducciones del orden del 70-90 por ciento en comparación con el diésel fósil y el petróleo, sin contabilizar el carbono emitido debido al cambio del uso de la tierra. (FAO, 2008).

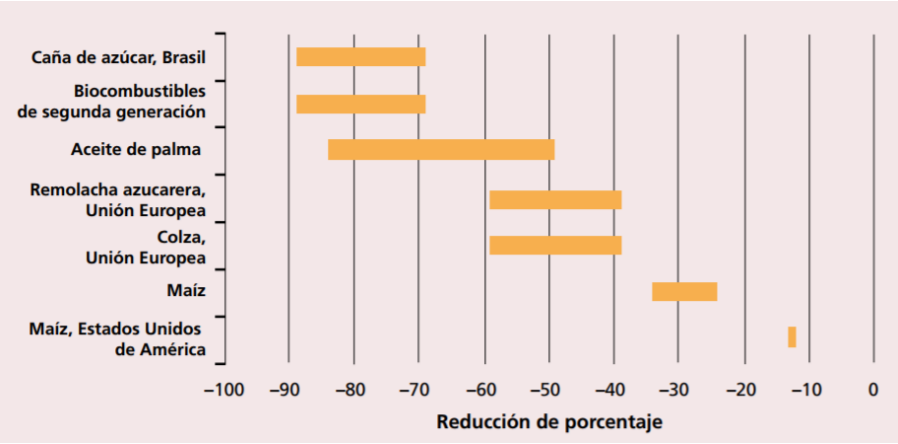

Figura 2.17: Reducción de gases de efecto invernadero en comparación con combustibles fósiles.

Los biocombustibles de segunda generación ofrecen la posibilidad de utilizar residuos (además de cultivos no alimenticios) como materia prima, reduciendo el impacto ambiental que tienen los procesos de otras industrias al aprovechar subproductos indeseables, como lo es el aprovechamiento del cuesco de la aceituna y las cascaras de almendra como biomasa, residuos de la industria porcina en la producción de biogás, los residuos forestales en la producción de bioetanol. Estos antecedentes son especialmente significativos para Chile, dado que al año 2011 posee 33,8 millones de hectáreas forestales, de ellas, 16,6 millones de hectáreas son bosques nativos y plantaciones forestales, las restantes 17,2 millones de hectáreas son áreas protegidas (CONAF, 2011).

2.5.1.2 Bosques nativos y biodiversidad

Un factor negativo es la deforestación a través de la tala de bosques nativos para la siembra de materias primas para producir biocombustibles, como ocurre con el cultivo de soya transgénica para producir biodiésel, que desplaza bosques del Chaco en Argentina, los bosques del Pantanal, del Atlántico y Chaco en Paraguay, mientras que en Brasil se ha cortado parte de la selva amazónica para el cultivo de soya para producir biodiésel. En estos casos el balance de absorción de CO_2 se torna negativo debido a que las especies taladas/cortadas dejan de tomar el dióxido de carbono desde la atmosfera, es decir el procesamiento de estas materias primas aumentaría los gases de efecto invernadero.

Se debe fortalecer la protección de la biodiversidad a través del fomento y protección de los sitios prioritarios de biodiversidad.

2.5.1.3 Uso de recursos hídricos

El mundo está al borde de una crisis sin precedentes ocasionada por la falta de agua. Esta situación se presenta ante el crecimiento de la población, de los requerimientos alimenticios, así como por la creciente industrialización y urbanización. Mientras que la crisis por la falta de agua puede ser parcialmente atribuida a una distribución desigual del agua a nivel geográfico, la situación ha sido exacerbada por la ausencia de políticas públicas, nacionales e internacionales, apropiadas para asegurar el uso sostenible del agua. Esto se puede considerar una desventaja al comparar los biocombustibles con sus símiles fósiles ya que estos no requieren agua para su producción.

La intensificación en la producción agrícola para biocombustibles implica mayor uso de recursos hídricos. Por ello la expansión de estos cultivos y su concentración en algunas regiones requiere evaluar la disponibilidad de recursos hídricos, considerar el mantenimiento

de caudales ecológicos con criterios eco-sistémicos, prevenir la contaminación de las aguas y utilizar sistemas de riego más eficientes.

En la producción de biodiésel el requerimiento de agua es bajo y muy inferior a aquellos del etanol (ver Tabla 2.10). Para abastecer el 2% de la demanda de biodiésel de Chile al año 2010 (96.640 m^3) se requieren alrededor de 37.000 m^3 de agua. Por otra parte, para producir la demanda de etanol dada por un 2% de sustitución de la gasolina a utilizar en Chile el 2010 (64.634 m^3), se requerirían, aproximadamente, 323.000 m^3 de agua (CATA, 2007).

Tabla 2.10: Requerimientos hídricos de los principales cultivos en Chile.

	Producción de etanol			Producción de biodiésel	
Materia prima	Arroz	Maíz	Trigo	Maravilla	Raps
Litros de agua por cada litro de biocombustible	5	5	5	0.3822	0.3822

Fuente: Evaluación de potencial productivo de biocombustibles en chile, UTFSM.

El actual interés por el desarrollo de biocombustibles podría agravar la crisis del agua, y el acceso al agua podría llegar a ser un factor primordial en el desarrollo de la producción de biocombustibles a partir de las materias primas agrícolas. No es suficiente, por supuesto, evaluar solamente el desarrollo de los biocombustibles desde la perspectiva de la crisis inminente del agua. Las políticas e iniciativas nacionales tienen una tremenda influencia en la disponibilidad local del agua. De este modo es necesario perseguir políticas multilaterales y globales así como reglas que aseguren que los tratados comerciales y de inversión no afectan los derechos y las responsabilidades de las naciones para satisfacer las necesidades de su gente y de su ambiente.

2.5.1.4 Cultivos transgénicos

Los organismos genéticamente modificados (OGM), también llamados transgénicos, son organismos cuyo material genético ha sido alterado usando técnicas de ingeniería genética,

como la clonación molecular, la mutación excepcional, la transgénesis, entre otras. El uso de estas especies trae consigo ventajas y desventajas para el productor y su entorno.

Las plantas transgénicas que se cultivan actualmente fueron creadas para mejorar características agronómicas (indiferentemente si se utilizan para consumo humano o en la producción de biocombustibles) como la resistencia a insectos, la tolerancia a herbicidas, un menor periodo de crecimiento, mejoras en la calidad nutricional (en el caso de la caña de azúcar, se puede aumentar su concentración de azúcares) y la creación de plantas más resistentes a factores climáticos como el frio y la sequía. Por lo que los principales beneficios los percibe el agricultor a través de la simplificación en el manejo, el aumento en los rendimientos y la disminución de los costos de producción.

Sin embargo, el uso cultivos transgénicos conlleva el riesgo de contaminar otros cultivos, cruzándose con otros cultivos vía polen y generando nuevas especies también transgénicas, del mismo modo se pueden crear malezas extremadamente resistentes a herbicidas. El maíz transgénico Starlink resistente a insectos “barrenadores del tallo”, aprobado solo para el consumo animal en Estados Unidos, fue encontrado en tortillas de maíz de la marca Kraft Foods en EE.UU en septiembre de 2000 (New York Times, 23 de septiembre de 2000). El uso de cultivos transgénicos implica un mayor uso de herbicida (los cultivos de soya transgénica en Argentina reportan el uso del doble de herbicidas que los de soya convencional). Además se está generando una concentración del mercado de semillas en ciertas compañías biotecnológicas, con lo cual la gran mayoría de las semillas presentes en el mercado estarían manipuladas genéticamente. Debido a ello los agricultores se verían forzados a comprar semillas provenientes de estas compañías, pagando las regalías respectivas por concepto de patentes (Manzur, 2005).

La evolución de la comercialización mundial de semillas transgénicas se muestra en la Tabla 2.11, observándose que el uso de cultivos transgénicos ha aumentado en las últimas décadas. En este contexto Chile permite cultivos transgénicos a lo largo de casi todo el territorio, con débiles medidas de bioseguridad que no resguardan los recursos genéticos[12]. La única normativa específica en Chile respecto a transgénicos consiste en una resolución del Servicio Agrícola y Ganadero (SAG) sobre Normas y Regulación de Liberación de Transgénicos. Según este decreto, solo se autoriza en Chile la entrada de semillas transgénicas para la multiplicación con fines de exportación. No se permite liberación de transgénicos para consumo. Existe además poca capacidad técnica y de fiscalización de estos cultivos por lo que el resguardo debe venir a través de regulaciones legales.

Tabla 2.11: Porcentaje de semillas transgénicas comercializadas a escala mundial.

Cultivo	Año 2000	Año 2002	Año 2003
Soya	34%	51%	55%
Canola	11%	12%	16%
Maíz	7%	9%	11%

Fuente: ISAAA.

Considerando la elevada dificultad para su regulación y la inexistencia de políticas que limiten la propagación de genes mutados a especies vegetales cultivadas para el consumo humano, se debe cuidar la liberación de cultivos transgénicos para la producción de biocombustibles en Chile, por los graves e impredecibles riesgos de esta nueva biotecnología a la salud humana y al medio ambiente, o en su defecto, trabajar en estos puntos identificando zonas geográficas en donde se disminuya el riesgo de contaminación otros cultivos. De esta

[12] El término de "recursos genéticos" se refiere al material genético de valor real o potencial. El material genético es todo material de origen vegetal, animal. Como ejemplos cabe citar material de origen vegetal, animal o microbiano como puedan ser las plantas medicinales, los cultivos agrícolas y las razas animales.

forma se permite el resguardo de nuestro patrimonio genético y de nuestra biodiversidad y el desarrollo de una agricultura alimenticia libre y orgánica.

2.5.1.5 Otros aspectos ambientales

- Los biocombustibles son biodegradables. El biodiésel se degrada cuatro veces más rápido que el combustible diésel convencional, esto se debe al contenido superior de oxígeno que posee el biodiésel (Dermibas, 2009).

- En general, los biocombustibles líquidos presentan un punto de inflamabilidad más alto en comparación con los combustibles fósiles, lo que implica un menor riesgo de incendio en su manipulación y transporte.

- Los cultivos para la producción de biocombustibles pueden ser usados en la recuperación de suelos degradados, salinos y en suelos susceptibles a la erosión, mejorando el hábitat y la biodiversidad del lugar. Los cultivos energéticos perennes[13], contrarios a los anuales, mejoran la cubierta del suelo y forman un extenso sistema de raíces incorporando materia orgánica.

- El biodiésel posee un menor contenido de azufre. El contenido promedio de azufre en el biodiésel equivale al 16% del que posee el diésel convencional (EPA, 2002).

- El biodiésel posee un mayor índice de cetano (IC) en comparación al diésel convencional, esto permite que posean un menor retraso de ignición y por ende el proceso de combustión comienza más rápido y alcanza mayores temperaturas en la

[13] Son cultivos de ciclo largo, es decir que su periodo vegetativo se extiende más allá de los doce meses y por lo regular una vez establecida la plantación, se obtienen varias cosechas.

cámara de combustión. Si la temperatura de la cámara es insuficiente el combustible se quemará parcialmente, es decir, se oxidará formando partículas carbonosas y otros contaminantes que pueden llegar a depositarse sobre las paredes de la cámara de combustión, complicando las combustiones posteriores. El índice de cetano del diésel convencional se encuentra entre 40 - 46 (Demirbas, 2009), mientras que dependiendo de las normativas referidas al biodiésel, como mínimo se pide que sea entre 47 y 51, por ejemplo, el índice de cetano del biodiésel obtenido de la guindilla, es 59, muy por sobre la normativa para el biodiésel (San Martín et al., 2010).

2.5.2 Aspectos sociales

2.5.2.1 Generación de empleos

La producción de biocombustible genera nuevas líneas de actividad económica, considerando producción de materia prima, obtención de biodiésel; procesos, insumos y maquinarias en el proceso productivo. También se incentivan otras actividades como la adaptación de motores de vehículos que permitan el uso de etanol o biodiésel puro o mezclado, así como también el uso en calderas y motores para la cogeneración y la generación de calor. En esta sección se muestran los puestos de trabajo creados de forma directa en la producción de biocombustibles, es decir, se estimó la mano de obra utilizada a nivel de campo, para la producción de granos, y la utilizada en la planta de producción de biocombustibles y coproductos.

La agricultura familiar campesina (AFC)[14] está interesada en el negocio de los biocombustibles, ya que tendría un impacto social importante, mejorando su nivel de vida. Sin embargo se debe establecer una correcta política bioenergética, para evitar que pueda ocurrir una concentración de las tierras de cultivo, como ha ocurrido con otros bienes, como el agua de riego (Turra, 2006).

La producción de biodiésel es intensiva en mano de obra, en especial si se compara con combustibles fósiles u otras fuentes de energías renovables. Se genera un gran número de empleos locales, la mayoría de estos puestos de trabajo son necesarios en tareas agrícolas, de transporte y tratamiento, ubicándose por tanto en zonas rurales en las que el desempleo es mayor. En 2004 Brasil se contabilizaron aproximadamente 700.000 trabajos directos y alrededor de 3,5 millones indirectos debido a la producción de 350 millones de toneladas de caña de azúcar destinadas a la producción de bioetanol (Seixas, 2006).

En Chile se realizó una estimación de la mano de obra a utilizar en la producción de etanol y de biodiésel en los distintos escenarios de demanda al año 2010 (suponiendo la sustitución de un porcentaje de la demanda de gasolina y diésel respectivamente) (CATA, 2007). Para la estimación de la mano de obra total a utilizar para cada biocombustibles, se consideró separadamente la utilizada a nivel de campo, para la producción de granos, y la utilizada en la planta misma de producción de biocombustibles y subproductos. Tanto para el etanol como para el biodiésel se consideraron las plantas de mayor capacidad de producción, es decir, 100.000 m^3 al año y la de 60.000 m^3 al año, respectivamente. La cantidad de empleos que se pueden generar por año en la producción de bioetanol y biodiésel, en cada caso, se presentan

[14] Son agricultores que explotan una superficie inferior a las 12 hectáreas de riego básico, que tienen activos por un valor menor a las 3.500 unidades de fomento, que obtienen sus ingresos principalmente de la explotación agrícola y que trabajan directamente la tierra. La ODEPA estima que son alrededor de 278.000 familias.

en la Tabla 2.12 y en la Tabla 2.13 respectivamente, en donde se comparan escenarios de sustitución de 2%,5% y 10% de la demanda de gasolina y de 2%, 5%, 8%y 9% de la demanda diésel. Para el caso de la mano de obra utilizada en el cultivo de la materia prima se consideró las hectáreas necesarias de cada grano para producir la cantidad de biocombustible estimado para cada escenario de demanda, sin considerar los posibles efectos de economías de escala; por esta razón, la mano de obra utilizada a nivel de campo representa una cota superior. La cantidad de empleos creados para los escenarios de bioetanol y biodiésel se muestran en las tablas 2.12 y 2.13 respectivamente.

Tabla 2.12: Estimación de la mano de obra a utilizar por la industria del bioetanol.

	Mano de obra en planta				Mano de obra en cultivos			
Escenario de demanda	Cantidad de plantas	M.O. por planta	Total M.O. por planta	Cultivo	Cantidad de hectáreas necesarias	Personas por hectárea	Total de M.O. en cultivos	Total de Empleos
2%	1	56	56	Trigo	38.771	0,003	106	162
				Maíz	0	0,014		
5%	2	56	112	Trigo	99.543	0,003	273	385
				Maíz	0	0,014		
10%	4	56	224	Trigo	125.991	0,003	709	933
				Maíz	26.523	0,014		

Fuente: Universidad Federico Santa María – CATA, Diciembre 2006.

Tabla 2.13: Estimación de la mano de obra a utilizar por la industria del biodiésel.

	Mano de obra en planta				Mano de obra en cultivos			
Escenario de demanda	Cantidad de plantas	M.O. por planta	Total M.O. por planta	Cultivo	Cantidad de hectáreas necesarias	Personas por hectárea	Total de M.O. en cultivos	Total de Empleos
2%	2	40	80	Maravilla	0	0,014	216	296
				Raps	78.694	0,003		
5%	4	40	160	Maravilla	0	0,014	439	599
				Raps	160.243	0,003		
8%	7	40	280	Maravilla	39.760	0,014	1.166	1.446
				Raps	226.633	0,003		
9%	8	40	320	Maravilla	76.002	0,014	1.664	1.984
				Raps	227.449	0,003		

Fuente: Universidad Federico Santa María – CATA, Diciembre 2006.

A pesar de que sólo se ha incluido el empleo directo, la evaluación social de toda la cadena de valor de los biocombustibles, que cuantifique las externalidades sobre el empleo indirecto en el uso de los biocombustibles, necesariamente tendría un mayor impacto en el trabajo generado por esta actividad. Se puede apreciar que la generación de empleo en esta industria es escaso, considerando las grandes extensiones de terreno que podrían utilizarse en otras actividades económicas y por lo tanto, no puede ser éste el foco de una evaluación social.

Por otra parte, la contribución a la seguridad y diversificación de la matriz energética chilena, si es un factor social positivo a considerar. En un país con más de 4.000 km de longitud, innumerables climas y condiciones de suelos y realidades sociales diversas, una cantidad importante de ellas ubicadas en localidades aisladas, sin lugar a dudas tener la opción de producir energía utilizando sus propios recursos, constituye una contribución importante al desarrollo nacional a largo plazo (Iglesias, 2010).

Finalmente el desarrollo de biocombustibles a través de cultivos agrícolas implicaría el desarrollo territorial y productivo inclusivo de los pequeños y medianos agricultores, lo que se logra por la agregación de valor en las cadenas productivas ligadas a ellas.

2.5.2.2 Incertidumbre sobre la seguridad alimentaria

Prácticamente la totalidad de la producción de biodiésel a nivel mundial es con cultivos alimenticios (raps, maravilla, palma aceitera y soya), por lo que se ha abierto un debate sobre la pertinencia de utilizar terrenos fértiles para la producción de biocombustibles. Esta problemática afecta negativamente el mercado de alimentos, desabasteciendo y disminuyendo la oferta de alimentos de producción nacional, aumentando precios y eventualmente provocando la escasez de alimentos.

La utilización de cultivos que no sean alimenticios podría servir de solución ante esta problemática (Sims et al., 2010), como lo es el cultivo de la jojoba (cuya especie es *simmondsia chinensis*), es una planta arbustiva capaz de producir cera líquida y tiene sus principales usos en la industria cosmética, en la elaboración de lubricantes y en la industria farmacéutica. En este caso, la utilización de este aceite para la producción de biodiésel está limitado por su alta valoración en dichos mercados, sin embargo esto no ocurre en todas las especies no alimenticias.

Otra alternativa es la utilización de áreas no aptas para el cultivo, debido a suelos áridos y/o bajos en nutrientes. En este sentido tendría cierta ventaja la *jatropha curcas*, especie vegetal que es adaptable a terrenos marginales improductivos, por lo que no desplazaría a los cultivos alimenticios. Se han estudiado las zonas de Chile donde sería posible su introducción y adaptación. Los resultados demuestran que existen sobre 2,8 millones de hectáreas disponibles para su producción considerando restricciones hídricas, térmicas y usos de suelo. La Región de Antofagasta es la que posee la mayor cantidad de terreno disponible con 1,2 millones de hectáreas, pudiendo ser una alternativa real para su producción (Labra, 2009). En este mismo sentido la planta de guindilla también es una alternativa llamativa, el género guindilla se compone de tres especies que se limitan a Chile y Argentina. La guindilla es un pequeño arbusto que crece abundantemente en altitudes de más de 1.500 msnm, siendo una de sus principales ventajas su capacidad para sobrevivir y prosperar en suelos y climas considerados inadecuados para la agricultura. En Chile se encuentra en las zonas montañosas de la zona central, específicamente entre la región de Valparaíso y la del Maule. El biodiésel de esta especie puede ser una fuente viable, sólo si se mejora el rendimiento de obtención de aceite. (San Martín et al., 2010).

2.5.3 Aspectos técnicos

Estas consideraciones apuntan a la operación en el mercado de los biocombustibles, es decir, se toman en cuenta los problemas podrían ocurrir en la plantación de especies agrícolas, procesos productivos hasta la obtención del biodiésel o etanol y en la distribución y venta de los mismos. Se debe considerar que en Chile es limitada la superficie agrícola que puede ser destinada a los cultivos para la producción de biocombustibles de primera generación. En el caso del bioetanol, la producción máxima que se puede alcanzar sin desplazar el grano de sus usos alternativos (como alimentación) es de 104.894 m^3/año, lo que equivale a reemplazar el 3,18% de gasolina al año 2011. En el caso del biodiésel, la producción máxima que se puede alcanzar es de 396.514 m^3/año, lo que equivale a reemplazar 7,94% al año 2011 (CATA, 2007). Además actualmente en Chile, los recursos humanos con conocimiento técnico en la producción y manejo de los biocombustibles son muy escasos. Si bien el gobierno promueva su uso y facilita la investigación de nuevas tecnologías, el conocimiento en los profesionales comenzará a expandirse cuando comience la operación de la industria de los biocombustibles en Chile.

2.5.3.1 Existencia de diferentes especies y procesos productivos

Las distintas especies oleaginosas utilizadas como materia, requieren de diferentes climas (temperatura, humedad, y ciclos de sol), tiempos de crecimiento, necesidades hídricas y de nutrientes en la tierra para potenciar y maximizar su crecimiento. Considerando la gran variedad de climas que existen en Chile, existe un mayor potencial para algunas especies sobre otras. También existen diferencias significativas en los tipos de procesos que se utilizan para obtener el biodiésel y el bioetanol, lo que influye en los costos de inversión y de operación para los productores. Esto dificulta encontrar la especie correcta, la tecnología

adecuada y la mejor zona agrícola, que pueda dar una producción de biocombustible competitiva.

2.5.3.2 Balance de energía

En este punto se analiza el potencial productivo de cultivos tradicionales de Chile, específicamente compara el potencial del trigo, del maíz y del arroz para la producción de etanol, y de la misma forma compara la utilización de raps y maravilla para la producción de biodiésel (CATA, 2007). La comparación se realiza realizando dos tipos de análisis:

- Balance exhaustivo: Considera en forma exhaustiva todos los posibles costos energéticos, incluyendo la energía utilizada por los equipos y máquinas, la mantención de las mismas, los costos de combustible y los costos energéticos de la mano de obra (como la fertilización manual y la siembra manual), de procedencia nacional y extranjera.

- Balance nacional: Este balance solo incluyó el gasto de combustible en cada una de las labores realizadas más los insumos que podrían producirse a nivel nacional y que demandan un gasto de energía; entre ellos se incluyó a la semilla, el muriato de potasio y el carbonato de calcio. No considera los costos energéticos de la producción de maquinaria, fertilizante y agroquímicos que fueron realizados fuera del territorio nacional.

En relación al biodiésel, para ambos cultivos evaluados los balances energéticos fueron positivos con cuocientes de energía de salida sobre energía de entrada que variaron entre 1,9

a 2,1, para el "balance exhaustivo" para maravilla y raps en cero labranza[15] respectivamente. En este análisis se incluyó todo el gasto energético posible a nivel de planta, incorporando incluso el costo de prensado. Además, se incluyó un costo de tratamiento de aguas servidas que duplicó a aquel del etanol, debido a las dificultades para disponer la glicerina que, debido a que ésta prácticamente no tiene valor comercial, se transforma en un potencial contaminante. Al considerar el "balance nacional" que excluye a todos aquellos insumos y maquinaria producidos fuera del país, el cuociente de salida/entrada se incrementó cerca entre 2,5 y 3 veces para maravilla y raps, respectivamente.

En el caso del etanol, en el "balance exhaustivo", los mayores costos energéticos a nivel de campo provienen de los insumos, que representan cerca de un 80% del costo energético total. Dentro de ellos, el nitrógeno representa a su vez, cerca del 80% de los costos, es decir, del costo energético total, cerca de 2/3 son de responsabilidad del nitrógeno aplicado. En este balance energético, los resultados indicaron que con un costo de energía primaria de 9,7 *MJ* por litro a nivel de planta, el balance fue siempre positivo con relaciones de energía neta entre 1,2 y 1,42 para trigo y maíz, respectivamente. Por otra parte, como era de esperar el "balance nacional" presentó relaciones de energía neta muy superiores, que variaron entre 1,65 y 1,93, para arroz en la región del Maule y maíz en la región de O'Higgins respectivamente. Los resultados antes presentados se muestran en la Tabla 2.14.

[15] Cero labranza es una técnica de cultivo sin alteración del suelo mediante arado, lo que incrementa la cantidad de agua que se infiltra en el suelo, aumenta la retención de materia orgánica y la conservación de nutrientes en el suelo.

Tabla 2.14: Balance energético global para sistemas productivos seleccionados para la producción de etanol y biodiésel.

Biocombustible	Etanol						Biodiésel			
Materia prima - Región	Trigo - Riego - VII		Maíz - VI		Arroz - VII		Raps – Cero Labranza - IX		Maravilla - VII	
Indicador	Exhaustivo	Nacional	Exhaustivo	Nacional	Exhaustivo	Nacional	Exhaustivo	Nacional	Exhaustivo	Nacional
Energía de entrada (MJ/L)	19,5	13,5	16,8	12	18,5	14,2	15	5	17,2	7,2
Energía de salida (MJ/L)	24,3	23,4	23,9	23,1	24,2	23,5	32	32	32	32
Entrada/Salida	1,25	1,73	1,42	1,93	1,31	1,65	2,13	6,4	1,86	4,5

Fuente: Universidad Federico Santa María – CATA, Diciembre 2006.

De este estudio se infiere, además, que a nivel de planta, el costo energético de producción de etanol es aproximadamente ocho veces mayor que el costo energético de producción de biodiésel.

El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), en junio de 2010 produjo un balance energético para el etanol de maíz basado en datos recolectados el año 2005. Se encontró que el cuociente entre la salida de energía y la entrada de energía para el etanol de maíz era de 1,4 sin permitir procesar subproducto (granos para alimentación). Después de permitir el subproducto, la relación de energía está entre 1,9 y 2,3.

2.5.3.3 Estimación de costos y rentabilidad

En el estudio señalado en el punto anterior (CATA, 2007) se evalúa la factibilidad económica de producir en Chile etanol y/o biodiésel a partir de cultivos seleccionados en distintas regiones utilizando variadas técnicas agrónomas para la producción de la materia prima. Se estudia el primer eslabón de la cadena productiva, la producción de materia prima a través de labores agrícolas considerando los ingresos y costos asociados, y calculando la rentabilidad esperada para el productor. Las rentabilidades por hectárea que se pueden obtener de catorce cultivos a nivel de productor individual se muestran en la Tabla 2.15.

Tabla 2.15: Rentabilidad de cultivos para sistemas productivos seleccionados.

Ítem	Trigo valle central de riego - VII	Trigo secano interior VIII	Trigo secano interior cero labranza VIII	Trigo precordillera tradicional VIII	Trigo precordillera cero labranza VIII	Maíz VI	Maíz VII
Rendimiento (qq/ha)	80	40	40	55	55	120	120
Precio ($/qq)	11.841	11.841	11.841	11.841	11.841	8.921	8.921
Ingreso bruto ($)	947.304	473.652	473.652	651.272	651.272	1.070.496	1.070.496
Costo total ($)	726.224	504.198	428.344	631.978	554.151	878.471	882.382
Margen bruto ($)	221.080	-30.546	45.308	19.294	97.121	192.025	188.114
Renta anual (/ha)	**30,4%**	**-6,1%**	**10,6%**	**3,1%**	**17,5%**	**21,9%**	**21,3%**

Fuente: Universidad Técnica Federico Santa María - CATA. Diciembre 2006.

Tabla 2.15: Rentabilidad de cultivos para sistemas productivos seleccionados (continuación).

Ítem	Maíz VIII	Arroz VI	Arroz VII	Arroz VIII	Raps precordillera tradicional IX	Raps precordillera cero labranza. IX	Girasol o Maravilla VII
Rendimiento (qq/ha)	120	70	70	70	35	35	25
Precio ($/qq)	8.921	10.461	10.461	10.461	14.549	14.549	15.027
Ingreso bruto ($)	1.070.496	732.249	732.249	732.249	509.229	509.229	375.683
Costo Total ($)	899.848	676.926	641.899	640.035	519.178	492.547	661.124
Margen bruto ($)	170.648	55.323	90.350	92.214	-9.949	16.682	-285.441
Renta anual (/ha)	**18,9%**	**8,2%**	**14,1%**	**14,4%**	**-1,9%**	**3,4%**	**-43,2%**

Fuente: Universidad Técnica Federico Santa María - CATA. Diciembre 2006.

De los 14 escenarios, 9 tienen rentabilidad menor a 15%, específicamente al observar la rentabilidad del cultivo de maíz y raps, se observa que, a los precios utilizados para la evaluación, el maíz tiene rentabilidad positiva, no así el raps que tiene una leve rentabilidad negativa, la cual se hace positiva (pero baja) cuando el cultivo se realiza en cero labranza. En el caso de la maravilla o girasol, la rentabilidad para el productor siempre es negativa, se debería aumentar al doble el precio del quintal para alcanzar una rentabilidad de 10%. Esto

implica que la producción de biocombustibles en algunos casos requeriría de precios más altos por los cultivos de los que se pagan a la fecha, lo que haría poco probable la compra de estos por parte de las plantas productoras de biocombustibles, y fomentaría la importación de materia prima a un menor precio.

El estudio también destaca la necesidad de tener plantas productoras que puedan procesar distintos tipos de cultivos. Respecto de potenciales ubicaciones, éstas se localizarían generalmente desde la Región del Maule hacia el sur, las que dependerían de la disponibilidad de cultivos, distancias a centros de consumo de productos y subproductos y valor del suelo.

Por último los precios a los cuales podría comercializarse el etanol y el biodiésel se muestran en la Tabla 2.16 y en la Tabla 2.17 respectivamente. No se contemplan restricciones a las importaciones, asumiendo que las plantas obtienen retornos del 12%.

Tabla 2.16: Precios competitivos para etanol.

Capacidad de planta (m3/año)	Materia prima		
	Precio en US$/L		
	Arroz	Maíz	Trigo
80.000	0,903	0,693	1,006
100.000	0,903	0,696	1,006

Fuente: Universidad Técnica Federico Santa María - CATA. Diciembre 2006.

Tabla 2.17: Precios competitivos para biodiésel.

Capacidad de planta (m3/año)	Materia prima	
	Precio en US$/L	
	Raps	Maravilla
40.000	0,903	0,693
60.000	0,903	0,696

Fuente: Universidad Técnica Federico Santa María - CATA. Diciembre 2006.

Un análisis de sensibilidad a la rentabilidad determina que los parámetros claves son el precio del biocombustible y el precio del grano. En el caso del etanol, los ingresos por el biocombustible representan del orden del 87% de los ingresos totales de la planta, mientras que el costo del grano representa del orden del 64% de los costos operacionales de una planta.

También se consideró como ingreso la venta de los DDGS (12.3%) y de CO_2 (0,6%), y como egresos los costos operacionales de energía (8,1%), costos operacionales de químicos (11,2%) y otros costos de operación 8,1%). De la misma forma en el biodiésel, tanto los ingresos como los costos están fuertemente concentrados. En este caso, los ingresos por la venta de biodiésel representan el 77% de los ingresos totales, y el costo del grano corresponden al 72% de los costos operacionales totales, respectivamente. Otros egresos son los costos operacionales de energía (1,9%), costos operacionales de químicos (6,2%) y otros costos de operación (20,2%) y otros ingresos son la venta de la torta (21,7%) y de glicerina (0,5%).

Si bien estos resultados parecieran favorecer la opción del etanol, el problema que se presenta es que ésta requeriría importar maíz en cantidades significativas, pues la disponibilidad de tierras aptas para su producción en Chile no alcanzaría para satisfacer ni siquiera el escenario de demanda del 2%. Por otra parte, el raps presenta a este respecto un gran potencial puesto que hoy sólo se cultiva del orden del 5% de la superficie potencial, apta para producirlo. En tal sentido la producción de biodiésel a base de raps satisface de mejor modo el objetivo de independencia energética asociado a la producción nacional de biocombustibles.

2.5.3.4 Desventajas operacionales en la incorporación de biocombustibles a la red.

Existe cierta resistencia en la industria petrolera nacional respecto a incluir a los biocombustibles dentro de su modelo de negocio. Esta barrera es más crítica en el caso del bioetanol que en el del biodiésel, principalmente porque Chile es un país excedentario en producción de gasolina y al reemplazar una fracción de gasolina por bioetanol se genera una mayor sobreoferta de este producto.

Las características de almacenamiento, manejo, mezclado y uso de biodiésel puro (B100) son muy distintas a las de una mezcla de B20 o menor de biodiésel. El B100 posee propiedades de solvente y una mayor temperatura de congelación en comparación con el diésel convencional, por lo que es necesario calentar las líneas y estanques en climas fríos para evitar que se transforme en gel, dado que las soluciones o mezclas siempre se congelan a menor temperatura que el solvente puro (CNE, 2008). Cuando esta calefacción es insuficiente la viscosidad aumenta a niveles mayores que la del diésel, lo que aumenta el consumo energético de los sistemas de bombeo e inyección. Ésta es la principal razón por la cual se utilizan mezclas de biodiésel con diésel en climas fríos.

Otra característica del B100 es que no es compatible con el material de algunas mangueras y uniones en los equipos de las estaciones de servicio, pudiendo ablandar y degradar ciertos tipos de gomas utilizados en estos elementos, causando fugas al punto de romperse por completo.

Con respecto al bioetanol, su transporte mediante tuberías es una opción limitada debido a que absorbe agua e impurezas de las líneas. Además se acostumbra revestir el interior de los estanques de almacenamiento de gasolina con materiales epóxicos o resinas de poliéster, materiales que no son compatibles con las mezclas de bioetanol, se produce un desgaste de los estanques y la potencial fuga de combustible, debido a que la mezcla reacciona químicamente con estos materiales.

En suma, la incorporación masiva de biocombustibles en la matriz energética chilena implicaría que las empresas de distribución deberían realizar inversiones en infraestructura necesarias para resolver estos problemas.

2.6 Conclusiones Capítulo I

En Chile no existe un profundo desarrollo de biocombustibles, las actividades que más se desarrollan son las relacionadas con la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal usado, pero la capacidad de producción es aún muy pequeña. Sin embargo Chile cuenta con una serie de elementos que constituyen una buena plataforma tecnológica que ayude a materializar proyectos de inversión relevantes a futuro. Algunos estos elementos son: existencia de importantes grupos de investigación en las áreas biológica, agrícola y acuícola (especies acuáticas), así como también un grupo de industrias que podrían beneficiarse enormemente del desarrollo de este tipo de tecnologías como son las industrias forestal, salmonera, minera y de energía.

Es fundamental tomar conciencia que no existe una solución única que permita eliminar por completo nuestra dependencia de los combustibles fósiles. Esto no significa que no se deba trabajar para reducir esta dependencia, sino que es prioritario focalizarnos en soluciones que nos permitan aprovechar las ventajas que nuestro país ofrece. Si bien en Chile todas las energías renovables tienen un gran potencial de aportar en el logro de este objetivo, la bioenergía (biocombustible) se transforma en una de las opciones claves, principalmente debido a que emplean la misma infraestructura logística de los derivados del petróleo, donde en un comienzo la renovación del parque vehicular no significaría costos adicionales excesivos.

Conclusiones sobre el desarrollo de una industria de biocombustibles en Chile no resultan auspiciosas, sin embargo ésta es una industria de gran dinamismo, y que está en fase de desarrollo, por lo tanto existe la opción a ingresar hoy a un mercado para capitalizar el *know how* futuro. Esta opción posee un valor que puede ser muy alto y justificar, por sí mismo, la

decisión estratégica de producir biocombustibles, a pesar de que con la tecnología actual aparezca como poco rentable.

La producción de biocombustible a partir de especies vegetales tiene la peculiaridad de poseer procesos altamente conocidos y una gran variedad de materias primas, sin embargo estos procesos no son factibles de practicar en todas las zonas, debido principalmente a factores climáticos. En caso de ingresar al mercado, las alternativas de primera generación que ofrecen más ventajas para Chile, son el maíz para etanol, y maravilla para biodiésel, en otros países la productividad de estas especies puede verse superadas.

Al respecto cabe señalar que la producción de biocombustibles de segunda generación a partir de materiales lignocelulósicos constituye una opción de futuro en la cual el país podría tener muchas ventajas competitivas. De la misma forma el cultivo de algas para biocombustibles de tercera generación, considerando el vasto territorio marítimo, posiciona a Chile como posible productor de este combustible, sin la necesidad de competir con la industria alimenticia. Otra alternativa es el cultivo de *jathropa curcas* en zonas poco húmedas, como el norte del país.

En cuanto a los aspectos ambientales que se ven afectados por el uso de biocombustibles, existen ventajas y desventajas. Se debe trabajar por aprovechar las ventajas y buscar formas de paliar las cualidades negativas. Los biocombustibles ayudan a disminuir la emisión de gases de efecto invernadero, pero favorece la emisión de otros contaminantes. Es necesario realizar trabajos de investigación sobre producción de hollín en estos combustibles, en mezclas y en estado puro, debido a la poca información que se tiene al respecto.

Los aspectos sociales son mayoritariamente positivos, aunque la creación de empleo es marginal, y no clasifica como aspectos beneficiosos para la sociedad, ya que se pueden crear

más fuente de trabajo si se desarrollan otras actividades en vez de la producción de biocombustible.

Los aspectos técnicos son desalentadores, están asociados a la baja inclusión que tiene este tipo de combustibles en el mercado chileno. Es posible que estas limitaciones se superen con mayor investigación sobre el potencial que tienen otras especies en Chile. Además es necesario que exista motivación, por parte de las empresas de distribución de combustible que actualmente existen, a incorporar biocombustibles a la red logística, considerando los cambios estructurales que se deben efectuar para su buen funcionamiento.

3. CAPÍTULO II: PLANIFICACION Y CONSTRUCCIÓN DE APARATO EXPERIMENTAL

En el capítulo anterior se analizó el potencial que tiene Chile como productor de biocombustibles, y cuáles de estos son una alternativa real que ayude a disminuir la dependencia al diésel en el corto plazo. Se tiene poca información sobre el comportamiento de los biocombustibles líquidos al ser quemados, es por eso que el siguiente paso es construir un dispositivo que permita el almacenamiento, inyección, vaporización y quema de combustibles líquidos con el fin de analizar la llama resultante y determinar cuáles son los factores que influyen en la formación de hollín.

Por otro lado se desea comprobar los resultados numéricos obtenidos en el estudio de Liu, Consalvi y Fuentes (2014) sobre el efecto sobre la formación de hollín que tiene la adición de vapor de agua en el flujo de aire en llamas de difusión laminar. Para este objetivo se debe incorporar al sistema los instrumentos para el almacenamiento, inyección y calentamiento post-vaporización de agua para ser ingresada a un mismo quemador en estado gaseoso. Nótese que no se indica la incorporación del sistema de vaporización para agua, esto se debe a que dicho sistema ya fue adquirido en instancias anteriores, por lo que su justificación no forma parte del presente trabajo.

El diagrama de flujo de los procesos involucrados en el aparato experimental se puede apreciar en la Figura 3.1, dicho flujo es válido para ambos propósitos antes señalados (sistema para biocombustible y sistema para agua).

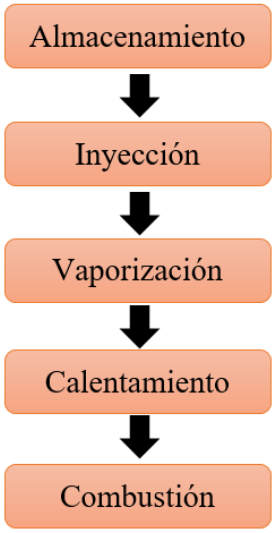

Figura 3.1: Diagrama de flujo del funcionamiento del dispositivo experimental.

Se debe encontrar la configuración que funcione de mejor forma que asegure la generación de una llama de difusión en régimen laminar, alimentada en forma constante con un biocombustible en estado gaseoso durante un lapso de tiempo que permita realizar las mediciones relacionadas con la producción de hollín en esta llama. La determinación de esta configuración debe considerar las limitaciones en presupuesto y espacio, y contempla:

- Diseñar y construir un banco para el soporte de las componentes del aparato experimental.
- Diseñar y construir un quemador que permita la combustión de un biocombustible previamente evaporado con una mezcla comburente.
- Construir un sistema de almacenamiento biocombustible en estado líquido.
- Instalar y poner en marcha un dispositivo de evaporación del biocombustible líquido que además lo inyecte en un gas de transporte.
- Diseñar y ensamblar un sistema de calefacción para mantener el biocombustible evaporado en estado gaseoso.

Se comienza desde una base teórica de investigaciones similares e información conceptual, para la obtención de datos, herramientas y procedimientos a utilizar. Una vez creado el modelo teórico se procede con las cotizaciones y compras las cuales deben responder a las restricciones presupuestarias, para finalizar con la instalación y prueba del aparato experimental.

3.1 Marco teórico

3.1.1 Tipos de llama

En procesos de combustión, el combustible y el comburente son mezclados, para luego reaccionar y producir dicho proceso, lo que se manifiesta en la generación de una llama. El combustible y el comburente son mezclados de dos formas, provocando dos tipos de llamas; el primero es la llama de premezcla, en la cual el combustible y el comburente son mezclados antes del proceso de combustión; en el segundo caso la mezcla del combustible y el comburente ocurre por difusión molecular, por lo tanto la llama generada de esta forma se denomina de difusión. Ambas llamas pueden exhibir un comportamiento laminar o turbulento dependiendo de la velocidad a la cual se inyecta el combustible.

Normalmente en un laboratorio las llamas de premezcla se obtienen mediante un quemador tipo Bunsen, mientras que las llamas de difusión se generan quemadores Bunsen, Santoro o Gülder. Las llamas de difusión son las más comunes en aplicaciones domésticas y fenómenos naturales, tales como el encendido de un fósforo, la llama de una cocina, un incendio, entre otros.

En las llamas de difusión no es posible controlar la tasa de mezcla, debido a que tanto el combustible como el comburente alcanzan la zona de reacción a través de difusión molecular. Una llama de difusión laminar en una configuración co-flujo (ver Figura 3.2) ofrece mayores ventajas que las llamas reales involucradas en procesos de combustión e incendios, en

particular una configuración más simples y un procedimiento experimental repetible. Esta llama permite estudiar exhaustivamente la zona de reacción, los fenómenos de transporte y transferencia de calor y por ende los factores que influyen en la propensión a la formación de hollín, además de permitir la validación experimental de modelos numéricos relativos a la formación y producción de hollín.

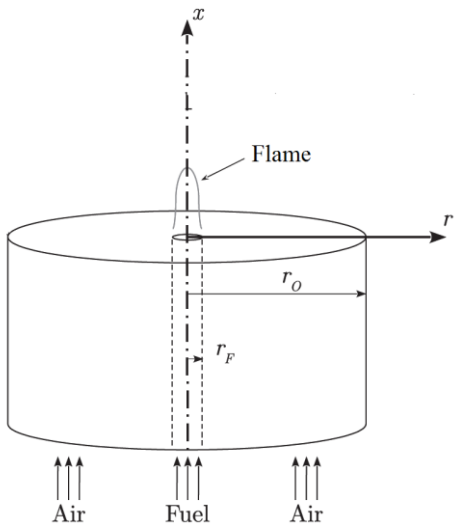

Figura 3.2: Esquema de una llama de difusión producida en co-corriente.

Para la medición de hollín es necesario vaporizar los combustibles líquidos, principalmente porque la mayoría de los procesos ocurren en este estado de agregación. Se podría hacer combustión en estado líquido y medir la propensión a la formación de hollín pero los resultados no serían atribuibles, por ejemplo, al proceso de combustión de los vehículos.

3.1.2 Producción de hollín

El hollín es una nube de nanopartículas aglomeradas con diámetros entre 6 y 30 *nm*, compuestas principalmente de carbono. La densidad de la partícula de hollín varía en torno a los 1,84701 g/cm^3 (Choi et al. 1994). Una partícula de hollín recién formada tiene un alto contenido de hidrógeno, y una relación C/H cercana a 1. Sin embargo, a medida que el hollín

madura, la fracción de carbono aumenta, hasta llegar a aproximadamente a ocho partes de carbono y una parte de hidrógeno.

La formación de hollín es un proceso complejo, dado que contempla la evolución de la materia debido a la acción de numerosas reacciones químicas y físicas dentro de unos pocos milisegundos, se forma durante la combustión incompleta de moléculas precursoras como el acetileno.

El hollín es una especie de transición de fase gaseoso-sólida donde la fase sólida no presenta estructuras físicas y químicas únicas. El hollín de fase gaseosa contiene hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), los que pueden provocar mutaciones en seres vivos y están clasificados como carcinógeno humano por el Organismo Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC). También las partículas de hollín se pueden mezclar con óxidos metálicos y con minerales y pueden revestirse con ácido sulfúrico dependiendo de las condiciones del medio

Muchos detalles de la química de la formación de hollín siguen sin respuesta y controversiales, pero ha habido algunos acuerdos en cuanto a los procesos o estados que participan en la formación de hollín (ver Figura 3.3) (Omidvarborna, Kumar y Kim, 2015):

- El hollín comienza con algunos precursores o bloques de construcción.
- La nucleación de moléculas pesadas se produce para formar partículas.
- El crecimiento superficial de una partícula procede por adsorción de moléculas en fase gaseosa.
- La coagulación ocurre a través de colisiones reactivas de partícula-partícula.

- La oxidación de las moléculas y partículas de hollín reduce la formación de hollín.

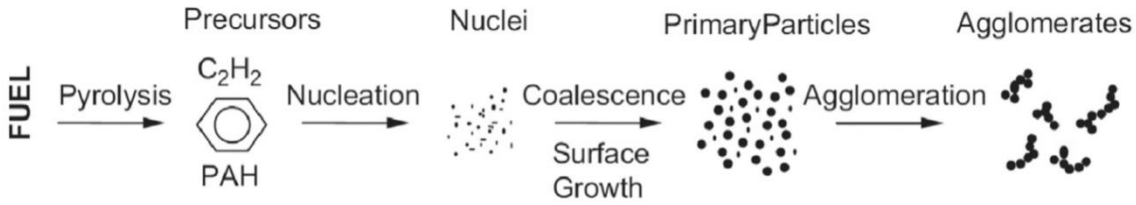

Figura 3.3: Procesos en la formación de hollín.

La producción de hollín es un problema importante que aún no ha sido resuelto por completo. Éste es un aspecto importante en sistemas reactivos y procesos, ya que es considerado un indicador de contaminantes y consecuentemente un producto indeseado. En la fase de oxidación del hollín, ciertos procesos reducen su masa convirtiendo partículas sólidas de hollín o parte de ellas en gases como CO y CO_2, esta oxidación ocurre durante y después de la formación del hollín.

En el último tiempo se han hecho avances significativos en la formulación de modelos matemáticos para predecir la formación de hollín, sin embargo, todavía existe una brecha entre los modelos de hollín existentes y los procesos reales. La brecha se hace aún mayor cuando se trata de la formación de hollín de la combustión de combustibles oxigenados (biocombustibles) debido a las diversas composiciones y diversos tipos de materias primas.

A pesar de esto, trabajos previos han demostrado que un incremento en la producción de hollín influye positivamente en las propiedades de radiación de una llama (Cacua, Amell & Cadavid, 2012), provocando un consecuente aumento en la tasa de liberación de energía mediante este mecanismo, lo que presupone un proceso más eficiente en términos de aportar calor al sistema. Entonces existe una discrepancia entre mayor producción de contaminantes

versus una reacción exotérmica más eficiente que libere una mayor cantidad de energía por unidad de combustible.

3.1.3 Aspectos a medir de la llama de difusión

En esta investigación los procedimientos se basan en la medición de índices desarrollados con anterioridad por diversos autores con objetivos semejantes bajo el contexto de la medición de hollín en las llamas de difusión, en este caso se definen cuatro principales características de la combustión de hidrocarburos: *smoke point height, threshold sooting index, yield sooting index* y el índice de oxígeno.

Smoke point height (SPH): Es definido como la altura visible de una llama que no emite hollín pero que si se aumenta ligeramente comienza a hacerlo. En la teoría se conoce como *Laminar Smoke Point* (Punto de humo laminar), el cual es la variable que describe las propiedades de formación de hollín de un combustible. Cuánto más alto sea el SP, menores serán sus propiedades de formación de hollín, en términos de generar una tasa mayor de partículas de hollín. Una gran variedad de factores afecta a la obtención del SPH: la homogeneidad del flujo oxidante tiene vital importancia, al igual que el tipo de quemador en donde se produzca la llama y las condiciones ambientales como la gravedad.

Threshold sooting index (TSI): El índice de umbral de las deposiciones es un número independiente de dispositivo, y se puede calcular a partir del SPH:

$$TSI = \frac{A*PM}{SPH} + B \qquad \text{Fórmula 3.1}$$

En donde PM es el peso molecular del compuesto en estudio y A y B son constantes específicas para el dispositivo. Relaciones cuantitativas se han desarrollado a partir de los valores medidos de la TSI de más de 100 hidrocarburos de estructura molecular diferente que permiten predecir la TSI para otros hidrocarburos mediante modelos de predicción. Esto es

posible porque en una llama de difusión, la producción de hollín aumenta en el siguiente orden: alcanos < alquenos < alquinos < compuestos aromáticos, el valor TSI aumenta con el aumento del número de carbonos de cada compuesto.

Yield Sooting Index (YSI): El índice de rendimiento deposiciones de hollín (YSI) (McEnally & Pferfferle, 2007) se calcula por el dopaje de pequeñas cantidades de compuestos en el combustible de la llama de metano/aire y midiendo la fracción de volumen máximo resultante de hollín. Entonces el índice YSI es independiente del dispositivo para un compuesto de ensayo y puede calcularse utilizando la siguiente relación:

$$YSI = C * f_{soot,max} + D \qquad \text{Fórmula 3.2}$$

Donde $f_{soot,\ max}$ es la fracción máxima de volumen resultante de hollín y se mide en la llama utilizando técnicas de láser no intrusivas, mientras tanto C y D son constantes que dependen de aparatos. Usando este método McEnally y Pfefferle calculan las tendencias de las deposiciones de hollín de 72 compuestos aromáticos no volátiles, 89 hidrocarburos regulares y 186 compuestos oxigenados con diferentes grupos funcionales.

Índice de oxígeno (OI): Se define como la concentración de oxígeno presente en el flujo de oxidante que está compuesto por un diluyente determinado:

$$OI = \frac{V_{oxigeno}}{V_{oxigeno} - V_{diluyente}} \qquad \text{Fórmula 3.3}$$

Donde V es el flujo volumétrico y el diluyente puede ser nitrógeno (N_2), argón (Ar), helio (He) y dióxido de carbono (CO_2). La variación del OI altera las propiedades de la zona reactiva, en términos de temperatura y concentración de especies, lo cual afecta los procesos de formación y oxidación. Es importante obtener información experimental confiable de la distribución de la fracción en volumen de hollín bajo diferentes condiciones de OI para

validar modelos de producción de hollín y entender completamente el fenómeno que ocurre en la llama.

3.1.4 Dispositivo experimental

El dispositivo experimental tiene como propósito obtener distribuciones locales de la fracción de volumen de hollín y la temperatura del hollín dentro de la llama mediante técnicas de diagnóstico no intrusivas. Estas mediciones deben efectuarse de forma simultánea, para estos efectos se propone el montaje mostrado en la Figura 3.4.

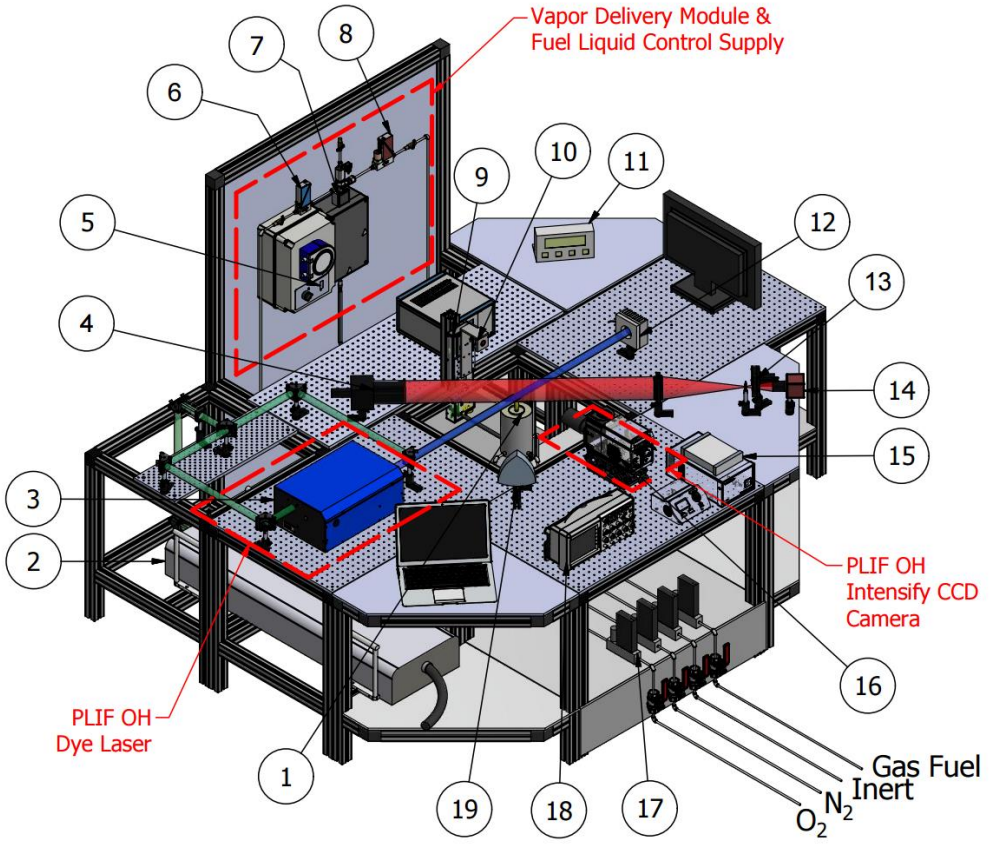

Figura 3.4: Esquema del montaje de dispositivo.
(1) Quemador, (2) Laser 100 mJ, (3) Laser de color, (4) Diodo laser, (5) Bomba peristáltica, (6) Controlador de flujo líquido, (7) VDM, (8) Controlador de flujo gaseoso, (9) Motor lineal, (10) Medidor radial, (11) Controlador de flujo, (12) Medidor de potencia del láser, (13) Filtro de rueda motorizado, (14) Cámara CCD, (15) Generador de pulsos y retardos, (16) Cámara ICCD, (17) Medidor de flujo gaseoso, (18) Osciloscopio, (19) Cámara EMCCD.

En esta configuración se deben tener las siguientes consideraciones que ayudan a un buen funcionamiento del dispositivo:

- El quemador será de tipo Gülder con dos bandas calefactoras internas (ver seccion 4.2 “Diseño y construcción del quemador”) y una cubierta aislante (colocar figura con las dimensiones del quemador Gulder). En adelante este quemador se denominará *heated burner* (HB). En esta configuración el combustible se inyecta a través del tubo central mientras que el comburente (una mezcla de oxígeno y nitrógeno) son inyectados al espacio anular.

- El combustible consistirá en un biocombustible líquido evaporado y mezclado con un gas transportador (*carrier gas*), el cual será inerte (nitrógeno) o combustible (metano).,

- El circuito de conducción de combustible desde el evaporador hacia el HB debe ser mantenido a una temperatura tal que evite la condensación del biocombustible. El HB también debe ser calentado, con el fin de evitar cualquier condensación de combustible dentro de él.

- Con el fin de determinar en forma precisa la fracción de biocombustible suministrado al HB, los flujos másicos de biocombustible, gas transportador y comburente estarán regulados por controladores de flujo. El controlador de flujo de biocombustible es de tipo Coriolis, mientras que los otros son de tipo térmico.

- Se utiliza la técnica de visualización de incandescencia inducida por láser (LII), la cual es una herramienta útil de diagnóstico para medidas de alta resolución, tanto espacial como temporal, de hollín. Mediante esta técnica es posible obtener información sobre la masa, temperatura, la fracción de volumen así como el tamaño del hollín. El método se basa en el calentamiento del hollín contenido en un cierto volumen por medio de un pulso láser de alta energía el cual es absorbido por la nube de hollín, luego esta nube emite una radiación cercana a la de un cuerpo negro[16]. Resolviendo las ecuaciones de balance de energía y de masa, y teniendo en cuenta los fenómenos relevantes en la absorción de la energía y las pérdidas de calor, es posible determinar la temperatura y el diámetro del hollín en cualquier instante de tiempo.

- Se utiliza el método de atenuación de la línea de visión (LOSA) para medir la fracción de volumen de hollín debido a su simplicidad y precisión. Es una técnica óptica no intrusiva, que evita los numerosos inconvenientes de muestreo físico y que requiere menos acceso óptico que otras técnicas de medición. Las aplicaciones de LOSA incluyen la medición de especies gaseosas dentro de los motores de automóviles y quemadores de laboratorio. La técnica utiliza la absortividad espectralmente selectiva de las moléculas de gas a la radiación infrarroja. Comúnmente se utiliza un láser HeNe. Durante una medición, el haz láser es posicionado sobre toda la anchura de la llama a una cierta altura, la absorción por la especie objetivo atenuará el haz láser y la absorbancia a una cierta longitud de onda.

[16] La Radiación de cuerpo negro se refiere a un objeto o sistema que absorbe toda la radiación incidente sobre él, y toda la energía incidente desde el interior es emitida.

3.1.5 Sistemas de evaporación

Uno de los procesos más importantes que se deben lograr en el dispositivo experimental es la evaporación del biocombustible.

3.1.5.1 Sistema de burbujeo

Este sistema consiste en utilizar un gas inerte para transportar el combustible líquido (gas portador). Para evaporar pequeñas cantidades de líquido el gas portador a circula través de un depósito calentado lleno del líquido a ser evaporado. El líquido se evapora tan pronto como entra en contacto con el gas, por lo tanto las burbujas formadas en el depósito contienen una mezcla del gas portador y el líquido evaporado. Este método de evaporación es difícil de aplicar a la evaporación de una mezcla de diferentes líquidos (como un biocombustible), puesto que debido a la diferencia en los puntos de ebullición de los componentes en dicho líquido, los componentes con los puntos de ebullición más bajos comenzarán a evaporarse primero mientras que los componentes con los puntos de ebullición más altos permanecerán en fase líquida. El riesgo de tener tal proceso de destilación mientras se ejecuta un experimento es crítico y por lo tanto este concepto se descarta en el presente trabajo (ver Figura 3.5).

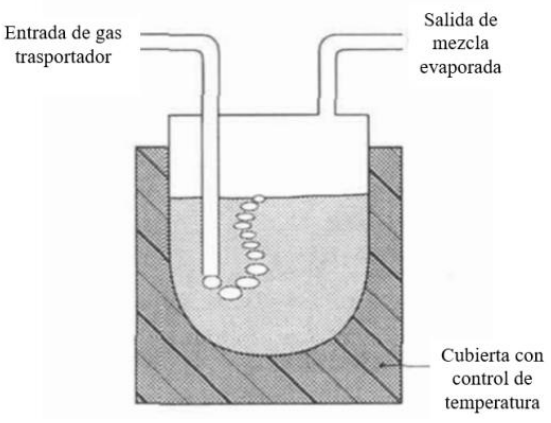

Figura 3.5: Diagrama de evaporador por sistema de burbujeo.

3.1.5.2 Evaporador de placa caliente

Un concepto similar al sistema de burbujeo es un evaporador de placa caliente. La principal diferencia es el método de suministro de líquido. Mientras que el sistema de burbujeo tiene un depósito calentado, la placa caliente o evaporador de pulverización tiene un depósito externo y el líquido se inserta en el módulo a través de una aguja hipodérmica (hueca). La pulverización de la aguja golpea una placa calentada dentro del evaporador que vaporizará el líquido. Similar al sistema de burbujeo, un gas portador transportará el vapor del evaporador. Para evitar que el fluido evaporado condense, el gas portador se precalienta (ver Figura 3.6).

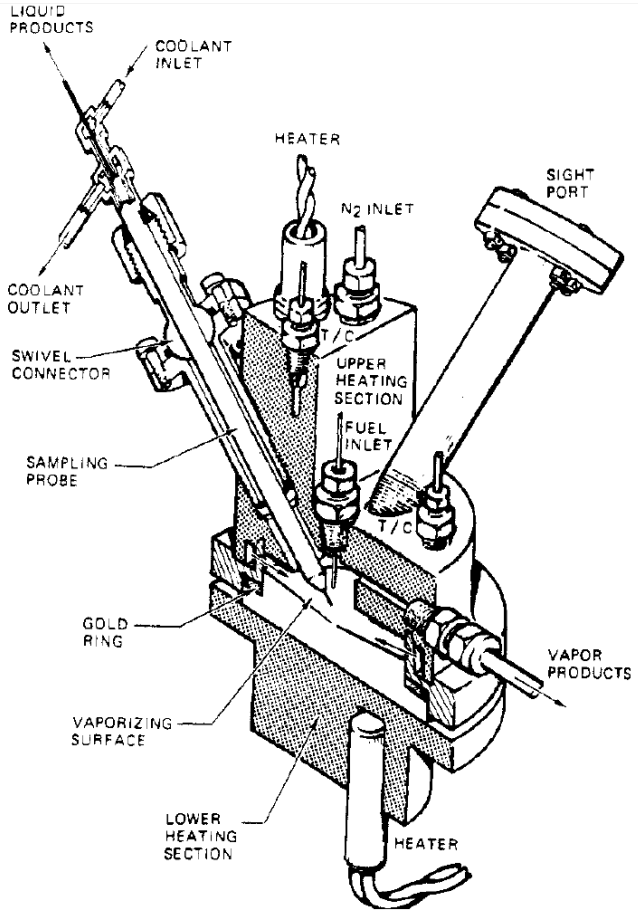

Figura 3.6: Diagrama del evaporador de placa caliente.

3.1.5.3 Mezclador y evaporador controlado (CEM)

Un sistema novedoso para vaporizar el líquido consiste en mezclar el líquido con el gas portador antes de calentar ambos fluidos. Este proceso de mezclado puede ser controlado con precisión, dando como resultado una composición de mezcla precisa, que consiste en gotitas de líquido mezcladas en el gas portador. Después del proceso de mezclado, la mezcla se calienta externamente evaporándose las gotas líquidas. En este trabajo se utilizará mezclador y evaporador controlado (*controlled evaporation and mixing*, CEM) marca Bronkhorst High-Tech, empresa que también provee controladores de flujo másico. El módulo CEM se divide en un mezclador, ubicado en la parte superior, y un serpentín de calentamiento, en la parte inferior del módulo (ver Figura 3.7).

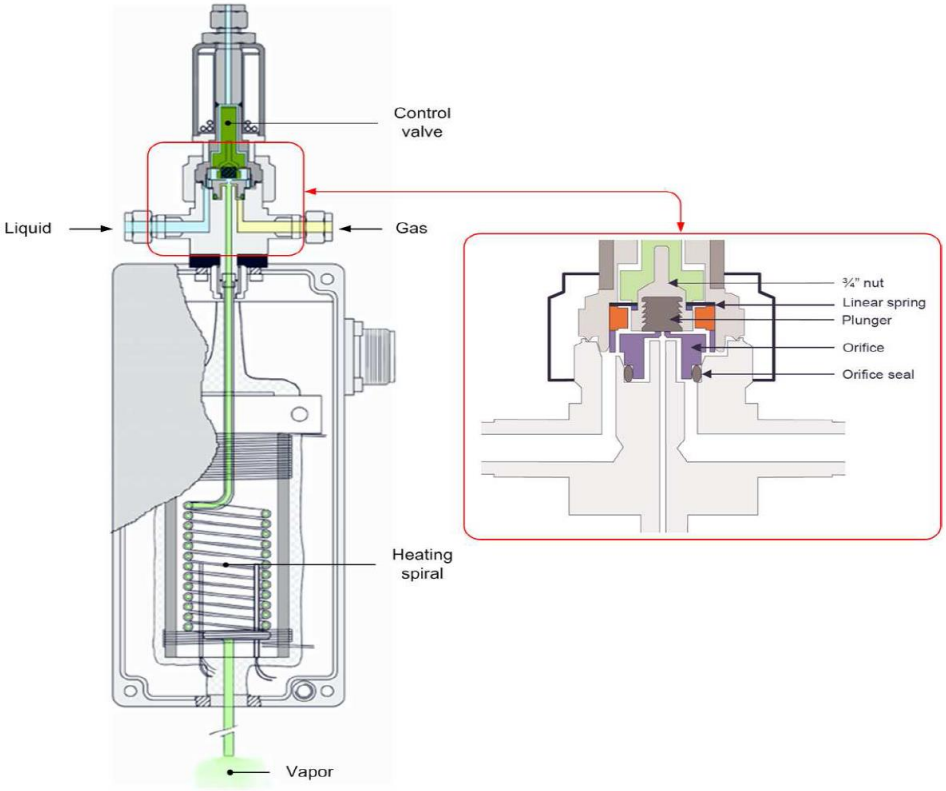

Figura 3.7: Diagrama del Mezclador y Vaporizador Controlado (CEM).

El mezclador consiste principalmente en una válvula de control y una conexión de líquido y gas. La válvula de control es capaz de restringir y controlar el flujo de líquido. La restricción

se consigue mediante un pequeño orificio, con un diámetro de aproximadamente 100 μm, que puede cerrarse mediante un émbolo. El émbolo se encuentra elásticamente cargado y cerrado naturalmente. Una fuerza electromagnética es capaz de abrir el émbolo, lo que hace que el líquido fluya a través del orificio. El flujo másico del líquido se mide antes de ingresar al mezclador y ajustando la fuerza magnética de la válvula, se puede controlar el flujo. Cuando el líquido atraviesa el orificio, se pulveriza en pequeñas gotitas hacia gas portador, que es arrastrado justo por debajo del orificio. Este proceso crea una mezcla de gotitas y gas portador. Si también se mide y controla el flujo másico del gas portador, se puede crear una mezcla muy precisa. Luego la mezcla circula hacia el serpentín de calentamiento, que consiste en tubo metálico en forma de espiral que se calienta externamente mediante una resistencia eléctrica. Si la temperatura en la pared del serpentín es mayor que la temperatura de saturación del líquido, las gotitas en la mezcla se evaporarán. Este proceso da lugar a un flujo de vapor estable y controlable de forma precisa. El principal inconveniente de este sistema es la temperatura limitada del módulo CEM. Debido a la prevención de la fusión del bloque metálico, la temperatura del módulo se restringe a un máximo de 483 K, mientras que el punto de ebullición del diésel, por ejemplo, oscila entre 489 y 616 K (Anitescu y Bruno. 2012). La solución a este problema se muestra en la sección 3.4.1.

3.1.6 Impulsión de líquido

El biocombustible en estado líquido debe ser suministrado al sistema de evaporación mediante un sistema de impulsión. Es necesario que este sistema aporte un bajo caudal de líquido, con el fin de lograr una baja temperatura de saturación del líquido evaporado, y que este caudal sea constante en el tiempo para evitar fluctuaciones en la llama de difusión generada en el HB.

3.1.6.1 Bomba de jeringa

Las bombas de jeringa garantizan la entrega de volumen con alta exactitud y un flujo constante para volúmenes pequeños (el volumen que puede soportar la jeringa). La bomba expele el líquido cuando el émbolo avanza a una tasa establecida mediante un motor que arrastra un tornillo de hijo fino o un mecanismo de engranaje. La velocidad del motor varía con la tasa de flujo establecida y el tamaño de la jeringa.

En casi todas las bombas de jeringa, las jeringas vacías deben ser reemplazadas manualmente. Algunos modelos pueden acoplar dos o más jeringas, para permitir una entrega continua cuando una de las jeringas se ha vaciado, para suministrar infusiones simultáneas o para suministrar volúmenes mayores. El mecanismo de funcionamiento se muestra en la Figura 3.8.

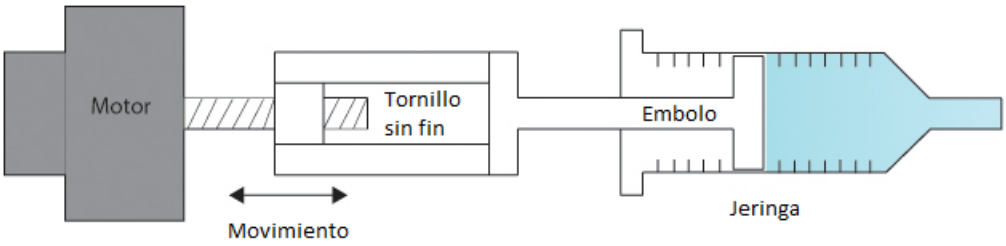

Figura 3.8: Funcionamiento de la bomba de jeringa.

3.1.6.2 Bomba peristáltica

Una bomba peristáltica es un tipo de bomba hidráulica de desplazamiento positivo, su nombre proviene del sistema de digestión humana conocido como movimiento “peristáltico” el cual consistente en la contracción y sucesiva relajación de un músculo alrededor de un tubo. En el caso de la bomba, un tubo flexible es aplastado continuamente por rodillos colocados adecuadamente, el mecanismo más común cuenta con dos o tres rodillos que giran en un compartimiento circular comprimiendo en forma progresiva una manguera especial flexible (ver Figura 3.9).

Entre un paso y el otro del rodillo impulsor, el tubo recupera su diámetro original generando un vacío que provoca el retroceso del fluido transportado, lo que se traduce en una pulsación. La bomba peristáltica ideal debería tener un diámetro infinito del cabezal y el mayor diámetro posible de los rodillos. Esta bomba peristáltica ideal tendría una vida útil ilimitada del tubo (manguera) y proporcionaría un flujo constante y libre de pulsaciones.

Las bombas peristálticas son típicamente usadas para bombear fluidos limpios o estériles porque la bomba no puede contaminar el líquido, o para bombear fluidos que puedan dañar la bomba. Las bombas peristálticas de más alta presión, que típicamente pueden operar con hasta 16 *bar*, usualmente usan tubos reforzados y tienen cubiertas llenas con lubricante para prevenir la abrasión del exterior del tubo de la bomba y para ayudar en la disipación del calor. Las bombas peristálticas de más baja presión, usualmente usan tuberías no reforzadas y tienen típicamente cubiertas secas.

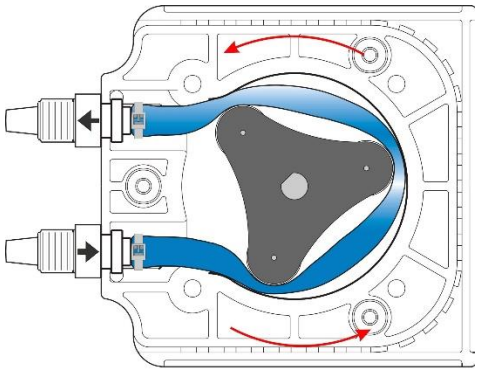

Figura 3.9: Esquema de una bomba peristáltica.

3.1.6.3 Estanque presurizado

Se trata de un estanque que contiene el líquido a impulsar, el cual está adaptado para recibir la entrada de un gas a alta presión por su parte superior. Generalmente se inyecta un gas inerte que además sirve para limpiar las líneas, al hacerlo circular directamente por las tuberías. El estanque debe estar completamente sellado al ambiente, logrando que el gas

ejerza presión sobre el líquido, y que este salga del estanque a un flujo establecido por el gas. Este es el sistema de inyección recomendado por el fabricante del módulo CEM (ver Figura 3.10).

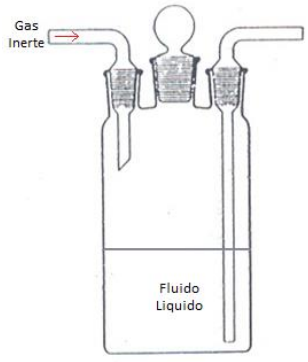

Figura 3.10: Funcionamiento del tanque presurizado.

3.2 Diseño y construcción del banco experimental

El diseño de este banco contempla dos caras verticales congruentes unidas en un ángulo de 90°, también posee dos caras horizontales separadas por aproximadamente 40 centímetros, en estas caras se fijaran los dispositivos requeridos en ambos sistemas, como controladores de flujo, vaporizadores, mangueras, válvulas, tubos, etcétera. Su altura es de 155 centímetros, su ancho es de 90 centímetros y su profundidad de 645 centímetros (Figura 3.11). La estructura es construida con perfiles de aluminio marca Bosch serie 45x45, los cuales permiten el ensamble con planchas de robanit (un tipo de plástico muy resistente a productos químicos) en sus ranuras con forma de “T”. Cuatro ruedas de plástico montadas en acero permiten la movilidad del banco y aseguran su estabilidad.

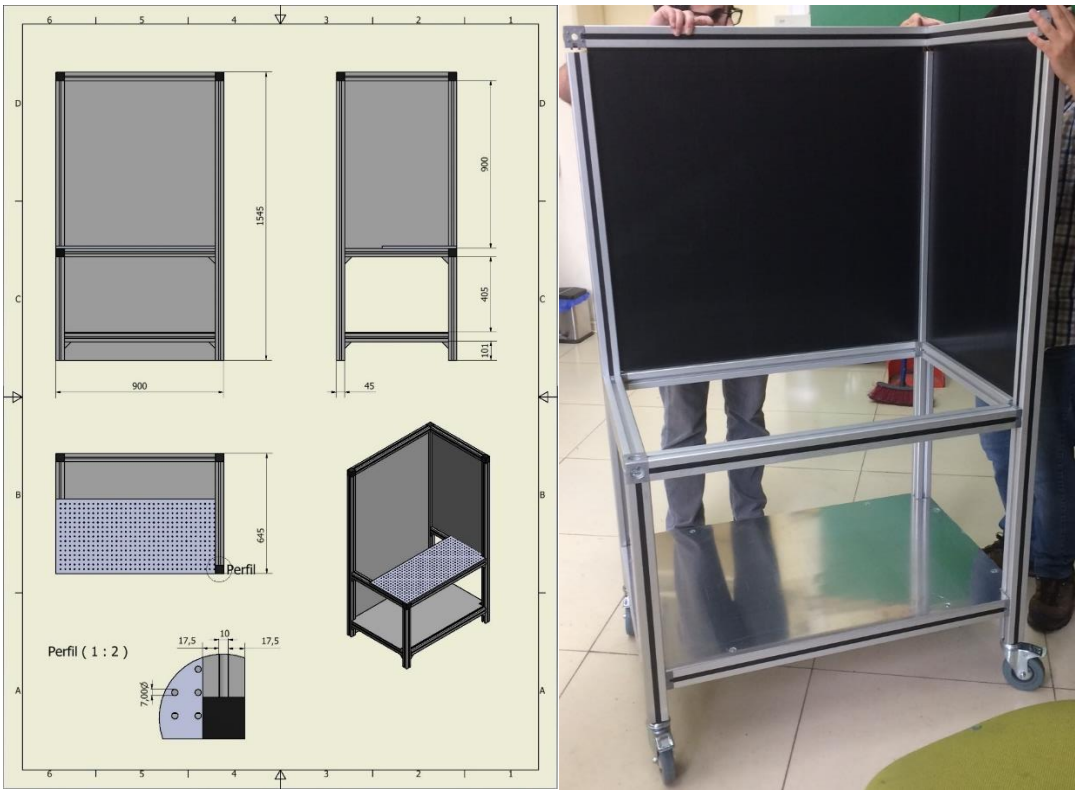

Figura 3.11: Dibujo isométrico del banco experimental (izquierda) y construcción (derecha).

3.3 Diseño y construcción del quemador

El quemador tipo Gülder es altamente utilizado por la comunidad científica en la exploración de fenómenos ocurridos en una llama de difusión. La llama producida en él tiene una altura aproximada de 65 *mm* y está caracterizada por ser de régimen laminar. En este tipo de quemador se presentan similitudes en los procesos que ocurren en la fase gaseosa entre las llamas turbulentas y las laminares, permitiendo extrapolar resultados obtenidos en una llama laminar a una llama turbulenta (presente en la mayoría de los procesos).

El quemador debe ser diseñado para dos objetivos. El primero es recibir el biocombustible evaporado por el tubo central y una mezcla de nitrógeno y oxígeno (el comburente) por el espacio anular exterior, donde la proporción de oxígeno se puede variar para observar su influencia en la formación de hollín. El segundo objetivo es recibir combustibles gaseosos de origen fósil (etileno por ejemplo) por el tubo central y una mezcla de aire con vapor de

agua (aire humedecido) por el espacio anular exterior. En ambos casos hay riesgo de condensación de los fluidos vaporizados debido al enfriamiento de la mezcla donde se encuentre el líquido evaporado, por lo que ésta se debe calentar, proceso que se ve favorecido al aislar el quemador con una funda aislante, ayudando a evitar pérdidas de calor hacia el exterior.

El quemador consta de dos tubos concéntricos unidos a una misma base cilíndrica de aluminio que llamaremos “base”. El tubo interno, cuya función es trasladar el combustible, es de aluminio para evitar reacciones químicas entre este y el combustible vaporizado, tiene un diámetro externo de 12,7 *mm*, un largo de 250 *mm* y se conecta al centro de la base mediante un *fitting* de empalme (ver Figura 3.12).

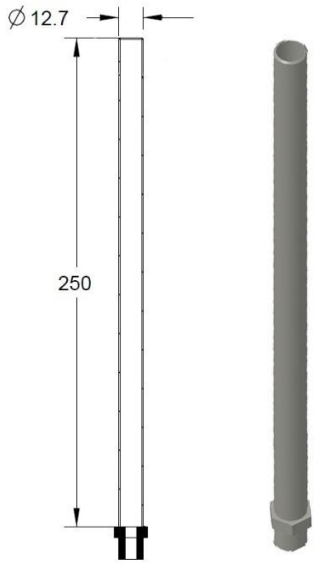

Figura 3.12: Diseño del tubo interior del quemador.

El tubo externo, que trasladará el comburente, es de aluminio, tiene aproximadamente un diámetro interno de 90 *mm*, un grosor de 10 *mm* (estos valores varían a lo largo del tubo), un largo de 144 *mm* y se conecta a la base mediante una rosca o hilo. También posee una rosca en la parte superior para unirlo a la pieza aislante (ver Figura 3.13). A la base además se le

conectan las entradas de ambos flujos, por el costado se le inyecta el oxidante y por abajo el combustible. El diseño de la base se muestra en la Figura 3.14.

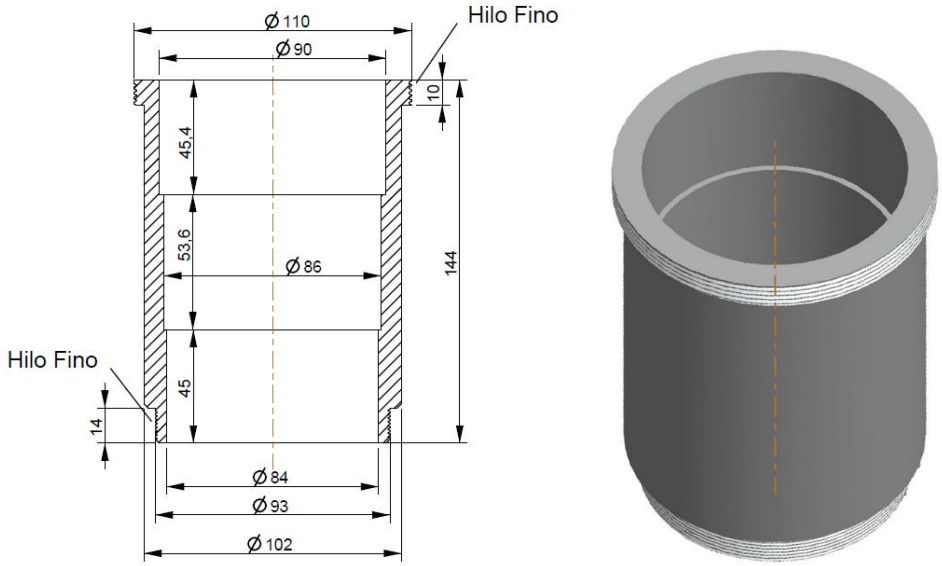

Figura 3.13: Diseño del tubo exterior del quemador.

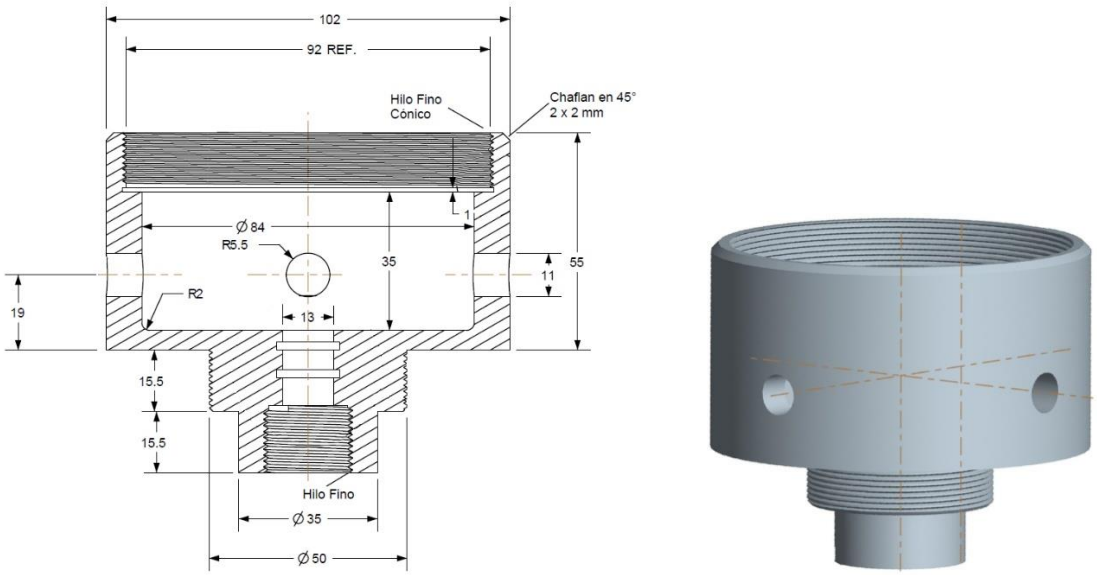

Figura 3.14: Diseño de la base del quemador.

El diseño también contempla una funda aislante que cubre por completo la parte lateral del quemador para reducir las pérdidas de calor desde el HB, la que será construida con “ertaceltal”, un material de elevada resistencia mecánica y que soporta la degradación por

oxidación térmica. Esta funda aislante fue diseñada para unirse a la base por la parte inferior y al tubo externo por la parte superior, dejando un espacio de aire en el centro y así aprovechar sus propiedades de aislante térmico. La funda de aislación térmica está representada en la Figura 3.15.

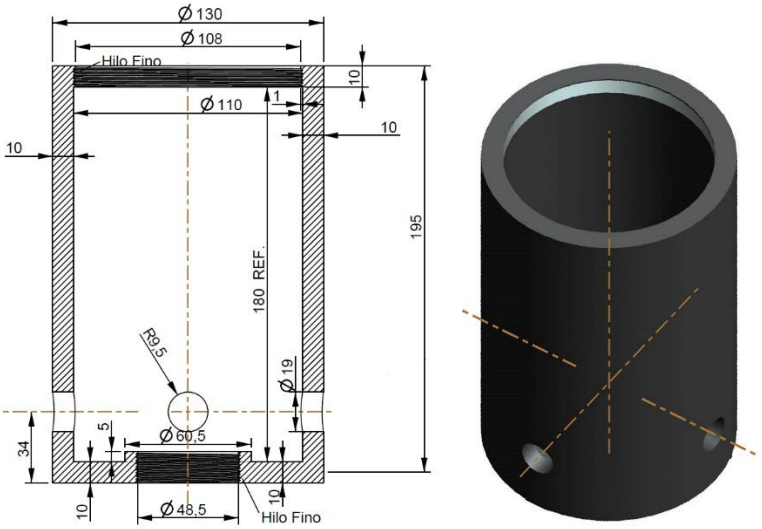

Figura 3.15: Diseño de la funda de aislación térmica para el quemador.

El quemador cuenta con un material "poroso"[17] a través del cual el flujo de oxidante, circula hacia el exterior hacia la llama. De esta manera se logra una homogenización en el campo de velocidades del flujo de oxidante. Este material poroso irá montado dentro del tubo exterior y fuera de tubo interior.

Por último se agregará una cinta calefactora al interior del quemador, dicha cinta estará colocada en la cara interna de tubo externo, y su función será agregar calor al sistema mediante una resistencia eléctrica controlada mediante un potenciómetro.

[17] Este material fue suministrado por la empresa Porometal (http://porometal.com)

3.4 Selección del sistema de evaporación

En primer lugar la solución fue basarse en las investigaciones realizadas por el mundo científico en donde se utilizara algunos de los elementos o técnicas similares a las que se necesitaran para montar el dispositivo, por ejemplo “Merchan-Merchan” en su publicación Soot “formation in diffusion oxygen-enhanced biodiésel flames” estudia la formación de hollín en la llama producto de la quema de biodisel, aunque no incluye todos los biocombustibles, el autor muestra la forma en la cual se inyecta el combustible al vaporizador, junto con los flujos másicos de combustible (6 *ml/hr*) y de oxidante (36 *lt/min*).

Desde el estudio de Muhammad Kashif y otros autores, en la publicación “*Sooting tendencies of primary reference fuels in atmospheric laminar diffusion flames burning into vitiated air”* Se obtiene la forma de calentar el tubo interior del quemador, se señala que el tubo central del quemador es calentado enrollando un cable que entrega energía (calor). También se obtiene la temperatura de la línea calefaccionada (150°*C*), sin embargo esta temperatura puede variar dependiendo del fluido, la temperatura de ebullición del biodiésel es cercana a 360°C mientras que la temperatura de ebullición del bioetanol bordea apenas 78°C.

3.4.1 Modulo Vaporizador

De las alternativas analizadas para evaporar el biocombustible líquido (ver sección “3.1.5 Tipos de sistemas vaporizadores”) el módulo CEM es la mejor opción porque permite obtener una mezcla precisa entre el biocombustible y el gas transportador mediante controladores de flujo másico, sin embargo ambos flujos deben ser suministrados a una presión suficiente para ingresar al evaporador y vencer la resistencia que ofrece el otro flujo. Por ejemplo si suministramos nitrógeno como gas transportador desde un tubo de gas de 45 *kg* a una presión

de 2 *bar*, necesariamente el biocombustible deberá tener una presión igual o mayor para evitar que este retorne y no se mezcle con el gas transportador.

El proveedor seleccionado del módulo CEM, la compañía Bronkhorst High-Tech, ofrece dos opciones:

- VDM: El módulo de suministro de vapor es un vaporizador completamente empaquetado diseñado a medida. Se compone de controladores de flujo de masa para el suministro de gas, una válvula mezcladora de 3 vías, un medidor de flujo de masa líquida y el vaporizador en su interior. Incluye un control de pantalla táctil y un sistema de alimentación. Todas las piezas están conectadas mecánicamente y eléctricamente. (Figura 3.16).

- CEM: El sistema de CEM permite que el usuario diseñe su propio sistema. Por lo general, comprende uno o más controladores de flujo de masa para el suministro de gas, un medidor de flujo de masa (ya sea térmico o Coriolis) para el líquido, una válvula mezcladora de tres vías, un intercambiador de calor para vaporización y un sistema de alimentación y lectura. Los componentes se montan mecánicamente por parte del usuario (Figura 3.16).

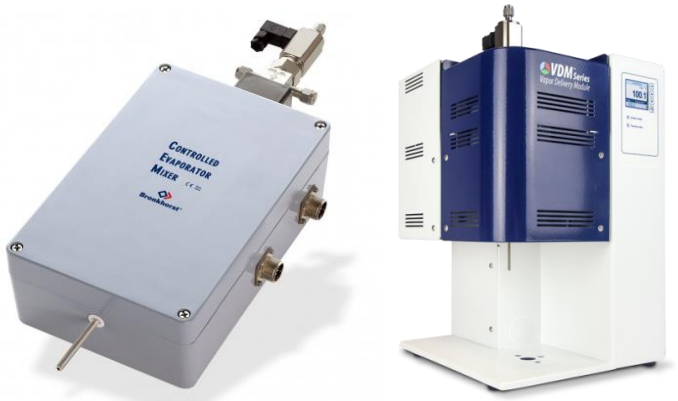

Figura 3.16: Módulos vaporizadores. Izquierda: Evaporador y mezclador controlado (CEM). Derecha: Modulo de suministro de vapor (VDM).

La principal ventaja del VDM sobre el CEM es que el evaporador viene ya ensamblado junto con los controladores de flujo. Las especificaciones técnicas del equipo seleccionado son:

- Flujo de líquido: Mezcla de biocombustible, flujo entre 1 y 20 *g/hr*.
- Flujo de gas: Nitrógeno, flujo entre 300 cm^3/min
- Presión de salida de vapor: Pocos milibares por encima de la presión atmosférica.
- Presión de entrada de gas: 1 a 2 *bar*. El gas viene de en cilindros de 45 *kg*, se puede establecer dicha presión.
- Temperatura ambiente: 10 a 30 °*C*.
- Electrónica necesaria: el aparato se accionará manualmente, no de forma remota.
- Control sobre ambos fluidos: Ambos fluidos deberán ser controlados por el sistema de lectura y control.
- Forma de inyección de combustible: Se incorpora presión mediante un sistema externo a seleccionar.
- Concentración de masa/moles: La fracción volumétrica del biocombustible vaporizado en la mezcla debe estar entre 0,05 y 0,10.
- Flujo de mezcla: El flujo de la mezcla debe estar entre 50 y 300 [cm^3/min].
- Adicionalmente se pide un controlador de flujo para dopar la mezcla vaporizada de biocombustible y nitrógeno con metano con flujos desde 50 a300 [cm^3/min].

La curva de presión de saturación en función de la temperatura se determina mediante la ecuación de Antoine[18], de esta forma es posible predecir la temperatura a la cual debe mantenerse la mezcla y la energía necesaria para evaporar el biocombustible. Se supone que los biocombustibles a utilizar serán bioetanol y biodiésel, donde el escenario más exigente corresponde a la evaporación de biodiésel puro, debido a que es el más pesado, por lo cual se consideró el biodiésel obtenido del aceite de girasol para el dimensionamiento del módulo vaporizador.

Si bien ambas alternativas ofrecen los mismos controladores de flujo, y un vaporizador similar, el CEM es más económico ya que la alternativa VDM incluye la instalación y conexión del evaporador con los controladores de flujo másico dentro del mismo espacio físico. No obstante se escoge la segunda alternativa para crear aparato experimental más compacto.

El principal inconveniente del CEM o VDM es que el módulo tiene una temperatura máxima limitada de 473 *K*, demasiado baja para evaporar biocombustibles que tienen, en general, un punto de ebullición superior a 500 *K* a presión atmosférica. Esto se resuelve manteniendo la presión parcial del combustible líquido por debajo de su presión de vapor de saturación aumentando el flujo de gas portador.

Para determinar la fracción molar de biocombustible evaporado que logre mantener una presión parcial apropiada primero debe determinarse el peso molecular del biocombustible. El peso molecular de distintos biodiésel se muestra en la Tabla 3.1, en función de las composiciones típicas. (Fassinou et al, 2012).

[18] La ecuación de Antoine describe la relación entre la temperatura y la presión de saturación del vapor de sustancias puras:

$$P = 10^{A-\frac{B}{C+T}}$$

Tabla 3.1: Composición de ácidos grasos en base másica y peso molecular estimado.

Ácido graso	Compuesto	PM $\frac{g}{mol}$	Aceite de girasol	Ethyl ester aceite de girasol	Aceite de soya	Biodiésel de aceite de soya	Aceite de Jatropha	Aceite de palma africana
Ácido caprítrico	$C_8H_{16}O_2$	144						3,77
Ácido cáprico	$C_{10}H_{20}O_2$	172						3,67
Ácido laurico	$C_{12}H_{24}O_2$	200						48,38
Ácido mirístico	$C_{14}H_{28}O_2$	228					0,05	17,37
Ácido palmítico	$C_{16}H_{32}O_2$	256	6,4	6,2	12	10,76	14,7	9,13
Ácido Palmitoleico	$C_{16}H_{30}O_2$	254	0,1	0,1			0,65	
Ácido esteárico	$C_{18}H_{36}O_2$	284	2,9	3,7	3	4,37	6,75	2,72
Ácido oleico	$C_{18}H_{34}O_2$	282	17,7	25,2	23	24,13	40,05	12,56
Ácido linoleico	$C_{18}H_{32}O_2$	280	72,9	63,1	55	51,83	36,6	2,4
Ácido linolénico	$C_{18}H_{30}O_2$	278		0,3	6	6,81	0,15	
Ácido gadoléico	$C_{20}H_{38}O_2$	310		0,2				
Ácido eicosadienoico	$C_{20}H_{36}O_2$	308					0,15	
Ácido behénico	$C_{22}H_{44}O_2$	340		0,7			0,1	
Ácido docosenoico	$C_{22}H_{42}O_2$	338		0,1				
Ácido lignocérico	$C_{24}H_{48}O_2$	368		0,2				
			100	99,8	99	97,9	99,2	100
Peso molecular ponderado			278,9	279,3	274,8	272,1	275,2	221,3

Fuente: Fassinou et al, 2012.

e puede apreciar que los pesos moleculares de los distintos biodiésel están cerca de 280 *g/mol* (279,3 *g/mol* en el caso del etil ester de aceite de girasol), por lo que se puede ocupar como referencia el hidrocarburo icosane o eicosane ($C_{20}H_{42}$) presente la Figura 3.17, cuyo peso molecular es 282,5 *g/mol*. La curva representativa del etil ester de aceite de girasol estaría apenas por encima de la línea roja punteada. Entonces para encontrar la presión parcial a la que debe estar el biocombustible, consideramos que la temperatura máxima del CEM (o VDM) es 473 *K*, la presión que el fluido no debe sobrepasar son 0,02 *bar*. En cada punto por encima de cada curva, el combustible está en una fase líquida y en cada punto por debajo de la línea está en fase gaseosa, por lo que al disminuir la presión parcial de un fluido, se necesitaría menor temperatura para evaporarlo, esto se logra aumentando el flujo de gas transportador.

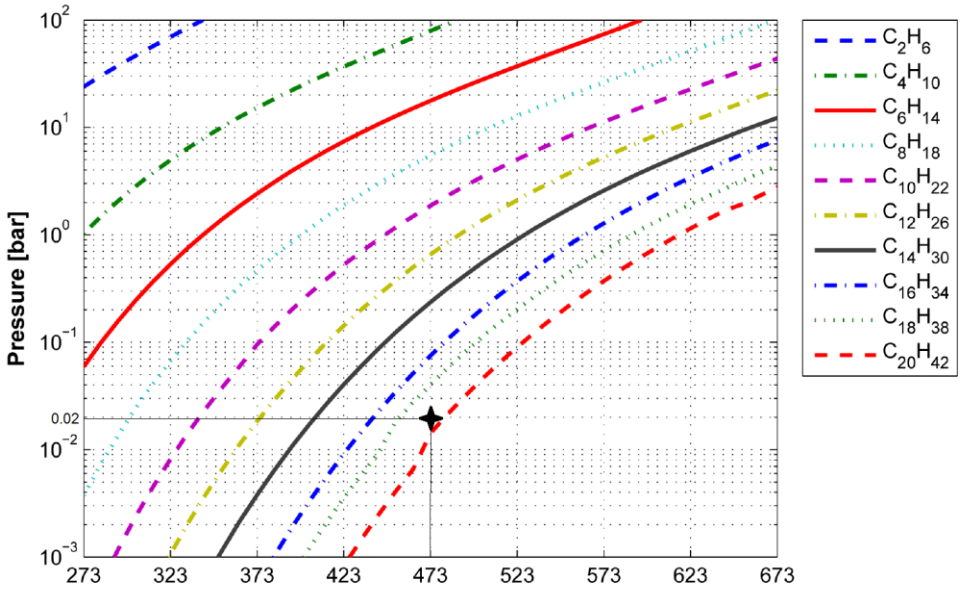

Figura 3.17: Presión de vapor para distintos hidrocarburos. Fuente: Bronkhorst.

La fracción molar de combustible se determina con la fórmula $X_c = \frac{P_c}{P_t}$, donde X_c es la fracción molar de combustible, P_c la presión parcial del combustible (en este caso 0,02 bar) y P_t la presión a la que se encuentra el sistema (2 *bar*). Entonces la fracción molar máxima para el etil ester de aceite de girasol debe ser 0,01.

3.5 Selección del sistema de impulsión mediante análisis de configuraciones

En este punto se proponen distintas configuraciones con los elementos tentativos que podrían formar parte del panel vaporizador de agua y biocombustible, para hacer un análisis comparativo de sus ventajas y desventajas, para luego determinar cuál es la configuración y los metodos que convienen para impulsar los fluidos. En cada modelo se proponen distintas formas de satisfacer el problema de almacenamiento, inyección, transporte y vaporización. Se cuantifica la cantidad de válvulas, mangueras, conectores y tuberías, para determinar la configuración que representa una mejor relación costo/beneficio. Se debe considerar:

- Las válvulas negras representan válvulas de alto costo diseñados para soportar altas presiones y evitar la filtración de fluido gaseoso, las de color rojo son de menor costo para el fluido en estado líquido.

- Los elementos “MFC” son controladores de flujo, los cuales deben estar presentes y no se puede variar su número o colocación.

- Se proponen distintas formas de inyección: método gravitatorio, bomba de jeringa, bomba peristáltica. El método deberá ofrecer una presión suficiente tal que pueda contraponerse a la presión ejercida por el gas transportador (en el caso del biodiésel) y por en nitrógeno (en el caso del agua), los cuales viene de cilindros de gas a una presión regulable de aproximadamente 2 *bar*.

- El VDM (para biofuel) y el CEM (para agua) ya están seleccionados por lo que no varían de un modelo a otro.

- Luego del vaporizador y antes del quemador, se utiliza una línea calefaccionada para evitar la condensación del fluido. Esta línea es capaz de entregar calor de forma controlada al fluido, al mismo tiempo que lo aísla del entorno. En los modelos se varía el número de líneas calefaccionadas.

- El quemador es el mismo para todos los modelos, de acuerdo al diseño mostrado anteriormente.

Modelo 1: Corresponde al modelo que pretende la inyección de agua y combustible por método gravitatorio, contempla la compra de dos estanques que se ubicaran medio metro sobre el panel (el fluido cae por su propio peso generando presión), y no posee sistemas que

adicionen presión a la línea. Su principal ventaja es el bajo costo. Su principal desventaja es que no proporciona una presión suficiente para que el fluido alcance a entrar al vaporizador.

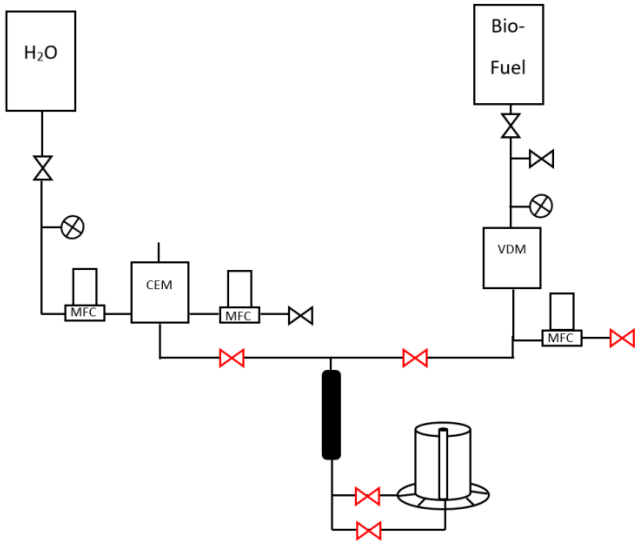

Figura 3.18: Diagrama del modelo 1.

Modelo 2: Modelo similar al anterior. Se utiliza aire para ejercer presión en la línea del CEM, este se obtiene de un compresor de aire. Se utiliza argón (u otro gas inerte) para ejercer presión en el combustible, desde un tanque de gas. El gas (aire y gas inerte) sirve para limpiar la línea si se quieren utilizar distintos tipos de fluidos (por ejemplo biocombustibles de distintas especies vegetales). El tanque en donde se almacena el agua/combustible debe soportar la presión requerida por el CEM/VDM, en todos los casos es 2 bar, por lo que se utiliza un tanque presurizado (se puede utilizar tanques de pintura; calderines, o un tanque construido a medida). Su principal ventaja es que es un método conocido e implementado por algunos autores (Kashif et al, 2013). Su desventaja está en que el compresor y el tanque de gas inerte suelen ser de gran tamaño, restándole espacio a los demás elementos.

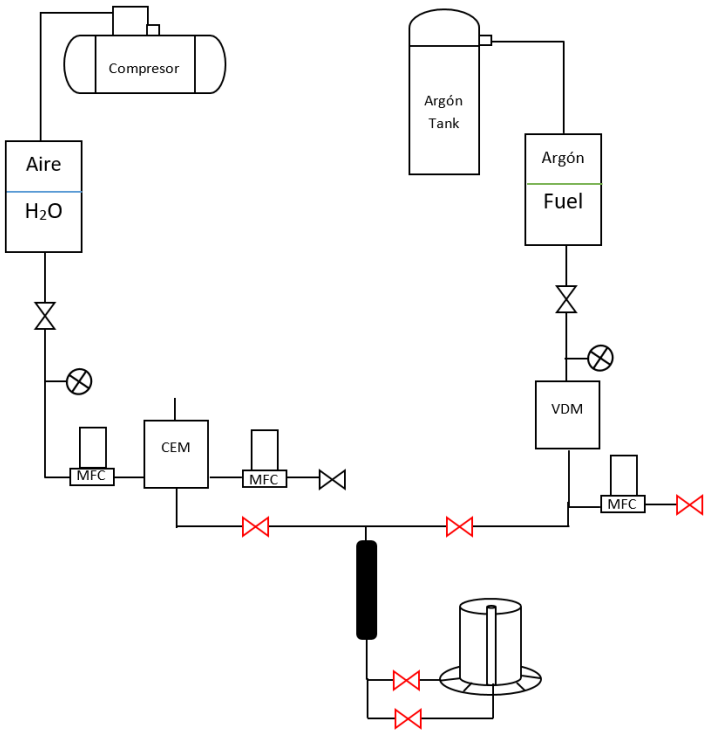

Figura 3.19: Diagrama del modelo 2.

Modelo 3: Este modelo presenta solo una bomba para ambos sistemas vaporizadores, la cual debe tener un rango de caudales desde los 0,1 *ml/min* hasta 20 *ml/min*, se deben incorporar un mayor número de válvulas para conducir los fluidos hasta la bomba y solo se

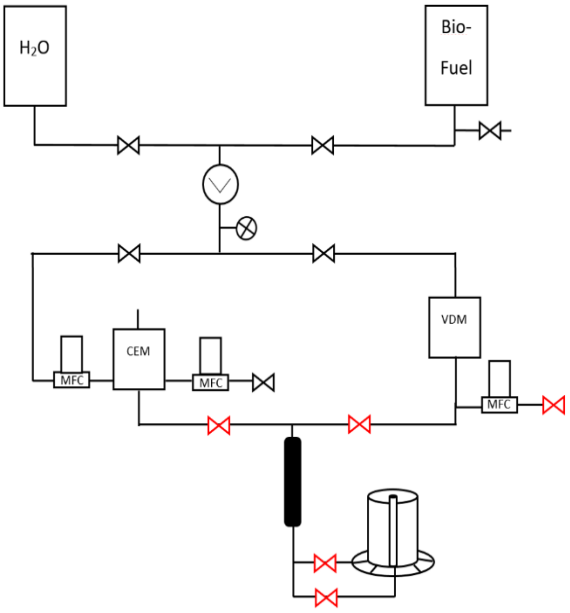

Figura 3.20: Diagrama del modelo 3.

utiliza un manómetro. Es un modelo de bajo costo y su principal deficiencia es que hay tramos de tuviera que se utilizan para ambos fluidos provocando eventualmente la mezcla de ellos (indeseada).

Modelo 4: Es un modelo igual al anterior que incluye dos bombas de distinta capacidad, una con capacidad apropiada para el biocombustible y otra adaptada para bombear agua. Su principal ventaja es que se tiene un sistema de bombeo propio para cada línea, por lo tanto, capaz de administrar flujo con alta precisión. Su desventaja es que no existe gran precisión al considerar bombas de este tipo, ya que el fluido es transportado por pulsos lo que puede hacerlo fluctuar (y con esto provocar turbulencia de la llama).

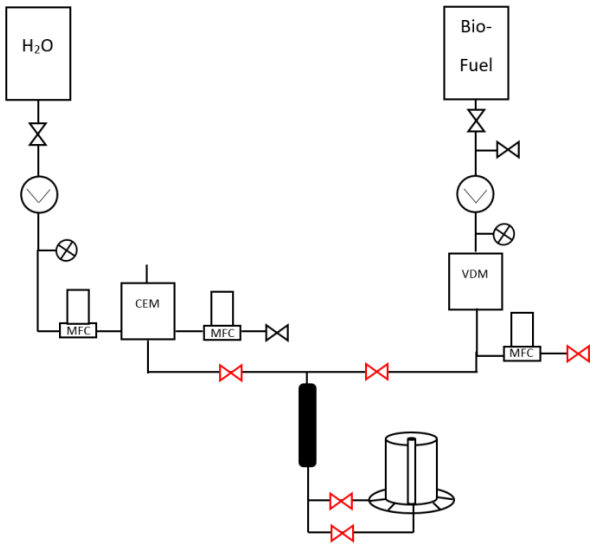

Figura 3.21: Diagrama del modelo 4.

Modelo 5: Al sistema anterior se incorpora una bomba de jeringa para el biocombustible, es de consto elevado pero presenta ventajas frente a otras bombas, pues el flujo se puede regular con mucha precisión. Se requiere de dos manómetros.

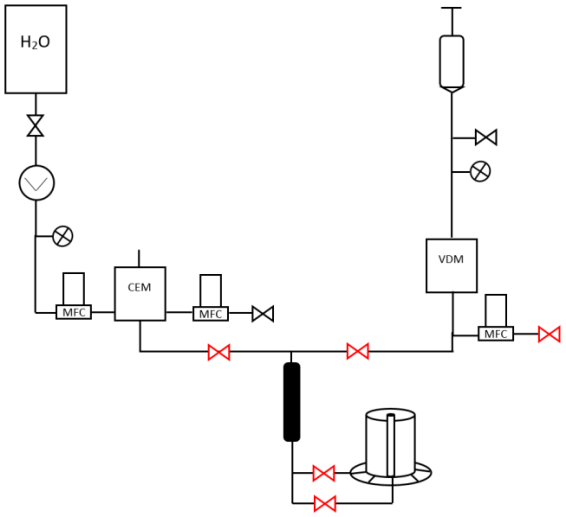

Figura 3.22: Diagrama del modelo 5.

Modelo 6: El modelo 6 considera dos métodos distintos de inyección, para el caso del agua se utiliza un tanque presurizado y un compresor para agregar presión. Por otro lado en la línea de biocombustible se utiliza una bomba de jeringa de gran precisión y elevado costo.

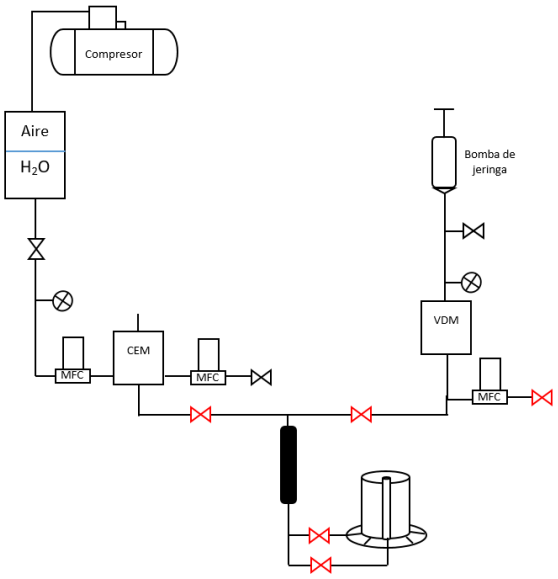

Figura 3.23: Diagrama del modelo 6.

De los casos propuestos, todos excepto el "modelo 1" requieren de una bomba o sistema que adicione presión a la línea. Con el fin de hacer una selección correcta del sistema de inyección de biocombustible al vaporizador, se realiza un análisis de pérdidas de carga que hay en su recorrido desde el tanque que contiene el fluido hasta la entrada del vaporizador. Estimando las pérdidas de carga se procede a cotizar bombas que cumplan con los requisitos identificados de presión y caudal, para luego hacer pruebas experimentales y determinar cuál es la mejor opción.

3.5.1 Pérdidas de carga en el circuito de biocombustible

Para el cálculo de pérdidas de carga se supone que una bomba impulsa al biocombustible desde un estanque ubicado debajo del módulo vaporizador (VDM). Además se considera lo siguiente:

- Biodiésel obtenido del aceite de palma cuya densidad (867,98 kg/m^3) es estimada a partir de estudio experimental (Benjumea et al., 2006).

- Flujo de combustible de 10 *ml/hr*, fluido incompresible.
- Tubos de acero inoxidable de 0,25 pulgadas de diámetro externo y 0,035 pulgadas de espesor.
- Largo de la tubería de 2 metros totales, y recorrido vertical igual a 1,5 metros.
- Presión necesaria a la entrada del vaporizador igual a 2 *bar*.
- Se consideran pérdidas de carga en singularidades (válvulas y codos).

El número adimensional de Reynolds se entiende como la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas presentes en un fluido y permite predecir el régimen de flujo en una tubería. Se calcula de la siguiente manera:

$$Re = \frac{\rho * v_s * D}{\mu} \qquad \text{Fórmula 3.4}$$

Donde:

- Re= Numero de Reynolds.
- ρ = Densidad del fluido, en este caso 867,98 kg/m^3 a 20°C.
- v_s =Velocidad del fluido, en este caso 1,69 x 10^{-4} m/s. Obtenida utilizando un caudal de 10 *ml/hr* y un área transversal de la tubería de 1,642 x 10^{-5} m^2.
- D = Diámetro interno de la tubería, en este caso 4,572 x 10^{-3} m.
- μ = Viscosidad dinámica, en este caso 1,145 $Pa*s$.

Al ingresar los datos a la Fórmula 3.4 el resultado es 0,5864, esto lo clasifica como flujo laminar, lo cual es lógico pues se trabajan con caudales muy pequeños que suelen ser laminares y homogéneos, para obtener una llama uniforme en el tiempo.

Como se trata de un flujo laminar el valor del factor de fricción (f) es 64/Re, es decir 109,14 (adimensional). Luego se utiliza la ecuación de Darcy-weisbach (Formula 3.5) para determinar la pérdida de carga:

$$h_L = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g} \qquad \text{Formula 3.5}$$

$$h_L = 109{,}14 * \frac{2\ [m]}{4{,}572 * 10^{-3}\ [\mathrm{m}]}\frac{\left(1{,}69 * 10^{-4}\left[\frac{m}{s}\right]\right)^2}{2 * 9{,}80665\left[\frac{m}{s^2}\right]} = 0{,}0000697\ [m]$$

Para calcular las pérdidas de carga localizadas (h_v), se considera que el fluido pasa por al menos tres válvulas de bola abiertas y por tres curvas de 90°, cuyos coeficientes de pérdidas se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Coeficiente K para válvulas y codos.

Tipo de singularidad	K
Válvula de compuerta abierta	0,2
Curva de 90°	1,0

La pérdida de carga en las singularidades se obtiene mediante la Formula 3.6:

$$h_v = K\left(\frac{V^2}{2g}\right) \qquad \text{Formula 3.6}$$

Reemplazando con los datos anteriores:

$$h_v = 3 * 0{,}2\left(\frac{\left(1{,}69 * 10^{-4}\left[\frac{m}{s}\right]\right)^2}{2 * 9{,}80665\left[\frac{m}{s^2}\right]}\right) + 3 * 1\left(\frac{\left(1{,}69 * 10^{-4}\left[\frac{m}{s}\right]\right)^2}{2 * 9{,}80665\left[\frac{m}{s^2}\right]}\right) \qquad \text{Formula 3.7}$$

$$h_v = 5{,}25\ x\ 10^{-9}[m]$$

Las pérdidas totales por fricción se obtienen sumando las pérdidas de carga en la línea (Formula 3.5) y las pérdidas de carga en las singularidades (Formula 3.7):

$$\sum \lambda = h_l + h_v \qquad \text{Formula 3.8}$$

$$\sum \lambda = 0{,}00418\ [m] + 1{,}89 * 10^{-5}\ [m] = 0{,}0042\ [m]$$

Finalmente se aplica un balance de energía (Formula 3.9) para determinar de qué forma las pérdidas de carga producen una disminución en la presión del fluido. Para ello se establecen dos puntos de análisis (ver Figura 3.24), el primero (1) se ubica en la salida del estanque de biocombustible y el segundo (2) en la entrada del vaporizador en donde la presión debe ser de al menos 2 *bar* (P_2 = 200 *kPa*) para vencer la presión de entrada del gas transportador. Otros valores necesarios son la altura referencial del punto (1) ($y_1 = 0$), la velocidad del flujo en ambos puntos igual a 1,69*10^{-4} *m/s*, considerando flujo incompresible y tuberías del mismo diámetro ($v_1 = v_2$), la densidad del combustible (867,98 *kg/m*^{3}) y la aceleración de gravedad (9,80665 *m/s*^{2}).

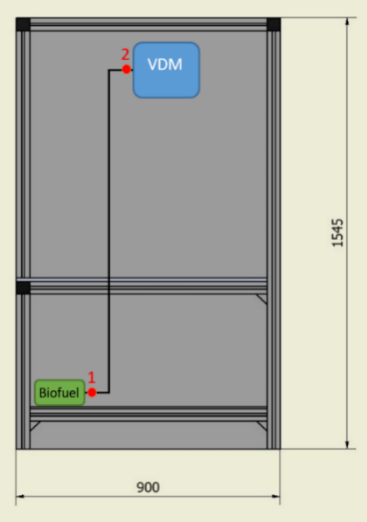

Figura 3.24: Puntos de referencia sobre el tablero.

Reemplazando los datos se tiene:

$$y_1 + \frac{P_1}{\rho * g} + \frac{{v_1}^2}{2g} = y_2 + \frac{P_2}{\rho * g} + \frac{{v_2}^2}{2g} + \sum \lambda \qquad \text{Formula 3.9}$$

$$0 + \frac{P_1\,[Pa]}{867{,}98[\frac{kg}{m^3}] * 9{,}80665[\frac{m}{s^2}]} = 1.5[m] + \frac{200000[Pa]}{867{,}98[\frac{kg}{m^3}] * 9{,}80665[\frac{m}{s^2}]} + 6{,}97\ x\ 10^{-5}\ [m]$$

$$\xrightarrow{Implica} P_1 = 212768{,}6\ [Pa] = 2{,}128\ [bar]$$

Finalmente la bomba seleccionada deberá adicionar 2,128 *bar* al sistema considerando que debe llevar el fluido a la parte superior del panel y que en ese trayecto tendrá pérdidas por fricción, las cuales son levemente importantes.

3.5.2 Pérdidas en el flujo de agua

Se realiza el mismo cálculo para el recorrido que realiza el agua desde el estanque en la parte inferior hasta el vaporizador CEM en la parte superior, en donde se consideran las siguientes características:

- Densidad= 998 kg/m^3 a 20°C
- Viscosidad dinámica =1,02 x 10^{-03} $Pa*s$.
- Caudal = 20 *ml/min.*
- Velocidad del fluido = 0,0203 *m/s*
- Diámetro interno de la tubería = 4,572 *mm.*

Con esto se obtiene el valor de Reynolds igual a 91,032, como es un flujo laminar se obtiene el factor de fricción: f=64/Re, es decir 0,70305. Luego utilizando la fórmula de Darcy Weisbach.

$$h_L = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g} = 0{,}00646\ [m] \qquad \text{Fórmula 3.10}$$

Luego para las pérdidas de cargas localizadas se consideró que el fluido pasa a través de tres conectores en 90°, y al menos tres válvulas abiertas. Entonces la formula queda:

$$h_v = 3 * 0{,}2\left(\frac{\left(2{,}03 * 10^{-2}\left[\frac{m}{s}\right]\right)^2}{2 * 9{,}80665\left[\frac{m}{s^2}\right]}\right) + 3 * 1\left(\frac{\left(2{,}03 * 10^{-2}\left[\frac{m}{s}\right]\right)^2}{2 * 9{,}80665\left[\frac{m}{s^2}\right]}\right) \qquad \text{Fórmula 3.11}$$

$$h_v = 7{,}56\ x\ 10^{-5}[m]$$

La suma de ambos factores da como resultado las pérdidas totales, equivalentes a 0,0065397 metros. Con este valor y utilizando el principio de Bernoulli (Formula 3.9) se obtiene la presión que debe suministrar la bomba para lograr que el fluido (H_2O) entre al vaporizador. Se considera una distancia de 1,5 *m* entre el estanque de agua y el vaporizador.

$$0 + \frac{P_1\,[Pa]}{898{,}3\left[\frac{kg}{m^3}\right] * 9{,}80665\left[\frac{m}{s^2}\right]} \qquad \text{Formula 3.12}$$

$$= 1.5[m] + \frac{200000[Pa]}{898{,}3\left[\frac{kg}{m^3}\right] * 9{,}80665\left[\frac{m}{s^2}\right]} + 0{,}0065397\ [m]$$

$$\overset{Implica}{\Longrightarrow} P_1 = 214748{,}992\ [Pa] = 2{,}148\ [bar]$$

3.5.3 Cotización de bombas

Con esta información se procede a hacer la cotización y selección de una bomba peristáltica que pueda aportar 2.15 *bar* de presión como mínimo, con el objetivo que sea funcional para ambos recorridos. A continuación, en la Tabla 3.3 aparecen las opciones que se tienen en el mercado nacional, considerando sus características principales y precio.

Tabla 3.3: Opciones de bomba peristáltica.

Opción	Modelo/ marca	Empresa vendedora	Caudal mínimo [l/hr]	Caudal máximo [l/hr]	Presión máxima [bar]	Precio con IVA
1	-	SMC Pneumatics Chile S.A.	1	-	-	-
2	Serie B3-V	Aguamarket S.A	-	1	3	$ 135.815
3	L0500905	Veto y Cia. Ltda.	0	1,9	17,2	$ 297.814
4	Masterflex L/S	W. Reichmann y Cia Ltda.	0,0036	204	2,7	$ 1.600.792
5	Longer Pump	Comercial Vimaroni S.A.	0,0042	22,8	2,7	$ 569.005
6	Shenchen	Comercial Vimaroni S.A.	0,00004	22,8	2,7	$ 790.210
7	MasterFlex L/S	Interquímica	0,00444	102	2,7	$ 2.838.150

Fuente: Creación propia.

Por otro lado se debe analizar la alternativa de utilizar bombas de jeringa para la inyección de combustible y/o agua a cada vaporizador, se debe considerar que estas bombas poseen una capacidad de fluido limitada por el tamaño de su jeringa, además hay una fracción de fluido que queda en la tubería (cerca de 10 *ml*). Por ejemplo para una jeringa de 60 *ml* (la de mayor capacidad disponible) que otorgue un flujo de 6 *ml/hr* de biocombustible, tendría disponibilidad de trabajar por más de 8 horas continuas, lo cual es suficiente para los propósitos de la investigación. Por otro lado, para el caso del agua, la misma jeringa con un flujo de 10 *ml/min* tendría disponibilidad para trabajar solo durante 5 minutos, lo cual es insuficiente. Bajo este punto de vista se cotiza en el mercado nacional bombas de jeringa, considerando su uso solo con combustible y no con agua. Las alternativas son las siguientes:

- Bombas de jeringa LSP01-1A: es una bomba de jeringa de un solo canal. Posee gran precisión y permite flujos pequeños. Permite flujos desde 0,0128 *ml/min* (con la jeringa de 10 *ul*) hasta 43,349 *ml/min* (con la jeringa de 60 *ml*). Su precio con IVA es $1,509,991.

- Bomba de jeringa modelo T34L ligera, compacta y segura se puede utilizar en una gran variedad de tratamientos de infusión. Rango de caudal: 0,05 a 650 *ml/h*. Gama de jeringa desde 2 a 60 *ml* (cualquier marca). Su precio con IVA es $1.285.200.

3.5.4 Pruebas y selección de modelos

Algunos de modelos antes presentados son puestos a prueba, para observar su comportamiento y desechar aquellos que no den un resultado satisfactorio, ya sea porque no son capaces de administrar un flujo continuo y estable, o porque son incapaces de administrar suficiente presión al sistema. También se evaluara el costo económico de construir estos modelos.

El “modelo 1” fue configurado en el panel, se colocó un frasco de vidrio con agua por sobre la estructura, a 50 *cm* de altura respecto al CEM. El peso del fluido fue incapaz de agregar la presión necesaria, de hecho, si consideramos que deben haber 2 *bar* a la entrada del CEM, el frasco de vidrio tendría que estar a más de 20 *m* de altura, y para el caso del biocombustible, este valor es mayor aun debido a su menor densidad. Por esto se descarta dicho modelo.

En otro experimento se instala una bomba peristáltica marca *“longer pump”* (opción 5) para impulsar agua desde un estanque de vidrio a presión ambiente hasta el controlador de flujo del CEM. Si bien la bomba funciona de forma correcta al impulsar el fluido y al incorporar una suficiente presión a la línea, no es compatible con el controlador de flujo debido a que el líquido se mueve por pulsos de caudal, variando constantemente la presión en la entrada del controlador de flujo. Como resultado el controlador se bloquea y no permite que el fluido pase hacia el vaporizador. Al apagar la bomba, la presión que queda en la línea es suficiente para hacer funcionar el sistema por algunos segundos. De este experimento se descartan todos aquellos modelos que consideren una bomba peristáltica; “Modelo 3”, “Modelo 4” y “Modelo 5”.

Finalmente solo quedan dos modelos; el modelo 2 y el modelo 6, ambos cumplen con los requisitos propuestos. Estos se compararan económicamente para tomar una decisión final sobre cuál es la mejor configuración. La información de los costos asociados a sus partes se detalla a en la Tabla 3.4 y en la Tabla 3.5. El precio de las válvulas y el manómetro es el ofrecido por la empresa ALTE.SA, el precio del cilindro de argón es obtenido desde la empresa INDURA, el precio del tanque presurizado es el otorgado por la Metalmecánica Lourdes (pieza fabricada bajo pedido) y la bomba de jeringa seleccionada es la de menor precio de las antes estudiadas.

Tabla 3.4: Costo por ítem y total del modelo 2

MODELO 2					
Ítem	Precio unitario		Cantidad	Total	
Válvula normal	$	10.000	3	$	30.000
Válvula para gas	$	75.000	5	$	375.000
Manómetro	$	70.000	2	$	140.000
Cilindro de Argón	$	150.000	1	$	150.000
Compresor de aire	$	150.000	1	$	150.000
Tanque presurizado	$	50.000	2	$	100.000
			TOTAL	$	945.000

Fuente: Creación propia.

Tabla 3.5: Costo por ítem y total del modelo 6

MODELO 6					
Ítem	Precio unitario		Cantidad	Total	
Válvula normal	$	10.000	3	$	30.000
Válvula para gas	$	75.000	5	$	375.000
Manómetro	$	70.000	2	$	140.000
Compresor de aire	$	150.000	1	$	150.000
Tanque presurizado	$	50.000	1	$	50.000
Bomba de jeringa	$	1.285.200	1	$	1.285.200
			TOTAL	$	2.030.200

Fuente: Creación propia.

Dada la gran diferencia en costo entre un sistema de inyección con tanque presurizado y una bomba de jeringa, el costo final del Modelo 2 es menor a la otra alternativa. En cuanto al funcionamiento la bomba de jeringa ofrece un control del caudal de biocombustible de forma autónoma, sin necesidad de un controlador de flujo, pero considerando que el VDM utiliza un controlador de flujo incorporado, esta cualidad no es necesaria. Basta con un sistema que incorpore la presión suficiente, el flujo que pasa al VDM será limitado por el controlador de flujo. Finalmente el modelo a seleccionar es el modelo 2.

3.6 Diseño y construcción de tanque presurizado

La mejor forma de adicionar al sistema vaporizador biocombustibles y agua, es a través de un tanque presurizado, esto considerando aspectos económicos (es de menor costo que las

otras alternativas) y técnicos (el vaporizador VDM y CEM requieren que el líquido tenga presión suficiente a la entrada del dispositivo).

El tanque presurizado fue creado basándose en el funcionamiento de un frasco llamado *woulff bottle*, utilizado en el lavado de gases, este frasco contiene dos aberturas, por una de ellas entra el gas (en el caso del biocombustible, este debe ser un gas inerte para evitar deflagración dentro del tanque), mientras que por la otra sale el líquido presente en la botella por la presión ejercida por el gas. El recipiente debe soportar una presión cercana a 2 *bar*, por lo que el material de construcción más adecuado es el acero inoxidable, además porque ofrece buena resistencia a la degradación al contacto con el biocombustible.

Los volúmenes que se deben manejar son pequeños en el caso del biocombustible, con un volumen de 500 *ml* se tendría suficiente combustible para hacer mediciones por más de 83 horas, y en caso del agua se tendría liquido suficiente para evaporar por 2 horas y media, lo que es suficiente.

El tanque se divide en dos piezas: la tapa y la base. La tapa posee tres tubos que sobresalen de ella permitiendo la conexión con el tanque de gas inerte (1), con la tubería que llegará hasta el vaporizador (este tubo "succionará" el líquido desde el interior) (2) y con una válvula de alivio (3), que sirve para disminuir la presión que hay dentro del tanque cuando se necesite, ver Figura 3.25.

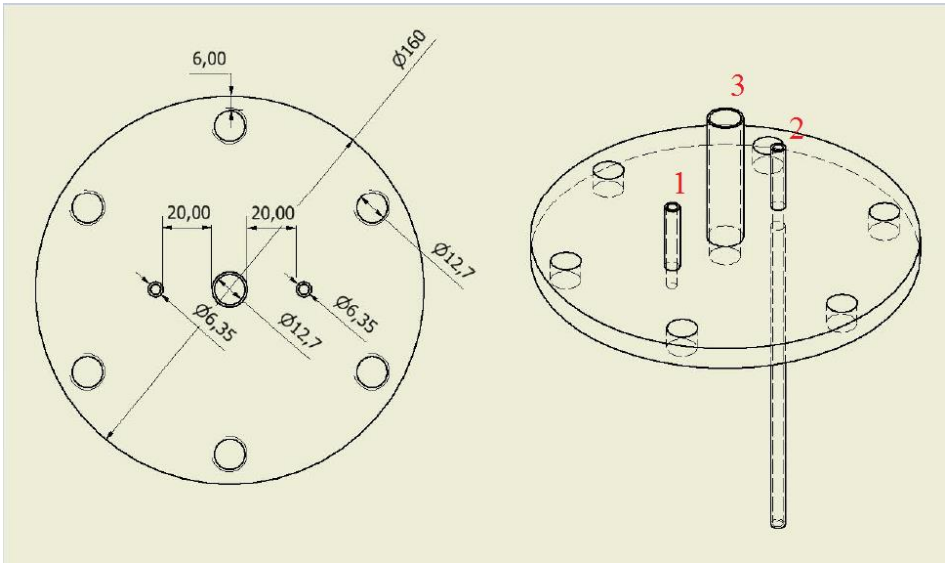

Figura 3.25: Diseño de la tapa del tanque presurizado.

La base tiene una profundidad aproximada de 160 *mm*, posee el mecanismo de acople de ambas piezas, que básicamente consiste en seis tuercas fijas en las cuales se pondrán pernos mariposa. Existe una tercera pieza, un trozo circular de goma o silicona (en color celeste en la Figura 3.26) que impermeabiliza la unión de la tapa con la base.

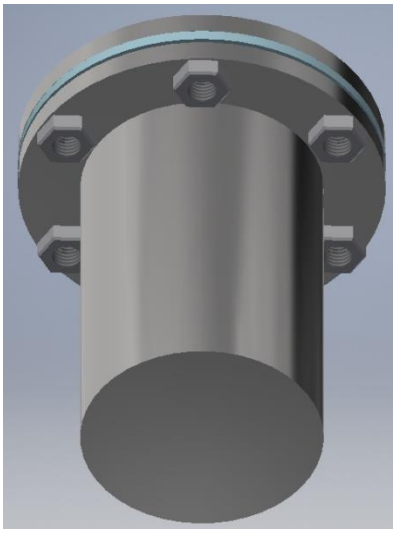
Figura 3.26: Vista inferior del tanque.

3.7 Funcionamiento del sistema

Para el funcionamiento de ambos sistemas (biocombustible y agua), se utiliza una herramienta ofrecida por el proveedor del vaporizador, llamada “fluidat” (www.fluidat.com),

la cual provee información referente a los balances de masa y de energía que sucederán a través del módulo. En la interfaz web se ingresan los flujos, presiones y temperaturas de entrada de líquido y gas transportador para encontrar la temperatura a la cual se debe calentar el intercambiador de calor con tal de evaporar la mezcla (ver Figura 3.27).

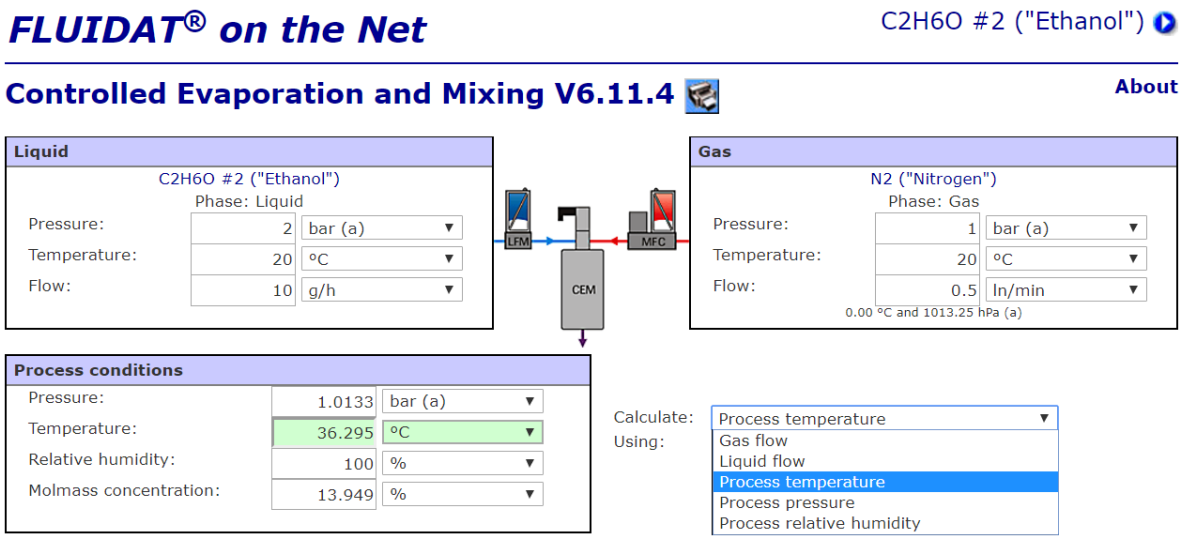

Figura 3.27: Interfaz de fluidat.

Son obtenidos los datos de temperatura de funcionamiento del vaporizador y de flujo para el líquido y el gas. El proveedor recomienda establecer la temperatura del vaporizador por un tiempo mínimo de 30 minutos antes de pasar el líquido por él.

A continuación se detallan los pasos para hacer funcionar el sistema, basándose en la Figura 3.28 donde se muestran las válvulas, líneas y controladores de flujo.

El primer paso consiste en purgar las líneas de fluido líquido. Se deber cerrar las válvulas (3), (5) y (10) y abrir las válvulas (2), (4), (7), (9) y (11), se hace pasar gas inerte o gas transportador por el sistema estableciendo en el módulo controlador de flujo de gas trasportador, un valor mayor a cero. Hasta este punto solo debe circular gas, por lo que se establece el flujo de líquido igual a cero.

Luego se le agrega presión al tanque presurizado que contiene el líquido, para esto se debe cerrar la válvula (4), conectar el cilindro de gas inerte al tanque presurizado, dar presión y abrir la válvula (3).

Con el flujo de gas constante se abre lentamente la válvula (5), que hasta el momento obstruía el paso del líquido, se debe esperar a que la válvula mezcladora (6) se llene. Cuando todas las burbujas salen del sistema se cierra la válvula de purga del vaporizador.

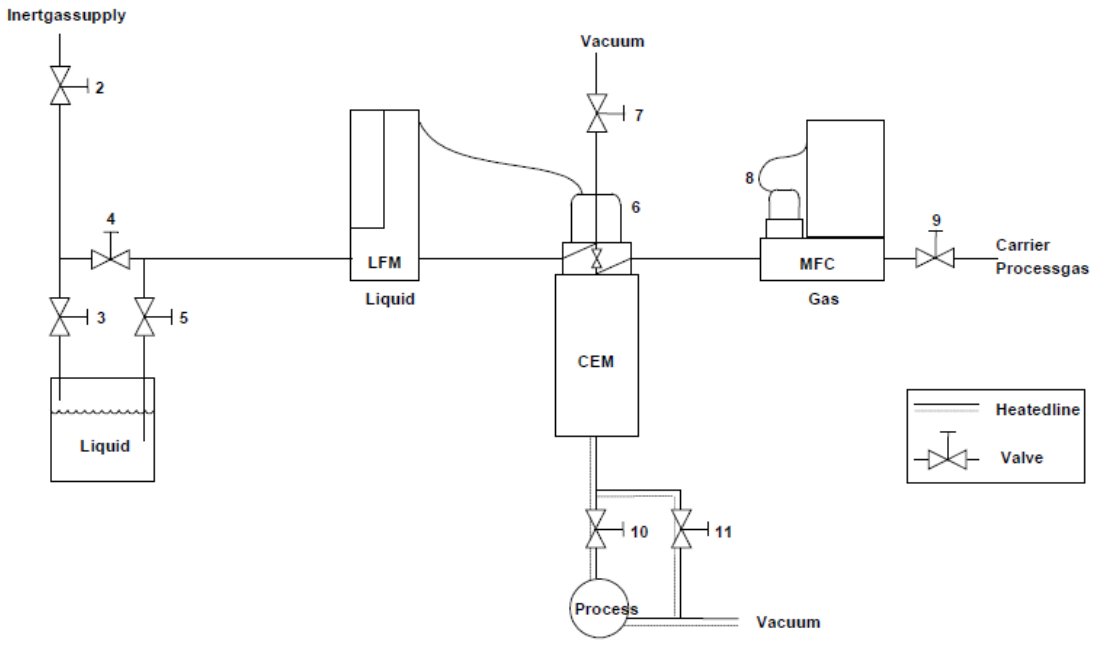

Figura 3.28: Esquema de funcionamiento del sistema.

Ahora el sistema vaporizador está listo para ser usado. Se debe asegurar que el gas portador siempre fluye cuando el flujo de líquido está encendido. Preferiblemente, se debe dejar fluir siempre gas en la línea de gas portador cuando el sistema se llena de líquido.

La mezcla evaporada pasará al tubo calefaccionado, en el cual se puede establecer una temperatura de calentamiento, para evitar la condensación de la mezcla en el interior. En el caso del agua esta temperatura no supera los $100°C$, pero en el caso del biocombustible se espera que sea mayor.

De la misma forma se establece previamente, mediante un voltímetro, la potencia de calefacción que se necesitará dentro del quemador para mantener ambos flujos en estado gaseoso, ya que el voltaje establecido implica una corriente y una caída de voltaje producto de la resistencia eléctrica (cinta calefactora).

Una vez terminada la medición, se apaga el suministro de fluido líquido y de gas transportador, y se comienza a limpiar el sistema utilizado, esto se logra haciendo circular gas inerte por las tuberías, luego de algunos minutos se puede cortar el flujo de gas inerte y apagar por completo el sistema.

3.8 Conclusiones Capitulo II

Luego de la planificación y construcción del dispositivo experimental se puede concluir que es importante tener un respaldo técnico para justificar la construcción de un aparato de elevado costo y de gran importancia. De esta forma se pueden tomar decisiones de forma segura, para luego comparar los resultados prácticos y los obtenidos durante la planificación y diseño del modelo.

Las pérdidas de presión en la línea para ambos flujos líquidos (en cada sistema) por efecto roce en la tubería y por singularidades, son insignificantes, en comparación a la presión que se requiere a la entrada de los dispositivos vaporizadores (2 *bar*). La presión necesaria para elevar el fluido desde la parte baja de la plataforma es del orden de 0,1 *bar*, siendo influyente en menor medida.

El dispositivo experimental no se ha probado, se está a la espera de llevar a cabo las decisiones propuestas en este trabajo, sin embargo, hay plena seguridad que una vez instalado el sistema se podrá tener una llama de difusión acorde a lo planeado, se podrá manejar el flujo másico de los combustibles y oxidantes de forma precisa, y también se podrá medir la propensión a la formación de hollín en ambos sistemas instalados.

Todas las partes del dispositivo experimental son necesarias para su funcionamiento, sin embargo las piezas de mayor importancia son el módulo de entrega de vapor (VDM) para el biocombustible y el evaporador y mezclador controlado (CEM), debido principalmente a que se requiere de una gran precisión en los flujos másicos, para obtener resultados prácticos reales y poder compararlos con los obtenidos de forma teórica. Se debe considerar el efecto que tiene la densidad del combustible en el comportamiento de la llama, comúnmente se mide el flujo de volumen de combustible, lo que puede ser un problema teniendo en cuenta que existen diferencias significativas entre las propiedades de los biocombustibles obtenidos desde distintas fuentes.

Es importante seguir las instrucciones de funcionamiento otorgadas por el proveedor, y ante cualquier inquietud contactar con ellos para obtener mayor información, para evitar el deterioro del equipo y alargar la vida útil del aparato. Además si no se siguen correctamente las instrucciones se pueden ocasionar fluctuaciones en la llama obtenida producto de burbujas en el sistema.

4. CONCLUSION GENERAL

Existe un interés intrínseco entre las naciones por el cuidado del medio ambiente y por el desarrollo de energías limpias y renovables, los biocombustibles son una solución a corto plazo a estos asuntos. Se debe tener en consideración que la industria de los biocombustibles posee muchos grupos de interés relacionados: gobierno, empresas petroleras, agricultores, empresas de transporte, empresas de alimentos, etc. por lo que su fomento y desarrollo trae consecuencias inevitables en muchas áreas. Por ejemplo las políticas que conllevan aumentos en el uso de biocombustibles, han significado una creciente demanda de commodities agrícolas, como caña de azúcar, cereales, maíz y aceites vegetales. Esto ha traído un alza en el precio de los alimentos para uso humano y animal, debido al aumento en su demanda. A pesar de ello el rol del estado es fundamental en la promoción del uso y producción de estos combustibles, más aun cuando no hay antecedentes de importancia en el país.

Existe un gran número de materias primas para la fabricación de biocombustibles, en donde algunas poseen mayor productividad y rentabilidad que otras. Si a lo anterior agregamos la gran variedad de climas existentes en Chile, el problema se vuelve más complejo, pues no existe solo una especie que ofrezca mejores resultados en todo el territorio. Por otro lado Chile debe aprovechar las ventajas competitivas que posee, como lo es la abundante cantidad de bosque nativo como opción para fabricar bioetanol de segunda generación, y el vasto territorio marítimo para el cultivo de algas para producir biodiésel.

Ante el latente crecimiento de esta industria, es necesario obtener la mejor información posible, respecto a estos recursos y su comportamiento en el proceso de combustión. Una forma de hacerlo es realizar estudios científicos sobre la llama, midiendo su propensión a formar hollín. Sin embargo los modelos numéricos que estudian la formación de hollín en combustibles no son suficientes, pues existe la necesidad de corroborar resultados con

mediciones de procesos reales, por ello y ante la poca información sobre los biocombustibles se origina este trabajo, de investigación y planificación del dispositivo experimental. Debido a la complejidad del proceso de formación del hollín, el mecanismo debe facilitar el trabajo de medición, sin provocar alteraciones positivas o negativas en la formación de estas partículas, por ende se debió trabajar con los mejores recursos disponibles, investigando profundamente técnicas y elementos utilizados por el mundo científico.

5. REFERENCIAS

Anitescu, G. & Bruno, J. (In preparation). Characterization of biodiésel fuel from supercritical fluid processing by the advanced distillation curve method.

Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) y Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE). (2008). Bioetanol de caña de azúcar, energía para el desarrollo sostenible.

Berti, M., R. Wilckens, S. Fischer, A. Solis & B. Johnson. 2011. Seeding date influence on camelina seed yield, yield components, and oil content in Chile. *Industrial Crops and Products* 34(2): 1358-1365.

Boza, S. (2011). Políticas y capacidades de I&D e innovación para el desarrollo de los biocombustibles en Colombia y Chile.

Bucy, H. (2011). Oxidative stability and ignition quality of algae derived methyl esters containing varying levels of methyl eicosapentaenoate and methyl docosahexaenoate. *Masters Thesis, Colorado State University, Fort Collins*.

Cacua, K., Amell, A. & Cadavid, F., Effects of oxygen enriched air on the operation and performance of a diésel-biogas dual fuel engine, Bio. and Bioenergy. 45: 159-167 (2012).

Centro Avanzado de Gestión, Innovación y Tecnología para la Agricultura (CATA.) (2007). Evaluación del potencial productivo de biocombustibles en Chile con cultivos agrícolas tradicionales. *Departamento de Industrias, Universidad Técnica Federico Santa María.*

Centro Avanzado de Gestión, Innovación y Tecnología para la Agricultura (CATA.) (2007). Evaluación y Sensibilización de Estudios Técnico-Económicos Respecto al Potencial de Biocombustibles en Chile. *Departamento de Industrias, Universidad Técnica Federico Santa María*.

Choi, MY., Hamins, A., Mulholland, GW., & Kashiwagi, T. (1994). Simultaneous optical measurement of soot volume fraction and temperature in premixed flames. Combust Flame.p174–86.

Corporación Nacional Forestal (CONAF). 2011. Catastro de los Recursos Vegetacionales Nativos de Chile. Disponible en: www.sit.conaf.cl

Comisión Nacional de Energía de Chile (CNE). (2008). Requerimientos de Infraestructura para el Suministro de Biocombustibles en la Actual Red de Distribución de Combustibles Fósiles.

Comisión Nacional de Energía de Chile (CNE) (2010). *Balance Nacional de Energía 2009*. Santiago, Chile. Disponible en: www.cne.cl

Comisión Nacional de Energía de Chile (CNE) (2017). *Balance nacional de energía 2015*. Santiago, Chile. Disponible en: www.cne.cl

McEnally, CS. & Pfefferle LD. (2015). Sooting tendencies of unsaturated esters in nonpremixed flames.

McEnally, CS. & Pfefferle LD. (2011). Sooting Tendencies of Oxygenated Hydrocarbons in laboratory-scale flames. *Environmental Science and Technology*, Vol. 45(6), pp 2498-2503, 2011. doi: 10.1021/es103733q

De Oliveira, M.E.D., B.E. Vaughan & E.J. Rykiel Jr. (2005). Ethanol as fuel: energy, carbon dioxide balances and ecological footprint. *BioScience* 55(7): 593-602.

Demirbas, A. (2009). Progress and recent trends in biodiésel fuels. *Energy Conversion and Management*. 50(1): 14-34.-

Environmental Protection Agency (EPA). (2002). A comprehensive analysis of biodiésel impacts on exhaust emissions. *Draft Technical Report, Environmental Protection Agency, United States*. 126 p

FAO. (2008). Biofuels: back to the future? by U.R. Fritsche, SOFA 2008 background paper. Unpublished. Rome.

Fassinou, W., Sako, A., Fofana, A., Koua, K., Toure, S,.(2010). Fatty acids composition as a means to estimate the high heating value (HHV) of vegetable oils and biodiésel fuels. https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.08.030

Francis. G., (2006). Jatropha curcas - its promise as a tool for rural income generation. *Ponencias del Taller Internacional sobre Biodiésel y Cooperación para el Desarrollo*. Universidad Politécnica de Madrid e Ingeniería Sin Fronteras.

García. C., (2008). Biocombustibles: ¿energía o alimento?. Universidad de Barcelona.

Gobierno de Chile. (2015). Contribución nacional tentativa de Chile (INDC) para el acuerdo climático parís 2015.

González, J.A., R. Velasc and C. Pérez. (2000). Dimensión socioeconómica de la degradación del suelo en Chile. *Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo* 94: 94-104.

Iglesias, R. (2010). Agricultura y bioenergía. *Gobierno de Chile, Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA)*. Santiago, Chile. 28 p.

International Energy Agency. (2010), WorldEnergy Outlook 2010. Recuperado de: http://www.iea.org

Karatas, A. E., & Gülder, Ömer L. (2012). Soot formation in high pressure laminar diffusion flames. *Progress in Energy and Combustion Science,* 38(6), 818–845. http://doi.org/10.1016/j.pecs.2012.04.003

Labra, F. (2009). Zonificación agroecológica preliminar para el establecimiento de áreas potenciales de cultivo de Jatropha curcas L. con fines bioenergéticos entre las regiones de Antofagasta y Valparaíso.

Mbainguebem, A., Mouangue, R., Bianzeube, B. T., Fino, D., Bensaid, S., Piumetti, M., … Mamat, R. (2015). Soot Filtration Recent Simulation Analysis in Diésel Particulate Filter (DPF). Applied Catalysis A: General, 509, 75–96. http://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.378

McEnally, C.S., and Pfefferle, L.D. 2007. Improved sooting tendency measurements for aromatic hydrocarbons and their implications for naphthalene formation pathways.

Merchan-Merchan, W., McCollam, S., & Pugliese, J. F. C. (2015). Soot formation in diffusion oxygen-enhanced biodiésel flames. Fuel, 156, 129–141. http://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.04.011

Omidvarborna, H., Kumar, A. & Kim, D. (Abril 2015). Recent studies on soot modeling for diésel combustion.

Peter, H. Joo, Yu Wang, Abhijeet Raj, & Suk Ho Chung. (Enero 2013). Sooting limit in counterflow diffusion flames of ethylene/propane fuels and implication to threshold soot index. Proceedings of the Combustion Institute, 34(1):1803–1809.

Pedro N, Benjumea H., German Chavez N. & Claudia M. Vargas R. (Diciembre 2006). Efecto de la temperatura sobre la densidad del biodiésel de aceite de palma y sus mezclas con diésel convencional.

Patrouilleau, R., C. Lacoste, P. Yapura y M. Casanova. (2006). Perspectivas de los biocombustibles de Argentina, con énfasis en el etanol de base celulósica. *Fundación ArgenINTA*, Gobierno de Argentina. 61 p.

Pollack, A. (September 23, 2000). New York Times: *Kraft Recalls Taco Shells With Bioengineered Corn.*

Red iberoamericana de aprovechamiento de residuos orgánicos en producción de energía (Bioenergía). (2014). Bioenergia: Fuentes, conversión y sustentabilidad.

San Martín, R., T. de la Cerda, A. Uribe, P. Basilio, M. Jordán, D. Prehn and M. Gebauer. (2010). Evaluation of guindilla oil (*Guindilia trinervis* Gillies ex Hook. et Arn.) for biodiésel production. Fuel 89(12): 3785-3790.

Seixas, M. (2006). Estrategias para construir una plataforma de cooperación horizontal sobre agroenergía y biocombustibles. IICA.

Sims, R.E.H., W. Mabee, J.N. Saddler and M. Taylor. (2010). An overview of second generation biofuel technologies. *Bioresource Technology* 101(6): 1570-1580.

Schulz, C., Kock, B.F., Hofmann, M., Michelsen, H., Will, S., Bougie, B., Suntz R., and Smallwood, G., Appl. Phys. B 83, (2006) 333-354.

Sun, J., Caton, J., Jacobs, T. (2010). Progress in Energy and Combustion Science. Department of Mechanical Engineering, Texas A&M University.

Turra, R. (2006). Antecedentes para una política nacional de Bioenergía. *Movimiento Unitario Campesino y Etnias de Chile (MUCECH)*. Santiago, Chile. 16 p.

Tat, M. E. & van Gerpen, J. H. (1999) The kinematic viscosity of biodiésel and its blends with diésel fuel. *J. Am. Oil Chem. Soc.*76 (12), 1511−1513.

Universidad Politécnica de Madrid e Ingeniería Sin Fronteras (2006). Jatropha curcas – its promise as a tool for rural income generation.