

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAISO – CHILE



**EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS
EMISIONES DE GASES Y MATERIAL
PARTICULADO DEL PROCESO DE
COMBUSTIÓN DE DIÉSEL EN MEZCLAS
CON BIODIÉSEL DERIVADO DE LA SOYA**

AGUSTÍN IGNACIO GARRIDO PEDREROS

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
CIVIL MECÁNICO, MENCIÓN ENERGÍA**

PROFESOR GUÍA: DR. ING. MARIO TOLEDO T.

**PROFESORES CORREFERENTES: DR. ING. MAURICIO OSSES A.
DR. ING. FRANCISCO CERECEDA B.**

ENERO - 2017

Agradecimientos

A Dios primeramente, porque de Él proviene la sabiduría, ciencia y todas las capacidades necesarias para poder desenvolverse en la vida universitaria.

A mis padres, por su apoyo constante, su amor, cariño y provisión.

Al Grupo Bíblico Universitario, un grupo de estudiantes donde pude experimentar la amistad en torno a las verdades de la Biblia.

Y a cada uno de mis compañeros, con quienes pasé más de seis años dentro y fuera de las aulas, almorzando, traspasando y disfrutando del compañerismo que permite el ambiente universitario.

Gracias por este lindo proceso terminado.

Resumen

En el marco del proyecto FONDEF “Análisis y generación de base de datos de potencial energético y emisiones contaminantes para biocombustibles líquidos de interés nacional” se han realizado diferentes experiencias en un horno isotérmico con el fin de obtener una visión general sobre las ventajas y los inconvenientes de usar biodiesel como combustible, incluyendo el impacto ambiental global de estos.

El Centro de Tecnologías Ambientales (CETAM) ha impulsado un proyecto de análisis de datos de combustión de combustibles de interés nacional. El objetivo del presente trabajo de título es mostrar la investigación desarrollada por los autores sobre el uso del biodiesel en calderas, prestando atención al rendimiento, emisiones y material particulado cuando es comparado con el diésel tradicional (A2).

La implementación de una caldera se ha llevado a cabo en el Laboratorio de Energías Renovables (LER), allí se implementó un sistema de dilución de gases de escape con el fin de evitar la saturación de los instrumentos utilizados para realizar las distintas mediciones.

Se realizaron pruebas experimentales de optimización para mezclas B0, B5, B20 y B50 con contenido de biodiesel de soja, en base a los resultados obtenidos cada mezcla operó en el punto más óptimo. Hubo cambios en el consumo de combustible pero de acuerdo a los resultados no se asocia ninguna tendencia entre el consumo de combustible y el porcentaje de biodiesel en la mezcla.

La mezcla B20 brindó una buena eficiencia de combustión, 83%, prueba de ello fueron los altos índices de emisiones de CO₂, lo que se tradujo un alto factor de emisión de CO₂, 60.094 [mg/MJ]. Comparativamente las emisiones de material particulado en relación al diésel se mantienen en la misma proporción. No hay datos concluyentes en relación a la eficiencia que ofrece el horno frente a las mezclas utilizadas.

En relación al material particulado se logra apreciar que está relacionado fuertemente con las condiciones ambientales en las cuales se desarrolla la actividad. Por otro lado la proporción de particulado PM₁₀ está compuesto en un 80% por PM₁, dato no menor considerando que es altamente peligroso en la salud de las personas expuestas a estos particulados.

Abstract

Within the framework of the FONDEF project "Analysis and generation of data on energy potential and polluting emissions for liquid biofuels of national interest", different experiences have been carried out in an isothermal furnace in order to obtain a general overview of the advantages and disadvantages of biodiesel, including the global environmental impact of these.

The Center for Environmental Technologies (CETAM) has promoted a project to analyze fuel combustion data of national interest. The objective of this title work is to show the research developed by the authors on the use of biodiesel in boilers, paying attention to performance, emissions and particulate matter when compared to traditional diesel.

The implementation of a boiler has been carried out in the Renewable Energy Laboratory (LER), where an exhaust gas dilution system is implemented in order to avoid saturation of the instruments used to perform the different measurements.

Experimental optimization tests were carried out for mixtures B0, B5, B20 and B50 with soybean biodiesel content, based on the results obtained, each mixture operated at the most optimal point. There were changes in fuel consumption but according to the results no tendency is associated between fuel consumption and the percentage of biodiesel in the mixture.

The B20 mixture provided a good combustion efficiency, 83%, proof of this were the high CO₂ emission rates, which translated into a high CO₂ emission factor, 60,094 [mg / MJ]. Comparatively, particulate matter emissions in relation to diesel are maintained in the same proportion. There is no conclusive data regarding the efficiency offered by the oven compared to the mixtures used.

In relation to the particulate material it is possible to appreciate that it is strongly related to the environmental conditions in which the activity takes place. On the other hand, the proportion of particulate PM₁₀ is composed of 80% by PM₁, a fact not less considering that it is highly dangerous in the health of people exposed to these particulates.

Glosario

Catalizadores: sustancia que acelera o retarda una reacción química sin participar en ella.

Destilación: Proceso por el que la sustancia volátil de una mezcla se separa de otra que no lo es mediante evaporación y posterior condensación de la misma

Disolución: Mezcla que resulta de disolver un cuerpo o una sustancia en un líquido.

Edáfica: Relativo al suelo, especialmente en lo que respecta a la vida de las plantas.

Estequiometria: es el cálculo de las relaciones cuantitativas entre los reactivos y productos en el transcurso de una reacción química.

Ésteres: En bioquímica son el producto de la reacción entre los ácidos grasos y los alcoholes.

Exotérmico: Proceso o reacción que se produce con desprendimiento de calor.

Glicerina: Alcohol incoloro de tres átomos de carbono, viscoso y dulce, que se encuentra en todos los cuerpos grasos como base de su composición.

Gasóleo: también llamado diésel, es una mezcla compleja de hidrocarburos procedentes del refino del petróleo, utilizado principalmente como combustible

Inyectores: Dispositivo utilizado para bombear fluidos utilizando el efecto Venturi. Utiliza un fluido a alta presión que sale por una boquilla a alta velocidad y baja presión convirtiendo su energía potencial en energía cinética.

PM 1: Partículas de diámetro menor o igual a un micrómetro.

PM 2,5: Partículas de diámetro menor o igual a 2,5 micrones. Puede ingresar hasta los alvéolos y luego a la sangre.

PM 10: Partículas de diámetro menor o igual a 10 micrones. Puede llegar hasta los pulmones.

Refinar: Hacer una cosa más fina o más pura, en especial determinadas sustancias a las que se les eliminan sus impurezas.

Transesterificación: es el proceso de intercambiar el grupo alcoxi de un alcohol. Estas reacciones son frecuentemente catalizadas mediante la adición de un ácido o una base.

Triglicéridos: Un triglicérido es un tipo de glicerol que pertenece a la familia de los lípidos. Este glicérido se forma por la esterificación de los tres grupos OH de los gliceroles por diferentes o igual tipo de ácidos grasos, concediéndole el nombre de «triglicérido»

Índice

Introducción.....	10
Objetivos.....	11
1. Biocombustibles y su desarrollo.....	12
1.1 Procedencia de los biocombustibles	12
1.2 Primeros biocombustibles	12
1.3 Auge de los biocombustibles.....	13
1.4 Situación mundial de biodiésel.....	13
1.5 Situación del biocombustible en Chile	15
2. Producción de biocombustibles y sus propiedades.....	16
2.1 Etapas de producción del biodiesel	16
2.2 Propiedades del biodiesel y otras consideraciones	20
2.2.1 Viscosidad	21
2.2.2 Densidad	22
2.2.3 Poder Calorífico.....	24
3. Uso de biodiesel en Calderas.....	24
3.1 Combustión en el interior de la caldera	24
3.1.1 Tipos de combustión.....	26
3.2 Pruebas experimentales	26
3.2.1 Primeros resultados	27
4. Reglamento asociado al uso de biodiesel y emisiones de combustibles	28
4.1 Ordenanzas internacionales referidas a biocombustibles	29
4.2 Regulación nacional de uso de biocombustibles	29
4.3 Factores de emisión	30
4.3.1 Componentes de los gases de combustión.....	31
4.3.2 Material Particulado	32
4.3.3 Carbono Negro	33
5. Diseño experimental	33
5.1 Biodiesel experimental y análisis	33
5.2 Implementación de horno y sistema de adquisición de datos.....	35
5.3 Implementación de Túnel de dilución	37
5.3.1 Muestreo Isocinético.....	38
6. Procedimiento Experimental	40

6.1 Pasos Previos	41
6.1.1 Procedimiento de mezclado.....	42
6.1.2 Puesta en marcha y detención del horno y elementos de medición.....	43
6.2 Optimización de Parámetros de funcionamiento.....	44
6.3 Personal y Seguridad	45
7. Determinación del balance energético.....	46
7.1 Metodología.....	46
7.2 Resultados relación aire combustible estequimétrico.....	48
7.3 Resultados relación aire combustible real	49
7.4 Resultados eficiencia de Caldera.....	50
8. Factores de Emisión	51
8.1 Metodología para material particulado y carbono negro.....	51
8.2 Cálculo del Factor de Dilución.....	51
8.3 Resultados Material particulado	52
8.4 Resultados carbono Negro.....	53
8.5 Metodología para gases de escape.....	54
8.5.1 Metodología para Eficiencia de combustión	56
8.1 Resultados de Factor de Emisión de gases de escape.....	56
9. Conclusiones.....	57
10. Consideraciones.....	58
11. Referencias	59
Anexo A – Perfil de temperaturas durante los experimentos	61

Índice de Ilustraciones

ILUSTRACIÓN 1. PROCESO GENERAL PARA LA OBTENCIÓN DE BIODIESEL	19
ILUSTRACIÓN 2. REACCIÓN ESTÁNDAR PARA LA ELABORACIÓN DEL BIODIESEL.....	20
ILUSTRACIÓN 3. SITUACIÓN IDEAL DE COMBUSTIÓN EN LOS GASES DE ESCAPE	25
ILUSTRACIÓN 4. SITUACIÓN REAL DE LA COMBUSTIÓN EN UNA CALDERA	25
ILUSTRACIÓN 5. ESQUEMA DE HORNO ISOTÉRMICO	35
ILUSTRACIÓN 6. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	36
ILUSTRACIÓN 7. QUEMADOR UNIGAS LO60	36
ILUSTRACIÓN 8. BOMBA SUNTEC AS47A	36
ILUSTRACIÓN 9. TOBERA DANFOSS.....	37
ILUSTRACIÓN 10. TÚNEL DE DILUCIÓN CONECTADO CON TUBERÍA 3/8" PARA TOMA DE MUESTRAS.....	37
ILUSTRACIÓN 11. ESQUEMA DE MUESTREO ISOCINÉTICO	38
ILUSTRACIÓN 12. TUBOS DE PITOT UTILIZADOS PARA TOMAR MUESTRAS DE GASES	38
ILUSTRACIÓN 13. VARIADOR DE FRECUENCIA	38
ILUSTRACIÓN 14. MONITOR DE PARTÍCULAS.....	39
ILUSTRACIÓN 15. TESTO 350 XL	39
ILUSTRACIÓN 16. MICROETALÓMETRO AE51	39
ILUSTRACIÓN 17. HORNO ISOTÉRMICO UTILIZADO	41
ILUSTRACIÓN 18. HORNO ISOTÉRMICO Y SU RED DE AGUA DEL HORNO.....	42
ILUSTRACIÓN 19. PROBETA 1000 ML	42

Índice de gráficos

GRÁFICO 1. PRODUCCIÓN MUNDIAL DE BIODIESEL. FUENTE: OIL WORLD STATISTIC UPDATE.....	14
GRÁFICO 3. VISCOSIDAD CINEMÁTICA DE TRES BIODIESEL DISTINTOS	21
GRÁFICO 4. VISCOSIDAD CINEMÁTICA DE BIODIESEL COMERCIAL EN VARIAS MEZCLAS	22
GRÁFICO 5. EFECTO DEL PORCENTAJE DE BIODIESEL EN LA DENSIDAD DE LA MEZCLA	23
GRÁFICO 6. EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA DENSIDAD DE LAS MEZCLAS	23
GRÁFICO 7. PODER CALORÍFICO SUPERIOR E INFERIOR DE LAS MEZCLAS	24
GRÁFICO 8. CONDICIONES AMBIENTALES DURANTE LOS EXPERIMENTOS.....	53
GRÁFICO 11. FACTOR DE EMISIÓN DE MEZCLAS EVALUADAS	54
GRÁFICO 12. PERFIL DE TEMPERATURA DE EXPERIMENTO 2 MEZCLA B0	61
GRÁFICO 13. PERFIL DE TEMPERATURA DE EXPERIMENTO 3 MEZCLA B0	61
GRÁFICO 14. PERFIL DE TEMPERATURA DE EXPERIMENTO 2 MEZCLA B5	62
GRÁFICO 15. PERFIL DE TEMPERATURA DE EXPERIMENTO 3 MEZCLA B5	62
GRÁFICO 16. PERFIL DE TEMPERATURA DE EXPERIMENTO 4 MEZCLA B5	63
GRÁFICO 17. PERFIL DE TEMPERATURA DE EXPERIMENTO 1 MEZCLA B20	63
GRÁFICO 18. PERFIL DE TEMPERATURA DE EXPERIMENTO 2 MEZCLA B20	64
GRÁFICO 19. PERFIL DE TEMPERATURA DE EXPERIMENTO 3 MEZCLA B20	64
GRÁFICO 20. PERFIL DE TEMPERATURA DE EXPERIMENTO 1 MEZCLA B50	65
GRÁFICO 21. PERFIL DE TEMPERATURA DE EXPERIMENTO 2 MEZCLA B50	65
GRÁFICO 22. PERFIL DE TEMPERATURA DE EXPERIMENTO 3 MEZCLA B50	66

Índice de tablas

TABLA 1. PRODUCCIÓN MUNDIAL DE BIODIESEL. DESAGREGADO POR PAÍSES.....	14
TABLA 2. TABLA COMPARATIVA DE ACEITES, ESTERES METÁLICOS Y PETRÓLEO DIÉSEL	20
TABLA 3. RESULTADOS COMPARATIVOS DE CALDERA ALIMENTADA CON DIESEL Y BIODIESEL.....	27
TABLA 4. PROPIEDADES DE LOS BIOCOMBUSTIBLES A ENSAYAR EN EL EXPERIMENTO	33
TABLA 5. PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DE BIODIESEL DE GRASAS ANIMALES.....	34
TABLA 6. PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DE BIODIESEL DE ACEITES DE FRITURA	34
TABLA 7. PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DEL BIODIESEL DE SOYA.....	34
TABLA 8. ELEMENTOS DE HORNO ISOTÉRMICO	35
TABLA 9. TERMOCUPLAS	35
TABLA 10. CÁLCULO DE MUESTREO ISOCINÉTICO	39
TABLA 11. PUESTA EN MARCHA DEL HORNO	43
TABLA 12. PUESTA DETENCIÓN DE EQUIPOS DE MEDICIÓN.....	43
TABLA 13. QUEMA DE MEZCLA B0 PARA BÚSQUEDA MEJORES CONDICIONES DE COMBUSTIÓN.....	44
TABLA 14. QUEMA DE MEZCLA B5 PARA BÚSQUEDA MEJORES CONDICIONES DE COMBUSTIÓN.....	44
TABLA 15. QUEMA DE MEZCLA B20 PARA BÚSQUEDA MEJORES CONDICIONES DE COMBUSTIÓN	44
TABLA 16. QUEMA DE MEZCLA B50 PARA BÚSQUEDA DE MEJORES CONDICIONES DE COMBUSTIÓN.....	44
TABLA 17. ESTEQUIOMETRIA DE LOS COMBUSTIBLES CONSEGUIDOS POR EL PROYECTO FONDEF	48
TABLA 18. CÁLCULO DE MASA DE AIRE Y COMBUSTIBLE ESTEQUIOMÉTRICO PARA EL DIÉSEL.....	49
TABLA 19. CÁLCULO DE MASA DE AIRE Y COMBUSTIBLE ESTEQUIOMÉTRICO PARA BIODIESEL DE SOJA	49
TABLA 20. CÁLCULO RAC REAL Y MASA DE AIRE REAL PROMEDIO PARA MEZCLAS DE SOJA.....	50
TABLA 21. ENERGÍA QUE ENTRA AL SISTEMA.....	50
TABLA 22. ENERGÍA QUE SALE DEL SISTEMA	50
TABLA 23. CÁLCULO DEL FACTOR DE DILUCIÓN PARA CÁLCULO DE MATERIAL PARTICULADO	52
TABLA 24. MATERIAL PARTICULADO PM1, PM2,5 Y PM 10 PARA LAS MEZCLAS EVALUADAS	52
TABLA 25. FACTOR DE EMISIÓN DE GASES DE COMBUSTIÓN DE MEZCLAS DIÉSEL-BIODIESEL.....	55
TABLA 26. ESTEQUIOMETRIA DE LOS COMBUSTIBLE Y GASES DE COMBUSTIÓN	56
TABLA 27. EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN PROMEDIO PARA CADA MEZCLA EVALUADA ..	56

Introducción

La creciente necesidad energética de la sociedad humana y las limitadas fuentes de energía no renovable han suscitado un auge en la investigación y el uso de fuentes de energía renovables que permitan reemplazar los limitados yacimientos energéticos fósiles actuales. Frente al actual desafío, los biocombustibles a partir de diferentes cultivos, surgen como una alternativa de reemplazo de los combustibles tradicionales obtenidos del petróleo. El etanol y el biodiesel son los combustibles que más participación tienen en esta área, ya que se presentan como una alternativa atractiva para su elaboración a partir de Raps o Canola, cultivo industrial presente por décadas en la producción de aceite comestible, apto para ser transformado en un biocombustible como es el biodiesel.¹

Como resultado de esta situación, el Gobierno ha estado impulsando acciones orientadas a variar la matriz energética del país, incorporando en ella fuentes de energía renovables. Así, la utilización de cultivos tradicionales como materias primas para la producción de biocombustibles aparece como una alternativa para diversificar las fuentes de energía, ya que se trata de recursos naturales renovables que permitirían disminuir el grado actual de dependencia energética, sustituir el consumo de combustibles fósiles, reducir la emisión neta de gases de efecto invernadero y reactivar un importante sector de la agricultura nacional.²

La política energética del Gobierno, como lo señala el Decreto 11, se ha orientado a maximizar la diversificación en todos los ámbitos: fuentes, proveedores y origen del abastecimiento. En este contexto, los biocombustibles representan una nueva fuente alternativa a los combustibles fósiles líquidos, esencialmente para el parque vehicular, donde según los artículos 11 y 12 el decreto emitido el año 2008, el biodiesel o bioetanol pueden ser mezclados en un 2% o en un 5% con el combustible correspondiente, aunque también puedan tener aplicaciones en ciertas áreas industriales. La meta es desarrollar un mercado gradual de biocombustibles, aprovechando las opciones de primera generación y fomentando la investigación y el desarrollo sostenible de los recursos potenciales para la producción de biomasa de segunda generación (lignocelulosa y algas).^{3 4}

La presente memoria pretende estudiar el comportamiento de estos biocombustibles. En forma independiente serán mezcladas con combustibles fósiles tradicionales y se analizará su comportamiento, potencial energético y emisiones contaminantes, en un horno isotérmico.

¹ (Wompner G. 2009)

² (Centro Avanzado de Gestión, Innovación y Tecnología para la Agricultura 2007)

³ (MINISTERIO DE ECONOMÍA 2008)

⁴ (Centro de Estudios Ambientales 2009)

Objetivos

Objetivos generales

Implementar un horno isotérmico en el Laboratorio de Energías Renovables de la Sede José Miguel Carrera de la Universidad Técnica Federico Santa María para realizar mediciones de los gases producto de la combustión de mezclas diésel-biodiésel derivado de la soya y la evaluación de rendimiento del proceso.

Objetivos particulares

- Implementar un horno isotérmico y un sistema de adquisición de datos en línea en Laboratorio de Energías Renovables.
- Realizar la instalación de un sistema de dilución de gases de escape junto instrumentos de medición de gases y partículas online en ducto de gases de escape.
- Definir los parámetros óptimos de combustión para las mezclas B5, B20 y B50 de manera de obtener mínimas emisiones gaseosas y de material particulado en las pruebas experimentales.
- Analizar los gases de escape producto de la combustión de las mezclas optimizadas.
- Medir y analizar el material particulado presente en los gases de escape.
- Realizar análisis de rendimiento de combustión de las diferentes mezclas estudiadas.

1. Biocombustibles y su desarrollo

1.1 Procedencia de los biocombustibles

El término biocombustible corresponde a combustibles derivados de biomasa renovables, consiste en una mezcla de sustancias orgánicas conformadas a partir de átomos de hidrógeno y de carbono para su uso en motores de combustión interna, cámaras de combustión o para otro tipo de generación de energía, que pueda sustituir parcial o totalmente los combustibles de origen fósiles. El biodiesel se produce a partir de aceites orgánicos, al convertir los triglicéridos (moléculas de grasa) de estos aceites en compuestos denominados ésteres. En este proceso químico, que se conoce como transesterificación, las tres cadenas ésteres de cada molécula de triglicérido reaccionan con un alcohol (metanol), y los productos finales son glicerina y un metiléster de ácido graso, que es el combustible. Las moléculas de oxígeno que retiene el biodiesel le otorgan propiedades favorables para la combustión. Los más utilizados son el biodiesel y el bioetanol. La gran diferencia entre los biocombustibles y las materias primas del petróleo es el contenido de oxígeno. Los primeros tienen niveles de oxígeno entre 10 a 45 %, mientras que los segundos no tienen esencialmente ningún porcentaje, lo que permite tener propiedades químicas muy diferentes entre ellos.⁵

1.2 Primeros biocombustibles

Los primeros biocombustibles de los cuales se tiene registro son los aceites vegetales desarrollados por el científico Patrick Duffy en 1853, 40 años antes de que el primer motor diésel funcionase. El primer modelo de Rudolf Diesel fue un monocilíndrico de hierro de 3 metros con un volante en la base que funcionó por vez primera en Augusta (Alemania), el 10 de agosto de 1893. Este motor, el cual fue presentado en la Exposición Mundial de París de 1900, es un ejemplo de la visión de Diesel, ya que era alimentado por aceite de cacahuete –un biocombustible, aunque no estrictamente biodiesel, puesto que no era transesterificado-. Diesel quería que el uso de un combustible obtenido de la biomasa fuese el verdadero futuro de su motor. En un discurso de 1912, dice: *“el uso de aceites vegetales para el combustible de los motores puede parecer insignificante hoy, pero tales aceites pueden convertirse, con el paso del tiempo, importantes en cuanto a sustitutos del petróleo y el carbón de nuestros días”*.⁶

Durante los años veinte, los fabricantes de motores diésel adaptaron sus propulsores a la menor viscosidad del combustible fósil (gasóleo) frente al aceite vegetal. La industria petrolera amplió así su hueco en el mercado de los carburantes porque su producto era más económico de producir que la alternativa extraída de la biomasa. El resultado fue, por muchos años, la casi completa desaparición de la producción de combustibles a partir de biomasa.⁷

⁵ (Wendy Espinoza de Aquino 2009)

⁶ (Duffy 1853)

⁷ (Wikipedia 2016)

A pesar del increíble uso de los derivados del petróleo como combustibles, durante los años veinte, treinta y la posguerra mundial, varios países informaron haber usado aceites como sustituto del diésel. Se detectaron problemas por la diferencia de viscosidad entre el aceite y el diésel, que producía depósitos dentro de la cámara de combustión y los inyectores. Algunos intentos para superar esto fueron aplicar una pirólisis craqueo al aceite, mezclarlo con diésel de petróleo o etanol, o calentarlo.⁸

1.3 Auge de los biocombustibles

En los últimos años la conciencia de los problemas energéticos y ambientales alentó a muchas universidades e investigadores a estudiar la posibilidad de la utilización de combustibles alternativos en lugar de la gasolina y sus derivados. Entre ellos, el biodiésel, producido a partir de diferentes aceites vegetales (soja, colza y girasol, por ejemplo), parece muy interesante por varias razones: puede reemplazar el aceite diésel en calderas y motores de combustión interna sin mayores ajustes; sólo es reportada una pequeña disminución en el rendimiento; casi cero emisión de sulfatos y una pequeña contribución neta de CO₂ cuando todo el ciclo de vida del biocombustible es considerado (incluyendo cultivación producción de aceite y conversión a biodiésel). Por esas razones varias campañas se han planificado en muchos países para introducir y promover el uso de biodiésel. No obstante, todavía existen muchas incertidumbres acerca de las potencialidades reales de biodiésel como sustituto del petróleo y los resultados reportados en la literatura parecen estar a menudo restringido al análisis y escenario específico que se derivan del petróleo. Se ha calculado que la cantidad de energía necesaria para la producción de biodiésel es menor que la obtenida con el producto final. Además, la emisión de contaminantes es algo menor.⁹

1.4 Situación mundial de biodiésel

En 2012, los precios mundiales del biodiésel cayeron, comparados con los altos niveles récord de 2011, en un contexto de precios sólidos de aceite vegetal (en parte debido a la sequía en Estados Unidos de América) y los altos precios del petróleo crudo. Contrariamente al caso del etanol, la producción mundial de biodiésel aumentó ese mismo año. Las cuatro principales regiones productoras de biodiésel (Unión Europea, Estados Unidos de América, Argentina y Brasil) aumentaron su oferta y en consecuencia la producción en Malasia se recuperó de un mínimo histórico en 2011 (ver Tabla 1).¹⁰

La producción mundial de biodiésel en el 2013 fue de 27,06 millones de toneladas. Con respecto a 2008, la producción mundial se ha incrementado en un 65% aunque a partir de ese año el crecimiento es más lento tal y como puede apreciarse en el gráfico 1.

⁸ (Knothe 2005)

⁹ (A. M. C. Carraretto 2004)

¹⁰ (OCDE/FAO 2013)

Tabla 1. Producción mundial de biodiésel. Desagregado por países y en base a la materia prima utilizada. Periodo 2008-2014 (en millones de toneladas)								
Rankin	Productor	2014 (estimado)	2013	2012	2011	2010	2009	2008
Producción mundial de biodiésel		29,12	27,06	24,19	22,31	18,37	16,20	14,18
Producción mundial de biodiésel en base a aceite de soja		7,29	7,00	6,83	7,37	5,34	4,38	4,53
1°	EE.UU.	2,27	2,50	1,83	1,88	0,52	0,96	1,62
2°	Brasil	2,16	1,89	1,80	1,91	1,74	1,10	0,85
3°	Argentina	2,05	2,00	2,46	2,43	1,82	1,18	0,71
4°	Unión Europea	0,40	0,27	0,44	0,84	0,97	0,85	1,14
Producción mundial de biodiésel en base a aceite de colza		6,41	6,23	6,25	6,23	6,34	5,71	4,98
1°	Unión Europea	5,76	5,64	5,64	5,64	6,07	5,42	4,70
2°	EE.UU.	0,33	0,29	0,36	0,38	0,11	0,15	0,18
Producción mundial de biodiésel en base a aceite de palma		9,56	8,69	6,82	5,12	3,99	3,37	2,28
1°	Indonesia	3,80	2,63	1,99	1,38	0,68	0,40	0,32
2°	Unión Europea	2,28	2,51	1,93	1,42	1,45	1,54	0,94
3°	Tailandia	1,00	0,95	0,92	0,79	0,65	0,57	0,40
4°	Malasia	0,63	0,47	0,25	0,17	0,19	0,24	0,20
5°	Colombia	0,54	0,50	0,49	0,44	0,34	0,17	0,04
6°	Singapur	0,42	0,41	0,55	0,34	0,12	0,05	0,00
Producción mundial de biodiésel de aceite de girasol		0,18	0,19	0,18	0,15	0,14	0,20	0,13
Producción mundial de biodiésel en base a sebo		2,17	1,94	1,52	1,43	0,98	1,03	0,87
Producción mundial de biodiésel en base a otras materias primas		3,52	3,16	2,61	2,03	1,55	1,51	1,33
Fuente: Oil World Statistic Update								

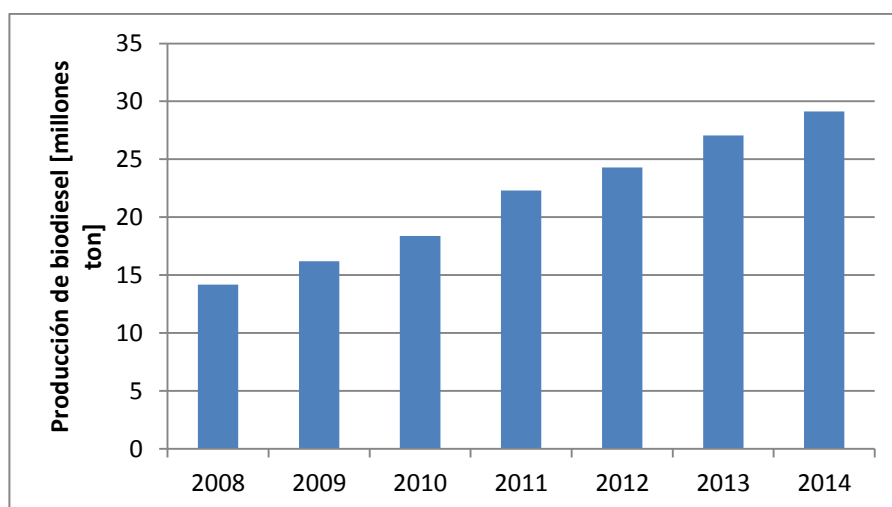


Gráfico 1. Producción mundial de biodiésel. Fuente: Oil World Statistic Update

La producción de biodiésel en los países en desarrollo se incrementó ligeramente más allá de la tendencia de años anteriores, con la mayor parte del crecimiento en Brasil, Indonesia, Tailandia y Malasia (ver Tabla 1), este último recuperándose de una fuerte disminución en su producción en el 2011. Se ha proyectado que la producción total de biodiesel de los países en desarrollo permanecerá constante en 2013 con alrededor de 10 millones de toneladas y aumentará después a 14 millones de toneladas para 2022. Por otro lado se espera que la producción mundial de biodiésel alcance 41 millones de toneladas en el 2022. Además se proyecta que la Unión Europea sea por muchos el mayor productor y consumidor de biodiesel, como lo indica el gráfico 2.¹¹

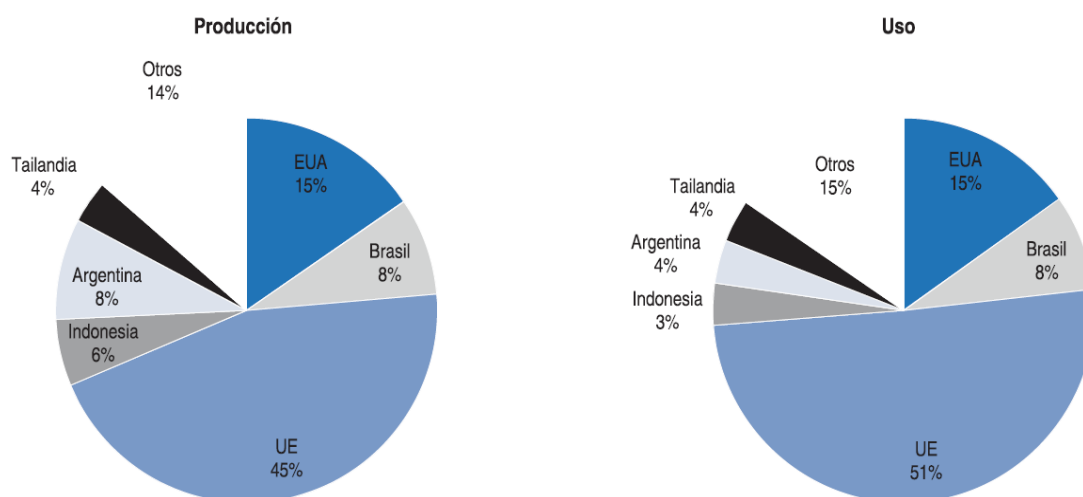


Gráfico 2. Distribución regional de la producción y uso mundiales de biodiesel para el 2022. Fuente: Perspectivas agrícolas 2013-2023.

1.5 Situación del biocombustible en Chile

Según un estudio realizado por la Universidad Técnica Federico Santa María existen en el país sobre 450.000 hectáreas de cultivos con potencial para poder producir aceite, lo que permitiría suplir la demanda de biodiésel de un 5% en el rubro del transporte, proyectado al año 2014. Entre las especies oleaginosas destinadas a la producción de aceite para bioenergía, los cultivos de raps y maravilla son los que se adaptarían de mejor manera a las condiciones climáticas y edáficas de Chile. Además, ambas especies se encuentran entre los principales cultivos que se producen en Chile.¹²

Hasta el momento no se conocen cifras significativas de producción de biodiésel en Chile, sin embargo existe producción en baja escala. Por ejemplo uno de estos procesos es la empresa FAME S.A. la cual produce biodiésel llamado métil éster a partir de aceites vegetales nuevos y de descarte (ex frituras), esta planta está diseñada para producir 200.000 lt/mes. Otra empresa que recicla y utiliza aceites vegetales usados en frituras es Bioils la cual tiene filiales en Perú, Ecuador, Colombia y Argentina a parte de nuestro país, quien han entrado al mercado chileno captando diversos locales donde se desechan estos aceites. Enap a través de su filial ENAP Refinerías S.A. tiene

¹¹ (OCDE/FAO 2013)

¹² (Centro Avanzado de Gestión, Innovación y Tecnología para la Agricultura 2007)

participación en dos sociedades relacionadas con los biocombustibles líquidos de segunda generación o combustibles celulósicos, producidos de materias primas no alimentarias, desechos de la industria forestal maderera, desechos agroindustriales, desechos municipales sólidos y cultivos energéticos de alta producción de biomasa, estos son ForEnergy S.A. y BIOCOMSA S.A.¹³

En lo que constituye una iniciativa pionera en Chile, el consorcio tecnológico empresarial Algae Fuels S.A. integrado por E-CL, COPEC, Pontificia Universidad Católica de Chile, Rentapack y Bioscan desarrollan un proyecto para producir biodiésel de segunda generación a partir de microalgas. La iniciativa, que cuenta con el apoyo de InnovaChile de Corfo consiste en implementar una planta piloto en Mejillones donde se cultivarán microalgas para la producción de biocombustibles. Sin embargo esta planta todavía está en sus primeras etapas de producción y no genera biocombustible para poder ser vendido o exportado.¹⁴

A pesar de existir proyectos con recursos aprobados y plantas en construcción todavía no existe producción a gran escala, es por esto que se hace difícil conseguir biocombustibles tanto de primera como segunda generación en el país.

2. Producción de biocombustibles y sus propiedades

Las materias primas a partir de las cuales se produce biodiésel son diversas y dependen de la disponibilidad de cada región o país. Más de 350 cultivos oleaginosos han sido identificados, de los cuales sólo la soja, palma, girasol, cártamo, algodón, colza, jatrofa y maní son considerados posibles combustibles alternativos para motores diésel, otras materias primas son, algas, microalgas, aceite de pescado, grasas animales, aceites de cocina usados. Esta gran variedad de fuentes tiene un efecto en la calidad del biodiésel ya que desde el punto de vista químico, los aceites de diferentes materias primas tienen diferentes composiciones y tipos de ácidos grasos (diferentes en relación con la longitud de la cadena, el grado de insaturaciones u otras funciones químicas).¹⁵

2.1 Etapas de producción del biodiesel

Para la producción de biodiésel es necesario disponer de biomasa o productos agrícolas ricos en grasas de animales (vacunos, cerdos) y aceites provenientes de diferentes cultivos. A nivel general la tecnología que se utiliza se basa en la conversión termoquímica, que consiste en retirar la glicerina de estos productos. Con este propósito se han desarrollado cuatro métodos, siendo el más utilizado el de la transesterificación, aunque también existen los métodos de dilución, microemulsión y pirólisis.¹⁶

Para la obtención de aceites vegetales procedentes de semillas oleaginosas hay que descortezar y triturar las semillas previamente. Las semillas oleaginosas contienen un

¹³ (Cavieres 2011)

¹⁴ (Electricidad 2011)

¹⁵ (Demirbas 2007)

¹⁶ (Korn 2011)

45% de aceite una vez pelada. Hay dos métodos fundamentales para obtener el aceite: el prensado y la extracción con disolventes apolares.

En el primer caso, una vez limpias las semillas se trituran y se calientan con vapor con objeto de dilatar los tejidos celulares. Seguidamente se someten a presión con prensas continuas de huso que alcanzan presiones altas y, simultáneamente, calientan la masa triturada. De este proceso se obtiene el aceite crudo y la torta. El aceite crudo se decanta, se filtra y pasa al proceso de refinado. La torta, que aun contiene entre un 15% y un 25% de aceite pasa a la etapa de extracción con disolvente.

Para la extracción con disolventes se utiliza la fracción de petróleo que destila entre 55 y 65 °C, denominada hexano comercial. El hexano circula, a contracorriente, a través de depósitos llenos de material triturado. La disolución obtenida se destila para recuperar el hexano y obtener el aceite. Ambos procesos se usan extensamente para obtener aceites de semillas oleaginosas (soja, girasol, algodón, colza). El aceite así obtenido hay que refinarlo antes de utilizarlo para consumo humano o para biocombustible. El residuo sólido desengrasado es muy rico en proteínas y se utiliza para la extraer proteínas destinadas a la industria alimentaria.¹⁷

Para el caso del sebo animal, la grasa se extrae mediante el molido y cocción de la materia prima en agua. Hay dos tipos de grasa que pueden emplearse: la primera es el sebo directamente retirado de la carne de los animales; el otro incluye, además de lo anterior, cartílagos y huesos. Una vez obtenido el caldo con la grasa, ésta debe separarse por técnicas como el filtrado, el prensado, la centrifugación o la extracción usando solventes. El resultado final es la grasa sin agua ni partículas.

Para el aceite de cocina usado, la preparación consiste en filtrarlo para eliminar las impurezas y restos de alimento, y quitar el agua que pueda contener, mediante calentamiento.

A continuación se detallan los procesos involucrados en la obtención de biodiésel a partir de los aceites obtenidos de plantas oleaginosas, grasas animales o aceites reciclados.

- Esterificación:

Este proceso se aplica solamente a las grasas primarias que contienen un alto nivel de ácidos grasos libres. Estos ácidos son de importancia determinante en la producción de biodiésel porque si su nivel es alto, el biodiésel resultante se hará sólido ante temperaturas bajas.

Por ello el proceso de esterificación sirve para retirar a los ácidos grasos libres y dejar al aceite base con una concentración de éstos que sea inferior al 1%. Este proceso es especialmente importante para el caso del biodiésel proveniente de grasas animales o aceites de desuso, puesto que el nivel de ácidos grasos libres presentes en la materia

¹⁷ (Tejedor 2014)

prima varía de lote en lote. Ante esta situación el control de calidad en la planta de producción es un elemento crítico. No sucede así con las grasas provenientes de cultivos, porque casi no tienen variaciones sobre el nivel de tales ácidos.

Se lleva a cabo agregando un catalizador ácido (como el ácido sulfúrico) y metanol a la grasa, lo que hace que los ácidos grasos se separen, generando una parte de aceite bajo en ácidos grasos libres y otra de agua química.

- Transesterificación:

Como se describió antes, la transesterificación es el proceso en el que el aceite se separa en glicerina por una parte y biodiesel por la otra, gracias a la acción de un catalizador base como el hidróxido de sodio y un alcohol como el metanol.

El biodiésel se dirige a la fase de lavado, mientras que la glicerina es sometida a un proceso de refinación y desmetanolización, puesto que ésta se queda con la mayor parte del metanol empleado en la transesterificación.

El biodiésel que queda después de este proceso todavía tiene impurezas que hay que retirar en los siguientes pasos.

- Lavado

El lavado se hace mediante agua y consiste en retirar del biodiésel cualquier sustancia que sea soluble en agua, aprovechando que los aceites como el biodiésel no son solubles en agua.

Entre otras cosas, de esta fase se retira más glicerina, que puede enviarse al proceso de refinación de la misma.

- Deshidratado

En este paso se quita el agua que pudo quedarse del proceso de lavado. Se realiza calentando el biodiesel para que se evapore el agua.

La glicerina como subproducto que se obtiene a partir de la producción del biodiésel, se produce en una cantidad del orden del 10% del biodiésel elaborado, debe ser refinada para obtener un producto con valor agregado, comerciable en los campos químicos, farmacéutico y cosmético. Entre los usos de la glicerina se pueden citar las siguientes: solvente, plastificante, edulcorante, suavizante, en la producción de nitroglicerina, cosméticos, licores, lubricante, tintas, anticongelante, producción de resinas, esteres para los variados empleos, humectante, emulsionados.

A continuación en la Figura 1, se detalla el proceso productivo para la obtención de biodiésel de aceites de diferente origen.

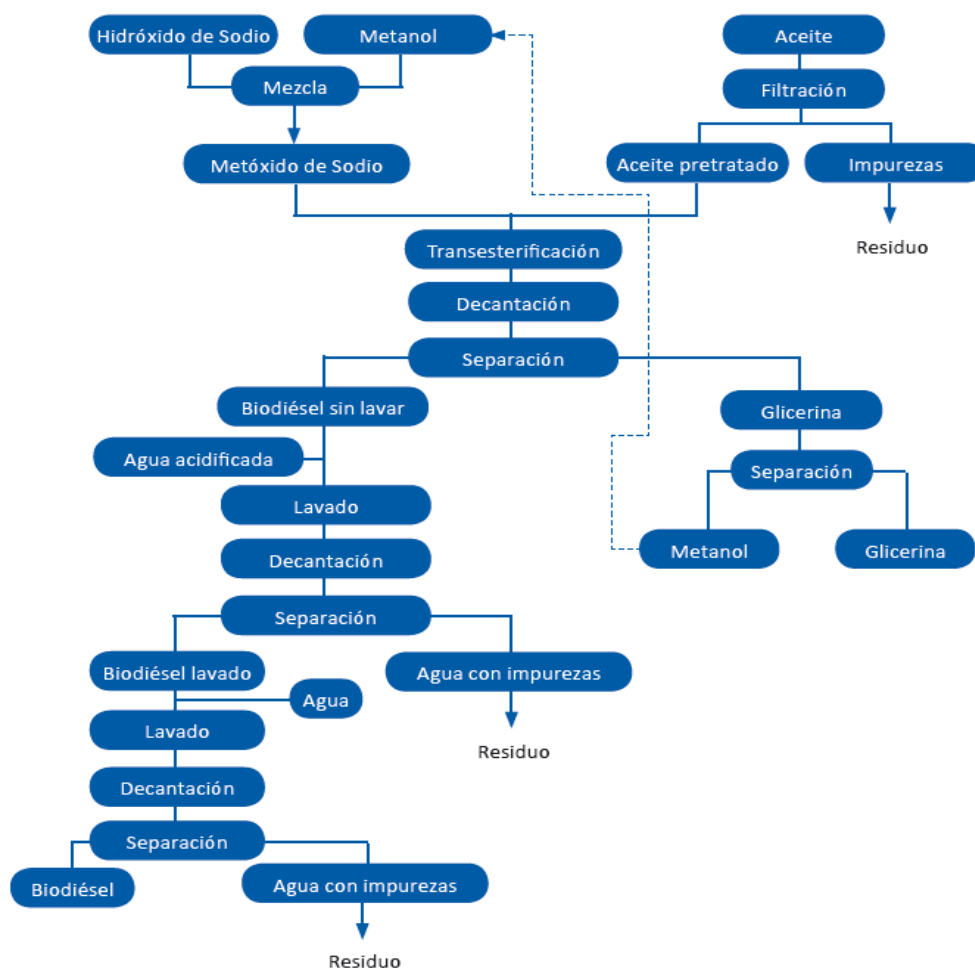


Ilustración 1. Proceso general para la obtención de biodiesel.¹⁸

La elección de la tecnología a utilizar estará determinada por la capacidad de producción deseada, la materia prima (algunos sistemas productivos son capaces de operar con varios insumos, mientras que otros no), su calidad, y la recuperación deseada de alcohol y del catalizador. La mayoría de las actuales plantas de biodiesel en el mundo utilizan el primer proceso (transesterificación de los aceites a través de un catalizador básico) debido a las siguientes ventajas:

- Su bajo requerimiento de temperatura y presión.
- Su alta tasa de rendimiento (sobre 98% de transformación de aceite en biodiesel), con mínimas reacciones colaterales y tiempo de reacción.
- Se trata de una conversión directa a biodiesel sin compuestos intermedios.
- No se requieren materiales especiales para la infraestructura de la planta.

La reacción química básica de este proceso productivo se describe en la Figura 2 en la que se ilustra como 100 kilos de aceite vegetal reaccionan con 10 kilos de un alcohol de cadena corta (usualmente metanol), en presencia de un catalizador (usualmente hidróxido de sodio o de potasio), previamente mezclado con el alcohol. Como resultado se obtienen 10 kilos de glicerina y 100 kilos de biodiesel.

¹⁸ (Fuenzalida 2008)

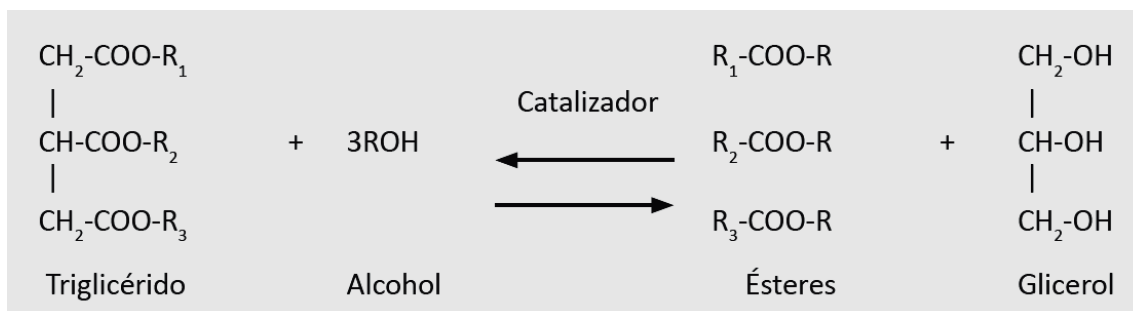


Ilustración 2. Reacción estándar para la elaboración del biodiesel

Fuente: *Biodiesel Production and Quality*, National Biodiesel Board, 2002.

El costo de la inversión y de producción de biodiesel de segunda y tercera generación es bastante más elevado que el de la primera generación, por lo que su introducción en el país es más difícil, salvo que sea subsidiado por el Gobierno.¹⁹

2.2 Propiedades del biodiesel y otras consideraciones

El biodiesel tiene propiedades físicas similares a las del diésel, sin embargo, como inconvenientes presenta un menor poder calorífico (alrededor de un 10%) y un comportamiento inferior a bajas temperaturas con tendencia a solidificarse en condiciones de frío extremas, lo que obliga a que deba ser tratado con aditivos específicos al igual que, por otra parte, se realiza con el propio diésel. El aceite sin procesar también se puede utilizar en motores diésel, pero es necesario realizar una serie de ajustes en los motores. Al contrario del combustible diésel, el aceite vegetal consiste sobre todo en hidrocarburos saturados, triglicéridos, es decir en ésteres formados por glicerina y ácidos grasos. Para efectos comparativos, en la tabla 2 se muestran algunas propiedades de algunos aceites y se comparan con las del diésel y las del biodiesel.

Tabla 2. Tabla comparativa de aceites, ésteres metílicos y petróleo diésel					
Combustible Propiedad	Petróleo Diésel	Aceite de girasol	Ester metílico de girasol	Aceite de colza	Ester metílico de colza
Densidad [15°C]	0,84[kg/l]	0,92[kg/l]	0,89 [kg/l]	0,9 [kg/l]	0,88 [kg/l]
Punto de ignición	63 °C	215 °C	183 °C	200 °C	153 °C
Viscosidad cinemática	3,2 mm ² /s	35 mm ² /s	4,2 mm ² /s	39 mm ² /s	4,8 mm ² /s
Número de Cetano	40-45	33	47-51	35-40	52
Calor de combustión	44[MJ/kg]	39,5[MJ/ kg]	40 [MJ/kg]	[-]	40 [MJ/kg]
Punto de enturbiamiento	0 [°C]	-6,6 [°C]	3 [°C]	[-]	-3 [°C]
Azufre [%peso]	0,3	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Residuo de carbón [%peso]	0,2	0,42	0,05	[-]	[-]
Fuente: Energía a debate ²⁰					

¹⁹ (Korn 2011)

Como se puede observar, las mayores diferencias se producen en la viscosidad. Los valores de la misma en los aceites son muy superiores a los presentados por el biodiesel. Esta es la principal razón, por la cual el aceite no puede ser utilizado directamente en los motores diésel sin haberles realizado las modificaciones necesarias. Otra propiedad muy importante es el punto de ignición, tanto en los aceites como en el biodiesel, dicho punto es mucho mayor que el correspondiente a un combustible diésel, esta circunstancia otorga al biodiesel mayor seguridad en su manejo y almacenamiento.

2.2.1 Viscosidad

La viscosidad del combustible tiene un impacto significativo en el funcionamiento de los sistemas de inyección y atomización del combustible del motor, se sabe que afectan el desgaste del motor y la tasa de incrustación de los inyectores. Además, la viscosidad puede ser un factor en el diseño de las bombas para la transferencia de biodiesel almacenado. El gráfico 3 muestra las viscosidades cinemáticas a partir de las correlaciones de tres biodiesel de distinto origen desde 20 °C a 300 °C.

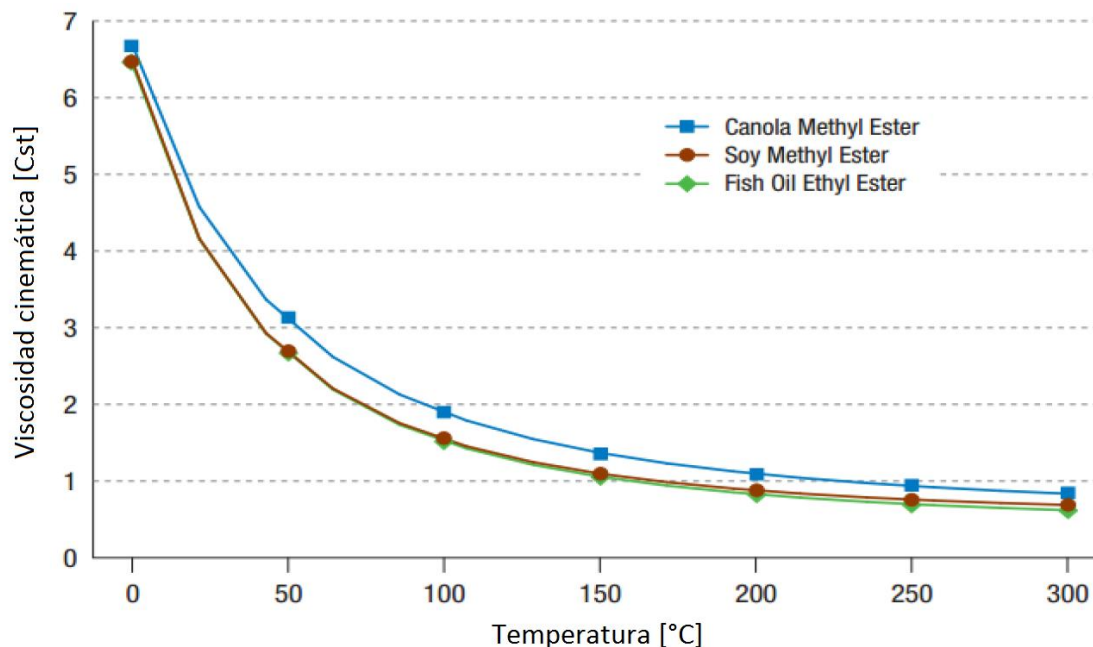


Gráfico 3. Viscosidad cinemática de tres biodiesel distintos

Fuente: Biodiesel Handling and Use Guide²¹

A medida que aumenta la temperatura del combustible, este tiende a disminuir su viscosidad cinemática, esta es una manera que se utilizan para disminuir la viscosidad de las mezclas de biodiesel cuando esta es muy alta.

También la viscosidad se puede medir en mezclas diésel-biodiesel utilizando el método estándar para el cálculo de viscosidades cinemáticas en las mezclas el gráfico 4 indica los resultados.

²⁰ (Sarmiento 2008)

²¹ (NREL 2009)

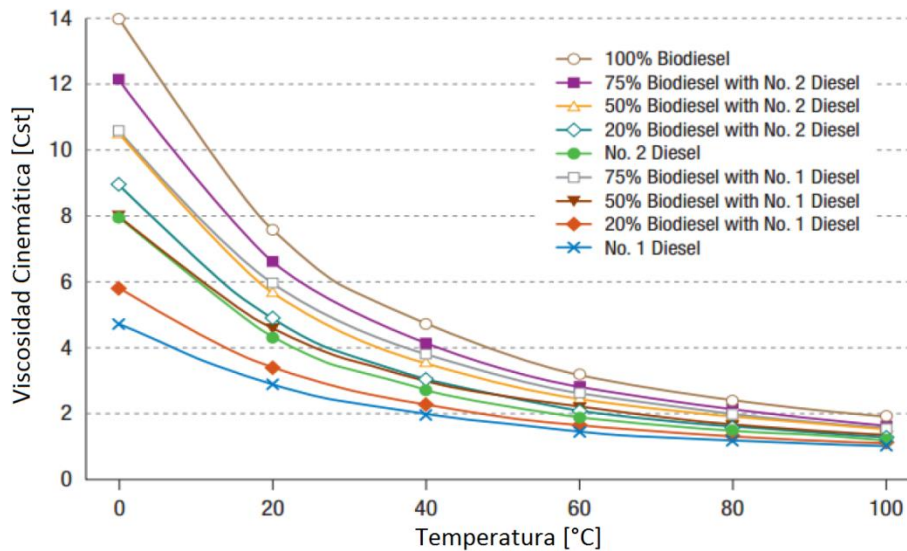


Gráfico 4. Viscosidad cinemática de biodiesel comercial en varias mezclas.

Fuente: Biodiesel Handling and Use Guide

A diferencia de la densidad o la concentración de un elemento, la viscosidad no es una propiedad que tenga un carácter lineal en la mezcla de dos o más fluidos.

En el caso de la viscosidad, al no comportarse como una propiedad lineal en las mezclas, aunque se traten de fluidos newtonianos, debe abordarse el cálculo de esta por otros métodos. En este caso, el cálculo de la viscosidad debe abordarse en forma analítica. No existe ninguna ecuación general que permita calcular exactamente el valor de la viscosidad final de la mezcla de fluidos, por lo tanto se usa una formula empírica que se ajusta más o menos al resultado medido en un viscosímetro en función del tipo de mezcla utilizado.

$$\ln(v_m) = m_1 \cdot \ln(v_1) + m_2 \cdot \ln(v_2) \quad (2.1)$$

Donde: v_m : viscosidad de la mezcla.
 $v_{1,2}$: viscosidad de cada componente.
 $m_{1,2}$: fracción másica de cada componente.

2.2.2 Densidad

Como es lógico para todas las temperaturas, la densidad de la mezcla aumenta con el contenido de biodiésel, dado que la densidad es una propiedad aditiva, con la ley mezclas se predice adecuadamente el valor de la propiedad de la mezcla en función de su composición (fracción másica) y de los valores de la propiedad para los valores individuales. De este modo, la densidad de la mezcla a una temperatura dada puede calcularse como:

$$\rho_{mix} = \sum_i^n \rho_i Y_i \quad (2.2)$$

Donde: ρ_{mix} : Densidad de la mezcla.
 Y_i : Fracción másica combustible.
 ρ_i : Densidad combustible.

El gráfico 5 muestra el efecto del porcentaje de biodiesel sobre la densidad de una mezcla a distintas temperaturas, donde la masa del combustible se mantiene constante. Incrementos de temperatura implican aumentos en el volumen que ocupa la sustancia y, por ende, reducción en su densidad.

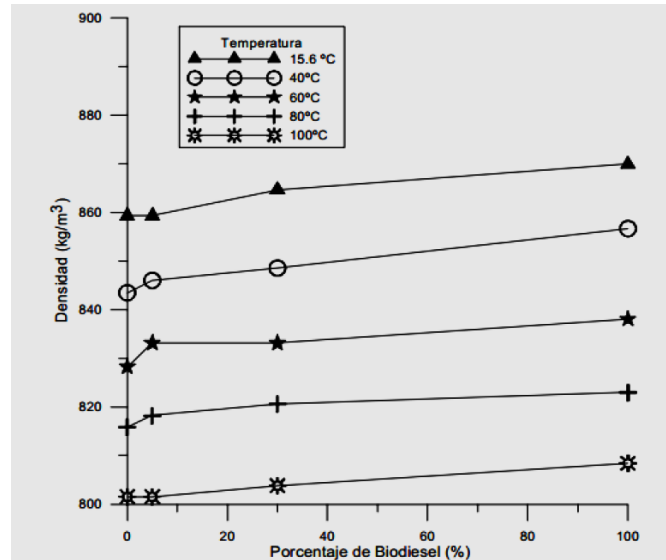


Gráfico 5. Efecto del porcentaje de biodiesel en la densidad de la mezcla
Fuente: Biodiesel: Producción, calidad y caracterización²²

Debido a que la densidad de biodiesel varía con la temperatura, y el biodiesel se vende típicamente en volumen, temperatura es un factor importante a la hora de evaluar la compra de este. La densidad del biodiesel disminuye linealmente con la temperatura, el grafico 6 muestra el efecto de la temperatura sobre la densidad del B0, B5, B20 y B100.

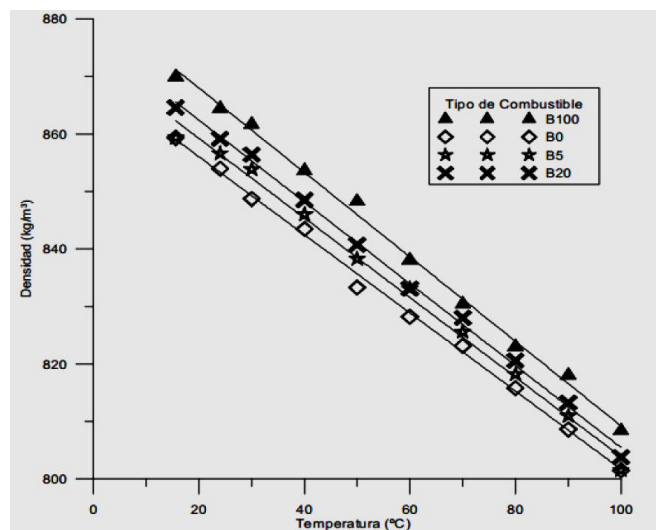


Gráfico 6. Efecto de la temperatura sobre la densidad de las mezclas
Fuente: Biodiesel: Producción, calidad y caracterización.

²² (Hernández 2009)

2.2.3 Poder Calorífico

El menor contenido energético del biodiesel se debe a la presencia de oxígeno molecular. La diferencia en los poderes caloríficos es más pequeña cuando se expresa en unidades de energía por unidad de volumen, gracias a la mayor densidad del biodiesel.

El gráfico 7 muestra que el poder calorífico másico de las mezclas disminuye linealmente conforme aumenta el porcentaje por volumen de biodiesel en la mezcla. La ecuación 2.4 permite predecir esta propiedad como un promedio ponderado, tal como la ley de mezclas, conociendo los valores para los combustibles puros.

$$PC_{mix} = \sum Y_i * PCI_i \quad (2.3)$$

Donde: PC_{mix} : Poder calorífico mezcla.
 Y_i : Fracción másica combustible.
 PCI : Poder calorífico combustible.

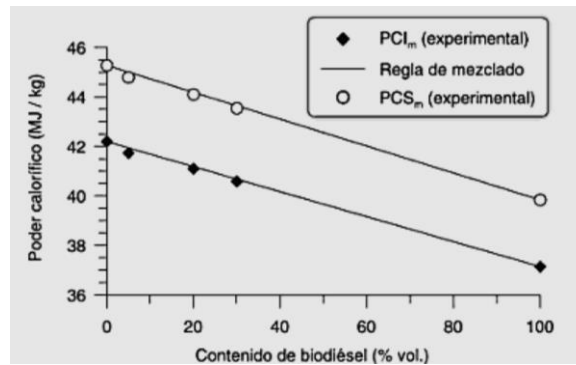


Gráfico 7. Poder calorífico superior e inferior de las mezclas

Fuente: Biodiesel: Producción, calidad y caracterización.

3. Uso de biodiesel en Calderas

El uso de biodiesel en las calderas es algo popular, aunque las investigaciones en esta área son aún limitadas. Experiencias de campo y trabajos experimentales apuntan al hecho de que el uso de biodiesel en los quemadores adaptados implica menos emisiones de contaminantes y los problemas de incrustación. Por esta razón el biodiesel puede ser considerada una alternativa viable en calderas, especialmente en lugares donde el gas natural no está disponible o donde convertir calderas es complicado o muy costoso.

3.1 Combustión en el interior de la caldera

La reacción de combustión se basa en la reacción química exotérmica de una sustancia (o una mezcla de ellas) denominada combustible, con el oxígeno. Como consecuencia de la reacción de combustión se tiene la formación de una llama. Dicha llama es una masa gaseosa incandescente que emite luz y calor.

La combustión puede llevarse a cabo directamente con el oxígeno o con una mezcla de sustancias que lo contengan. Esta mezcla de sustancias que contiene oxígeno se denomina comburente. Donde el aire es el comburente más usual.

Si se supone (caso más común) que la combustión se realiza con aire, la reacción química que se debe plantear es la del proceso por el cual el combustible reacciona con el aire para formar los productos correspondientes, es decir:



Una forma general de plantear una reacción química es la siguiente:



Donde: A: Combustible
 B: Comburente
 C y D: Productos

Una combustión ideal presentaría en sus gases de combustión dióxido de carbono (CO_2) y vapor de agua (H_2O) como lo muestra la Ilustración 3.

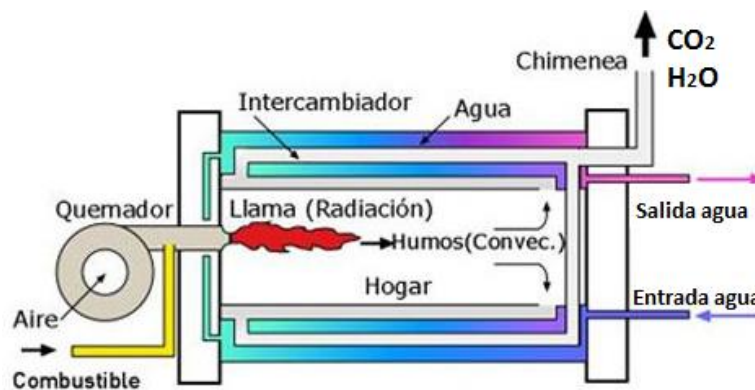


Ilustración 3. Situación ideal de combustión en los gases de escape

Sin embargo en la práctica no se logra esto ya que la combustión no logra ser perfecta. Es por ello que se pueden apreciar otro tipo de gases resultantes además de los ya mencionados, como lo muestra la Ilustración 4.

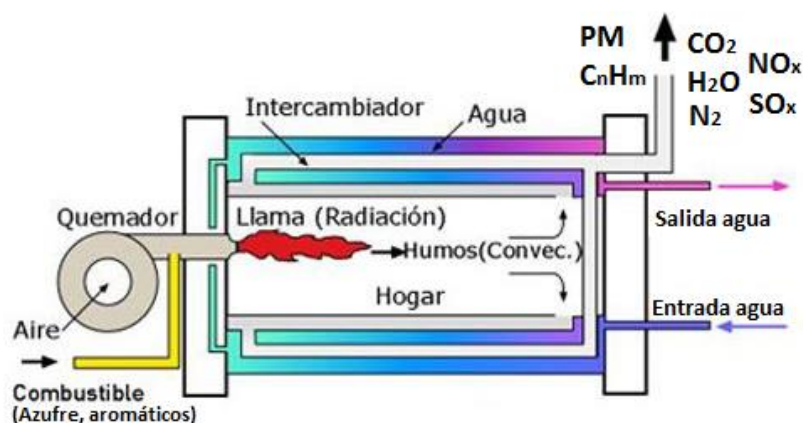


Ilustración 4. Situación real de la combustión en una caldera

3.1.1 Tipos de combustión

Combustión completa: Las sustancias combustibles se queman hasta el máximo grado posible de oxidación. En consecuencia no habrá sustancias combustibles en los humos. En los productos de la combustión se pueden encontrar NO_2 , CO_2 , H_2O , y SO_2 .

Combustión incompleta: Una combustión se considera incompleta cuando parte del combustible no reacciona completamente porque el oxígeno no es suficiente. Cuando una sustancia orgánica reacciona con el oxígeno de manera incompleta puede formar N_2 , C_nH_m , H_2S , y CO . Estas sustancias son los contaminantes más comunes que escapan a la atmosfera en los gases de combustión.

Combustión teórica o estequiométrica: Es la combustión que se realiza con la cantidad teórica de oxígeno estrictamente necesaria para producir la oxidación total del combustible. En consecuencia, no se encuentra O_2 en los humos.

Combustión con exceso de aire: Es la combustión que se lleva a cabo con una cantidad de aire superior a la estequiométrica. Es típica la presencia de O_2 en los humos. Si bien la incorporación de aire permite evitar la combustión incompleta, trae aparejada la pérdida de calor en los productos de combustión, reduciendo la temperatura de combustión, la eficiencia y la longitud de llama.

Combustión con defecto de aire: En esta combustión, el aire disponible es menor que el necesario para que se produzca la oxidación total del combustible. En este tipo de reacción es característica la presencia de sustancias combustibles en los gases o humos de reacción.

3.2 Pruebas experimentales

Bajo la supervisión del Grupo de Energía de la Universidad de Padua, fue monitoreado un sistema térmico ubicado en una escuela de la ciudad de Padua. Consiste en dos calderas idénticas con una potencia nominal de 512 kW cada uno; una de ellas se ha convertido para usar biodiesel, mientras que el otro todavía utiliza diésel. Sobre la base de la potencia térmica requerida, el sistema de control y regulación puede operar las calderas para trabajar en modo secuencial o modo paralelo, con el fin de tener un número similar de horas de trabajo para ambas.

Cada quemador puede trabajar en dos diferentes niveles de potencia, 214 y 512 kW. El control se realiza de forma automática en la temperatura de entrada y salida de agua.

Quemadores utilizados fueron similares, ambos alimentados con biodiesel y previamente fueron testeados en un banco de prueba, sin mostrar problemas particulares; el quemador tuvo que ser ajustado para un caudal de combustible ligeramente diferente para una potencia térmica constante, además algunas empaquetaduras adhesivas se debieron cambiar por otras hechas de Viton o Teflón.²³

²³ (A. M. C. Carraretto 2004)

3.2.1 Primeros resultados

Dos campañas experimentales se llevaron a cabo durante la temporada de invierno 2000-2001 y 2001-2002; el sistema térmico trabajó en modo automático, lo que demuestra que ninguna ayuda externa se requiere cuando se utiliza biodiesel. La caldera de biodiesel trabajó durante 544 horas a alta potencia y 530 a baja potencia.

Los resultados más significativos se presentan en la Tabla 3. La eficiencia de la caldera biodiesel fue mayor que una diésel y no disminuye significativamente con el tiempo; esto está relacionado con un ensuciamiento menor y ha sido confirmado por el análisis realizado al final de la temporada.

La mayor eficiencia también está relacionada con la temperatura más baja de los gases de escape. Las emisiones de CO y CO₂ son muy similares para las dos calderas. Desafortunadamente, las emisiones de NO_x no pudieron ser concluyentes; estudios anteriores muestran una reducción en un 30%, gracias a la presencia de oxígeno en el combustible; es por eso que se añaden con frecuencia algunos aditivos a base de compuestos oxigenados a los diésel habituales.²⁴

Tabla 3. Resultados comparativos de caldera alimentada con diesel y biodiesel.

		19/12/2000	14/2/2000	19/12/2001	25/2/2002	28/2/2002	6/3/2002
<i>Boiler 1—biodiesel</i>							
O ₂	%	4.3	5.4	4.3	3.1	7.1	4.3
CO ₂	%	12.4	11.2	12.4	13.4	12.2	12
CO	ppm	2	1	2	4	0	3
T _{ex gases}	°C	193	187	174	168	191	153
T _{air}	°C	18	17.9	19	9	6	23
η		91.8	91.7	93	90.4	93.8	92.1
		5/9/2000	5/10/2000	14/2/2001	2/11/2001	25/2/2002	28/2/2002
<i>Boiler 2—diesel oil</i>							
O ₂	%	4.5	4.5	4	5	3.5	4
CO ₂	%	11.9	11.8	12.2	11.4	12.6	12.2
CO	ppm	0	0	0	0	8	0
T _{ex gases}	°C	297.8	245	389	227.4	408	389
T _{air}	°C	22.5	20	15.7	16	5	6
η		86.7	86.7	82.6	89.5	81.2	83

Fuente: Biodiesel as alternative fuel: Experimental analysis and energetic evaluations

Durante la campaña experimental no hubo fallas o dificultades; ni siquiera el olor penetrante característico de los gases de escape, que se reporta a veces en la literatura, se considera un problema molesto por los residentes cercanos. El mantenimiento de rutina no mostró degradación de las juntas.

Otro aspecto importante a ser informado es la amplia variación de los parámetros del biodiesel comercial. Los análisis químicos que se realizaron en algunas muestras de biodiesel mostraron considerables variaciones del punto de inflamación, el residuos carbono, el contenido de fósforo y el número de yodo. Incluso si estas variaciones son en algunos casos notable, no se han observado diferencias de funcionamiento.

²⁴ (Canalini F 1999)

4. Reglamento asociado al uso de biodiesel y emisiones de combustibles

La toma de conciencia de los efectos nocivos asociados con la contaminación del aire ambiental obliga a la introducción de regulaciones ambientales más estrictas en todo el mundo. Biodiesel, biocombustibles y bioaceites transformados a base de materiales biológicos tales como aceites vegetales, aceites de cocina reciclados, grasas animales, productos vegetales y residuos forestales son combustibles que se pueden mezclar con destilados de petróleo para su uso en motores de transporte, calefacción de espacios y procesos industriales para ayudar a compensar el aumento de la demanda de energía. El biodiesel tiene propiedades similares al diésel, pero esencialmente no contiene componentes indeseables, tales como azufre, nitrógeno y compuestos aromáticos policíclicos. Aunque la mezcla más habitual de biodiésel es B20 (20% de biodiesel y 80% de diésel) se requiere cumplir las especificaciones de la norma ASTM D 6751 para asegurar un rendimiento aceptable para cualquier combinación.

En Europa, se han desarrollado las especificaciones del combustible para las mezclas B100 y las mezclas de contenidos más bajos como el B5, designados como prEN 142 y prEN 590, respectivamente. La designación 'prEN' indica que la norma está en la etapa de propuesta. Por otra parte, los aceites procesados de semillas oleaginosas a base de ácidos grasos o grasa animal aceites que no están restringidos por las especificaciones de biodiesel están vagamente denominados como biocombustibles derivados. Se pueden producir a un costo más bajo que el biodiesel debido a ordenamientos menos estrictos de calidad del producto, por ejemplo; el biocombustible procedente de procesos industriales que utilizan la soja en la fabricación de aditivos, cosméticos, productos farmacéuticos y productos químicos especiales. Ellos tienen un potencial prometedor en calefacción y aplicaciones de procesos industriales proporcionando una mayor eficiencia energética y flexibilidad en la gestión de recursos. Los aceites de calefacción contienen biocarburantes que son generalmente conocidos como ésteres metílicos de ácidos grasos o FAME y sus especificaciones se están desarrollando en Europa como método prEN 14213. El Bioaceite es otro nombre genérico dado para líquidos transformados a base de materiales basados en la biomasa, como los líquidos de pirólisis de la madera. Si estos productos de energía renovable se pueden utilizar tanto como los combustibles derivados del petróleo, con o sin pequeñas modificaciones de equipos, se pueden obtener importantes beneficios en los costos de energía, la economía agrícola regional, la reducción de emisiones y una extensión en la vida útil del equipo.²⁵

De todos estos combustibles alternativos derivados de la biomasa, las aplicaciones de biodiesel han ganado cada vez más reconocimiento y apoyo de los reguladores y de los sectores industriales en los últimos años, sobre todo para los equipos con motores de encendido por compresión, como en los vehículos de transporte y equipamiento comercial e industrial fuera de ruta (off-road).

²⁵ (T. H. S. Win Lee 2004)

4.1 Ordenanzas internacionales referidas a biocombustibles

Existen grandes potencias en materia de biocombustibles, como lo es Alemania, España, Austria, Brasil, EE.UU. y Rusia los cuales son pioneros en el marco legislativo y normativo, de estos se pueden destacar:

- ASTM D396-08b, “Standard Specification for Fuel Oils”, especifica los combustibles usados en sistemas de calefacción y calderas que incluye exigencias para permitir mezclas que contienen hasta un 5% de Biodiesel.
- ASTM D6751-07b, “Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels”, especifica mezcla de combustible existentes de biodiesel (B100), en los grados S15 y S500 para su uso como componente de una mezcla con combustibles destilados medios. Esta especificación establece las propiedades requeridas de los combustibles diésel en el momento y el lugar de entrega. Los requisitos aquí se pueden aplicar en otros puntos de la producción y el sistema de distribución siempre y cuando por acuerdo entre el comprador y el proveedor.
- DIN V51606, publicada en 1994, “Liquid Fuels; Diesel fuel of vegetable oil methylester (PME); requirements”, especifica las características principales que debe tener un biocombustibles para ser usado en Alemania.
- ORORM C1190, publicada en 1991, especifica “Estandarización para el Biodiesel de Origen Vegetal” especifica las condiciones aceptadas por Austria para el uso de biocombustibles.
- Ley 11.097/2005, establece los porcentajes mínimos en Brasil de mezclas de biodiesel al diésel obligatorio.

4.2 Regulación nacional de uso de biocombustibles

A raíz del vacío normativo sobre biocombustibles donde no se expresa ni existe una marco regulatorio para ellos, y el auge que están teniendo las energías renovables en el mundo, en variados países se han constituido mesas de trabajo para formular políticas sobre los biocombustibles líquidos, en Chile la Comisión Nacional de Energía (CNE) informa de nuevos decretos y normativas referente al uso de estos, para fomentar el uso de los biocombustibles en vehículos e industria, a través de eximirlo de impuesto específico que pagan las gasolinas.

Según Circular N°30 del Servicio de Impuesto Internos, publicada el 16 de mayo del 2007 se instruye sobre el tratamiento de los biocombustibles denominados Biodiesel y Bioetanol, del cual se desglosa lo siguiente:

Con motivo de diversas consultas relacionadas con la tributación con impuestos específicos que correspondería a los productos denominados Biodiesel y Bioetanol, calificados en forma genérica como biocombustibles, se ha considerado necesario impartir instrucciones respecto de la situación de estos combustibles en relación con la aplicación de los impuestos establecidos en la Ley N° 18.502, de carácter específico a

las gasolinas automotrices y al petróleo diésel, en la Ley N° 19.030, que creó el Fondo de Estabilización de Precios del Petróleo y en la Ley N° 20.063 que creó el Fondo de Estabilización de Precios de Combustibles Derivados del Petróleo, cuya vigencia fue prorrogada por la Ley N° 20.115 de 01/07/2006.

Según información de la Comisión Nacional de Energía (CNE), el biodiesel es todo combustible líquido compuesto por una mezcla de ésteres alquílicos obtenidos mediante la reacción química de transesterificación o conversión de ácidos grasos a ésteres metílicos o ésteres etílicos de aceites vegetales, grasa animal o el aceite comestible usado.

La Norma NCh 59, en su punto 3.1 define el aditivo como una “sustancia que agregada a otro producto, generalmente en cantidades pequeñas, le confiere propiedades especiales o refuerza sus propiedades naturales”. Como ha quedado dicho, los biocombustibles son usados como combustibles, aun cuando se mezclen con otro combustible, ya que su objeto no es potenciar las propiedades del combustible al cual se adicionan, sino que por sí mismos suponen la liberación de una energía utilizable. Por lo expuesto, los biocombustibles no constituyen aditivos de aquellos que se encuentran autorizados como tales en las regulaciones vigentes.

El Impuesto específico a la primera venta o importación de las gasolinas automotrices y del petróleo diésel, se ha establecido en el artículo 6° de la Ley N° 18.502, de 1986. Tal como se señala en la propia disposición, este impuesto se aplica en la primera venta o importación de gasolinas automotrices y petróleo diésel, razón por la cual no le es aplicable al combustible denominado biodiesel. Este, es un producto químicamente diferente al petróleo diésel, elaborado a partir de aceites y grasas de origen vegetal y animal, a diferencia del petróleo diésel, que es un destilado medio derivado del petróleo.

4.3 Factores de emisión

Los factores de emisión son promedios de un gran número de mediciones de emisiones contaminantes atmosféricos, que son representativos de un tipo de fuentes de emisión.

Un factor de emisión es una relación entre la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera y una unidad de actividad. Los factores de emisión, en general, se pueden clasificar en dos tipos: los basados en procesos y los basados en censos. Por lo general, los primeros se utilizan para estimar emisiones de fuentes puntuales y a menudo se combinan con los datos de actividad recopilados en encuestas o en balances de materiales. Por otro lado, los factores de emisión basados en censos se usan generalmente para estimar emisiones de fuentes de área.

En muchos países se han realizado múltiples estudios para determinar las tasas de emisión promedio de diferentes procesos que son fuentes de emisiones. Puesto que con frecuencia no se requiere ni es económicamente factible hacer un muestreo en cada fuente de emisión, se usan los resultados de muestreos de fuentes representativas para desarrollar factores de emisión, los cuales se expresan como unidades de masa de contaminante emitido por unidad de proceso. Entre las unidades de proceso más

comunes se encuentran el consumo de energía, el consumo de materia prima, las unidades de producción, el calendario de operación, el número de dispositivos ó las características de éstos. Por ejemplo, lb/MMBtu, lb/gal, lb/lote, lb/hr ó lb/pie².²⁶

4.3.1 Componentes de los gases de combustión

Nitrógeno (N₂): El nitrógeno es el principal componente del aire (79% en vol.) que respiramos. Este gas incoloro, inodoro y sin sabor no interviene en la combustión. Entra en la caldera como un lastre, se calienta y sale por la chimenea.

Dióxido de carbono (CO₂): El dióxido de carbono es un gas incoloro e inodoro con un ligero sabor agrio. Bajo la influencia de la luz solar y el verde de las hojas, la clorofila, las plantas convierten el dióxido de carbono en oxígeno. La respiración humana y animal convierte el oxígeno otra vez en dióxido de carbono. Esto crea un equilibrio que los productos gaseosos de la combustión distorsionan. Esta distorsión acelera el efecto invernadero. El valor límite de efecto al ser humano es de 5000 ppm. A concentraciones superiores al 15% en volumen (150.000 ppm) en la respiración, se produce una inmediata pérdida de consciencia. Los valores típicos en los gases de combustión: calderas de gasoil: 11 % – 14 %, calderas de gas: 5 % – 10 %.

Vapor de agua (humedad): El hidrógeno contenido en el combustible se combina con el oxígeno para formar agua. Esta agua sale del combustible y del aire combustionado, dependiendo de la temperatura de los gases de combustión, en forma de humedad del gas de combustión (a una temperatura de los gases de combustión elevada) o como condensado (a una baja temperatura de los gases de combustión).

Oxígeno (O₂): El oxígeno restante no utilizado en la combustión. En el caso de utilizar aire en exceso aparece como componente de los gases de combustión y se utiliza para medir el rendimiento de la combustión. La concentración de O₂ Se utiliza para determinar las pérdidas por chimenea y el contenido de dióxido de carbono. Los valores típicos en los gases de combustión: calderas de gasoil: 2% – 8%, calderas de gas: 2% – 9%

Monóxido de carbono (CO) El monóxido de carbono es un gas venenoso al respirar, incoloro, inodoro y es el producto de una combustión incompleta. En concentraciones demasiado altas, no permite que la sangre absorba oxígeno. Si, por ejemplo, el aire de una habitación es de 700 ppm de CO, una persona respirando durante 3 horas moriría. El valor límite del CO en el ambiente es de 50 ppm. Los valores típicos en los gases de combustión: calderas de biomasa: 40 ppm – 200ppm, calderas de gasoil: 40 ppm – 150 ppm, calderas de gas: 30 ppm – 100 ppm.

Óxidos de nitrógeno (NO y NO₂, suman NO_x): A altas temperaturas en procesos de combustión, el nitrógeno presente en el combustible y en el aire de combustión se combina con el oxígeno del aire y forma el monóxido de nitrógeno (NO). Después de algún tiempo, este gas incoloro se oxida en combinación con el oxígeno (O₂) para

²⁶ (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2005)

formar dióxido de nitrógeno (NO_2). El NO_2 es soluble en agua, tóxico si se respira (produce daños irreversibles en el pulmón) y contribuye a la formación del ozono en combinación con la radiación ultravioleta (luz solar). El NO y NO_2 en conjunto se llaman óxidos de nitrógeno (NO_x). Los valores típicos en los gases de combustión: calderas de gasoil/gas: 20 ppm – 100 ppm.

Dióxido de azufre (SO_2): El dióxido de azufre es un gas tóxico incoloro con un olor muy fuerte. Se forma a partir de la oxidación del azufre que está presente en el combustible. El valor límite en el lugar de trabajo es de 5 ppm. Junto con agua o condensados forma el ácido sulfuroso (H_2SO_3) y el ácido sulfúrico (H_2SO_4), ambos son muy dañinos por ejemplo en la naturaleza (lluvia ácida). Se utilizan filtros/depuradoras para limpiar los gases de combustión de óxidos de azufre. Los valores típicos en los gases de combustión: calderas de gas: 0 ppm, calderas de gasoil: 0 ppm – 5 ppm.

Hidrocarburos no quemados (C_xH_y o HC): Los hidrocarburos son un amplio grupo de compuestos químicos compuestos a partir de enlaces de hidrógeno y carbono. Los HC son la base de la química orgánica; en la naturaleza se encuentran en el crudo de petróleo, gas natural y carbón. Las emisiones tienen lugar durante la producción de productos hidrocarbonados (ej. En refinerías) así como durante su uso y quemado. Otros ejemplos son disolventes, plásticos, barnices, combustibles de vehículos etc. Las fuentes de emisión de HC también se forman debido a un proceso de combustión incompleta. Las emisiones de hidrocarburos también contribuyen al efecto invernadero. Los hidrocarburos incluyen miles de componentes, metano (CH_4), propano (C_3H_8), butano (C_4H_{10}), benceno (C_6H_6), acetileno (C_2H_2), etc. y también componentes cancerígenos como el benzopireno. La cantidad total de hidrocarburos volátiles en un gas de combustión normalmente se describe como “hidrocarburo total”. Normalmente en el control de emisiones se especifica y mide el valor del “hidrocarburo total”. Los valores típicos en los gases de combustión: calderas de gasoil: < 50 ppm

Hollín: El hollín es carbono puro (C) resultante de una combustión incompleta. El valor típico en los gases de combustión de calderas de gasoil está limitado por el número de opacidad, este debe ser inferior o igual a 1 en la escala de Bacharach. Calderas de biomasa: número de opacidad debe ser inferior o igual a 2 en la escala de Bacharach.

Partículas sólidas: Las partículas sólidas (polvo) es el nombre que se da a pequeñas partículas sólidas distribuidas en el aire. Esto puede ocurrir en cualquier forma y densidad. Se forman a partir de las cenizas y de los minerales que componen los combustibles sólidos.

4.3.2 Material Particulado

El material particulado PM1, PM 2.5 y PM10 son partículas de diámetro menor o igual a 1, 2.5 y 10 micrones (un micrón es la milésima parte de un milímetro), respectivamente. Por su tamaño, el MP10 es capaz de ingresar al sistema respiratorio del ser humano. Mientras menor sea el diámetro de estas partículas, mayor será el potencial daño en la salud.

Generalmente el material particulado respirable es originado en los procesos de combustión (bencina, carbón, gas, etc.), ya se generado por Fuentes Fijas (Hornos, Calderas) o Fuentes Móviles (Vehículos), por el levantamiento de polvo generado por el viento o por el tránsito de vehículos, por emisiones volcánicas y por partículas biológicas que se incorporan a la atmósfera (polen, esporas).²⁷

4.3.3 Carbono Negro

El carbono negro es uno de los cuatro grandes contaminantes climáticos de vida corta (CCVC) que permanecen en la atmósfera durante un período de tiempo relativamente corto en comparación con otros gases de efecto invernadero, como el CO₂. Entre los CCVC, el carbono negro tiene el tiempo de vida más corto: permanece en la atmósfera durante días o semanas. Por lo tanto, la reducción de las emisiones de carbono negro ofrece beneficios casi de inmediato. Estudios recientes han demostrado que el carbono negro es el segundo contaminante más poderoso que contribuye al calentamiento climático después del CO₂ y expertos internacionales lo han vinculado al cáncer y otros problemas de salud graves, lo que proporciona un incentivo aún mayor para priorizar la reducción de estas emisiones.

El carbono negro se libera de una amplia variedad de fuentes de combustión, entre ellas, la quema de biomasa a cielo abierto (p. ej., incendios forestales), las estufas domésticas y la industria. En América Latina, sin embargo, el sector del transporte es la mayor fuente de emisiones de carbono negro generadas por el hombre. En el sector del transporte, los vehículos diésel que tienen un alto nivel de emisiones emiten la mayor parte del carbono negro. Esta es una función de dos factores: (1) la alta concentración de carbono negro en el núcleo de carbono de una típica partícula de diésel y (2) el creciente número de vehículos diésel en la región.²⁸

5. Diseño experimental

5.1 Biodiesel experimental y análisis

El Biodiesel de Soja con el que se trabajó está detallado en la tabla N°4 donde además se muestran las propiedades de otros tres tipos de biodiesel con los que cuenta el proyecto. Estos datos fueron proporcionados por la Universidad de Castilla La Mancha a partir del perfil de ésteres de cada biodiesel.

Tabla 4. Propiedades de los biocombustibles a ensayar en el experimento				
Biodiesel	FAME 1	FAME 2	FAME 3	FAME 4
	Propiedades Medidas			
Origen muestra	Grasas animales	Aceites de fritura	Aceite de soja	Aceite de palma
PCI [MJ/kg]	40,0449	38,4468	39,9924	-
Densidad a 15°C [kg/m ³]	875	890	884	874,8*
Viscosidad cinemática 40°C	4,4395 [cSt]	6,1722 cSt	3,9599 cSt	4,533 cSt *

²⁷ (MMA 2016)

²⁸ (NRDC 2014)

POFF [°C]	8	-1	-4	
Flash Point [°C]	171	<30	159,75	
Propiedades estimadas a partir de perfil de ésteres				
Fórmula molecular media	$C_{18,49}H_{35,32}O_2$	$C_{18,89}H_{35,21}O_2$	$C_{18,81}H_{34,49}O_2$	$C_{18,02}H_{34,91}O_2$
Contenido en oxígeno [%m/m]	11,05	10,87	10,93	11,28
Peso Molecular Medio [kg/kmol]	289,66	294,42	292,71	283,61
Relación aire/combustible	12,56	12,54	12,49	12,55
Número de cetano	65,77	57,15	52,20	69,68
Densidad a 15°C [kg/m ³]	876,23	882,25	886,36	873,09
Poder calorífico sup. [MJ/kg]	39,953	39,947	39,840	39,877
Poder calorífico inf. [MJ/kg]	37,318	37,363	37,294	37,218
Flash point [°C]	152,82	157,87	156,82	-

*Valores proporcionados por el fabricante

De acuerdo a las ecuaciones 2.2, 2.3 y 2.4 las propiedades de las mezclas serán las presentadas en la tabla 5, 6 y 7.

Tabla 5. Propiedades termofísicas de Biodiesel de grasas animales			
Mezcla	Viscosidad cinemática [Cst]	Densidad [kg/m3]	Poder Calorífico inferior [MJ/kg]
B0	2,620	835	42.658
B5	2,690	837,06	42.391
B20	2,911	843,25	41.590
B50	3,410	855,62	39.988
B100	4,440	876,23	37.318

Fuente: elaboración propia a partir de datos entregados por el fabricante.

Tabla 6. Propiedades termofísicas de Biodiesel de aceites de fritura			
Mezcla	Viscosidad cinemática [Cst]	Densidad [kg/m3]	Poder Calorífico inf. [MJ/kg]
B0	2,620	835	42.658
B5	2,735	837,36	42.393
B20	3,110	844,45	41.599
B50	4,021	858,63	40.011
B100	6,172	882,25	37.363

Fuente: elaboración propia a partir de datos entregados por el fabricante.

Tabla 7. Propiedades termofísicas del Biodiesel de soya			
Mezcla	Viscosidad cinemática [Cst]	Densidad [kg/m3]	Poder Calorífico inf. [kJ/kg]
B0	2,620	835	42.658
B5	2,675	837,57	42.390
B20	2,845	845,27	41.585
B50	3,221	860,68	39.976
B100	3,960	886,36	37.294

Fuente: elaboración propia a partir de datos entregados por el fabricante.

5.2 Implementación de horno y sistema de adquisición de datos

Este horno consiste en un hogar de combustión de 540 [mm] de diámetro con revestimiento interno de 40 [mm] de Plastigreen (plástico refractario) y una cubierta intermedia de agua para mantener una temperatura constante al interior del horno. En la Ilustración 5 se presenta un esquema del horno isotérmico implementado e inmediatamente debajo, en la Tabla N°8 de describe la enumeración de sus componentes

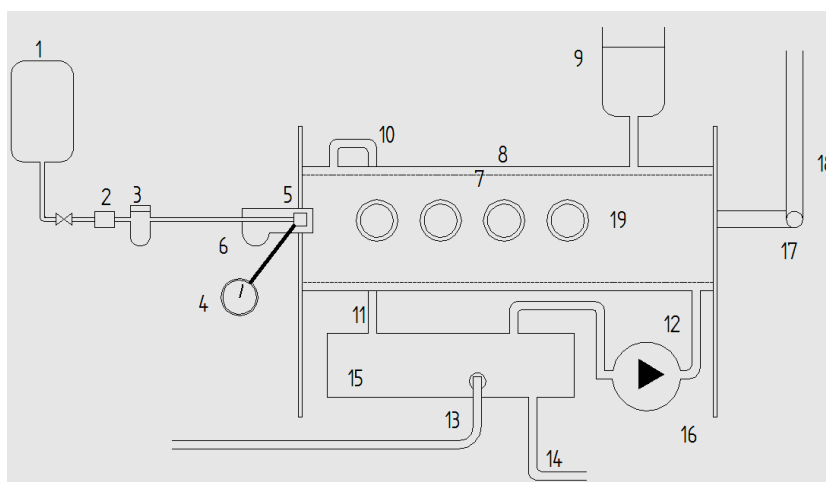


Ilustración 5. Esquema de horno isotérmico

Tabla 8. Elementos de horno isotérmico	
1. Estanque de combustible	2. Control de flujo de combustible
3. Filtro de combustible	4. Manómetro
5. Bomba de combustible	6. Quemador
7. Cámara de refrigeración	8. Control de temperatura
9. Estanque de expansión	10. Flujo de agua de circulación
11. Temperatura salida horno	12. Temperatura entrada del horno
13. Temp. entrada Intercambiador	14. Temp. salida intercambiador
15. Intercambiador de calor	16. Bomba de circulación
17. Ducto de escape	18. Control de emisiones

En la Tabla N°9 se describen las termocuplas utilizadas para el registro de la temperatura alrededor del horno, luego en la Ilustración 6 se muestra el sistema de adquisición de datos, Tarjeta OMEGA OMB-DAQ56, que permite la entrada de hasta 20 señales análogas, junto al software Personal Daqview se puede observar mediante el computador los parámetros en tiempo real, y guardar un registro completo del ensayo.

Tabla 9. Termocuplas	
Termocuplas	Temperatura
T1-T3-T5-	Temperatura superior manto horno
T2-T4-T6-	Temperatura inferior manto horno
T8	Temperatura agua entrada horno
T12-T13	Temperatura agua salida horno
T14	Temperatura agua entrada intercambiador
T15	Temperatura agua salida intercambiador



Ilustración 6. Sistema de adquisición de datos

El quemador utilizado posee varios componentes, los principales son el quemador, la bomba de inyección y la tobera de atomización, los cuales se detallan en la tabla 10. Debido a diferentes problemas en la inyección el quemador debió ser enviado al laboratorio de termofluidos del departamento de Mecánica de la UTFSM.

Tabla 10 Componentes del quemador utilizado	
Instrumento	Especificaciones
 Ilustración 7. Quemador Unigas LO60	Quemador de Gasóleo: Quemador de petróleo de baja potencia, modelo LO60, CIB Unigas, procedencia Italiana, sus características son las siguientes: • Potencia 30 – 60 kW calóricos • Combustible: Gasóleo • Viscosidad Op: 2 – 7 cSt (a 40°C) • Capacidad: 2,5 – 5,5 [kg/hr]
 Ilustración 8. Bomba Suntec AS47A	Bomba Hidráulica: Bomba que permite funcionar al quemador, esta funciona para combustible líquido, sus características se presentan a continuación. • Viscosidad Op.: 2 – 12 cSt • T° Combustible: 0 – 60 °C • Presión Inyección: 7 – 25 bar • Velocidad rotación: 3600 rpm

 Ilustración 9. Tobera Danfoss	Tobera: La función principal de esta es transformar el combustible líquido en pequeñas partículas para mejorar el contacto con el comburente, lo que se llama el proceso de atomización. • Denominación: 60°S (para chorros líquidos) • Capacidad: 1 USgal/hora • Denominación CEN: EN 70° IV 3,72 kg/hr
--	--

5.3 Implementación de Túnel de dilución

Producto de la elevada concentración de particulado en los gases de escape se requirió de la ayuda de un túnel de dilución (TD) para evitar que los instrumentos de medición se saturen. El TD estaba compuesto por una bomba de vacío en uno de sus extremos y en el otro extremo una tobera de color azul por donde entra el aire gracias a la succión que genera la bomba. Los gases de escape entran a través de una tubería de acero inoxidable de 3/8 de pulgadas como se ve en la ilustración 10.

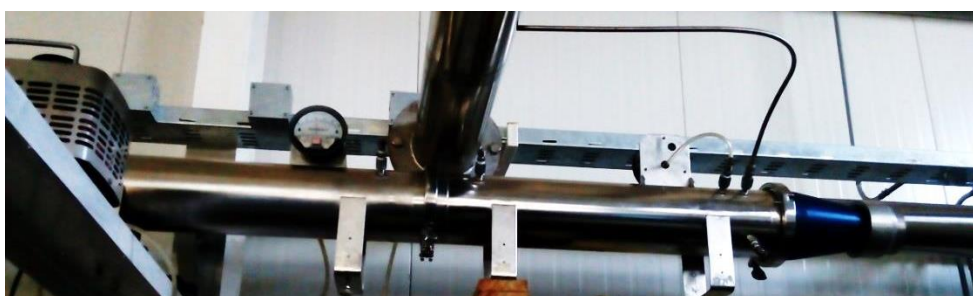


Ilustración 10. Túnel de dilución conectado con tubería 3/8" para toma de muestras

Al interior del túnel de gases de escape la cañería de 3/8" posee una curvatura la cual permite que la boquilla de la tubería se encuentre frente al flujo de gases. Al entrar la muestra de gases de escape, se logra una muestra homogénea al terminar su recorrido por el TD en el extremo de la bomba, donde están ubicados los instrumentos de medición. Con los gases diluidos y con una temperatura en torno a los 35°C se pudieron ingresar las sondas de medición al interior del túnel de dilución.

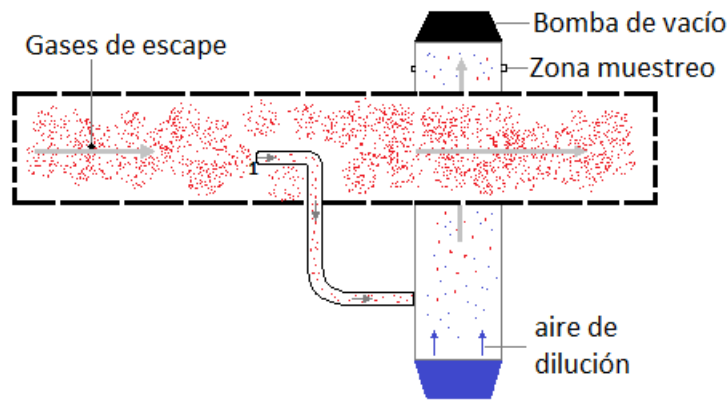


Ilustración 11. Esquema de muestreo isocinético

La disposición de los elementos a utilizar en el túnel de dilución se muestra en la Ilustración 11, en el extremo opuesto a la entrada del aire y de la muestra de gases de escape, cuando los gases ya se encuentran homogeneizados. En la ilustración 12 se muestra la disposición de las sondas al interior del túnel, para ello se debió sacar la bomba de vacío. En el sector superior izquierdo tenemos muestreo de gases para carbonilos, abajo está la sonda de gases para el Grimm y a la derecha la sonda de gases para MicroEtalómetro.

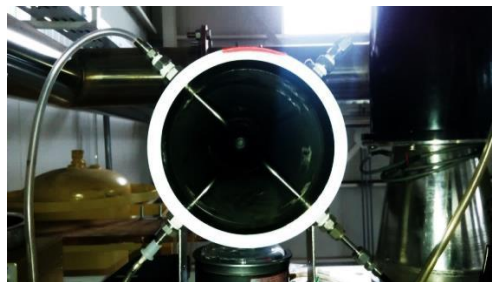


Ilustración 12. Tubos de pitot utilizados para tomar muestras de gases

5.3.1 Muestreo Isocinético

Para regular las revoluciones de la bomba de vacío se requirió de un variador de voltaje, mostrado en la Ilustración 13. La bomba de vacío trabajó a 20 volt con una presión de vacío de 4 [in/pulg²], de esta manera se consiguió un muestreo isocinético, esto es, que en el punto 1 de la ilustración 11 la velocidad de succión que genera la bomba en el TD es igual a la velocidad de los gases de escape, esto evita una variación en la velocidad o algún grado de estanqueidad alrededor de la sonda. Los cálculos realizados se muestran en la tabla 11.



Ilustración 13. Variador de frecuencia

Tabla 11. Calculo de muestreo isocinético		
	Flujo	Velocidad gases
Tubería 3/8" (8,4 mm ϕ_{int})	6,2 [lt/min]	1,86 [m/s]
Ducto de gases de escape	[-]	1,8 [m/s]

Como se muestra en la tabla 11 las velocidades se aproximan bastante. Se trabajó durante todo el experimento en esas condiciones, de manera de afectar lo menos posible el flujo de gases de escape al interior de la cañería de gases de escape.

Tabla 12. Instrumento de medición de Gases y particulado



Ilustración 14. Monitor de partículas

Monitor de partículas portátil: Monitor de partículas de la serie 107 de Grimm, se utiliza para medir de manera continua partículas en el aire (aerosoles). Estas mediciones se determinan en uno de dos modos básicos, concentración de partículas [cuentas / L] o concentración de masa [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], los datos se almacenan en el software *Grimm Spectrometer*.



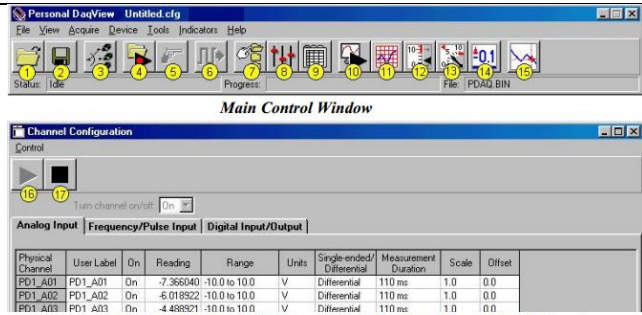
Ilustración 15. Testo 350 XL

Medidor de Gases: Para el análisis de la emisión de gases se utiliza el equipo Testo, modelo 350 XL, el cual nos da información respecto al porcentaje y concentración de contaminantes en los gases de escape debido a la combustión, los datos se almacenan en el software *Easy Emmision*.



Ilustración 16. MicroEtalómetro AE51

MicroEtalómetro: utilizado para medición de carbón negro (Black Carbon) contenido en los gases de escape.

Tabla 13. Programas utilizados en la adquisición de datos																																									
Programa	Interfaz o estructura																																								
Personal Daqview, OMEGA Adquisidor de datos de temperatura del manto del horno.	 <i>Main Control Window</i> <i>Channel Configuration Window, with Analog Input Spreadsheet Selected</i> <table><thead><tr><th>Physical Channel</th><th>User Label</th><th>On</th><th>Reading</th><th>Range</th><th>Units</th><th>Single-ended/Differential</th><th>Measurement Duration</th><th>Scale</th><th>Offset</th></tr></thead><tbody><tr><td>PD1_A01</td><td>PD1_A01</td><td>On</td><td>-7.366040</td><td>-10.0 to 10.0</td><td>V</td><td>Differential</td><td>110 ms</td><td>1.0</td><td>0.0</td></tr><tr><td>PD1_A02</td><td>PD1_A02</td><td>On</td><td>-6.018922</td><td>-10.0 to 10.0</td><td>V</td><td>Differential</td><td>110 ms</td><td>1.0</td><td>0.0</td></tr><tr><td>PD1_A03</td><td>PD1_A03</td><td>On</td><td>-4.488921</td><td>-10.0 to 10.0</td><td>V</td><td>Differential</td><td>110 ms</td><td>1.0</td><td>0.0</td></tr></tbody></table>	Physical Channel	User Label	On	Reading	Range	Units	Single-ended/Differential	Measurement Duration	Scale	Offset	PD1_A01	PD1_A01	On	-7.366040	-10.0 to 10.0	V	Differential	110 ms	1.0	0.0	PD1_A02	PD1_A02	On	-6.018922	-10.0 to 10.0	V	Differential	110 ms	1.0	0.0	PD1_A03	PD1_A03	On	-4.488921	-10.0 to 10.0	V	Differential	110 ms	1.0	0.0
Physical Channel	User Label	On	Reading	Range	Units	Single-ended/Differential	Measurement Duration	Scale	Offset																																
PD1_A01	PD1_A01	On	-7.366040	-10.0 to 10.0	V	Differential	110 ms	1.0	0.0																																
PD1_A02	PD1_A02	On	-6.018922	-10.0 to 10.0	V	Differential	110 ms	1.0	0.0																																
PD1_A03	PD1_A03	On	-4.488921	-10.0 to 10.0	V	Differential	110 ms	1.0	0.0																																
Grim Spectrometer (Medición de material particulado)	 <i>Control GRIMM Spectrometer Model OPC 1.109 s/n: 9C100013 Program Revision Version 2.2.3</i> Control Overview Distribution Table Time Statistic Help Stop & Exit total counts [1/l] 151400 counts < 1 µm [1/l] 150400 counts > 1 µm [1/l] 1000 PM10 [µg/m³] 91.6 PM2.5 [µg/m³] 17.7 PM1 [µg/m³] 12.5 Inhalable [µg/m³] 947.2 Thoracic [µg/m³] 120.9 Alveolar [µg/m³] 25.9 Qbatt 45 Imot 32 C-factor 1 counts [1/l] min mid size max mid size 0.265 µm 34.000 µm counts [min,max] [1/l] 151400 dp [µm] 0.25-0.28 0.28-0.30 0.30-0.35 0.35-0.40 0.40-0.45 0.45-0.50 0.50-0.59 82000 33100 25150 15700 8350 2000 1700 0.58-0.65 0.65-0.70 0.70-0.80 0.80-1.00 1.00-1.30 1.30-1.60 1.60-2.00 2.00-2.50 750 550 300 0 0 300 130 70 2.50-3.00 3.00-3.50 3.50-4.00 4.00-5.00 5.00-6.50 6.5-7.5 7.5-8.5 8.5-10.0 100 90 60 70 50 40 10 0 10.0-12.5 12.5-15.0 15.0-17.5 17.5-20.0 20.0-25.0 25.0-30.0 30.0-32.0 >32 50 20 0 10 20 10 0 10																																								

6. Procedimiento Experimental

El presente protocolo está dirigido a la toma de muestras de emisión contaminantes producto de la quema de biocombustibles en un horno isotérmico (ver Ilustración 17), específicamente de la quema de mezclas diésel-biodiésel, para obtener la eficiencia y balance energético del equipo, además de analizar las emisiones de contaminantes criterio y concentraciones de material particulado derivadas de la combustión de biocombustibles. Las mezclas evaluadas fueron; B0, B5, B20 y B50. Debido a problemas ocurridos anteriormente con toberas de atomización utilizar mezcla B100 fue necesario quitar esta mezcla del experimento. Se propone para futuros experimentos contar con una tobera de repuestos para garantizar la continuidad de cualquier procedimiento que se lleve a cabo.

En este proceso de combustión se requerirá una gran cantidad de equipos tanto para el proceso de combustión de los biocombustibles, como para la toma de muestras de las emisiones contaminantes derivadas del proceso. Los experimentos se llevaron a cabo al interior de la nave del Laboratorio de Energías Renovables ubicado en la Sede de la Universidad Técnica Federico Santa María de Viña del Mar.

A partir de la quema de cada mezcla diésel-biodiésel, tomando como referencia el diésel base, se determinaran los contaminantes criterio (CO, CO₂, NO_x, BC, MP₁₀, MP_{2.5}, MP₁) los contaminantes del aire que se han clasificado como contaminantes criterio se identifican como perjudiciales para la salud y el bienestar de los seres humanos.



Ilustración 17. Horno isotérmico utilizado

6.1 Pasos Previos

Para determinar las prestaciones de las mezclas de diésel-biodiésel, primero se debe realizar un proceso de medición de propiedades termofísicas de los biocombustibles investigados, para posteriormente utilizarlos en cálculos. Se toman muestras representativas de cada biodiésel y de diésel base, y en ellas se realizan pruebas para obtener características termofísicas de estos (ver tablas 5,6 y 7), todas estas pruebas se realizan bajo norma ASTM para combustibles líquidos. Se obtienen valores característicos de Viscosidad [ASTM D-445], Densidad [ASTM D-1481], y Poder Calorífico Superior e Inferior [ASTM D-240].

El proceso de medición de las temperaturas dentro del horno consta de 6 termocuplas instaladas en las paredes de este, que permiten medir la temperatura del horno a distintas distancias desde la base de la llama producida en el quemador, estas corresponden a termocuplas tipo “K”, con un largo de inmersión de 335 [mm], las termocuplas se instalan dentro de vainas cerámicas, que entregan aislamiento y protección al equipamiento asegurando una mayor vida útil y evitando suciedad, lo que permite una mejor calidad en la medición.

El agua contenida en la cámara de refrigeración circula hacia el intercambiador de calor para ser enfriada y posteriormente es redirigida a la cámara como se muestra en la Ilustración 18. La circulación del agua se logra por medio de una bomba radial, accionada por un motor eléctrico, este motor debe ser energizado antes del proceso de combustión.

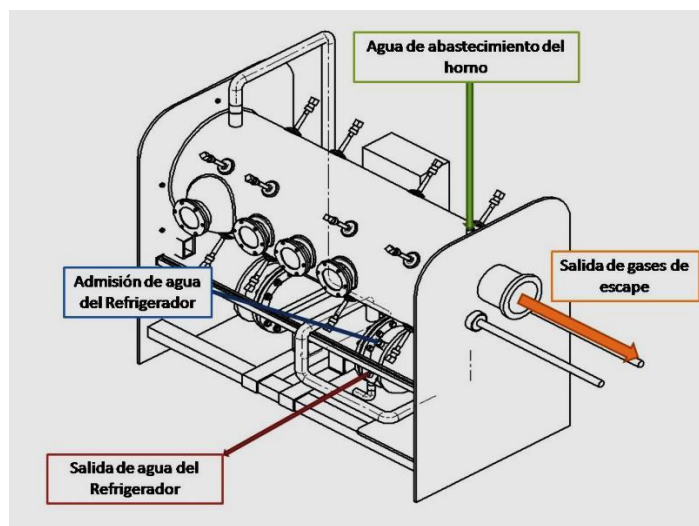


Ilustración 18. Horno isotérmico y su red de agua del horno

Los gases de escape evacúan la cámara de combustión por un ducto de 0,15 [m] de diámetro. Al salir del horno, los gases son evacuados de forma vertical para unirse a una red de cañerías que finalmente darán a la atmosfera por una chimenea ubicada afuera de la nave del LER.

Las temperaturas tanto del agua de ingreso al horno desde el intercambiador de calor, y de egreso del mismo, junto a las temperaturas de abastecimiento del intercambiador, tanto de entrada como de salida, deben medirse en forma continua, para asegurar el correcto funcionamiento del horno. Para ello se cuenta con 5 termocuplas tipo “K”, estilo bayoneta que cuentan con vainas metálicas.

6.1.1 Procedimiento de mezclado

Cada experiencia se inicia con la mezcla de combustibles a utilizar durante la jornada, en porcentajes volumétricos conocidos, tanto para diésel base como para el biodiesel mediante vasos precipitados de 1000 [ml] y 2000 [ml], como se aprecia en la ilustración 19 y 20 respectivamente. Se debe procurar que la mezcla permanezca sin fases, para no interferir en los resultados. El mezclado se hace mediante el método de homogeneización manual.



Ilustración 19. Probeta 1000 ml



Ilustración 20. Probeta de 2000 ml

6.1.2 Puesta en marcha y detención del horno y elementos de medición

Para clarificar los diferentes pasos a la hora de empezar el experimento se han detallado en las tablas 14, 15 y 16 la puesta en marcha del horno, la iniciación de las mediciones y cómo realizar experimentos continuos.

Tabla 14. Puesta en marcha del horno
1.- Aprobar condiciones de ensayo preliminares
2.- Corroborar que la red de agua del sistema (horno y bomba de agua) estén llena.
3.- Revisar el nivel del agua del tanque de expansión
4.- Conectar a la red eléctrica los circuitos del quemador
5.- Verificar estado de flexibles que conectan el combustible con el quemador
6.- Energizar la bomba de circulación de agua del horno
7.- Activar la medición en tiempo real de las temperaturas arrojadas por el horno
8.- Encender el Quemador

Tabla 15. Puesta en marcha de equipos de medición
1.- Esperar 45 minutos desde el encendido del horno, para condición estacionaria
2.- Realizar una medición en blanco para los equipos analizadores de gases
3.- Conectar sondas de muestreo al túnel de dilución o al túnel de gases de escape
4.- Iniciar lecturas y esperar 10 minutos a que se estabilicen las mediciones
5.-Registrar hora de inicio de mediciones HH:MM:SS
6.-Iniciar medición de perfil de temperatura del horno en el Adquisidor de datos
7.-Registrar masa inicial de combustible al inicio del experimento
8.-Iniciar registro de material particulado, gases de escape y carbono negro
9.-Estar atento a niveles de combustible durante el experimento
10.-Registrar masa final transcurrido los 20 minutos del experimento
11.- Retirar las sondas de los equipos de medición
12.- Detener registro de temperaturas del horno en Adquisidor de datos

Mediciones previas con detención del quemador entre cada experimento significaban un gasto de tiempo considerable, ya que al encender y apagar el quemador se liberan gases y material particulado con elevadas concentraciones. Para evitar tiempos prolongado esperando a que se estabilice la combustión se optó por mantener encendido el quemador entre cada experimento, en la tabla 16 se detallan los procedimientos entre cada experimento.

Tabla 16. Procedimiento para repetición de mediciones
1.- Mantener el quemador encendido
2.- Preparar nueva mezcla de combustible
3.- Verter la mezcla en el recipiente de alimentación del quemador
4.- Verificar estado de los instrumentos de medición (cambiar filtros si es necesario)
5.- Iniciar lecturas de instrumentos de medición para verificar estabilidad
6.- Registrar hora de inicio de mediciones HH:MM:SS
7.- Iniciar medición de perfil de temperatura del horno en el Adquisidor de datos
8.- Registrar masa inicial de combustible al inicio del experimento
9.- Iniciar registro de material particulado, gases de escape y carbono negro

10.- Registrar masa final transcurrido los 20 minutos del experimento
11.- Retirar las sondas de los equipos de medición
12.- Detener registro de temperaturas del horno en Adquisidor de datos
13.- Si se han realizado todos los experimentos alimentar el quemador con diésel
14.- Transcurridos 10 a 15 minutos quemando diésel se puede apagar el quemador

6.2 Optimización de Parámetros de funcionamiento

Antes de cada ciclo de quemado se establecieron los parámetros más eficientes de combustión variando la presión de inyección de combustible y el exceso de aire de combustión, como lo detallan las tablas 17, 18, 19 y 20.

Tabla 17. Quema de mezcla B0 para optimización de la combustión									
graduación de aire	Presión de inyección de combustible								
	7 bar			8 bar			9 bar		
[-]	% O ₂	ppm CO	% CO _{2i}	% O ₂	ppm CO	% CO _{2i}	% O ₂	ppm CO	% CO _{2i}
4	9,2	16,2	9,5	7,1	1157,0	11,0	6,01	838	11,95
5	9,5	6,3	9,3	7,0	13,0	11,4	5,55	275	12,78
6	9,5	12,2	9,4	7,5	19,6	11,0	5,32	1063	12,64

Tabla 18. Quema de mezcla B5 de Soja para optimización de la combustión									
graduación de aire	Presión de inyección de combustible								
	6 bar			7 bar			8 bar		
	% O ₂	ppm CO	% CO _{2i}	% O ₂	ppm CO	% CO _{2i}	% O ₂	ppm CO	% CO _{2i}
4	9,2	5,5	9,7	6,1	5,2	12,2	4,0	3140,0	3,8
5	11,7	1,2	7,7	7,2	4,1	11,3	6,8	12,2	12,8
6	11,7	3,0	7,7	7,8	4,9	10,9	6,9	7,9	11,6

Tabla 19. Quema de mezcla B20 Soja optimización de la combustión									
Graduación de aire	Presión de inyección de combustible								
	6 bar			7 bar			8 bar		
	% O ₂	ppm CO	% CO _{2i}	% O ₂	ppm CO	% CO _{2i}	% O ₂	ppm CO	% CO _{2i}
4	6,5	4,3	12,1	6,1	5,3	12,3	4,9	28,2	13,3
5	6,8	4,1	11,7	6,7	5,1	11,8	6,4	11,5	12,1
6	8,7	6,8	10,1	7,5	8,3	11,1	6,9	12,4	11,7

Tabla 20. Quema de mezcla B50 para búsqueda de mejores condiciones de combustión									
graduación de aire	Presión de inyección de combustible								
	6 bar			7 bar			8 bar		
	% O ₂	ppm CO	% CO _{2i}	% O ₂	ppm CO	% CO _{2i}	% O ₂	ppm CO	% CO _{2i}
4	6,7	5,0	11,8	7,0	6,0	11,6	7,2	9,0	11,5
5	8,3	5,0	10,6	7,7	4,0	11,0	7,3	5,0	11,4
6		-	-	8,6	6,0	10,9	7,8	8,0	11,0

Para la quema del diésel base (B0) los parámetros de mejor combustión se dieron a una presión de inyección de 7 bar y para una alimentación de aire graduado en 5[-].

Para las mezclas B5, B20 y B50 la optimización a 9 bar de inyección presentó problemas. La inyección se tornó inestable y la aguja del manómetro errante arrojando presiones que fluctuaban entre los 8 y 10 bar, en consecuencia, la combustión generó elevadas concentraciones de particulado saturando los elementos de medición. Algunas de las causas probables es la viscosidad que poseían las mezclas evaluadas. Es por ello que las presiones de optimización para las mezclas fueron 6,7 y 8 bar.

Los criterios para elegir los mejores parámetros de combustión fueron, bajas emisiones de CO y la mayor emisión de CO₂. Para la mezcla B5 los parámetros de optimización elegidos para realizar los experimentos fueron; 7 bar de inyección y 5[-] en la regulación del aire. Para la mezcla B20; 6 bar de inyección y 5[-] en la regulación de aire. Por último, para la mezcla B50 los parámetros elegidos fueron; 7 bar de inyección y 5 de aire.

6.3 Personal y Seguridad

Para la realización de la toma de muestras, adicional al investigador, en este caso el alumno, debe haber una persona que preste apoyo, por lo tanto como mínimo se cuenta con 2 personas, las cuales realizarán las actividades que se detallan a continuación:

- *Investigador y Operador de Instrumentos de Medición:* Este será el alumno que realice las diversas mediciones derivadas de los gases producidos por la quema de biodiesel, además de operar los softwares necesarios para el almacenamiento de datos.
- *Apoyo en Laboratorio:* apoyo académico del LER, encargado de resolver eventuales problemas en instalación y funcionamiento de los equipos relacionados con el horno isotérmico.

Todas las personas relacionadas con la toma de muestras deben estar presentes durante toda la experiencia.

Los Implemento de seguridad para la realización de la toma de muestras que las personas encargadas deben tener son los siguientes:

- Overol o Capa
- Zapatos de Seguridad
- Guantes
- Gafas de seguridad

Estos implementos de seguridad se deben utilizar a lo largo de toda la experiencia. Adicionalmente se debe contar con los siguientes equipos de seguridad:

- Extintor certificado por CESMEC.
- Teléfono con conexión directa al servicio de salud del campus.

7. Determinación del balance energético

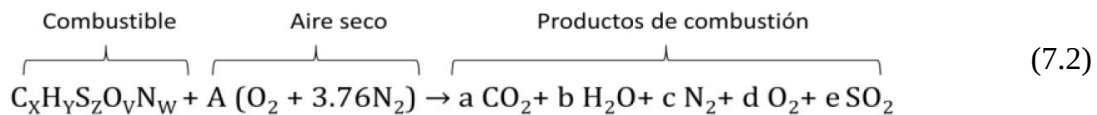
7.1 Metodología

El caudal másico de combustible consumido se calculará mediante la siguiente expresión:

$$\dot{m} = \frac{m_{inicial} - m_{final}}{t} \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (7.1)$$

Donde: $m_{inicial}$: es masa de combustible al inicio del experimento
 m_{final} : masa de combustible al final del experimento
 t : tiempo del experimento (20 minutos)

La relación de aire/combustible estequiométrico se puede calcular mediante un balance de masa, donde es conocida la composición elemental del combustible. La ecuación de combustión es de la siguiente manera:



Balanceando la ecuación de combustión, considerando la concentración porcentual en peso de los componentes del combustible obtenidos de su composición elemental, podemos obtener la masa tanto del aire como del combustible estequiométricos obteniendo la cantidad molar de cada componente, usando el siguiente método:

$$m = N \times M \quad (7.3)$$

Donde: m : Masa componentes
 N : Número de moles
 M : Masa molar

Luego obtenemos la masa de aire y la masa de combustible estequiométrico, de esta manera podemos calcular la relación aire combustible estequiométrica de la siguiente manera:

$$R_{a/c \text{ Esteq}} = \frac{\sum (N \times M)_{aire}}{\sum (N \times M)_{comb}} \quad (7.4)$$

Quedando de la siguiente manera

$$R_{a/c \text{ Esteq}} = \frac{m_{aire}}{m_{comb}} \quad (7.5)$$

Como los resultados obtenidos provienen de mezclas, la relación aire/combustible se calcula de la siguiente manera:

$$R_{a/c \text{ mezcla}} = X_{BX} * R_{a/c B100} + (1 - X_{BX}) * R_{a/c Diesel} \quad (7.6)$$

Donde $R_{a/c\text{ mezcla}}$: Relación aire combustible de la mezcla

$R_{a/cB100}$: Relación aire combustible del biodiesel

$R_{a/cDiesel}$: Relación aire combustible del diésel

X_{BX} : Fracción de mezcla de biodiesel

Como no se puede saber de manera exacta el suministro de aire de combustión que utiliza el quemador, utilizamos la relación de aire combustible real

$$R_{a/c\text{ Real}} = \frac{m_{aire}}{m_{comb}} \quad (7.7)$$

La cantidad de combustible consumida es un dato conocido al finalizar cada experimento. Luego se usa el dato lambda medido (λ) para obtener la masa de aire real utilizada con la siguiente ecuación.

$$\lambda = \frac{R_{a/c\text{ Real}}}{R_{a/c\text{ Esteq}}} \quad (7.8)$$

Luego de esto podemos calcular la energía utilizada por el quemador, que sería la energía correspondiente a la masa de aire entrante junto con la energía del combustible utilizado durante el experimento, de esta manera se realizará un correcto balance energético. Para ellos necesitaremos las siguientes ecuaciones de balance:

$$\dot{E}_1 = \dot{Q}_A + \dot{Q}_E \quad (7.9)$$

Donde: E_1 : Energía que ingresa a la cámara de combustión
 Q_A : Energía absorbida por la cámara de refrigeración
 Q_E : Energía liberada por los gases de escape

Luego cada término representa:

$$\dot{E}_1 = \dot{E}_c + \dot{E}_a \quad (7.10)$$

$$\dot{E}_c = m_{comb} * PCI_{mezcla} \quad (7.11)$$

$$\dot{E}_{aire} = \dot{m}_{aire} * c_{p\text{ aire}} * T_{amb} \quad (7.12)$$

$$\dot{Q}_A = \dot{m}_{agua} * c_{p,agua} * (T_{agua,salida}^{horno} - T_{agua,entrada}^{horno}) \quad (7.13)$$

$$\dot{Q}_E = \dot{m}_{ge} * c_{p,gases} * (T_{gases} - T_{amb}) \quad (7.14)$$

Considerando todos los datos obtenidos durante los ensayos, se calcula los rendimientos del equipo para cada mezcla de combustible de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_A}{\dot{E}_1} = \frac{\dot{m}_{agua} c_{p,agua} (T_{agua,salida}^{horno} - T_{agua,entrada}^{horno})}{\dot{m}_{comb} * PCI_{mezcla} + \dot{m}_{aire} * c_{p\text{ aire}} * T_{amb}} \quad (7.15)$$

Donde:

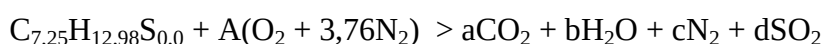
- $\dot{m}_{agua}$: flujo volumétrico de agua de refrigeración
- $c_{p,agua}$: Calor específico del agua
- m_{comb} : Masa de combustible
- PCI_{mezcla} : Poder calorífico inferior de la mezcla a quemar
- $\dot{m}_{aire}$: Masa de aire de combustión
- $C_{p\ aire}$: Calor específico del aire
- T_{amb} : Temperatura ambiente
- T_{gases} : Temperatura de gases de escape
- $c_{p,gases}$: Calor específico de gases de escape

7.2 Resultados relación aire combustible estequiométrico

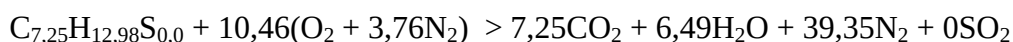
En base a los estudios hechos por la Universidad De Castilla La Mancha (UCLM) se desarrolló la tabla 21 con la estequiometría de los biocombustibles disponibles en el proyecto FONDEF.

Tabla 21. Estequiometría de los combustibles conseguidos por el proyecto FONDEF	
Diésel A1	$C_{7,25}H_{12,98}S_{0,0}$
Biodiesel de grasas animales	$C_{18,49}H_{35,32}O_2$
Biodiesel de aceites de fritura	$C_{12,89}H_{35,21}O_2$
Biodiesel de aceite de soja	$C_{18,81}H_{34,49}O_2$
Biodiesel de aceite de palma	$C_{18,02}H_{34,91}O_2$
Fuente: Propiedades estimadas a partir del perfil de ésteres por la UCLM	

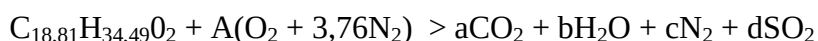
Con los datos obtenidos en la Tabla 21 y aplicando la ecuación (7.2) para realizar un balance a la ecuación se tendrá para el diésel la siguiente fórmula:



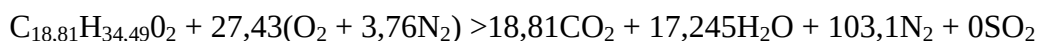
Por lo tanto la ecuación estequiométrica queda balanceada de la siguiente forma:



Luego para el biodiesel de Soja tendremos:



Donde la ecuación queda balanceada de la forma:



Utilizando la ecuación (7.3) y (7.4) y en base al balance realizado anteriormente se podrá calcular la masa de aire y de combustible estequiométrico para el diésel y el biodiesel de soja, los cuales se muestran en la Tabla 22 y 23.

Tabla 22. Cálculo de masa de aire y combustible estequiométrico para el diésel				
Compuesto	Peso Molecular	Moles	Peso	Peso
Combustible	[g/mol]	mol	[g]	[%]
C	12,0	7,25	87	87,0
H	1,008	12,98	13	13,0
O	16,0	0	0	0
S	32,0	0	0	0
Total			100 [g]	100 [%]
Compuesto	Peso Molecular	Moles	Peso	Peso
Aire	[g/mol]	mol	[g]	[%]
O	16,0	20,9	334,7	23,3
N	14,0	78,7	1101,8	76,7
Total			1436,2	100

Tabla 23. Cálculo de masa de aire y combustible estequiométrico para biodiesel de soja				
Compuesto	Peso Molecular	Moles	Peso	Peso
Combustible	[g/mol]	mol	[g]	[%]
C	12,0	18,81	225,72	77,2
H	1,008	34,49	34,76	11,9
O	16,0	2	32	10,9
S	32,0	0	0	0
Total			292,48 [gr]	100
Compuesto	Peso Molecular	Moles	Peso	Peso
Aire	[g/mol]	mol	[g]	[%]
O	16,0	54,86	877,76	23,3
N	14,0	206,27	2887,83	76,7
Total			3765,59	100

Finalmente se podrá obtener la relación aire/combustible estequiométrica con la ecuación (7.4)

$$Ra_{/c \text{ Esteq Diesel}} = \frac{masa_{aire}}{masa_{comb}} = \frac{1436,2}{100} = 14,36 [-]$$

$$Ra_{/c \text{ Esteq Soja}} = \frac{masa_{aire}}{masa_{comb}} = \frac{3765,59}{292,48} = 12,87 [-]$$

7.3 Resultados relación aire combustible real

Los siguientes resultados, representados en la tabla 24, representan la relación aire combustible real ($R_{AC \text{ real}}$) para el combustible diésel A1 y el biodiesel utilizado en las pruebas (soja). Para obtener esta relación se utiliza la ecuación 7.8, el dato del exceso de aire es resultado de la combustión de cada mezcla obtenido como la media aritmética de los datos por el equipo Testo.

Tabla 24. Cálculo RAC real y masa de aire real promedio para mezclas de soja					
Mezcla	Lambda	Rac esteq	Rac real	Masa comb [kg]	Masa aire [kg]
Diésel	1,50	14,36	21,61	1,39	29,91
B5	1,71	14,29	24,39	1,40	33,89
B20	1,50	14,06	21,08	1,38	28,86
B50	1,76	13,62	23,91	1,38	32,96

A pesar de los cálculos realizados se considera que hay un error relativo al instrumento Testo 350 XL, ya que los valores de exceso de aire están calibrados para ser medidos en combustión de diésel y no en mezclas con biodiesel.

7.4 Resultados eficiencia de Caldera

Al realizar un correcto balance de energía es posible calcular la eficiencia de la caldera utilizada. Tomando como volumen de control al horno isotérmico, la energía que ingresa al sistema se complementa entre la energía del combustible y la energía del aire de combustión (ver tabla 25), mientras que la energía que sale del sistema es la que absorbe el agua de refrigeración del horno, que en la práctica sería la energía que se aprovecha, y la energía de los gases de escape que finalmente es considerada como perdida por convección y en menor medida las pérdidas por radiación.

Tabla 25. Energía que entra al sistema						
Mezcla	flujo combustible	Poder calorífico	energía combustible	Masa aire	Temperatura ambiente (K)	Energía aire
[-]	ks/s	kJ/kg	kW	kg/s	K	kW
B0	0,001183	42.658	50,5	0,0235	290,0	6,9
B5	0,001134	42.389,8	48,1	0,0296	289,1	8,6
B20	0,001180	41.585,2	49,1	0,0240	293,1	7,1
B50	0,001148	39.976	45,9	0,0318	294,1	9,5

Al realizar un análisis de la masa de aire que ingresó en cada mezcla al proceso de combustión no se logra ver una tendencia, se esperaba que a medida que la mezcla incrementara su concentración en volumen de biodiesel, esta requiriera un menor exceso de aire, situación que no logra ser respaldada al mirar el exceso de aire el flujo de aire en las tablas 24 y 25, respectivamente.

Tabla 26. Energía que sale del sistema							
Mezcla	Experimento	Gases escape	Agua entrada	Agua salida	Flujo agua	Energía agua	Eficiencia
[-]	[-]	°C	°C	°C	kg/s	kW	[%]
Diésel	Exp 1*	392,6	-	-	-	-	-
	Exp 2	397,1	59,5	64,4	0,50	10,2	18,2
	Exp 3	390,4	69,1	74,6	0,50	11,5	23,3
B5	Exp 1*	372,9	-	-	-	-	-
	Exp 2	384,2	48,8	52,8	0,50	8,4	14,7
	Exp 3	399,4	64,9	70,8	0,479	11,8	20,9
	Exp 4**	390,4	48,4	52,5	0,55	9,4	16,7

B20	Exp 1	371,2	57,9	62,5	0,538	10,3	20,7%
	Exp 2	386,1	71,0	78,6	0,439	13,9	23,9%
	Exp 3	383,7	58,2	64,7	0,408	11,1	20,4%
B50	Exp 1	376,2	56,1	59,9	0,645	10,2	19,0%
	Exp 2	390,2	68,8	73,3	0,668	12,6	24,3%
	Exp 3	387,3	43,7	46,9	0,767	10,3	17,2%

(*) No se tuvo registro de las temperaturas del agua de refrigeración del horno.

(**) De manera excepcional se realizó una experiencia extra con la mezcla B5.

8. Factores de Emisión

Un factor de emisión (FE) es una relación entre la cantidad de contaminante emitido a la atmosfera y una unidad de actividad. Para la obtención de factores de emisión de los contaminantes criterios se llevarán los datos obtenidos a unidades de masa por unidad de volumen, específicamente a [mg/Nm³].

8.1 Metodología para material particulado y carbono negro

Los resultados para material particulado se obtienen directamente desde el software Grimm. Este aparato nos arroja resultados cada 6 segundos de PM₁, PM_{2.5} y PM₁₀ medidos en el túnel de dilución de la forma [µg/m³]. Para el caso del MicroEtalómetro, este instrumento nos arroja una medición de carbono negro (BC) presente en los gases de escape cada 10 segundos de la forma [ng/m³].

Cada experimento tuvo una duración de 20 minutos. Para tener una medición correcta de la masa de carbono negro o de material particulado (MP) se deberá multiplicar el valor puntual que arroja el instrumento por el volumen de aire que circula por el túnel de dilución en esos 6 o 10 segundos, para el Grimm y el MicroEtalómetro, respectivamente. Luego se hace una integración de todos los valores puntuales para tener un valor másico total que luego será dividido por el combustible consumido en esos 20 minutos de experimento como lo indica la ecuación (8.1):

$$FE_{combustible} = \frac{\sum MP \cdot V}{masa_{comb}} \quad (8.1)$$

Donde: MP: Material particulado o carbono negro que arroja el instrumento
V: Volumen de aire que circula a través del TD en seis o diez segundos

Teniendo el FE de cada experimento en función del combustible consumido (FE_{comb}) se procede a dividir por el poder calorífico de la mezcla a utilizar como lo indica la ecuación (8.2)

$$FE_{energía} = FE_{comb} / PCI_{mezcla} \quad (8.2)$$

8.2 Cálculo del Factor del Dilución

Para conocer el Factor de Dilución con el que trabajó nuestro Túnel de Dilución (TD) fue necesario registrar el flujo de gases de muestra que ingresaba al TD y el flujo de aire

que circulaba por el TD. En la tabla 27 se muestran los datos obtenidos mediante la ecuación 8.3 para el cálculo del FD.

$$FD = \frac{\dot{V}_{gases\ escape} + \dot{V}_{aire\ de\ dilución}}{\dot{V}_{gases\ de\ escape}} = \frac{\dot{V}_{gases\ totales}}{\dot{V}_{gases\ escape}} \quad (8.3)$$

Donde:

$\dot{V}_{gases\ escape}$: Gases que ingresan por la sonda de 3/8"

$\dot{V}_{aire\ de\ dilución}$: Aire de dilución que ingresa al TD

Tabla 27. Cálculo del Factor de dilución para cálculo de material particulado		
Flujo volumétrico	Registro	Unidades
Flujo en toma de muestra	6,2	[Lt/min]
Flujo en TD (total)	108	[Lt/min]
Factor de dilución	17,42	[-]

El FE obtenido en los cálculos anteriores será multiplicado por 17,42 para obtener el valor real de material particulado y carbono negro emitido por el horno.

8.3 Resultados Material particulado

En la tabla 28 se muestran los resultados obtenidos para cada mezcla de combustible, se realizaron 3 experiencias con el fin de tener una muestra representativa y valores estadísticos.

Tabla 28. Material particulado PM1, PM2,5 y PM 10 para las mezclas evaluadas						
Mezcla	Material Particulado	E1	E2	E3	Promedio	Desviación Estándar
		µg/MJ	µg/MJ	µg/MJ	µg/MJ	µg/MJ
B0	PM 10	23,7	11,6	8,4	14,6	8,1
	PM2,5	23,0	11,0	8,1	14,0	7,9
	PM1	19,2	8,8	6,9	11,6	6,6
B5	PM 10	6,4	23,2	23,5	17,7	9,8
	PM2,5	5,6	22,4	23,0	17,0	9,9
	PM1,0	4,8	18,9	19,4	14,4	8,3
B20	PM 10	8,9	8,7	12,8	10,1	2,3
	PM2,5	8,6	8,4	12,2	9,7	2,1
	PM1	7,7	7,7	10,5	8,6	1,6
B50	PM 10	3,6	2,4	12,8	6,3	5,7
	PM2,5	3,4	2,3	12,1	5,9	5,4
	PM1	2,9	2,0	10,5	5,2	4,7

Para la mezcla B0 los tres experimentos fueron realizados el mismo día bajo las mismas condiciones de ensayo, aun así se puede observar que con cada experimento hay una disminución del material particulado, esta tendencia le quita representatividad al promedio realizado. La muestra más representativa sería el experimento 3 donde se considera que hay un mayor grado de estabilidad.

Para la mezcla B5 el primer experimento generó emisiones que difieren bastante de los otros dos experimentos realizados posteriormente, esto se explica porque fue realizado en un día distinto a los ensayos dos y tres, lo que significa condiciones ambientales diferentes como bien se puede apreciar en el gráfico 5. La temperatura ambiente y el porcentaje de humedad relativa al ambiente influyen de manera importante en la combustión y material el particulado emitido.

El tercer experimento de la mezcla B20 y B50 se realizó al día siguiente donde la temperatura ambiente fue una temperatura más baja y la humedad relativa del ambiente subió entre 10 y 15 puntos porcentuales. Como podemos ver estos cambios generaron un aumento en el material particulado.

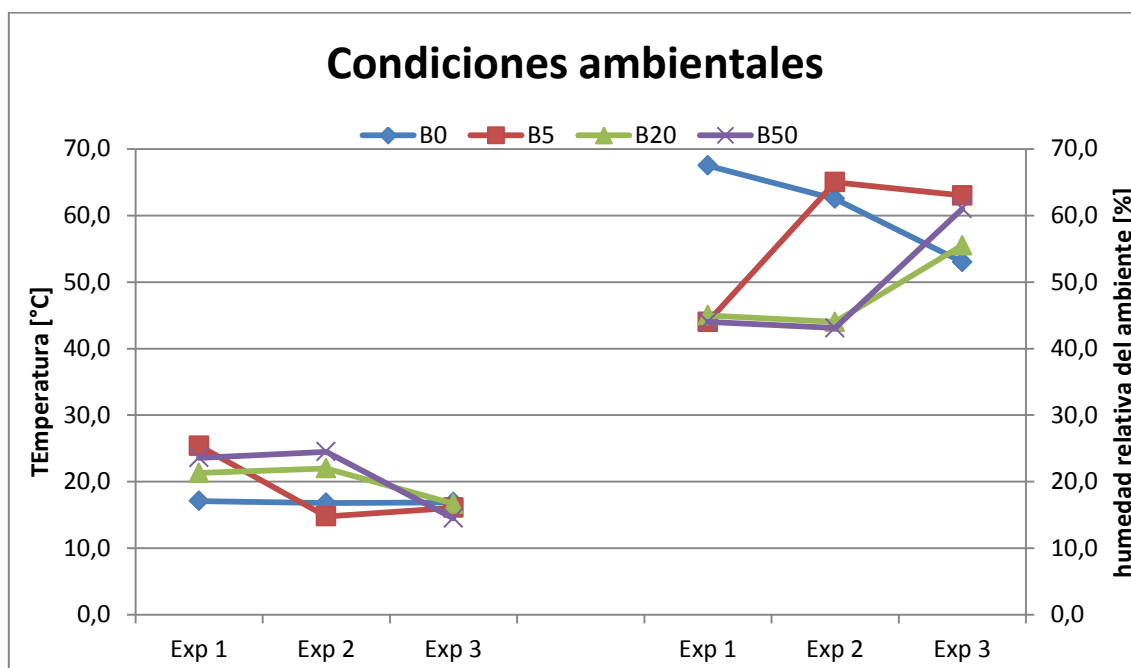


Gráfico 8. Condiciones ambientales durante los experimentos

8.4 Resultados carbono Negro

En la tabla 29 se muestran los valores obtenidos de Carbono Negro para las diferentes mezclas evaluadas en el experimento.

Tabla 29. Carbono negro en gases de escape producto de la combustión de mezclas						
Mezcla	Unidad	Experiencia 1	Experiencia 2	Experiencia 3	Promedio	Desviación Estándar
B0	µg/MJ	5.1	5.6	10	7	2.9
B5	µg/MJ	26.5	17.2	21.9	21.9	4.6
B20	µg/MJ	24.9	10.7	6.2	13.9	9.8
B50	µg/MJ	3.9	4.1	7.4	5	1.9

Como se vió en el análisis del material particulado se considera que para la mezcla B0 el ultimo experimento sea el más representativo, no obstante en este caso el tercer valor aumenta sin haber una tendencia. Lo mismo se puede apreciar en la mezcla B5 y B20 donde tampoco se logra confirmar una tendencia. A pesar de la dispersión se logra observar que la mezcla B50 posee emisiones menores al diésel en sus tres experimentos.

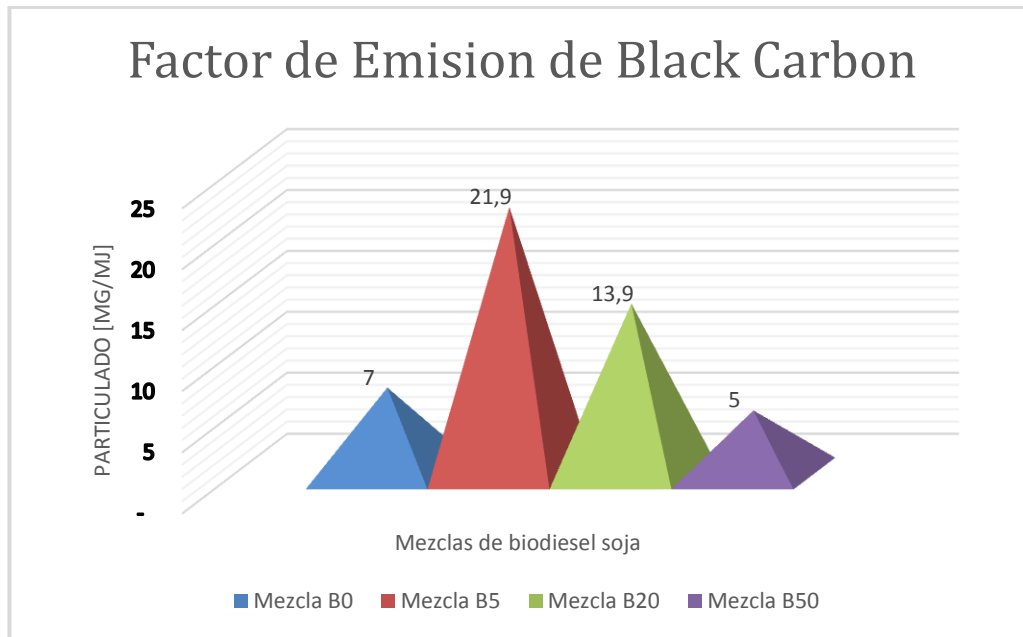


Gráfico 9. Factor de emisión de mezclas evaluadas

8.5 Metodología para gases de escape

El Analizador de gases de escape Testo entrega los resultados de los gases de escape en partículas por millón (ppm). Para poder trabajar con los datos de la misma manera con la que se trabajó con el material particulado se traducirán estos valores a masa por unidad de volumen, como se muestra en la ecuación (8.4)

$$X \left[\frac{mg}{Nm^3} \right] = \frac{M * ppm}{24,45} \quad (8.4)$$

El número 24.45 en la ecuación anterior es el volumen (litros) de un molar (gramo de peso molecular) de un gas o vapor cuando la presión es 1 atmósfera (760 torr o 760 mm Hg) y a 25°C. M es masa molar del gas a evaluar.

Para convertir ppm a mg/m³ en otras temperaturas y presiones, se debe calcular el volumen de 1 gramo de peso molecular de un contaminante transportado por aire usando la fórmula:

$$V = (RT / P) \quad (8.5)$$

En donde R es la constante ideal de gas; T, la temperatura en kelvin (273.16 + T°C); y P, la presión en mm Hg. Esta información puede ser sustituida en las fórmulas para la conversión entre mg/m³ y ppm.

$$\frac{mg}{m^3} = \left(\frac{P}{R * T} \right) * M * ppm = \frac{P * M * (Gas \text{ en } ppm)}{62,4 * (273,15 + T_{gas})} \quad (8.6)$$

Donde:

- R: 62.4 cuando la temperatura (T) está en kelvins, K
- M: Masa molar
- P: Presión expresada en unidades de mm Hg
- T_{gas}: Temperatura del gas a Evaluar

Una vez obtenido los valores en mg/m^3 del gas de interés se procede a multiplicar cada valor puntual por el volumen de gas que pasa por el ducto de gases de escape cada seis segundos y dividir por el combustible utilizado en dicha experiencia como lo muestra la ecuación 8.1. Luego este FE en función del combustible es dividido por el PCI de la mezcla utilizada en el experimento como lo señala la ecuación 8.2 para finalmente obtener una tabla 30 que muestra valores de emisión en función de la energía.

Tabla 30. Factor de Emisión de gases de combustión de mezclas diésel-biodiesel						
		Factores de emisión [mg/MJ]				
Mezclas	Experimento	CO ₂	CO	SO ₂	NO	NO _x
B0	E1	52.704	8,1	-	80,9	130,5
	E2	55.954	2,7	-	15,7	25,4
	E3	47.518	1,4	-	-	21,1
	Promedio	52.059	4,1	-	32,2	59,0
	Desviación Estándar	4.254	3,5	-	42,9	62,0
B5	E1	41.674	0,6	-	12,8	20,5
	E2	42.531	0,9	-	11,6	18,6
	E3	49.321	2,9	-	14,3	23,1
	E4	50.756	1,5	-	13,9	22,5
	Promedio	46.071	1,5	-	13,1	21,2
	Desviación Estándar	4.632	1,0	-	1,2	2,0
B20	E1	67.070	1,2	-	19,3	31,1
	E2	60.774	3,2	-	17,6	28,3
	E3	52.438	1,2	-	14,8	23,9
	promedio	60.094	1,9	-	17,2	27,7
	Desviación Estándar	7.340	1,1	-	2,3	3,6
B50	E1	60.048	0,2	-	17,8	28,5
	E2	59.226	1,1	-	18,0	29,0
	E3	43.124	0,6	-	10,6	17,1
	promedio	54.133	0,6	-	15,4	24,9
	Desviación Estándar	9.542	0,4	-	4,2	6,8

La mezcla B0 muestra valores bastante dispersos en el CO₂ con una leve disminución en la última experiencia, mientras que el CO exhibe una disminución con cada experimento realizado. Los datos de NO y NO_x no son concluyentes para esta mezcla.

La mezcla B5 presenta valores ascendentes en la emisión del CO₂ mientras que el CO no manifiesta ninguna tendencia. Por otro lado el NO y NO_x exponen valores bastante parejos.

En la mezcla B20 y B50, considerando que los dos primeros experimentos son los más representativos se puede apreciar que las emisiones de NO y NO_x no revelan una gran influencia por parte del porcentaje de biocombustible utilizado.

8.5.1 Metodología para Eficiencia de combustión

Para obtener la eficiencia de combustión es necesario calcular el factor de emisión estequiométrico de CO₂. Para conocer este FE estequiométrico es necesario saber la estequiometria de los combustibles (anteriormente calculados), donde posteriormente se ve la estequiometria de los gases de combustión, los cuales se detallan en la tabla 31.

Tabla 31. Estequiometria de los combustible y gases de combustión											
Combustible		C	H	S	O	CO2	H2O	N2	SO2	Masa CO ₂	Masa Comb
Peso molecular		12	1,008	32	16	44	18	46	64	gr	Kg
Diésel	[mol]	7,25	12,98	0	0	7,25	6,5	39,4	0	319	0.1
Soja		18,81	34,49	0	2	18,81	17,2	103,1	0	827.6	0.3

Conocidos ambos valores se hará uso de la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \frac{FE_{CO_2 \text{ estequimétrico}}}{FE_{CO_2 \text{ Real}}} \quad (8.7)$$

8.1 Resultados de Factor de Emisión de gases de escape

Utilizando la ecuación 8.2 para obtener el FE_{est} y con los datos de CO₂ calculados en la tabla 31 se podrá obtener por medio de la ecuación 8.7 la eficiencia para cada experimento, resultados que se muestran en la tabla 32

Tabla 32. Eficiencia de combustión promedio para cada mezcla evaluada			
Mezcla	FE CO ₂ estq	FE CO ₂ real	Eficiencia
B0	74.718	52.704	71%
		55.954	75%
		47.518	64%
B5	75.242	41.674	55%
		42.531	57%
		49.321	66%
B20	76.814	67.070	87%
		60.774	79%
		52.438	68%
B50	79.957	60.048	75%
		59.226	74%
		43.124	54%

Se esperaba que a medida que el porcentaje de biodiesel aumentaba en la mezcla la emisión de CO₂ también lo hiciera, ya que el contenido de oxígeno en la mezcla iba aumentando, lo que suponía un menor exceso de aire requerido, situación que en la práctica no se evidenció. En líneas generales no se logra apreciar una tendencia, pero siguiendo la misma tendencia obtenida del análisis del material particulado y utilizando los datos más representativos, se puede considerar que la mezcla B20 ofreció una mejor eficiencia que el resto de las mezclas.

9. Conclusiones

Se implementó del horno isotérmico junto con un quemador de petróleo diésel comercial de baja potencia y las termocuplas junto con su sistema de adquisición de datos en línea. Se pudo medir el comportamiento térmico de la cámara de combustión y sus respectivos gases, realizar lecturas del material particulado y obtener el registro el agua de circulación del horno con éxito, todo esto respetando los protocolos de seguridad impuestos por la universidad y el departamento de Ingeniería Mecánica de la USM . Esto permitió realizar un análisis correcto de la eficiencia tanto del horno como la eficiencia de combustión.

Se pudo instalar el túnel de dilución dispuesto por el proyecto con éxito, por otro lado se logró trabajar con la bomba de vacío acoplada al túnel de dilución y se pudo encontrar el voltaje bajo el cual se desempeñaría la bomba (20 Volt) y que lograra la succión necesaria para realizar un muestreo isocinético. Este voltaje regulado permitió una succión sin que los instrumentos se saturaran y que a la vez pudieran registrar lecturas estables.

En cuanto a los gases de interés, las lecturas realizadas durante los experimentos muestran rangos de emisiones dentro de la normalidad. Por medio de un balance energético se obtuvo las energías referenciales para ser comparadas en el mismo proceso de combustión haciendo uso de combustibles con diferente contenido de biodiesel. En relación al desempeño de las mezclas, el B20 brinda la mejor eficiencia de combustión producto de un alto factor de emisión de CO_2 , 83% y 60.094 [mg/MJ], respetivamente, sin embargo con los datos obtenidos no se logra apreciar una tendencia entre la eficiencia de combustión y el porcentaje de biodiesel en las mezclas evaluadas. Se propone disminuir el exceso de aire para todas las mezclas a costa de un aumento en la emisión de CO, ya que las emisiones de este gas bordeaban los límites inferiores de acuerdo a los estándares de normalidad, todo esto con el fin de encontrar un punto de mayor emisión de CO_2 sin que se excedan los rangos típicos de CO.

Otro factor de emisión importante a considera son los MP10, MP2,5 y MP1. En este sentido se logra ver una tendencia muy clara, en todas las mezclas las emisiones de PM1 representan más del 80% del material particulado menor a 10 micras, esto es de vital importancia ya que a medida que el particulado disminuye en tamaño supone un riesgo mayor para la salud de las personas expuestas a estos particulados. La mezcla B5 tiene la singularidad de emitir un mayor contenido de particulado en los 3 ensayos, este comportamiento destaca a pesar de haber trabajado bajo condiciones ambientales similares a las demás mezclas. Luego se logra apreciar un patrón, y es que a medida que se incorpora más biodiesel a la mezcla disminuye el material particulado en las tres dimensiones de particulado estudiadas.

10. Consideraciones

Se logró implementar el horno isotérmico de manera eficaz, respetando los protocolos de seguridad que solicitó la universidad y el departamento de Mecánica de la UTFSM. En relación a la configuración del horno con su sistema de enfriamiento se considera insuficiente, el calor liberado por el radiador ubicado a los pies del tanque de expansión no fue capaz para liberar el calor absorbido por el agua en el intercambiador de calor del horno. Esto produjo un aumento paulatino de la temperatura dentro del horno que oscilaba entre los 200 y 250 °C. Se sugiere cambiar el radiador actual por uno de mayor tamaño que logre desechar el calor suficiente para mantener la temperatura constante dentro del horno.

Se tuvieron algunos problemas durante las pruebas. Las pruebas realizadas con mezcla B50 generaron problemas en la bomba de inyección, ésta arrojó presiones muy fluctuantes. La presión y la llama se tornó inestable y con ellos la combustión disminuyó en eficiencia y aumento la cantidad de particulado en los gases de escape. Se concluye que hay que tener ciertos cuidados a la hora de usar biodiesel en quemadores industriales, estos son, partir y finalizar la jornada de combustión con diésel puro, esto con el propósito de evitar problemas de estancamiento al enfriarse el biodiesel al interior del sistema de inyección.

Para futuros proyectos que involucren varias aristas de investigación pero que requieran de los mismos instrumentos, se sugiere contar con más de un instrumento en las áreas que se investiguen, esto le dará continuidad a las investigaciones comprometidas. Para garantizar consistencia en las mediciones es necesario también realizar una correcta calibración de los instrumentos.

Para futuras mediciones realizadas en el horno se sugiere limpiar el túnel de dilución después de cada mezcla evaluada, esto disipará cualquier error atribuible a particulado presente en el túnel de dilución

Propuestas de trabajo futuro

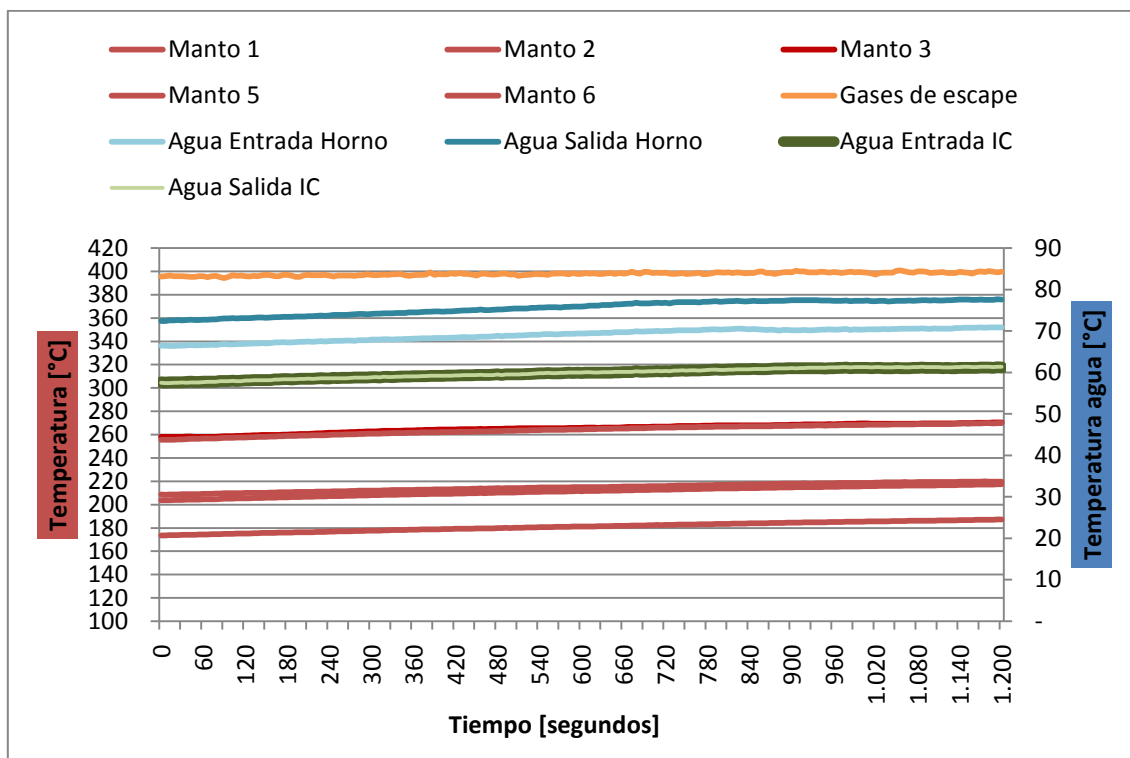
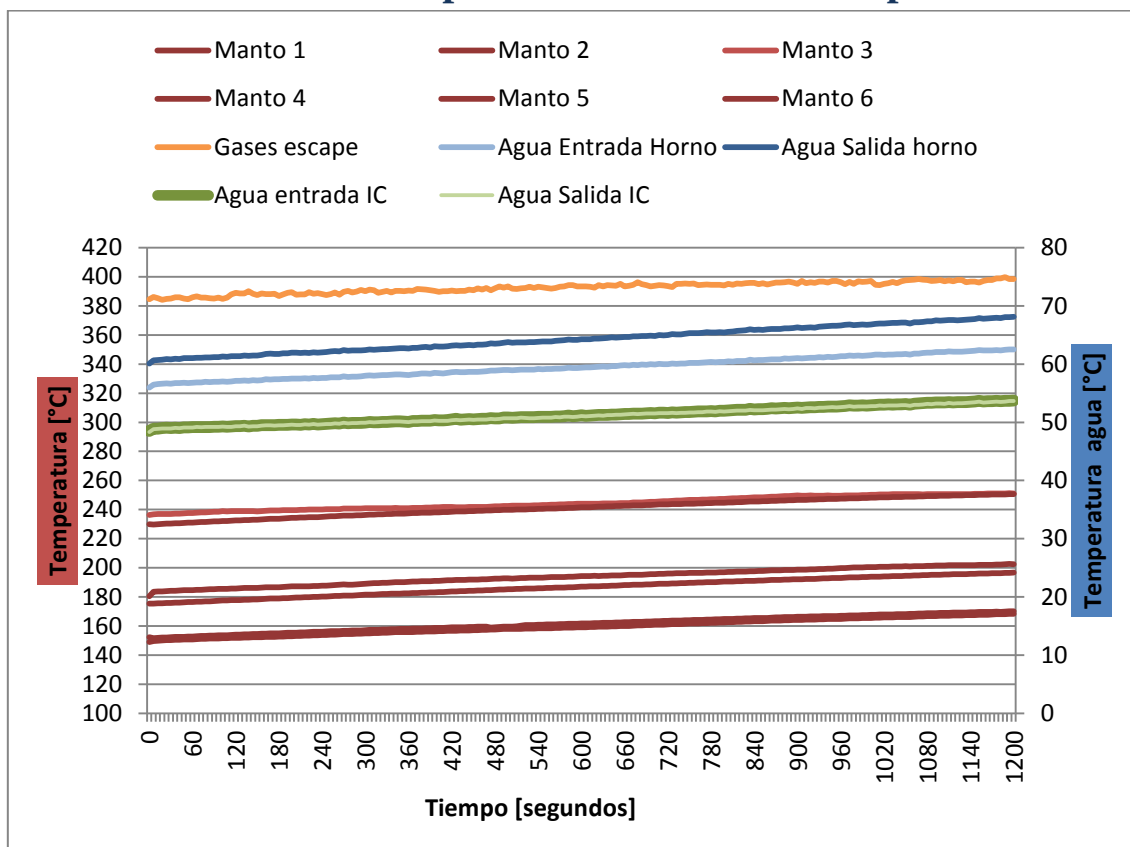
- Implementar un radiador capaz de liberar el calor suficiente para generar una isoterma clara al interior del horno
- Realizar pruebas de optimización para rangos más variados de exceso de aire.
- Realizar estudios de biodiesel graso animal, de palma y aceites en desuso.

11. Referencias

- C. Carraretto, A. Macor, A. Mirandola , A. Stoppato, S. Tonon. *Biodiesel as alternative fuel: Experimental analysis*. Padova, Italia: Department of Mechanical Engineering, University of Padova, 2004.
- C. Carraretto, A. Macor, A. Mirandola. *Biodiesel as alternative fuel: Experimental analysis and energetic evaluations*. Padova: Cience Direct, 2004.
- Canalini F, Pascuzzi S, Saponaro A. *Experimental Analysis of Combustion Processes in Thermal Plants fuelled*. L'Aquila: Proceedings of 54v ATI Congress, 1999.
- Cavieres, Patricio. *El Biodiesel en Chile*. Agosto de 2011. <http://www.ingenierosagronomos.cl/archivos/590>.
- Centro Avanzado de Gestión, Innovación y Tecnología para la Agricultura. «Evaluación del Potencial Productivo de Biocombustible en Chile con Cultivos Agrícolas Tradicionales.» Valparaíso , 2007.
- Centro de Estudios Ambientales. «Análisis y generación de base de datos de potencial energético.» Valparaíso, 2009.
- Demirbas, Ayhan. *Importance of biodiesel as transportation fuel*. pag 3: Energy Policy, 2007.
- Duffy, Patrick. *On the constitution of stearine*. Londres: Quarterly Journal of the Chemical Society of London, 1853.
- Electricidad. *Electricidad, La Revista energética de Chile*. 2 de Enero de 2011. <http://www.revistaei.cl/reportajes/con-algas-se-espera-producir-biocombustibles-chileno/>.
- Fuenzalida, Mónica Javiera Díaz. «Lista de verificación para estudios de impacto ambiental de la producción de biodiésel.» Santiago, Chile, 2008.
- Hernández, Pedro Nel Benjumea. «Caracterización del biodiésel de aceite de palma y su mezcla con diésel convencional.» En *Biodiésel:Producción, calidad y caracterización*, de Pedro Nel Benjumea Hernández, 123. Editorial Universidad de Antioquía, 2009.
- Knothe, Gerhard. «La historia de los combustibles diésel a base de aceite Vegetal.» En *El manual de Biodiesel*, de Gerhard Knothe. AOCS Press, 2005.
- Korn, Patricio Cavieres. *ElectroIndustria*. Junio de 2011. <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=959>.
- Ministerio de economía, reconstrucción y fomento. *aprueba definiciones y especificaciones de calidad para la producción, importación, transporte,*

- almacenamiento, distribución y comercialización de bioetanol y biodiesel.* Santiago: Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2008.
- MMA. <http://www.mma.gob.cl/retc/1279/article-43790.html>. 2016.
- NRDC. «Limpiando el aire de America latina.» 2014.
- NREL. «Biodiesel Handling and Used Guide.» *National Renewable Energy Laboratory*, 2009.
- OCDE/FAO. *OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2013-2022*. Texcoco: OCDE Library, 2013.
- S. Win Lee, T. Herage, B. Young. *Emission reduction potential from the combustion of soy methyl ester fuel*. Ottawa: CANMET Energy Technology Centre, Natural Resources Canada, 2004.
- S. Win Lee, T. Herage. B. Young. *Emission reduction potential from the combustion of soy methyl ester fuel*. Ottawa: Science Direct, 2004.
- Sarmiento, Rocio. «Propiedades físicas y químicas del biodiesel vs petroleo diesel.» *Energia a debate*, 2008.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. «10. Estimación de emisiones mediante factores de emisión.» En *Guia de elaboración y uso de inventarios de emisiones*, de Instituto Nacional de Ecología, 175. México, 2005.
- Tejedor, Ascensión Sanz. *Química Orgánica Industrial*. 26 de septiembre de 2014. <http://www.eii.uva.es/organica/qoi/tema-02.php>.
- Wendy Espinoza de Aquino, Mónica Goddard Juárez, Claudia Gutiérrez Arellano y Consuelo Bonfil Sande. «Los biocombustibles.» *¿Cómo Ves?*, 2009.
- Wikipedia. *Wikipedia*. 27 de Mayo de 2016. <https://es.wikipedia.org/wiki/Biodi%C3%A9sel>.
- Wompner G., Fredy H. «Biocombustibles en Chile ¿Una alternativa factible?» *Revista Desarrollo Local Sostenible*, 2009: 2.

Anexo A – Perfil de temperaturas durante los experimentos



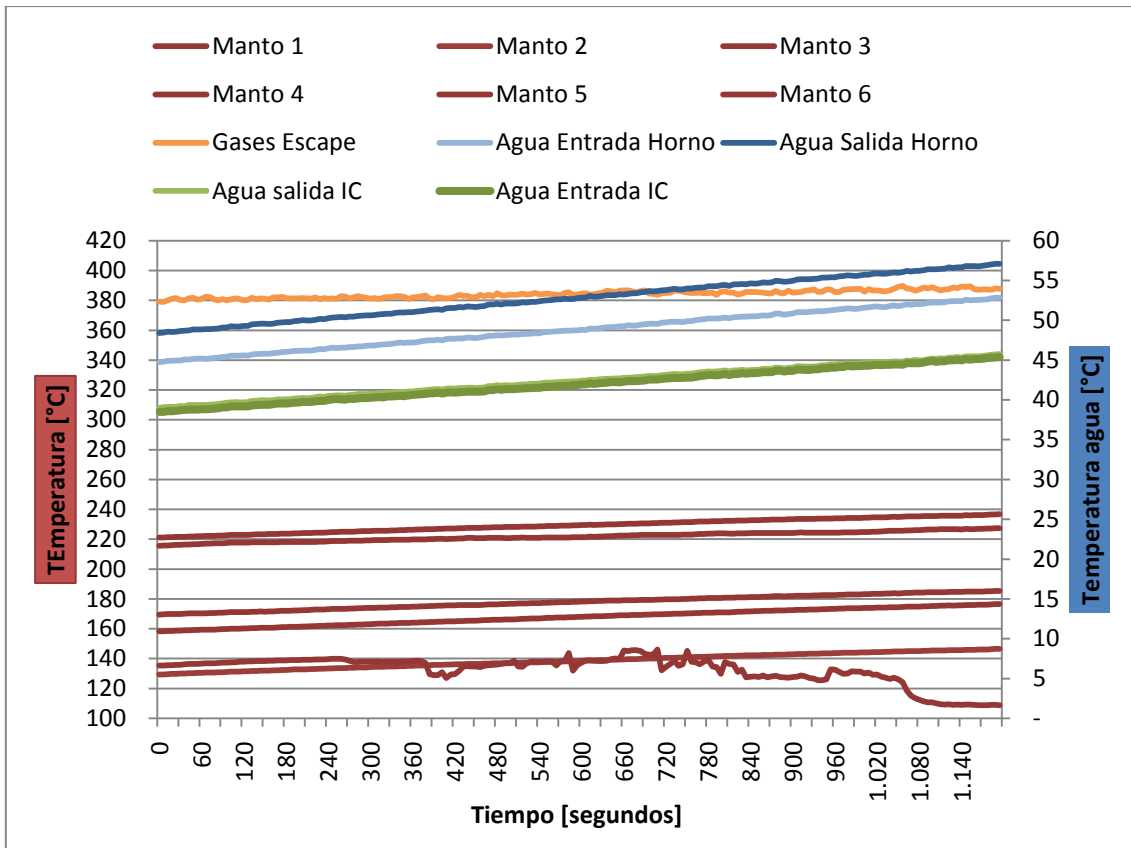


Gráfico 12. Perfil de temperatura de Experimento 2 mezcla B5

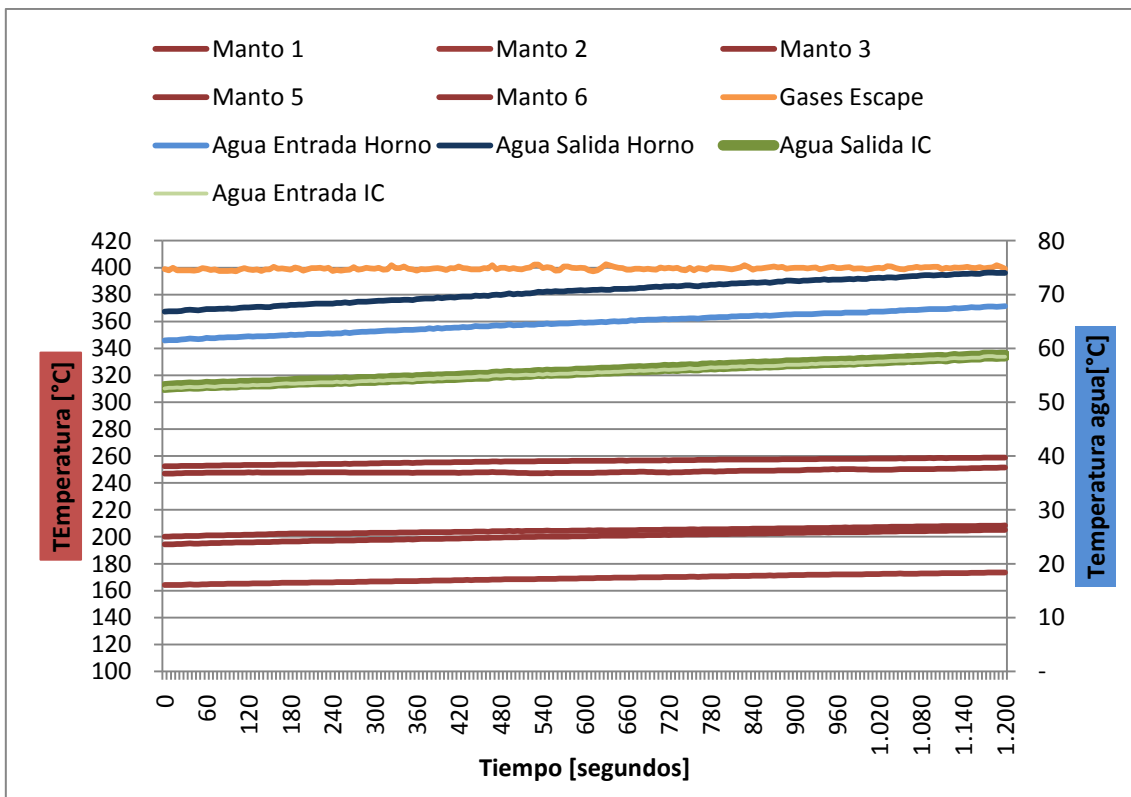


Gráfico 13. Perfil de temperatura de Experimento 3 mezcla B5

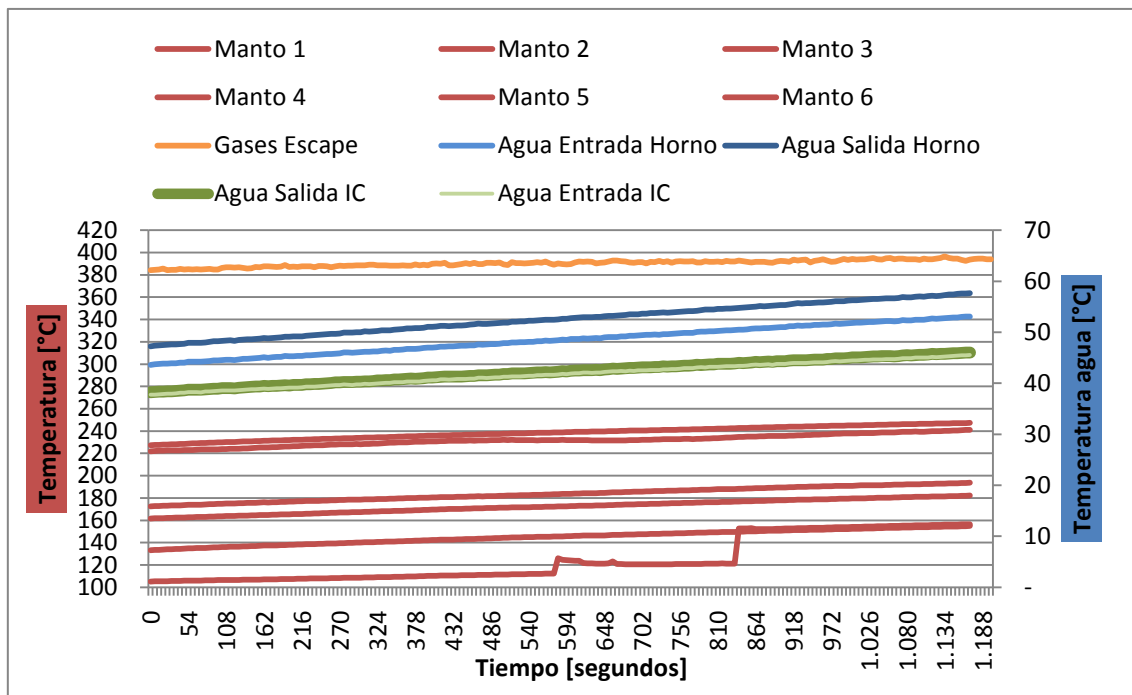


Gráfico 14. Perfil de temperatura de Experimento 4 mezcla B5

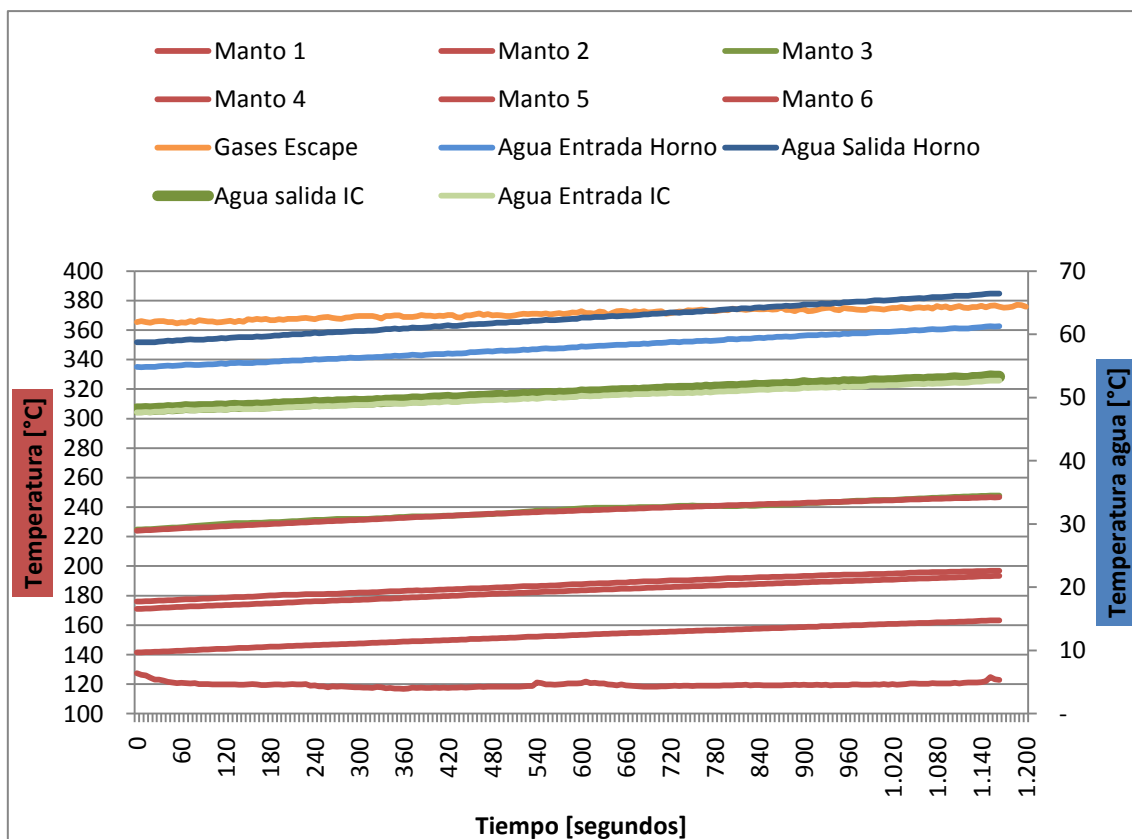
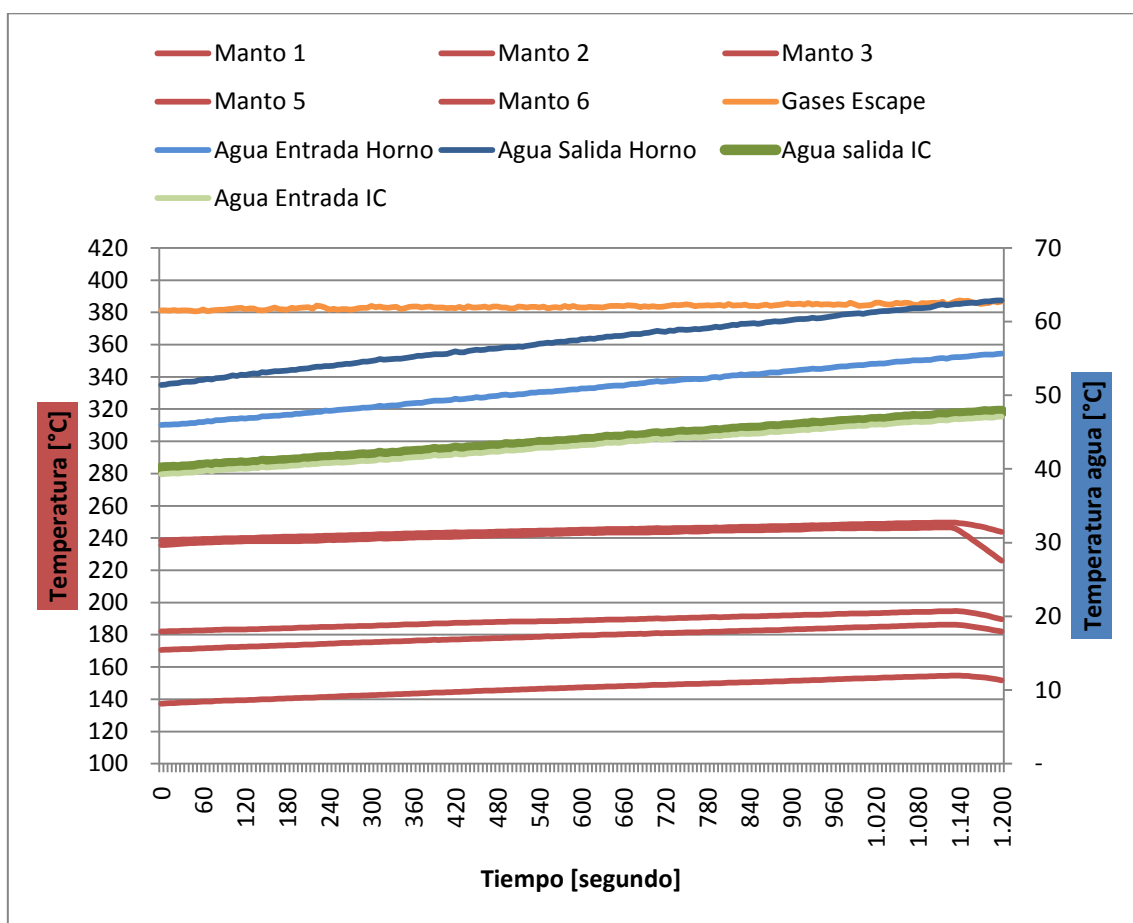
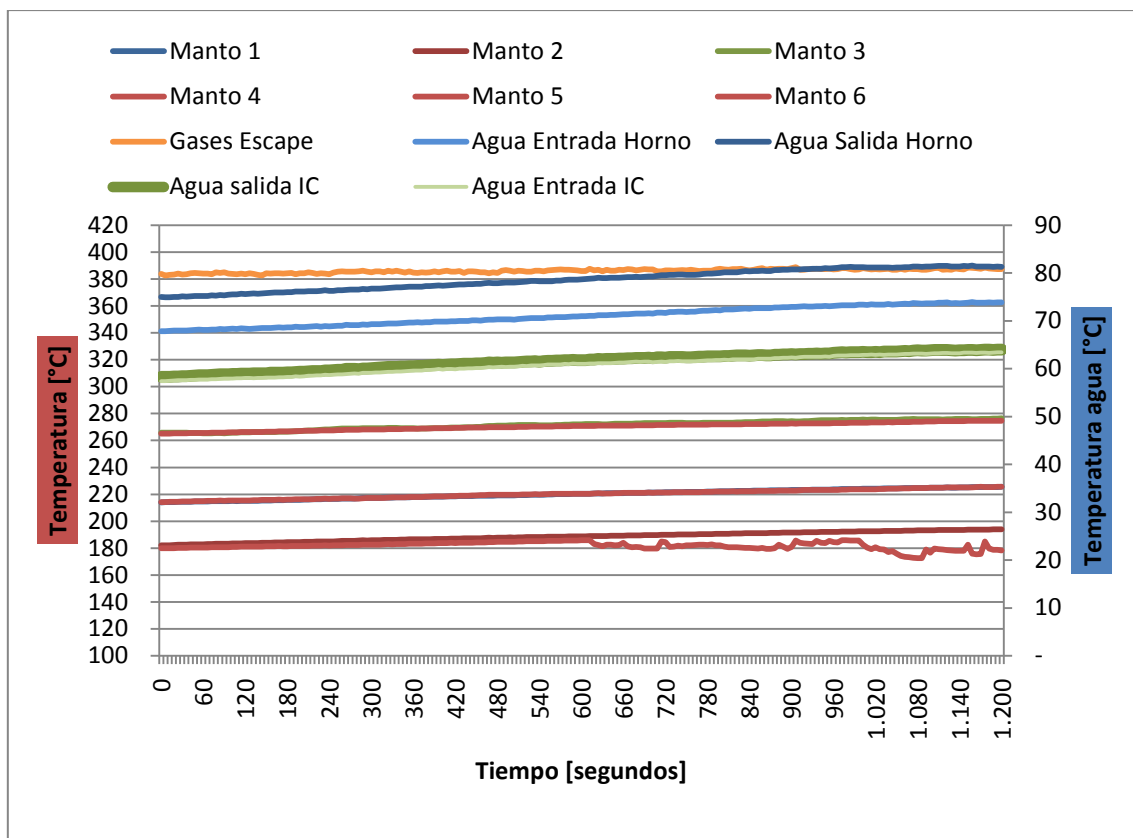


Gráfico 15. Perfil de temperatura de Experimento 1 mezcla B20



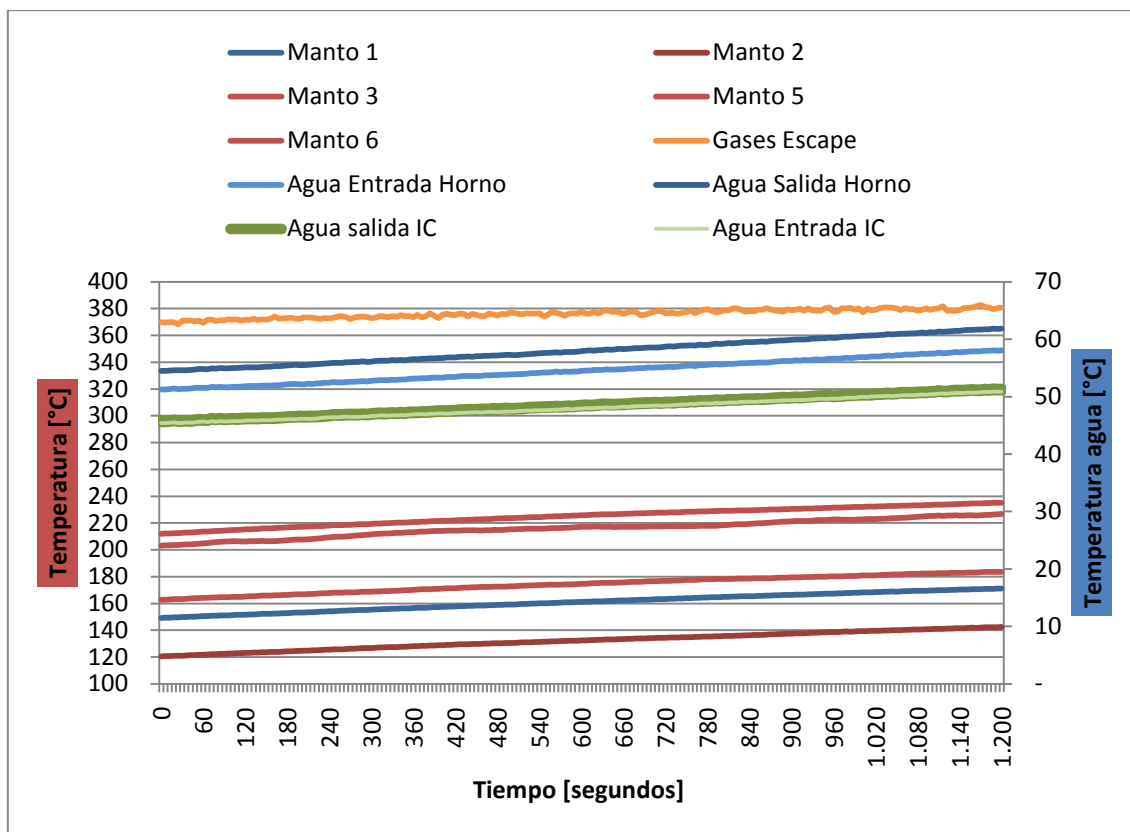


Gráfico 18. Perfil de temperatura de Experimento 1 mezcla B50

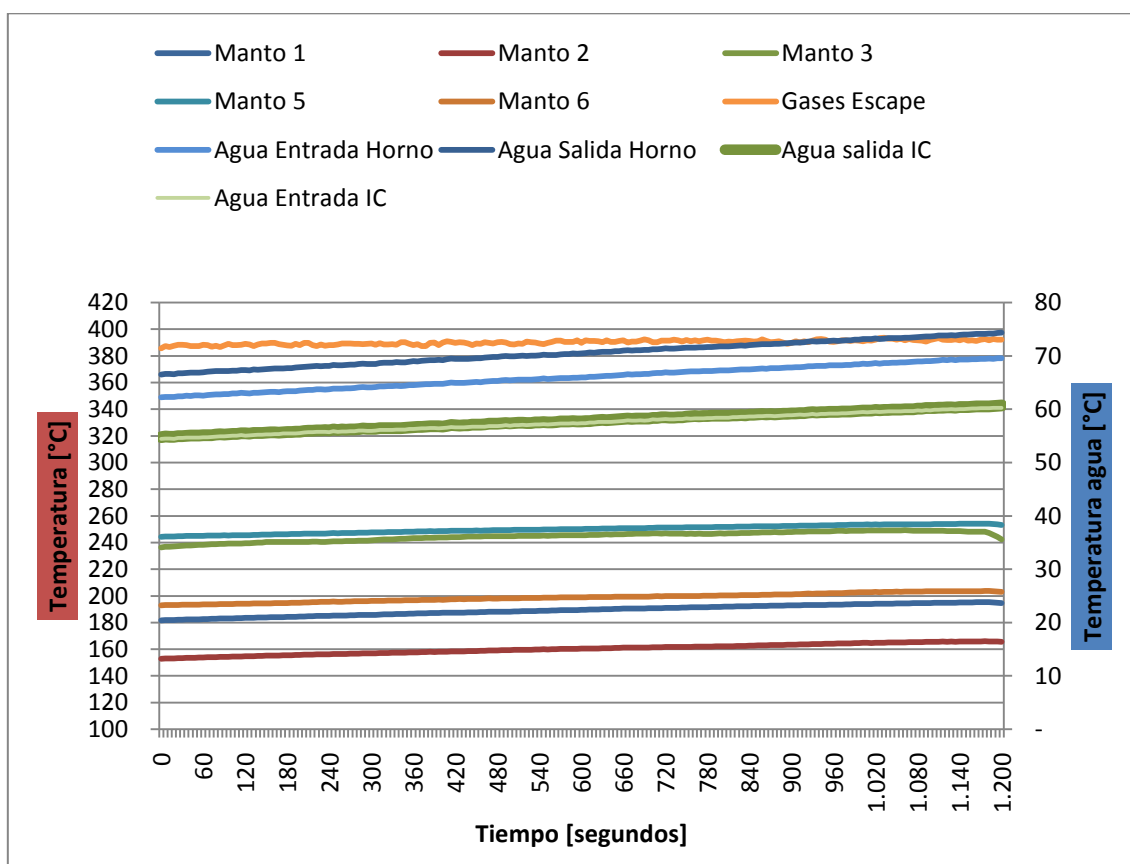


Gráfico 19. Perfil de temperatura de Experimento 2 mezcla B50

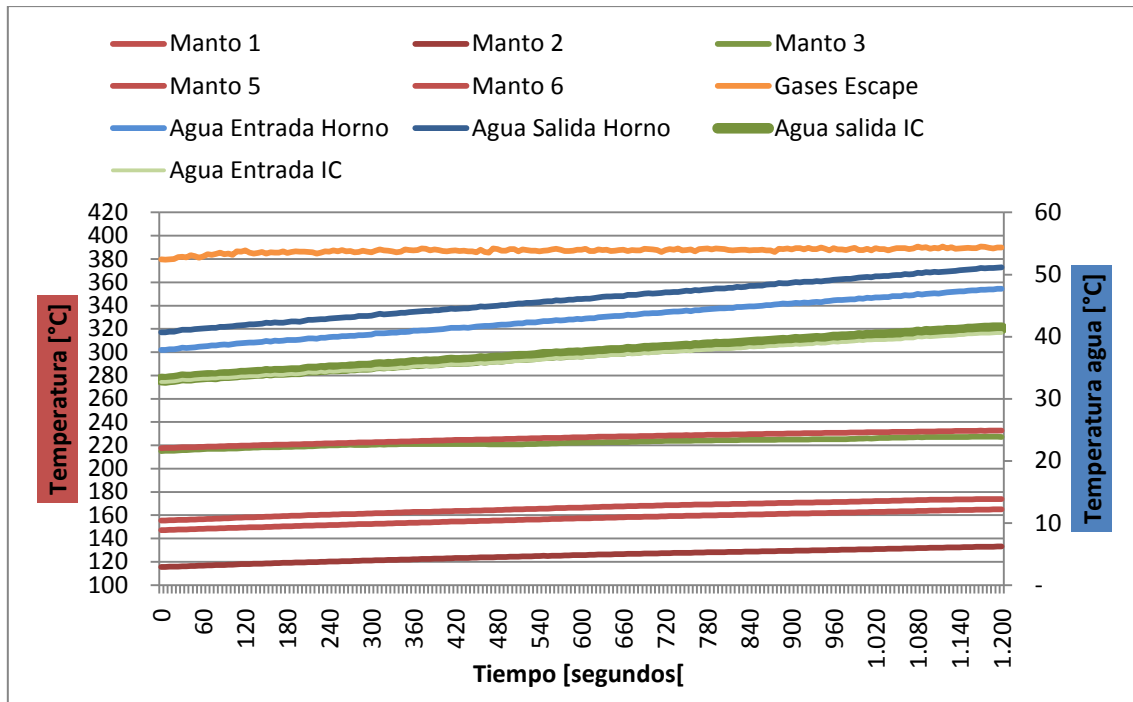


Gráfico 20. Perfil de temperatura de Experimento 3 mezcla B50