

**EFFECTO DEL FACTOR DE AIRE EN LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE
LLAMA PARA LLAMAS PREMEZCLADAS DE BIOCOMBUSTIBLES PUROS A
BASE DE SOYA Y CANOLA Y MEZCLAS CON DIÉSEL**

JUAN SEBASTIÁN GÓMEZ MEYER

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2011

**EFFECTO DEL FACTOR DE AIRE EN LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE
LLAMA PARA LLAMAS PREMEZCLADAS DE BIOCOMBUSTIBLES PUROS A
BASE DE SOYA Y CANOLA Y MEZCLAS CON DIÉSEL**

JUAN SEBASTIÁN GÓMEZ MEYER

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO**

Director

Ing. JABID QUIROGA

Magister, Ingeniero Mecánico

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2011

AGRADECIMIENTOS

Primero quiero agradecer a mis papás, sin ellos no estaría logrando nada de lo que hoy en día tengo. A mi mamá que toda la vida me ha dado los empujones que he necesitado, me sube el ánimo cuando no me siento bien y me has demostrado que las cosas son posibles. A mi papá que siempre ha confiado en mí, y me ha dado todo el apoyo que he necesitado, gracias porque me has apoyado en todos los planes que he tenido. Gracias por darme todo lo que me han dado, nunca voy a alcanzar a agradecerles todo lo que han hecho por mí.

A mis hermanos que me han apoyado y me han ayudado muchas veces. Eduardo gracias por acompañarme en este proceso, gracias porque sé que puedo confiar en ud. Santiago gracias porque me está dando una enseñanza de vida al estar tanto tiempo por fuera y tan lejos, sé que no es fácil pero ojalá algún día pueda seguir sus pasos.

Al Dr. Gollahalli y el Dr. Parthasarathy que pusieron su confianza en mí para desarrollar este proyecto. A Vinay Signh y a todos los compañeros del laboratorio de combustión de la Universidad de Oklahoma que me ayudaron con este proyecto.

Al Ing. Jabid Quiroga, el director de este trabajo, que confió en mi trabajo y me ayudó a desarrollar el proyecto.

A Dios pues sin el nada se puede.

A mis abuelas que aunque ya no están conmigo, sé que estarían muy orgullosas de mí en este momento.

A mis compañeros de universidad, que me acompañaron durante estos 5 años de estudio. Gracias por todos los momentos que pasamos y sé que nos esperan muchas cosas buenas.

A todas las personas que confiaron en mí, y que me acompañaron en los momentos difíciles. Gracias por darme el apoyo que necesitaba y pase lo que pase siempre voy a agradecer esos momentos.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	15
2. MARCO TEÓRICO.....	18
2.1 REACCIONES QUIMICAS Y MEZCLAS REACTIVAS.....	18
2.1.1 Ecuaciones básicas de combustión para combustible fósiles	18
2.1.2 Aire teórico, exceso de aire y relación aire-combustible	19
2.2 COMBUSTIBLES LÍQUIDOS.....	20
2.2.1 DIESEL	20
2.2.2 BIODIESEL	23
2.2.3 MEZCLAS DE COMBUSTIBLES	25
2.3 FACTOR DE AIRE.....	26
2.4 CARACTERISTICAS DE LAS LLAMAS PREMEZCLADAS LAMINARES.....	28
2.4.1 Perfil de temperatura.....	28
2.4.2 Zonas de llama.....	28
2.5 FACTORES QUE AFECTAN LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LLAMA Y EL ESPESOR.....	29
2.5.1 Temperatura.....	29
2.5.2 Presión.....	29
2.6 ESTABILIZACIÓN DE LLAMA.....	30
3 DESCRIPCIÓN DEL BANCO Y DE LA METODOLOGÍA	31
3.3 CÁMARA DE COMBUSTIÓN	32
3.4 QUEMADOR.....	32
3.5 SISTEMA DE INYECCIÓN DE AIRE	33
3.6 SISTEMA DE INYECCIÓN DE COMBUSTIBLE.....	34
3.7 SISTEMA DE TUBERÍAS CON SISTEMA DE CALENTAMIENTO	35
3.8 PROTOCOLO DE LOS EXPERIMENTOS	36
3.9 CÁMARA FOTOGRÁFICA	38
3.10 CÁLCULO DEL CAUDAL DE AIRE	38
3.11 MEDICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA LLAMA	40

3.12	CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LLAMA.....	43
4.	ESCENARIOS DE PRUEBA.....	45
4.1	VARIACIÓN DEL FACTOR DE AIRE	45
4.2	VARIACIÓN DEL PORCENTAJE DE BIOCOMBUSTIBLE	46
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	47
5.1	VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LLAMA.....	47
5.1.1	Diesel	47
5.1.2	CME B25.....	48
5.1.3	CME B50.....	49
5.1.4	CME B75.....	50
5.1.5	CME	51
5.1.6	SME B25	52
5.1.7	SME B50	53
5.1.8	SME B75	54
5.1.9	SME	55
5.1.10	CME, Diesel y mezclas	56
5.1.11	SME, Diesel y mezclas	57
5.2	FORMA DE LA LLAMA.....	59
5.2.1	Diesel	59
5.2.2	CME B25.....	61
5.2.3	CME B50.....	63
5.2.4	CME B75.....	65
5.2.5	CME	67
5.2.6	SME B25	69
5.2.7	SME B50	70
5.2.8	SME B75	72
5.2.9	SME	73
5.2.10	CME, Diesel y mezclas	75
5.2.11	SME, Diesel y mezclas	76
5.3	PROCESO DE RETROCESO DE LLAMA – FLASHBACK.....	78

5.4 PROCESO DE LEVANTAMIENTO DE LLAMA – LIFT OFF	79
6. CONCLUSIONES	80
7. BIBLIOGRAFÍA.....	81
ANEXOS	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Contenido de azufre en el diesel en el mundo.....	22
Figura 2. Reducción contenido de azufre Diesel de Ecopetrol	22
Figura 3. Reducción de emisiones gases de efecto invernadero.....	24
Figura 4. Ciclo del carbón y la conversión de la energía solar.....	25
Figura 5. Arrestador de llama	30
Figura 6. Esquema del banco experimental.....	31
Figura 7. Quemador.....	32
Figura 8. Válvulas de control de presión.....	33
Figura 9. Medidor de caudal	34
Figura 10. Bomba de jeringa.....	35
Figura 11. Tuberías y sistema de calentamiento	36
Figura 12. Medición del diámetro del quemador.....	40
Figura 13. Medición de la base de la llama.....	41
Figura 14. Medición de la altura de la llama	42
Figura 15. Velocidad de propagación de llama vs factor de aire – Diesel	47
Figura 16. Velocidad de propagación de llama vs factor de aire – CME B25	48
Figura 17. Velocidad de propagación de llama vs factor de aire - CME B50.....	49
Figura 18. Velocidad de propagación de llama vs factor de aire - CME B75.....	50
Figura 19. Velocidad de propagación de llama vs factor de aire - CME	51
Figura 20. Velocidad de propagación de llama vs factor de aire - SME B25	52
Figura 21. Velocidad de propagación de llama vs factor de aire - SME B50	53
Figura 22. Velocidad de propagación de llama vs factor de aire - SME B75	54
Figura 23. Velocidad de propagación de llama vs factor de aire - SME	55
Figura 24. Velocidad de propagación de llama vs factor de aire – CME y Mezclas con Diesel.....	56
Figura 25. Velocidad de propagación de llama vs porcentaje de biocombustible – CME y Mezclas con Diesel	57
Figura 26. Velocidad de propagación de llama vs factor de aire – SME y Mezclas con Diesel.....	58
Figura 27. Velocidad de propagación de llama vs porcentaje de biocombustible – SME y Mezclas con Diesel	59
Figura 28. Altura de llama vs Factor de aire – Diesel	60
Figura 29. Fotografías llama diesel.....	61
Figura 30. Altura de llama vs factor de aire – CME B25	62
Figura 31. Fotografías llama CME B25.....	63
Figura 32. Altura de llama vs factor de aire – CME B50	64

Figura 33. Fotografías llama CME B50.....	65
Figura 34. Altura de llama vs factor de aire – CME B75	66
Figura 35. Fotografías llama CME B75.....	67
Figura 36. Altura de llama vs factor de aire – CME	68
Figura 37. Fotografías llama CME	68
Figura 38. Altura de llama vs factor de aire – SME B25	69
Figura 39. Fotografías llama SME B25.....	70
Figura 40. Altura de llama vs factor de aire – SME B50	71
Figura 41. Fotografías llama SME B50.....	71
Figura 42. Altura de llama vs factor de aire – SME B75	72
Figura 43. Fotografías llama SME B75.....	73
Figura 44. Altura de llama vs factor de aire – SME.....	74
Figura 45. Fotografías llama SME	74
Figura 46. Altura de llama vs factor de aire – CME y mezclas con diesel.....	75
Figura 47. Altura de llama vs porcentaje de combustible – CME y mezclas con diesel	76
Figura 48. Altura de llama vs factor de aire – SME y mezclas con diesel.....	77
Figura 49. Altura de llama vs porcentaje de combustible – SME y mezclas con diesel	77

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación combustibles diesel según estándar ASTM D-975	21
Tabla 2. Velocidad de propagación de llama Diesel.....	47
Tabla 3. Velocidad de propagación de llama CME B25	48
Tabla 4. Velocidad de propagación de llama CME B50	49
Tabla 5. Velocidad de propagación de llama CME B75	50
Tabla 6. Velocidad de propagación de llama CME.....	51
Tabla 7. Velocidad de propagación de llama SME B25	52
Tabla 8. Velocidad de propagación de llama SME B50	53
Tabla 9. Velocidad de propagación de llama SME B75	54
Tabla 10. Velocidad de propagación de llama SME	55
Tabla 11. Altura de llama - Diesel	59
Tabla 12. Altura de llama – CME B25	61
Tabla 13. Altura de llama – CME B50	63
Tabla 14. Altura de llama – CME B75	65
Tabla 15. Altura de llama - CME	67
Tabla 16. Altura de llama – SME B25.....	69
Tabla 17. Altura de llama – SME B50.....	70
Tabla 18. Altura de llama – SME B75.....	72
Tabla 19. Altura de llama – SME	73

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. ARTÍCULO CIENTÍFICO.....	84
ANEXO B. TABLAS DE CÁLCULO.....	100

RESUMEN

TITULO: EFECTO DEL FACTOR DE AIRE EN LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LLAMA PARA LLAMAS PREMEZCLADAS DE BIOCOMBUSTIBLES PUROS A BASE DE SOYA Y CANOLA Y MEZCLAS CON DIÉSEL *

AUTOR: JUAN SEBASTIÁN GÓMEZ MEYER **

PALABRAS CLAVES: Biodiésel, soya, canola, velocidad de propagación de llama, mezclas de combustibles, factor de aire, biocombustibles.

DESCRIPCIÓN:

En la actualidad se busca encontrar un suplente a los combustibles derivados del petróleo, debido a que las reservas cada vez se hacen menores. Además la contaminación debido a los gases de efecto invernadero producto de la combustión en los motores, es cada vez más crítica. Es por esto que la gran parte de la atención de las investigaciones se centra en los biocombustibles, estos presentan una fuente de energía renovable, que reduce las emisiones de los gases de efecto invernadero y que presenta propiedades muy parecidas a los combustibles derivados del petróleo. Este tipo de combustible hoy en día es muy utilizado no solamente en automóviles si no en aeronaves también debido a que requieren poca o ninguna modificación de los motores para utilizarlos. Además se pueden mezclar con diésel fácilmente.

Debido a que existen muchos tipos de vegetales y grasas animales de las cuales se puede extraer biocombustibles, se hace necesario hacer un estudio para caracterizar las propiedades de los que no se tiene mucha información. Actualmente dos de los biocombustibles más utilizados son los extraídos de la soya y canola. Diferentes estudios se han realizado sobre emisiones globales y en la llama, radiación, perfil de temperatura de la llama entre otros. Pero no existen datos acerca de la velocidad de propagación de la llama. Dado que esta última es una propiedad importante para la eficiencia del motor, este estudio se centra en analizar el efecto del factor de aire sobre esta para los biocombustibles y sus mezclas con diésel. Además analizar el efecto que tiene variar la cantidad de aire en la combustión sobre la forma de la llama.

** Trabajo de grado

*** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Ing. Jabid Quiroga

ABSTRACT

TITLE: EFFECT OF THE EQUIVALENCE RATIO ON THE FLAME SPEED FOR PREMIXED FLAMES OF SOY AND CANOLA BIOFUELS AND THEIR BLENDS WITH DIESEL*.

AUTHOR: JUAN SEBASTIÁN GÓMEZ MEYER**

KEY WORDS: Biodiesel, soy, canola, flame speed, blends of fuels, equivalence ratio, biofuels.

ABSTRACT:

Nowadays the world is looking for a substitute for petroleum based fuels; a reason for this is that the reservoirs existent are getting lower. Also the pollution generated by the greenhouse gases, products of the combustion in engines, is getting critical. This is why big part of the attention of the investigation worldwide is focused in biofuels. Biofuels present a renewable source of energy, which reduce emissions of greenhouse gases and present petroleum bases fuels like properties. This type of fuel is today used, not only in cars, but in aircraft also. This because biofuels can be used in most engines with a small change o none also can be blended with diesel easily.

There are a lot of vegetables and animal fats where biofuels can be obtained. So it becomes needed to study the characteristics of the fuels that have not been studied. Actually there are two biofuels that are been used in several countries which are fuels extracted from soy and canola. Different studies have been developed for these fuels as global emissions and in-flame emissions, radiation fraction, profile temperature and other. But there is no record about flame speed for these fuels. Since this property is useful to determine the engine efficiency, this study is focus on determine the effect of the equivalence ratio on the flame speed for the pure biofuels and their blends with diesel. Also analyze the effect of changing the air on the combustion on the shape of the flame.

** Graduate project

*** Faculty of Physical-Mechanical Engineering, School of Mechanical Engineering. Eng. Jabid Quiroga

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la búsqueda de fuentes de energía renovables se hace cada vez más importante. Las reservas de petróleo cada vez son menores, y dado a que el petróleo tarda muchos años en formarse, se debe buscar un remplazo para los combustibles tradicionales. Además la necesidad de encontrar una nueva fuente de energía que reduzca la contaminación es importante debido a los efectos que tiene el uso de combustibles derivados del petróleo. Entre estas fuentes de energía renovables se encuentran los combustibles alternativos. Uno de los combustibles alternativos más limpio, el metano, presenta muy bajas emisiones de gases que contaminan la atmósfera. Pero el problema de este combustible es su tamaño molecular, al ser más pequeño que otros combustibles se requiere más metano para recorrer la misma distancia que otro combustible. Otro tipo de tipo de combustible alternativo muy limpio es el hidrógeno, este emite únicamente vapor de agua y son muy eficientes, pero son difíciles de encontrar. Otra fuente de energía es la electricidad. Automóviles accionados por electricidad presentan una ventaja económica y ambiental muy grande. Pero presentan baja eficiencia luego sus aplicaciones se ven limitadas.

Los biocombustibles representan un grupo de combustibles alternativos que se están usando para diferentes automóviles y motores de aeronaves. Los biocombustibles presentan muchas ventajas frente a los combustibles tradicionales, entre estas la disminución de emisiones de gases que producen el efecto invernadero. Por el nombre de biocombustibles entendemos que son combustibles extraídos de organismos recientemente vivos o sus desechos. Entre los biocombustibles encontramos bioetanol, biodiesel y biogás.

El biodiesel presenta propiedades muy parecidas al diesel derivado del petróleo. Es por esto que se ha vuelto tan atractivo, ya que además de presentar similitudes en su comportamiento, es miscible con el diesel y reduce las emisiones de gases invernadero. Además de esto al ser proveniente de vegetales o grasas animales, se considera como una fuente de energía renovable. Al ser este un campo nuevo en la industria, y que no se tiene mucha información acerca de todas las propiedades de estos nuevos combustibles. Se hace importante hacer un estudio acerca de las características de estos.

Del resultado de la combustión de un combustible depende la cantidad de energía que este entregue. La combustión tiene diferentes factores que afectan la cantidad de energía que es liberada por el combustible. Entre estos factores se encuentran la temperatura, la presión y el combustible en sí. Existen propiedades que indican la eficiencia con la que un combustible es quemado. Estas propiedades son el número de cetano, la velocidad de combustión y la velocidad de propagación de llama. Esta última indica que tan rápido viaja la llama y en un motor afecta la eficiencia de este.

Existen muchas variedades de biocombustibles hoy en día, extraídos de diferentes vegetales o grasas animales. Dos biocombustibles muy usados hoy en día son los provenientes de la soya y canola. Estos son ampliamente usados en diferentes países como EUA y Argentina.

Diferentes estudios se han hecho para diferentes biocombustibles. Singh et al estudiaron la fracción de calor emitida por radiación y las emisiones globales de CO y NO_x en llamas laminares premezcladas de mezclas de Canola Methyl Ester (CME) y diesel No. 2 a factores de aire de 1.2, 2, 3 y 7. Esto con el fin de simular la combustión en los motores diesel de llamas parcialmente premezcladas y no premezcladas. Encontró que la fracción de calor emitida aumentó cuando se incrementa el factor de aire y disminuyó cuando se aumenta el porcentaje de CME en la mezcla. Las emisiones de óxidos de nitrógeno disminuyeron cuando el factor de aire aumento para todos los combustibles y también disminuyeron cuando se disminuyó el porcentaje de CME en las mezclas. En cambio las emisiones de monóxido de carbono aumentaron cuando el factor de aire aumentó para todos los combustibles y disminuyó cuando se aumentó el porcentaje de CME.

Cristian Aldana, desarrolló un estudio sobre las propiedades de combustión de llamas dispersas para soy methyl ester (SME) y canola methyl ester (CME) mezclados con diesel No. 2. Estudió las emisiones globales de estos combustibles puros y mezclados a 25, 50 y 75 por ciento con diesel. También midió las concentraciones de monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno en diferentes puntos de la llama. Encontró las fracciones volumétricas de hollín para cada combustible, entre otros. Erazo et al, obtuvieron las concentraciones radiales de NO, CO, CO₂ y O₂ y las distribuciones de temperatura para el CME y diesel puros. Se encontró que la temperatura de llama disminuyó más rápido para el CME que para el diesel y las llamas de CME produjeron menos concentraciones dentro de la llama de NO y Co que el diesel.

Habib et al, analizaron el comportamiento y emisiones de una turbina de 30kW usando Jet A, SME, CME, biodiesel a base de colza, biodiesel extraído de grasa de cerdo y mezclas de estos biocombustibles con Jet. Encontraron que la adición de biodiesel resultó en la disminución del empuje estático, la reducción del consumo de combustible y el aumento de la eficiencia termina. Mientras que las emisiones de CO y NO se redujeron al agregar biocombustibles.

En este estudio se busca evaluar la velocidad de propagación de llama de dos biocombustibles extraídos de soya y canola y sus mezclas con diesel, para diferentes factores de aire. Para esto se llevó a cabo la combustión en un quemador tipo Bunsen y se tomaron fotografías de la llama para diferentes factores de aire, variando posteriormente el porcentaje de biocombustible en la mezcla. El fin de este estudio es brindar mayor información acerca de estos combustibles, evaluándolos para diferentes casos de combustión encontrando la velocidad de propagación de llama y la forma que toma la llama para diferentes mezclas.

2. MARCO TEÓRICO

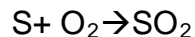
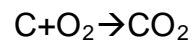
2.1 REACCIONES QUÍMICAS Y MEZCLAS REACTIVAS

Una mezcla reactiva consiste en un sistema de composición múltiple cuyos constituyentes pueden reaccionar químicamente entre sí. El estudio de sistemas de esta naturaleza es un sistema importante en la termodinámica química. El tema abarca tres aspectos principales que corresponden a tres leyes de la naturaleza: el principio de conservación de la materia, la primera ley de la termodinámica y la segunda ley de la termodinámica¹.

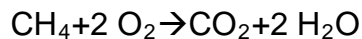
Cada reacción química tiene asociada una ecuación química. Una ecuación química expresa el principio de conservación de la masa en términos de la conservación de los átomos de las diversas especies que en ella se consideran.

2.1.1 Ecuaciones básicas de combustión para combustible fósiles

Los constituyentes susceptibles de ser quemados de un combustible son el carbono, el hidrogeno y el azufre, junto con compuesto. Si el combustible se quema por completo, es decir, si se libera completamente su energía química, todo el carbono se convierte en dióxido de carbono, todo el hidrogeno en vapor de agua y todo el azufre en dióxido de azufre. Las ecuaciones básicas para la combustión completa del carbono, del hidrogeno y el azufre se pueden escribir como:



La combustión completa de compuestos de los hidrocarburos da lugar a la formación de dióxido de carbono y de agua. Por ejemplo quemando metano (CH_4) se tiene:



¹ HUANG, Francis F. Ingeniería Termodinámica. México: Continental, 1994. P 659

Si el carbono no se quema completamente, se forma monóxido de carbono de acuerdo con la ecuación:



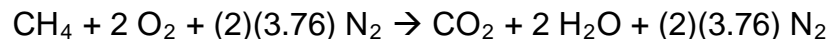
2.1.2 Aire teórico, exceso de aire y relación aire-combustible

El oxígeno requerido para la combustión se obtiene del aire, el que, prácticamente para cualquier cálculo relacionado con la combustión, se puede considerar como una mezcla de 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno en volumen. Así la composición del aire seco solo se puede escribir de la siguiente forma:

$$1 \text{ mol de } O_2 + 3.76 \text{ moles de } N_2 = 4.76 \text{ moles de aire}$$

$$1 \text{ kg de } O_2 + 3.30 \text{ kg de } N_2 = 4.3 \text{ kg de aire}$$

Resulta de interés calcular la cantidad mínima de aire seco que permite contar con oxígeno suficiente para la combustión completa. A esta cantidad se le conoce como aire teórico o aire estequiométrico. Para la combustión completa del metano con aire seco, se tiene:



Esto significa que se necesitan $(2)(3.76)$ moles de aire para quemar completamente 1 mol de metano.

En la gran mayoría de los problemas prácticos de combustión, se dificulta enormemente obtener, mezclas satisfactorias entre el combustible y el aire suministrado, por lo que resulta necesario disponer de aire en exceso para asegurar una combustión completa. Aire en exceso es el aire que se suministra para la combustión, además del teóricamente necesario por el combustible. La ecuación de la combustión completa se describe como:



La ecuación anterior se encuentra sin balancear, esta se balancea dependiendo de la cantidad de aire en exceso que se tenga en el proceso de combustión.

2.2 COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

Son, con pocas excepciones, mezclas de hidrocarburos derivados del petróleo por medio de procesos de refinación. En el petróleo se pueden distinguir diferentes compuestos. Además de hidrocarburos, el petróleo contiene pequeñas cantidades de oxígeno, nitrógeno, azufre, vanadio, níquel, hierro, trazas de otros metales e impurezas tales como agua y sedimentos².

Aunque los combustibles líquidos son mezclas de muchos hidrocarburos diferentes, por conveniencia en los cálculos suelen considerarse como uno solo. Por ejemplo a la gasolina, que consiste de una mezcla de hidrocarburos en el rango C_4 a C_{10} , principalmente, se trata como C_7H_{17} , el diesel como $C_{14.4}H_{24.9}$, etc.

La gasolina tiene una especificación llamada índice de octano, que mide el valor de antidetonante del combustible. Similarmente, para el combustible diesel se utiliza el índice de cetano, el cual es una medida de la calidad de ignición y de la suavidad de la combustión.

2.2.1 DIESEL

El diesel es el gasóleo extraído del petróleo. Es una mezcla de hidrocarburos que se obtiene por destilación fraccionada del petróleo entre 250 C y 350 C a presión atmosférica. El gasóleo es más sencillo de refinar que la gasolina y suele costar menos. Por el contrario, tiene mayores cantidades de compuesto minerales y de azufre.

El gasóleo tiene aproximadamente un 18 por ciento más de energía por unidad de volumen que la gasolina, lo que, sumado a la mayor eficiencia de los motores diesel, contribuye a que su rendimiento sea mayor. Es un combustible utilizado en motores de ignición por compresión, el cual es más eficiente en consumo de combustible respecto a los motores de ignición por chispa

² MARADEY CHARRIS, Juan Francisco. Termodinámica aplicada. Bucaramanga: UIS, 2002. P203

Tabla 1. Clasificación combustibles diesel según estándar ASTM D-975

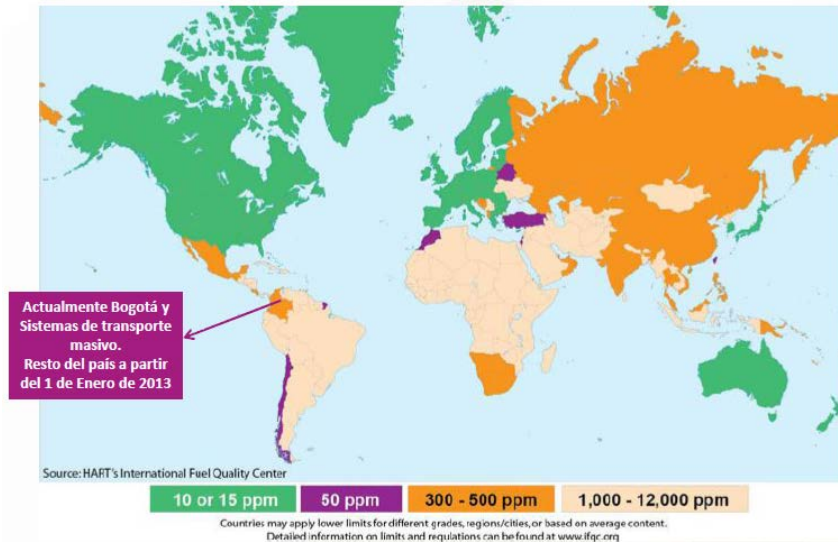
Grado	Características
Diesel N-1 S15	Combustibles de volatilidad intermedia entre el keroseno y los destilados medios, utilizados principalmente en maquinas diesel de alta velocidad; se distinguen entre si en el contenido de azufre.
Diesel N-1 S500	
Diesel N-1 S5000	
Diesel N-2 S15	Combustibles clasificados como destilados medios de menor volatilidad que el diesel N-1, utilizados en maquinaria de trabajo industrial; se distinguen entre por el contenido de azufre
Diesel N-2 S500	
Diesel N-2 S5000	
Diesel N-4	Comprende los destilados medios mas viscosos y sus mezclas con fuel oil; son utilizados en maquinas diesel de baja velocidad de operación.

Fuente: Foro-Buenas prácticas de manejo de biodiesel y sus mezclas. Norma ASTM D-975

Las normativas sobre emisiones en la Unión Europea han obligado a las refinerías a reducir drásticamente los niveles de esas impurezas, dando como resultado un combustible más limpio. Las regulaciones de Estados Unidos al respecto son menos exigentes, ya que allí se usa más la gasolina y sus regulaciones se han centrado en ésta.

La reducción de los niveles de azufre hace que sean menos contaminantes de por sí, y permiten el uso de catalizadores más sofisticados para reducir las emisiones de óxidos de nitrógeno. Sin embargo, esto también reduce las propiedades lubricantes del gasóleo, por lo que es necesario añadir aditivos que mejoren su lubricación.

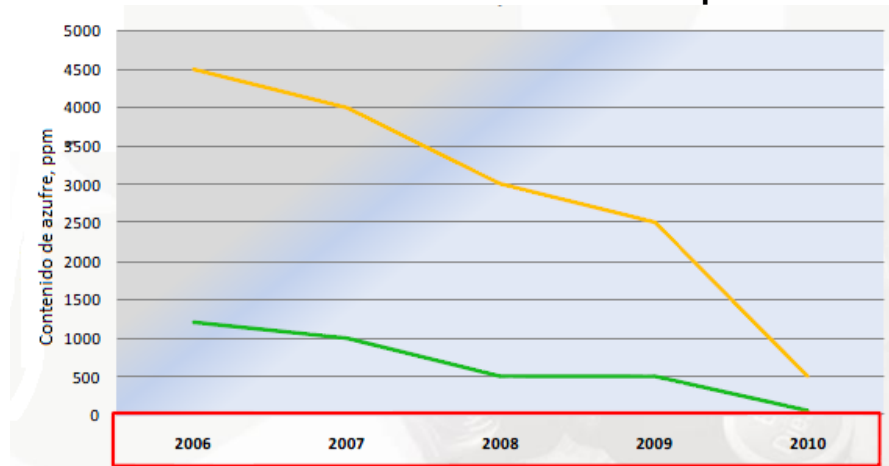
Figura 1. Contenido de azufre en el diesel en el mundo



Fuente: Foro Buenas prácticas de manejo del biodiesel y sus mezclas. HART's International Fuel Quality Center

En Colombia se ha buscado reducir el contenido del azufre en el diesel, pasando de tener 4500ppm en el 2006 para el diesel corriente, en el 2010 se alcanzó aproximadamente 500ppm. Mientras que para el diesel extra los valores son más bajos, pero aun así no se encuentran bajo los estándares europeos o de Estados Unidos.

Figura 2. Reducción contenido de azufre Diesel de Ecopetrol



Fuente: ECOPETROL - Foro Buenas prácticas de manejo del biodiesel y sus mezclas.

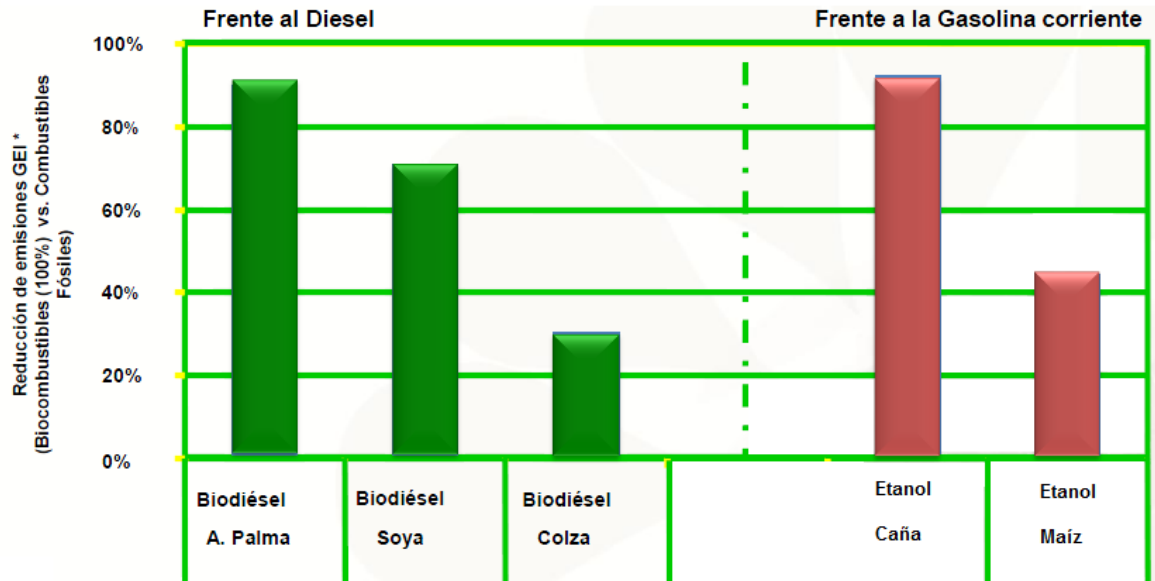
La búsqueda de reducir el contenido de azufre en el combustible trae varias ventajas. Al obtener un *Ultra low sulfur diesel* (USLD) se obtiene contenido de azufre igual o inferior a 15ppm y reducción del contenido de aromáticos, lo cual implica una mejor combustión y reducción de las emisiones. También se incrementa el contenido de parafinas, es decir, se incrementa el cetano. Además de esto se incrementa la estabilidad del combustible, con esto se puede concluir que el desempeño del combustible es mejor para bajos valores de contenido de azufre. También existe una disminución de la lubricidad natural del combustible, luego se deben utilizar aditivos, la presencia del biodiesel supera esta limitante; en ambos casos se presenta la tendencia a la formación de emulsiones estables con agua. También existe mayor susceptibilidad al ataque microbiológico, por reducción de componentes “tóxicos” y una disminución del poder solvente. Todo esto indica susceptibilidades del combustible, luego se debe tener cuidados especiales de manejo.

2.2.2 BIODIESEL

El biodiesel es un combustible líquido que se obtiene a partir de lípidos naturales como aceites vegetales o grasas animales, con o sin uso previo, mediante procesos industriales de esterificación y transesterificación, y que se aplica en la preparación de sustitutos totales o parciales del diesel o gasóleo obtenido del petróleo.

La producción de los biocombustibles trae consigo muchas ventajas, entre estas crea oportunidades para el uso de recursos naturales renovables. Además de esto genera empleo y ayuda a reducir la pobreza, especialmente en áreas rurales. Reduce las emisiones de gases de efecto invernadero y atrae la inversión nacional e internacional. En Colombia, los combustibles hacen parte de las políticas de desarrollo agrícola y rural, seguridad energética y de mitigación de calentamiento global.

Figura 3. Reducción de emisiones gases de efecto invernadero

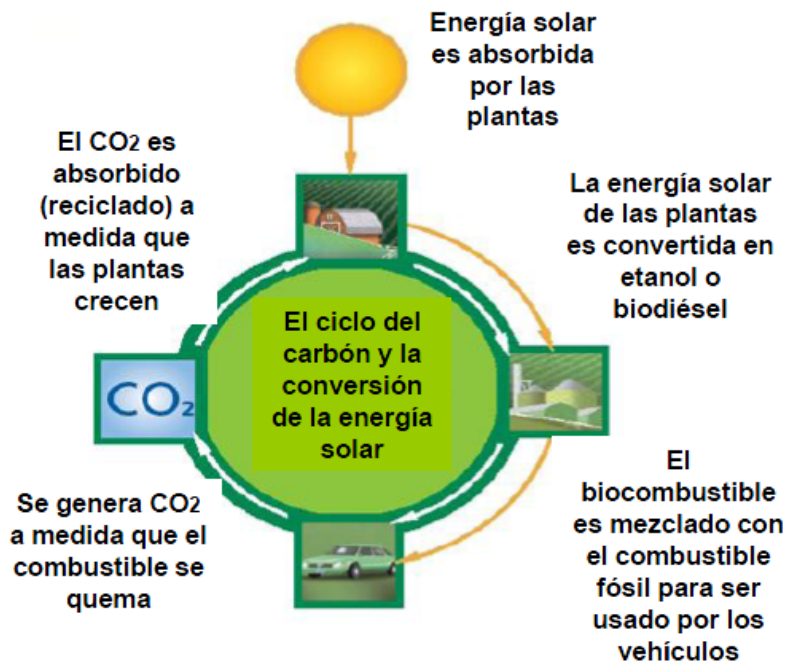


Fuente: USDA, 2007 y E4 Tech, et al 2006.

* GEI – dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoro de azufre (SFe).

Pero así mismo la producción de biocombustibles puede tener impactos sobre el medio ambiente, debido al proceso de producción de estos. También sobre la producción de alimentos, debido a que los biocombustibles se producen a base de vegetales o grasas animales, elementos que en un principio estaban destinados a este tipo de producción. Es importante determinar si un biocombustible es renovable o no. Para esto se debe determinar el balance neto de CO₂ y de energía. La generación de energía a través de biomasa no incrementa las emisiones netas de CO₂, ya que las plantas (maíz, caña de azúcar, soya, canola, etc.) absorben el CO₂ generado por la combustión de los biocombustibles, es por esto que se debe evaluar el balance de CO₂ para comprobar que este balance es cercano a 0. También es necesario evaluar el balance de energía de producción del combustible. Si la energía que se necesita para producir el combustible es menor que la que este mismo puede entregar, se puede hablar que el biocombustible es renovable.

Figura 4. Ciclo del carbón y la conversión de la energía solar



Fuente: Foro Buenas prácticas del manejo del biodiesel y sus mezclas

Los biocombustibles son biodegradables. El 85% se degrada en aproximadamente 28 días, mientras que los combustibles fósiles pueden durar años para degradarse.

El biodiesel puede mezclarse con gasóleo procedente del refinado del petróleo en diferentes cantidades. Se utilizan notaciones abreviadas según el porcentaje por volumen de biodiesel en la mezcla: B100 en caso de utilizar solo biodiesel, u otras notaciones como B5, B15, B30 o B50, donde la numeración indica el porcentaje por volumen de biodiesel en la mezcla.

2.2.3 MEZCLAS DE COMBUSTIBLES

Las mezclas de biodiesel y diesel convencional basada en hidrocarburos son los productos más habitualmente distribuidos para su uso en el mercado del gasóleo al por menor. Gran parte del mundo utiliza un sistema conocido como la "B", factor que indica la cantidad de biodiesel en cualquier mezcla de combustible: el combustible que contiene 20% de biodiesel tiene la etiqueta B20, mientras que el biodiesel puro se denomina B100. Las mezclas con 80 por ciento de biodiesel y 20 por ciento de diesel de petróleo (B80) se pueden utilizar en general en motores diesel sin modificar. El biodiesel también puede ser utilizado en su forma pura

(B100), pero puede requerir algunas modificaciones del motor para evitar problemas de mantenimiento y rendimiento. Las mezclas de biodiesel (B100) con diesel de petróleo se puede realizar por diferentes métodos:

- Mezclado en los depósitos: Tanto el biodiesel como diesel de petróleo se llevan a un depósito en la terminal de almacenamiento donde se mezclan y desde donde se distribuyen la mezcla realizada.
- En la línea de mezcla: los dos componentes provienen de depósitos diferentes en la terminal de almacenamiento y llegan al camión cisterna de forma simultánea. La mezcla final de biodiesel con el diesel de petróleo en la proporción deseada se realiza en la terminal de almacenamiento, en el brazo de carga del camión cisterna, lo que se conoce como “mezcla splash”
- Parquímetro bomba de mezcla: tanto el biodiesel como diesel de petróleo están en depósitos diferentes en la estación de servicio o el punto de consumo. En el surtidor de combustible se marca la mezcla deseada y es el surtidor el que realiza la mezcla solicitada en el momento de servirla. Desde el punto de vista logístico la mejor opción es ésta.

2.3 FACTOR DE AIRE

En la combustión completa de un hidrocarburo, todo el hidrogeno, todo el carbono y todo el azufre (si lo hay) se oxidan a H_2O , CO_2 , SO_2 . Generalmente, para tener combustión completa es necesario suministrar aire en exceso, es decir, más del teóricamente necesario para oxidar el combustible. Sea A la relación aire-combustible real (aquella que se tiene cuando se suministra aire en exceso o defecto); sea α (alfa) $= A/A^o$, el factor de aire de la combustión. Entonces tendremos que si se tiene aire en exceso, $\alpha > 1$, a la mezcla se la llama pobre y la combustión se dice que es oxidante; si el aire se suministra en defecto, $\alpha < 1$, y entonces se dice que la mezcla es rica y que la combustión es reductora. A la cantidad $|\alpha - 1|$ se le llama exceso o defecto, segundo el caso, y generalmente se da en porcentaje. Nótese que α es también la razón entre el oxígeno realmente utilizado y el teórico.

Si se utiliza aire en exceso, el O_2 extra aparecerá en lo humos, es decir, no participa en la reacción y esta ya no será teórica; la composición de los productos es ahora diferente de la de una combustión teórica. Si, por ejemplo, en la combustión del nitro metano se suministra un 20% de aire en exceso o, equivalentemente un 120% de aire teórico, tendremos un $\alpha = 1.2$.

La combustión teórica o neutra, es decir, aquella en que $\alpha=1$, raramente se consigue debido, principalmente, a la disociación, al mezclado imperfecto y a que las ratas de reacción son finitas. Pero, si a las moléculas de combustible les ofrecemos un excedente de oxígeno, aumentaremos considerablemente la probabilidad de que se oxiden todas ellas. Entonces, por razones económicas y de seguridad, en la mayoría de los procesos de combustión controlados se suministra más aire del mínimo necesario.

En la práctica los equipos de combustión se diseñan para que operen con aire en exceso, a fin de asegurar que el combustible no será desperdiciado y que será lo suficientemente flexible como para sostener una combustión lo más completa posible, aunque no teórica, a pesar de las variaciones en las propiedades del combustible y en las ratas de suministro de aire y combustible.

Para máxima eficiencia de la combustión el exceso de aire debe ser el menor posible, para minimizar sus efectos negativos; entre otros, están el de disminuir la temperatura de la combustión (y por ende la rata de transferencia de calor), y el incremento de la pérdida de energía a través de los humos. Sin embargo, un exceso de aire demasiado bajo puede resultar en combustión incompleta, hollín y combustible desperdiciado. Como vemos los requisitos de bajo exceso de aire y combustión completa son antagónicos. Se puede tener uno o el otro, pero no ambos al mismo tiempo, y en la práctica se tiene una situación intermedia. La cantidad exacta de aire en exceso depende, para un equipo en particular, de factores tales como: temperatura deseada de los gases, variaciones esperadas en las propiedades y en la rata de suministro del combustible y de la aplicación o uso del equipo. Sin embargo, limitaciones de tipo metalúrgico en los equipos pueden hacer necesario suministrar un gran exceso de aire.

La combustión incompleta o imperfecta, resulta cuando cualquiera de los elementos del combustible, C, H o S, no es completamente oxidado en el proceso de combustión. Por ejemplo, un hidrocarburo puede oxidarse solo parcialmente a CO_2 y H_2O y además formar compuestos tales como hidrocarburos varios no saturados (genéricamente HC), CO, H_2 , aldehídos, etc. Puede decirse entonces que una combustión es imperfecta cuando en los humos producidos por ella hay gases combustibles. Junto al exterior con los gases y en parte se quedan en el interior del equipo de combustión, depositándose en los puntos de menor velocidad del gas. Estas partículas sólidas en suspensión son características del humo. Son, principalmente, hollín o negro de humo y cenizas. Cuando la combustión es completa y sin cenizas, los gases producidos son prácticamente transparentes.

2.4 CARACTERISTICAS DE LAS LLAMAS PREMEZCLADAS LAMINARES

Una llama es la manifestación visible y la consecuencia de muchas reacciones químicas casi simultaneas, acopladas fuertemente a procesos de mecánica de fluidos, aerodinámica, transferencia de calor y difusión molecular.

2.4.1 Perfil de temperatura

La temperatura de llama depende de la posición donde se es medida. El color de la llama tiende a dar una idea de la diferencia de temperatura. Las llamas de color azul más claro tienen temperaturas más altas que las de color azul más oscuro.

La densidad de los productos es menor que la de los reactantes porque la llama calienta los productos. Esto induce a que la velocidad de los gases quemados sea más alta que la de los no quemados, debido a la diferencia de densidades:

$$\rho_u * V_u * A = \rho_b * V_b * A$$

Donde:

ρ = densidad

V= velocidad

A= área

El subíndice u indica los gases no quemados (Unburned) y el subíndice b los quemados (Burned).

2.4.2 Zonas de llama

Las llamas tienen varias zonas donde las características son diferentes. Una de las zonas es la zona de precalentamiento, en esta zona se expulsa una pequeña cantidad de calor. Otra de las zonas es la zona de reacción en donde el volumen de energía química es expulsado. Existe una región delgada en donde la velocidad de las reacciones químicas es más alta y hay una gran diferencia de temperatura. Mientras que existe una zona amplia donde la velocidad de las reacciones es menor y es donde reacciona finalmente el CO.

Cuando el aire disminuye a menos del aire requerido para la combustión estequiométrica, partes de las zonas se tornan azul y verde.

La velocidad de propagación llama depende del flujo de calor también, si calor es extraído de la llama la velocidad disminuirá.

2.5 FACTORES QUE AFECTAN LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LLAMA Y EL ESPESOR

2.5.1 Temperatura

Las llamas laminares tienen una alta dependencia con la temperatura. La velocidad de propagación de llama aumenta con el incremento de la temperatura de los gases no quemados. Si la temperatura de los gases quemados aumenta, la velocidad de propagación también aumenta. El espesor de llama disminuye cuando la temperatura de los gases no quemados aumenta, también lo hace si la temperatura de los gases quemados aumenta.

Existe una correlación empírica creada por Andrews y Bradley para estimar el efecto de la temperatura sobre la velocidad de propagación de llama:

$$S_L = 10 + 3.71 * 10^{-4} * (T_u)^2$$

Donde:

S_L = es la velocidad de llama en cm/s

T_u = es la temperatura de los gases no quemados en Kelvin

2.5.2 Presión

La presión de los gases también afecta la velocidad de propagación llama, cuando los gases se están quemando en el ambiente, esta presión sería la presión del cuarto. Cuando la presión aumenta, la velocidad de propagación disminuye. También existe una correlación formulada por Andrews y Bradley para analizar el efecto de la presión:

$$S_L = 43 * (P^{-0.5})$$

Donde:

S_L = es la velocidad de llama en cm/s

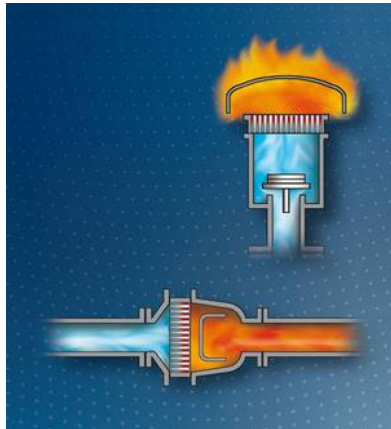
P = es la presión a la cual se quema el combustible en atm

Esta correlación solo se puede utilizar si $P < 5 \text{ atm}$.

2.6 ESTABILIZACIÓN DE LLAMA

La estabilización de llama es un aspecto importante para todo tipo de quemadores, ya que se debe prevenir fenómenos como el retroceso de llama y el levantamiento de llama para obtener funcionamientos efectivos y seguros. El retroceso de llama ocurre cuando la velocidad de propagación de llama es mayor que la velocidad de salida de los gases por el quemador. Se entiende como retroceso al efecto que se da cuando la llama viaja a través del tubo sin enfriamiento hacia la fuente de donde provienen los gases. Debido al peligro que esto representa, siempre en un montaje se debe instalar un arrestador de llama, el cual trabaja como una válvula anti-retorno, para evitar que los gases en combustión lleguen a la fuente del combustible.

Figura 5. Arrestador de llama



Fuente: RMG - www.rmg.com

El efecto de levantamiento de llama se da cuando la velocidad de propagación de la llama es menor a la velocidad de salida de los gases. El efecto es que la llama no se estabiliza en el quemador y por contrario se levanta hasta cierta distancia donde puede estabilizarse o apagarse.

3 DESCRIPCIÓN DEL BANCO Y DE LA METODOLOGÍA

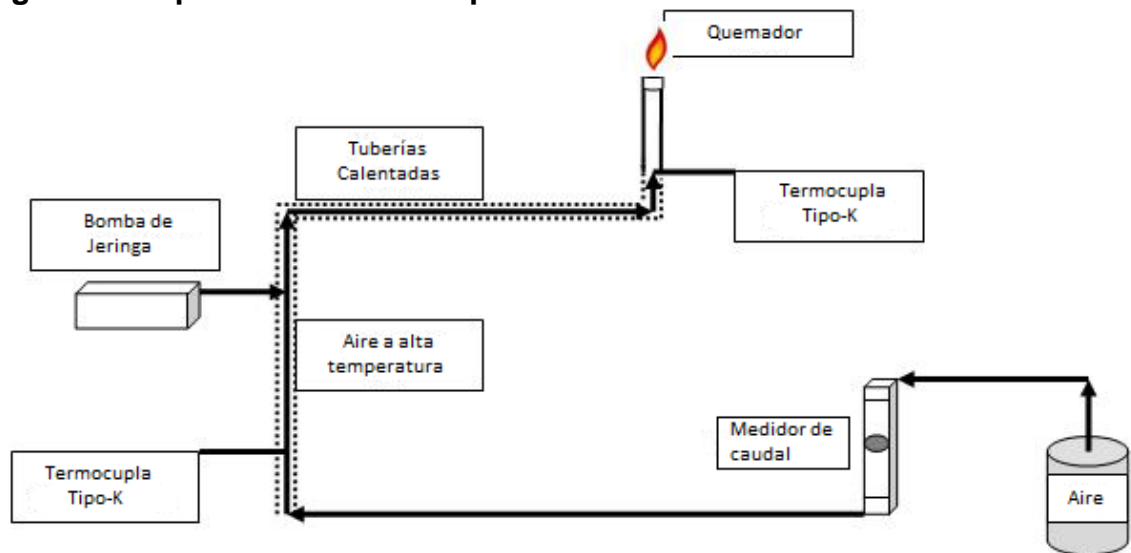
El banco en el que fueron realizadas las pruebas pertenece al laboratorio de combustión de la escuela de ingeniería aeroespacial y mecánica (Aerospace and Mechanical Engineering) de la Universidad de Oklahoma (The university of Oklahoma). El banco había sido usado por estudiantes de doctorado para hacer pruebas en llamas laminas premezcladas.

El banco consta de:

- Una cámara de combustión.
- Un quemador.
- Un sistema de inyección de aire.
- Un sistema de inyección de combustible.
- Una tubería con sistema de calentamiento.

A continuación se muestra el esquema del banco experimental, posteriormente se explicara cada parte de este.

Figura 6. Esquema del banco experimental



Fuente: Effects of Equivalence Ratio on Emissions and Radiation from Laminar Partially Premixed Flames of Petroleum-Biofuels Blends

3.3 CÁMARA DE COMBUSTIÓN

Los experimentos fueron realizados en una cámara de combustión de acero cuya sección transversal es de $76 \times 76 \text{ cm}^2$ y una altura de 100 cm. La parte superior de la cámara está conectada mediante unos ductos a la atmosfera para expulsar los gases de combustión. La presión al interior del laboratorio es mantenida alrededor de 20Pa por encima de la presión atmosférica para garantizar la expulsión de estos gases y evitar que estos se queden dentro del laboratorio. También para prevenir que los gases provenientes de alguna fuga se mantengan adentro.

3.4 QUEMADOR

El quemador es el lugar donde se lleva a cabo la combustión, de la forma y tamaño de este dependerá la forma de la llama. En este montaje se uso un quemador tipo Bunsen, este tipo de quemador tiene las siguientes propiedades:

- Tiene la habilidad de mantener una llama laminar.
- Tiene la habilidad de calentar los reactantes hasta temperaturas en las cuales el combustible se haya evaporado completamente.
- Tiene la habilidad de manejar diferentes combustibles, esto quiere decir que puede manejar diferentes temperaturas de calentado, ya que cada combustible tiene un punto de ebullición diferente.

Figura 7. Quemador



Fuente: Autor

3.5 SISTEMA DE INYECCIÓN DE AIRE

Para la combustión es necesario aportar oxígeno, para el caso de estos experimentos en los cuales se tienen llamas premezcladas, se requiere una fuente de aire. En estos experimentos se usaron cilindros a presión los cuales aportan la cantidad de aire necesaria para la combustión. La presión a la cual se inyecta el aire es controlada por unas válvulas a la salida del cilindro, las cuales se encargan de que la presión a la que sale el aire sea siempre constante y también se encargan de medir la presión al interior del cilindro para determinar en qué momento se deben cambiar.

Figura 8. Válvulas de control de presión



Fuente: Autor

La cantidad de aire es otro factor importante para la combustión. En estos experimentos la cantidad de combustible es un valor constante, por lo tanto el factor de aire se variará cambiando la cantidad de aire inyectada. Por esta razón se hace necesario instalar un medidor de caudal con una válvula de control de flujo a la salida del cilindro para variar la cantidad de aire suministrada.

Figura 9. Medidor de caudal

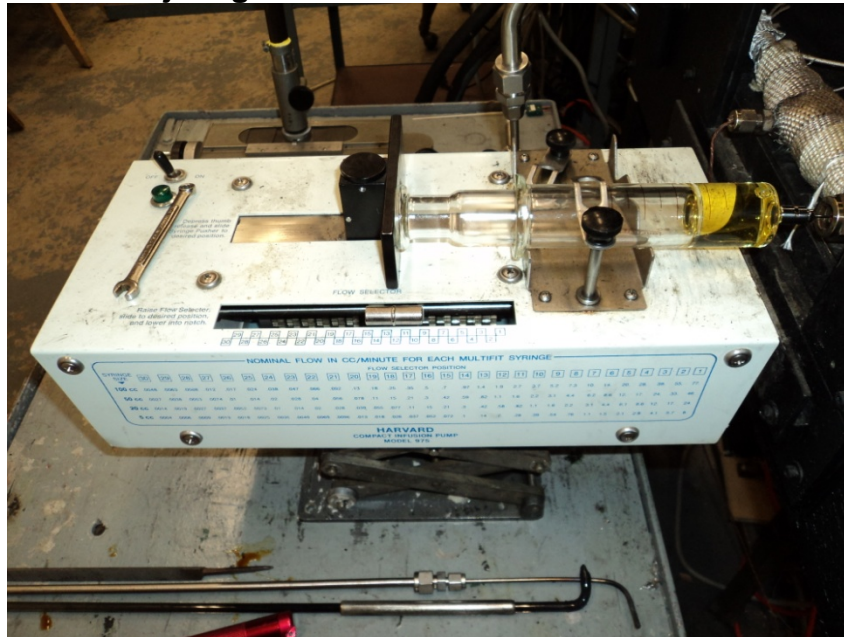


Fuente: Autor

3.6 SISTEMA DE INYECCIÓN DE COMBUSTIBLE

Para estos experimentos es requerido que se inyecte una pequeña cantidad de combustible, pero también es importante que la cantidad de combustible inyectada sea constante para proporcionar una llama estable. Es por esto que se decide usar una bomba de jeringa debido a sus propiedades, estas bombas son capaces de inyectar pequeños caudales a ratas constantes. El caudal de combustible inyectado depende del tamaño de la jeringa y de la velocidad de avance de la bomba. La cantidad de combustible deseado fue seleccionado por medio de la experimentación, ya que altos caudales de combustible implican altos caudales de aire para lograr una combustión estequiométrica. Y bajos caudales de combustible implica llamas más inestables. El caudal seleccionado fue el de $1.1 \text{ cm}^3/\text{min}$, el cual es logrado usando una jeringa de 50 cm^3 .

Figura 10. Bomba de jeringa



Fuente: Autor

3.7 SISTEMA DE TUBERÍAS CON SISTEMA DE CALENTAMIENTO

El sistema de tuberías es el encargado de transportar los gases hasta el quemador. Va desde la salida del cilindro de aire, pasando por el punto de inyección de combustible hasta llegar al quemador. Posee un sistema de calentamiento por medio de cintas eléctricas, las cuales se encargan de calentar el aire y la mezcla aire-combustible para garantizar que el 100% del combustible se evapore antes de llegar al quemador. Las cintas eléctricas funcionan por medio de unos resistores los cuales se calientan cuando corriente eléctrica viaja a través de ellos. La temperatura es un factor importante para controlar, debido a que si es muy baja el combustible no se evaporará. Y si la temperatura es muy alta, la densidad de la mezcla aire-combustible será más baja y por lo tanto la velocidad de salida de los gases aumentará haciendo que la llama sea más inestable. Para controlar la temperatura se instaló un sistema de control proporcional on-off el cual contiene 2 termocuplas, una antes del punto de inyección del combustible y otra a la salida del quemador. El controlador se encenderá cuando la temperatura medida sea inferior a la estipulada y se apagará cuando sea mayor. El controlador

trabaja con una tolerancia de 2 grados. El controlador proporciona una temperatura aproximadamente constante durante los experimentos.

Figura 11. Tuberías y sistema de calentamiento



Fuente: Autor

3.8 PROTOCOLO DE LOS EXPERIMENTOS

Para realizar los experimentos de manera correcta con el fin de obtener resultados confiables, se debe seguir una serie de normas y recomendaciones las cuales se enlistan a continuación.

Para iniciar se debe precalentar el montaje. Para esto se debe poner a fluir únicamente aire a través de las tuberías. Para esto se debe abrir la válvula del cilindro de aire completamente, para que el aire pueda fluir sin restricción. Se debe revisar la válvula de control de presión para mirar que la presión del cilindro es suficiente para realizar los experimentos. Dado el caso que la presión se encuentre por debajo del límite requerido o muy cercano a este, se debe cambiar el cilindro por uno nuevo.

Después de iniciar el flujo de aire, se debe encender el sistema de calentamiento. Para esto se debe programar el controlador con una temperatura de precalentamiento. Para estos experimentos se recomienda una temperatura de “*set-point*” de 300C. El montaje tarda alrededor de 30 min en calentar. Importante revisar que todas las válvulas del sistema se encuentren totalmente abiertas, para garantizar un correcto funcionamiento del sistema.

Mientras esto ocurre se debe preparar el combustible. Se debe seleccionar primero el tipo de jeringa que se va a usar y prepararla para envasar el combustible. Siempre que se vaya a realizar un nuevo experimento la jeringa debe lavarse muy bien para evitar que residuos del combustible anteriormente utilizado se mezclen con el nuevo combustible modificando las propiedades de este. También es muy importante que la jeringa no contenga otras impurezas como agua o residuos sólidos.

Cuando el montaje alcanza el valor puesto, se debe programar el valor deseado para los experimentos. Para el caso de estos combustibles se uso un valor de 350C, el cual garantiza que el combustible es evaporado en su totalidad.

A partir de este momento se puede insertar la jeringa en la tubería para inyectar el combustible. Se programa la bomba para el flujo deseado y se debe revisar que la jeringa debe estar bien alineada con el orificio en donde se inserta para evitar fugas. En este momento se enciende la bomba y al mismo tiempo se enciende la llama piloto para iniciar la combustión. Cuando la llama se encuentra estable se puede retirar la llama piloto.

Antes de empezar los experimentos, se debe revisar que el combustible si se está evaporando completamente. Una prueba para comprobar esto es apagar el flujo de combustible y mirar en cuanto tiempo se apaga la llama y deja de salir el combustible evaporado. El tiempo que demora en salir debe ser muy cercano al calculado teóricamente, este se puede calcular obteniendo la velocidad promedio con la que viaja el gas por la tubería. Esta velocidad es calculada usando el flujo volumétrico y el área transversal de la tubería. Teniendo la velocidad promedio con la que viaja el gas, y la distancia recorrida desde el punto de inyección del combustible y la salida del quemador se puede hallar un tiempo estimado de cuanto deben durar los gases en salir. Si al hacer la prueba, el tiempo que demoran los gases en salir sobrepasa el valor calculado se debe aumentar la temperatura de precalentado para garantizar la completa evaporación.

Habiendo comprobado que el combustible se evapora completamente. Se puede proceder a realizar los experimentos. Para esto se modifica la cantidad de aire deseada para generar el tipo de factor de aire requerido. Cuando se obtenga la llama deseada, para el factor de aire deseado, se debe esperar aproximadamente 2 minutos a que la llama se estabilice antes de comenzar a tomar las fotos. Cuando la llama está estable, se procede a tomar las fotos ubicando la cámara sobre un trípode y ajustando el lente para tomar la foto adecuadamente. Se recomienda que el centro del lente se alinee con el quemador. En el momento de

tomar las fotos se debe hacer con un intervalo de aproximadamente 10 segundos entre cada foto. Se recomienda tomar las fotografías con diferente exposición fotográfica, con flash y sin flash. Es recomendable tomar la mayor cantidad de fotografías posibles para cada experimento para garantizar buenas tomas.

Luego de realizar los experimentos respectivos el sistema se debe dejar enfriar. Para esto se apaga el sistema de calentamiento, dejando el flujo de aire libre. Luego de que se encuentre frío. Se deben cerrar todas las válvulas, retirar la bomba de combustible y limpiar las jeringas utilizadas.

3.9 CÁMARA FOTOGRÁFICA

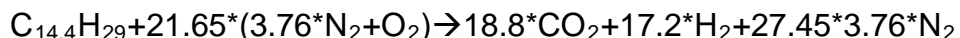
Una cámara fotográfica fue el instrumento de medición para estos experimentos, con las fotografías tomadas se medirá la velocidad de propagación de llama. Para el presente estudio se utilizó una cámara *Canon EOS Digital Rebel XT*. Las fotos fueron tomadas con diferentes exposiciones variando desde 1/10 hasta 1/40 s.

3.10 CÁLCULO DEL CAUDAL DE AIRE

Antes de tomar las fotografías se deben calcular las condiciones a las cuales se van a evaluar los combustibles. Como el caudal de combustible inyectado será constante en todos los experimentos, es necesario calcular el caudal de aire para cada valor de factor de aire a evaluar.

A continuación se muestran los cálculos para el combustible Diesel No. 2:

Primero se debe balancear la ecuación de combustión.



Luego se debe calcular la relación Aire-Combustible para combustión estequiométrica (AF_{sto}).

$$AF_{sto} = \frac{21.65 \cdot (3.76 \cdot 28 + 32)}{12 \cdot 14.4 + 29}$$

$$AF_{sto} = 14.73$$

Ahora se puede calcular la relación Aire-Combustible actual.

$$\Phi = AF_{sto}/AF$$

$$AF = AF_{sto}/\Phi$$

Para un factor de aire de $\Phi=1.2$

$$AF = 14.73/1.2$$

$$AF = 12.274$$

Conociendo el caudal del combustible ($1.1 \text{ cm}^3/\text{min}$) y la densidad del combustible (850 kg/m^3). Se puede calcular el flujo másico de combustible. En este estudio se trabaja con mezclas de combustibles, para este caso es necesario calcular la densidad de la mezcla usando las fracciones molares.

$$m_{DIESEL} = V_{DIESEL} \cdot \rho_{DIESEL} = 1.1 [\text{cm}^3/\text{min}] \cdot 1/10^6 [\text{m}^3/\text{cm}^3] \cdot 850 [\text{kg/m}^3]$$

$$m_{DIESEL} = 0.000935 [\text{kg/min}]$$

Ahora usando el flujo másico de combustible se puede calcular el flujo másico de aire requerido para el proceso de combustión.

$$AF = m_{AIRE}/m_{DIESEL}$$

$$m_{AIRE} = 12.274 \cdot 0.000935 [\text{kg/min}]$$

$$m_{AIRE} = 0.01148 [\text{kg/min}]$$

Con el flujo másico y la densidad del aire se puede calcular el caudal requerido.

$$V_{AIRE} = m_{AIRE}/\rho_{AIRE}$$

$$V_{AIRE} = 0.01148 [\text{kg/min}] / 1.2 [\text{kg/m}^3]$$

$$V_{AIRE} = 0.00956 [\text{m}^3/\text{min}] = 9.56 [\text{lpm}]$$

El cálculo se debe repetir para cada valor de factor de aire a evaluar.

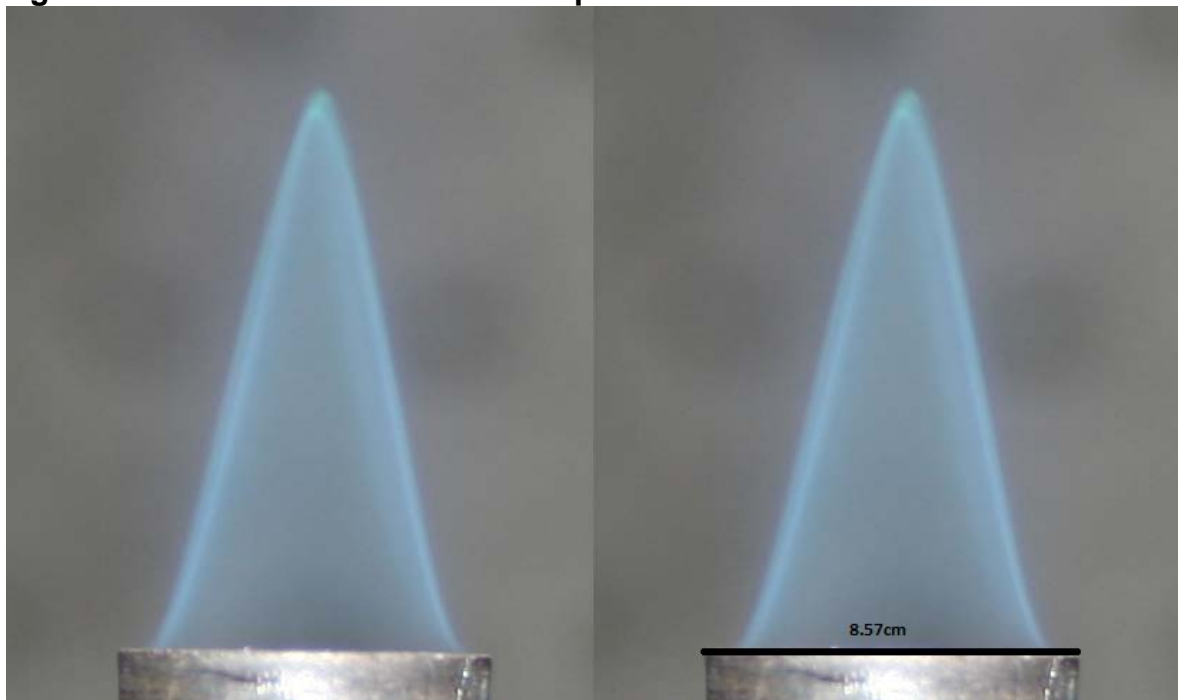
Luego de tener los valores de caudal de aire para cada factor de aire, se procede a realizar los experimentos.

3.11 MEDICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA LLAMA

Para los cálculos de la velocidad de llama es necesario calcular el área exterior de la llama. Para esto se requiere medir la altura y la base de esta. Pero como en la fotografía las distancias no son reales, es necesario tener un objeto del cual conozcamos las medidas reales para realizar una escala y determinar las longitudes reales. En este caso usaremos el quemador como medida base, el diámetro del quemador es 12.7 mm.

Usando la fotografía medimos el diámetro del quemador para obtener la escala de la figura. La figura usada muestra la llama perteneciente al combustible Diesel con un factor de aire de 1.04.

Figura 12. Medición del diámetro del quemador



Fuente: Autor

$$\text{Escala} = \text{Longitud real} / \text{Longitud figura}$$

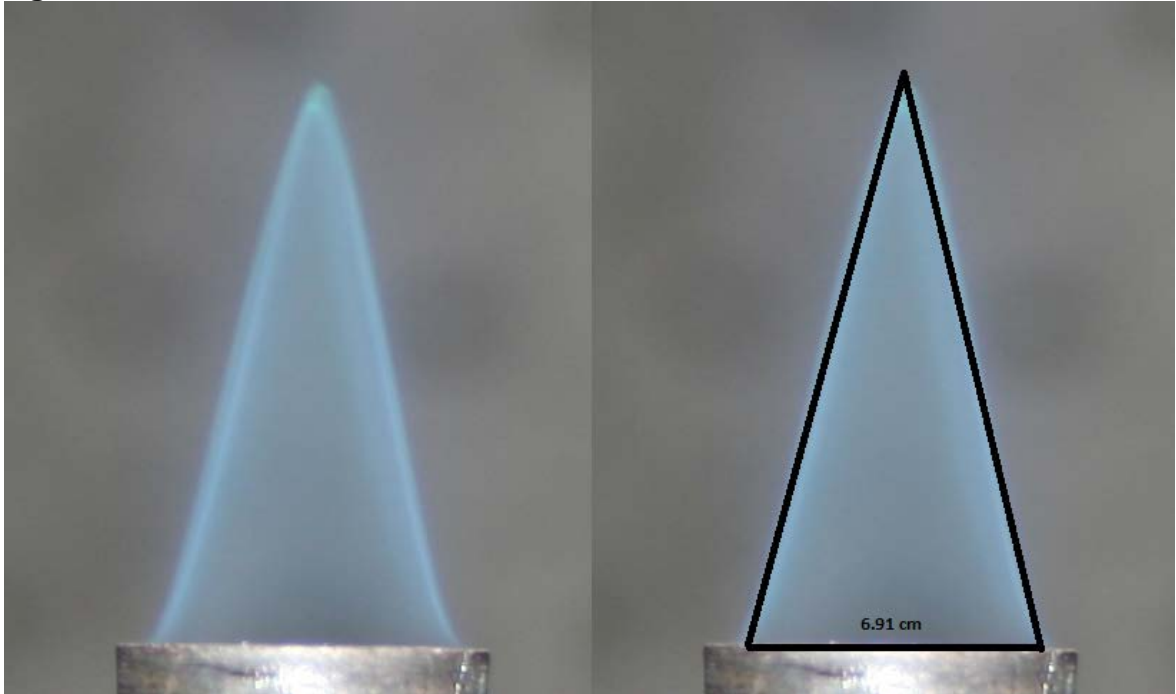
$$\text{Escala} = 1.27\text{cm} / 8.57\text{cm}$$

$$\text{Escala} = 0.1482$$

Esto quiere decir que la distancia medida de la foto es en realidad 0.1482 mayor.

Ahora usando la escala se puede determinar la altura y base de la llama. Para determinar la base de la llama se debe aproximar esta a un triángulo, siguiendo las paredes de la llama como se muestra en la figura.

Figura 13. Medición de la base de la llama



Fuente: Autor

Para determinar el valor real de la medida de la base de la llama, se debe multiplicar el valor de la escala por el valor medido en la foto.

$$\text{Base de llama} = \text{Escala} * \text{Base de llama Figura}$$

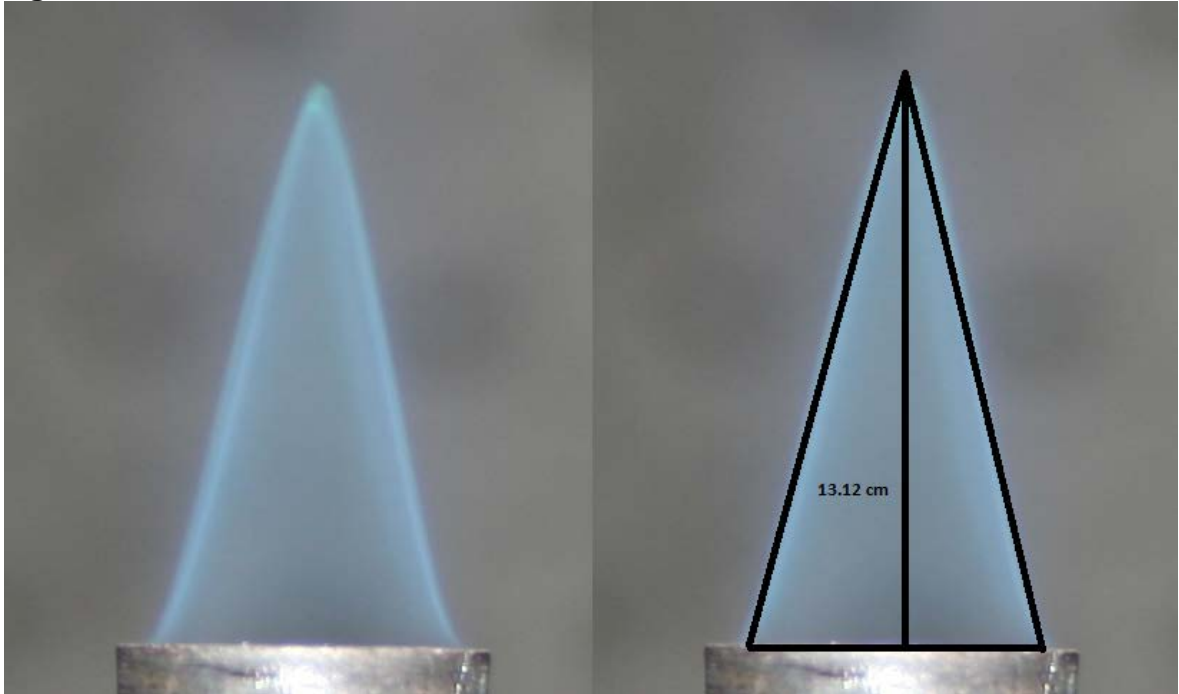
$$\text{Base de llama} = 0.1482 * 6.91[\text{cm}] = 1.02 [\text{cm}]$$

Para determinar el valor real de la altura de la llama, se debe hacer el mismo procedimiento multiplicar la escala por el valor medido en la foto.

$$\text{Altura de llama} = \text{Escala} * \text{Altura de llama Figura}$$

$$\text{Altura de llama} = 0.1482 * 13.12[\text{cm}] = 1.95 [\text{cm}]$$

Figura 14. Medición de la altura de la llama



Fuente: Autor

Teniendo el valor de la base y altura de la llama se puede calcular el ángulo de la llama usando funciones trigonométricas.

$$\text{Tan}(\alpha) = (\text{Base de llama}/2) / \text{Altura de llama}$$

$$\text{Tan}(\alpha) = (1.024/2) / 1.95$$

$$\alpha = 14.75^\circ$$

Ahora se puede calcular el área exterior de la llama, valor necesario para calcular la velocidad de propagación de llama. El área de un cono se define por la siguiente ecuación.

$$A = \pi * r * s$$

Donde:

$$s = (r^2 + h^2)^{1/2}$$

$$s = ((1.02/2[\text{cm}])^2 + (1.95[\text{cm}])^2)^{1/2}$$

$$s = 2.016 [\text{cm}]$$

$$A = \pi * (1.024/2[\text{cm}]) * 2.016 [\text{cm}]$$

$$A = 3.243 [\text{cm}^2]$$

3.12 CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LLAMA

Para comenzar lo primero que se debe calcular es el flujo másico de la mezcla aire-combustible.

$$m_{TOTAL}=m_{AIRE}+m_{DIESEL}$$

$$m_{TOTAL}=0.01148 \text{ [kg/min]}+0.000935 \text{ [kg/min]}$$

$$m_{TOTAL}=0.01241 \text{ [kg/min]}$$

Ahora es necesario calcular la densidad de la mezcla aire-combustible. Esta se puede determinar usando la ecuación de combustión.

$$n_{DIESEL}=1$$

$$n_{AIRE}=21.65$$

$$n_{TOTAL}=22.65$$

$$X_{DIESEL}=n_{DIESEL}/n_{TOTAL}=1/22.65$$

$$X_{DIESEL}=0.0442$$

$$X_{AIRE}=n_{AIRE}/n_{TOTAL}=21.65/22.65$$

$$X_{AIRE}=0.9558$$

Ahora se debe calcular la densidad del combustible como vapor, para esto se usa la ecuación de gas ideal.

El gas se encuentra a una temperatura $T=350 \text{ C}$ y a presión atmosférica, pero primero se debe calcular la masa molecular del gas para obtener la constante del gas.

Para Diesel

$$M=(12)*14.4+(1)*29=201.8 \text{ [kg/kmol]}$$

Si el combustible es una mezcla de Diesel y Biocombustible entonces se debe calcular la masa molecular usando las fracciones molares.

Ahora se puede calcular la constante del gas

$$R_{DIESEL}=R_u/M=8.31 \text{ [kJ/kmol}\cdot\text{K]}/201.8 \text{ [kg/kmol]}$$

$$R_{DIESEL}=0.042 \text{ [kJ/kg}\cdot\text{K]}$$

Ahora se puede determinar la densidad usando la ecuación de gas ideal

$$P = \rho * R * T$$

$$\rho = P / (R * T)$$

$$\rho = 101.325[\text{kPa}] / (0.042[\text{kJ/kg} \cdot \text{K}] * 623[\text{K}])$$

$$\rho = 3.95 [\text{kg/m}^3]$$

Teniendo la densidad del combustible como vapor se puede calcular la densidad de la mezcla aire combustible usando las fracciones.

$$\rho_{\text{MEZCLA}} = \rho_{\text{DIESEL}} * X_{\text{DIESEL}} + \rho_{\text{AIRE}} * X_{\text{AIRE}}$$

$$\rho_{\text{MEZCLA}} = 3.95[\text{kg/m}^3] * 0.0442 + 1.2[\text{kg/m}^3] * 0.9558$$

$$\rho_{\text{MEZCLA}} = 1.3019[\text{kg/m}^3]$$

Ya se tienen todos los datos necesarios para el cálculo de la velocidad de propagación de llama usando la siguiente ecuación.

$$S_L = (dm/dt) / (\rho_{\text{MEZCLA}} * A)$$

$$S_L = 0.01241 [\text{kg/min}] * 1/60[\text{min/s}] / (1.3019[\text{kg/m}^3] * 1/(100^3)[\text{m}^3/\text{cm}^3] * 3.243[\text{cm}^2])$$

$$S_L = 55.318 [\text{cm/s}]$$

4. ESCENARIOS DE PRUEBA

El presente estudio busca encontrar el efecto del factor de aire en la velocidad de propagación de llama y la forma de la llama. Los experimentos se realizaron para 2 tipos diferentes de biocombustibles, combustibles a base de soya y de canola. Estos combustibles se evaluaron en su forma pura y mezclados a diferentes relaciones con Diesel No. 2. A continuación se muestran los escenarios planteados para los experimentos.

4.1 VARIACIÓN DEL FACTOR DE AIRE

Para hallar la relación que existe entre el factor de aire y la velocidad de propagación y forma de la llama es necesario hacer una serie de experimentos en donde todas las variables se mantengan constantes y solamente se varíe el factor de aire.

Es por esto que se programó una serie de experimentos en donde las siguientes propiedades se mantenían constantes mientras se variaba la cantidad de aire suministrada.

- Temperatura de precalentado
- Presión de suministro de aire
- Caudal de combustible inyectado
- Tipo de combustible (% de biocombustible en la mezcla)

El caudal de aire es variado de tal forma que se alcancen factores de aire entre 1 y 1.2.

Se tomaron fotografías para 3 casos diferentes. Para factor de aire igual a 1, 1.1 y 1.2. Para el caso de Diesel la llama estequiométrica (factor de aire igual a 1) fue muy inestable y por lo tanto lo más cercano a la combustión estequiométrica que se pudo llegar fue factor de aire igual a 1.04. Luego se varía el combustible y se toman las fotografías necesarias. Las fotografías se tomaron con diferentes exposiciones fotográficas en un rango de 1/10 a 1/40 segundos. Para los cálculos se tomaron 8 de las mejores fotografías para promediar los resultados. Los combustibles se probaron puros y con mezclados con diesel. Las mezclas se realizaron de la siguiente manera

- 25% Biocombustible y 75% Diesel
- 50% Biocombustible y 50% Diesel
- 75% Biocombustible y 25% Diesel

4.2 VARIACIÓN DEL PORCENTAJE DE BIOCOMBUSTIBLE

Otro de los objetivos de esta investigación es determinar el efecto que tiene el porcentaje de biocombustible sobre la forma de la llama y la velocidad de propagación.

Es por esto que se programaron una serie de experimentos en donde se mantendrán constantes todas las variables del proceso y se cambiará el porcentaje de biocombustible. Para esto se mantendrá constante las siguientes variables:

- Temperatura de precalentado
- Presión de suministro de aire
- Caudal de combustible inyectado
- Factor de aire (esto implica variar la cantidad de aire suministrada cuando se varia el porcentaje de biocombustible debido a que las propiedades del combustible varían)

Se utilizaran 5 combustibles así:

- Diesel Puro
- 25% Biocombustible y 75% Diesel
- 50% Biocombustible y 50% Diesel
- 75% Biocombustible y 25% Diesel
- Biocombustible Puro

Se utilizaron los mismos 3 factores de aire utilizados anteriormente 1, 1.1 y 1.2. Pero no se evaluó Diesel para factor de aire igual a 1 debido a la inestabilidad de la llama.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se probaron en total 9 tipos diferentes de combustibles a 3 diferentes factores de aire: 1, 1.1 y 1.2. Para el caso de Diesel no fue posible evaluar las condiciones para combustión estequiométrica por lo tanto se evaluó los más cerca que se pudo obtener lo cual fue, para un factor de aire igual a 1.04.

5.1 VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LLAMA

5.1.1 Diesel

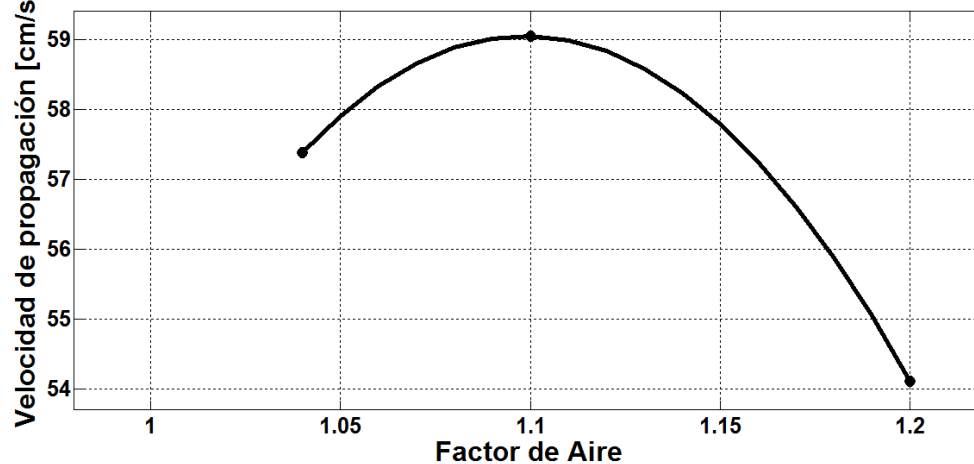
Para diesel fue imposible lograr que la llama para factor de aire igual a 1 fuera suficientemente estable para tomar las fotografías, por esto que se decidió evaluar al combustible para un factor de aire igual a 1.04. Esto fue lo más cercano que se pudo obtener. Se puede observar que La velocidad de propagación de llama varía entre 54 y 59 cm/s para el Diesel. Presentando el valor más alto para el factor de aire igual a 1.1. El valor más pequeño se presenta para el valor de 1.2.

Tabla 2. Velocidad de propagación de llama Diesel

	Factor de aire	SL [cm/s]
$\phi 1$	1.04	57.386
$\phi 2$	1.10	59.052
$\phi 3$	1.20	54.119

Fuente: Autor

Figura 15. Velocidad de propagación de llama vs factor de aire – Diesel



Fuente: Autor

5.1.2 CME B25

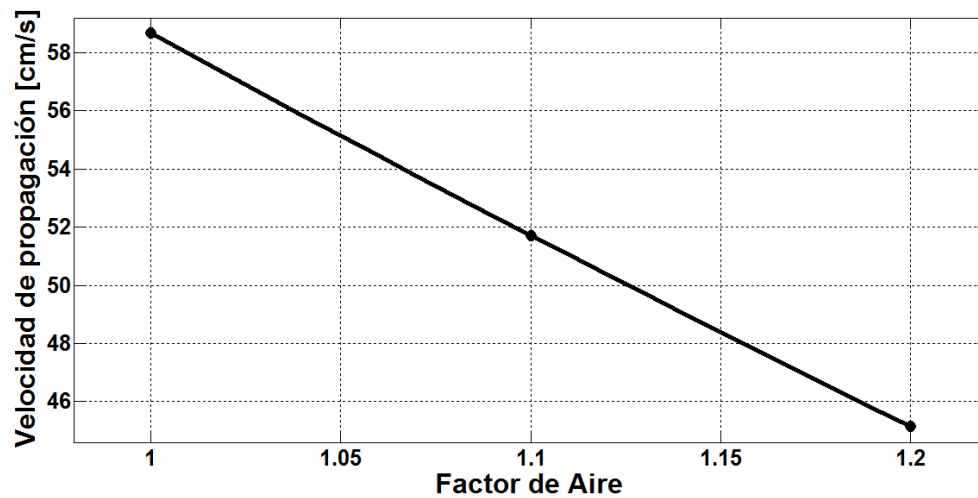
Para el combustible CME B25 se encontró que el máximo valor se presenta para la combustión estequiométrica y los valores van disminuyendo a medida que la cantidad de aire suministrada aumenta, es decir el factor de aire aumenta. El menor valor se presenta para un factor de aire igual a 1.2.

Tabla 3. Velocidad de propagación de llama CME B25

	Factor de aire	SL [cm/s]
$\phi 1$	1.00	58.670
$\phi 2$	1.10	51.719
$\phi 3$	1.20	45.142

Fuente: Autor

Figura 16. Velocidad de propagación de llama vs factor de aire – CME B25



Fuente: Autor

5.1.3 CME B50

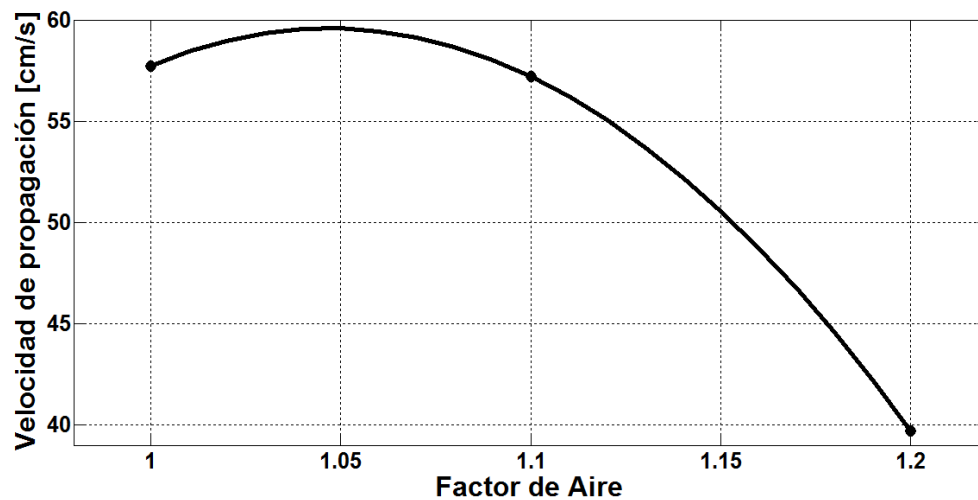
Para el combustible CME B50 se encontró que los valores de velocidad de propagación de llama para los factores de aire de 1 y 1.1 son muy cercanos. Se encuentra que para el factor de aire igual a 1.2 la velocidad de propagación de llama tiene un cambio muy grande pasando de valores alrededor de 57 cm/s a 39 cm/s.

Tabla 4. Velocidad de propagación de llama CME B50

	Factor de aire	SL [cm/s]
$\phi 1$	1.00	57.715
$\phi 2$	1.10	57.191
$\phi 3$	1.20	39.697

Fuente: Autor

Figura 17. Velocidad de propagación de llama vs factor de aire - CME B50



Fuente: Autor

5.1.4 CME B75

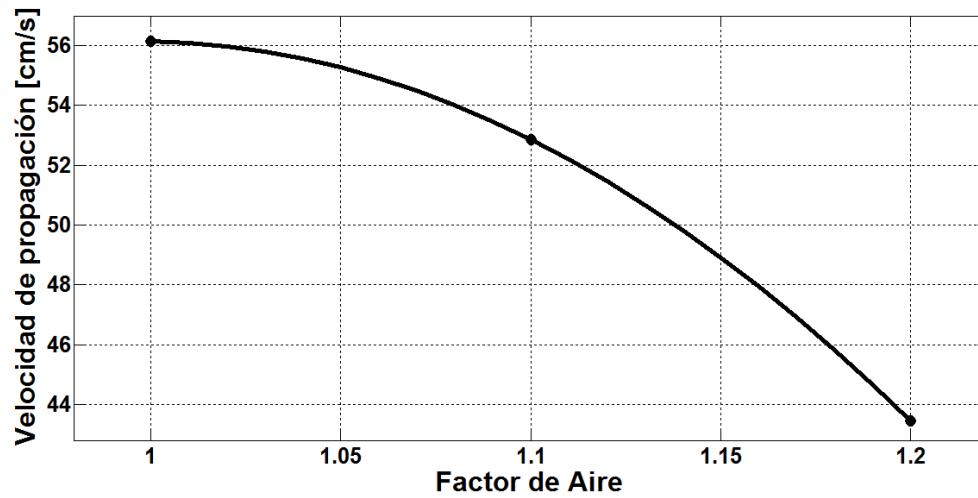
Para el caso del combustible CME B75, se encontró que el mayor valor de velocidad de propagación de llama se presenta para el factor de aire igual a 1. A medida que el factor aumenta la velocidad de propagación disminuye, encontrando el menor valor para el factor de aire igual a 1.2.

Tabla 5. Velocidad de propagación de llama CME B75

	Factor de aire	SL [cm/s]
$\phi 1$	1.00	56.147
$\phi 2$	1.10	52.860
$\phi 3$	1.20	43.443

Fuente: Autor

Figura 18. Velocidad de propagación de llama vs factor de aire - CME B75



Fuente: Autor

5.1.5 CME

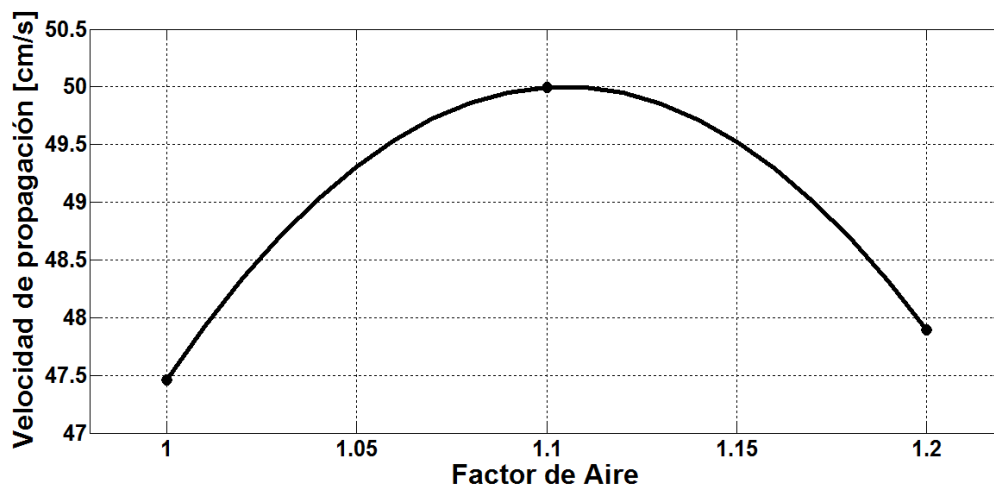
Para el combustible a base de canola (CME) se obtuvieron velocidades de propagación de llama entre 47 y 50 cm/s. Obteniendo el mayor valor para un factor de aire igual a 1.1. Los valores de velocidad de propagación de llama para los factores de aire 1 y 1.2 fueron bastante cercanos con una diferencia de alrededor de 0.4 cm/s.

Tabla 6. Velocidad de propagación de llama CME

Factor de aire		SL [cm/s]
$\phi 1$	1.00	47.461
$\phi 2$	1.10	49.998
$\phi 3$	1.20	47.891

Fuente: Autor

Figura 19. Velocidad de propagación de llama vs factor de aire - CME



Fuente: Autor

5.1.6 SME B25

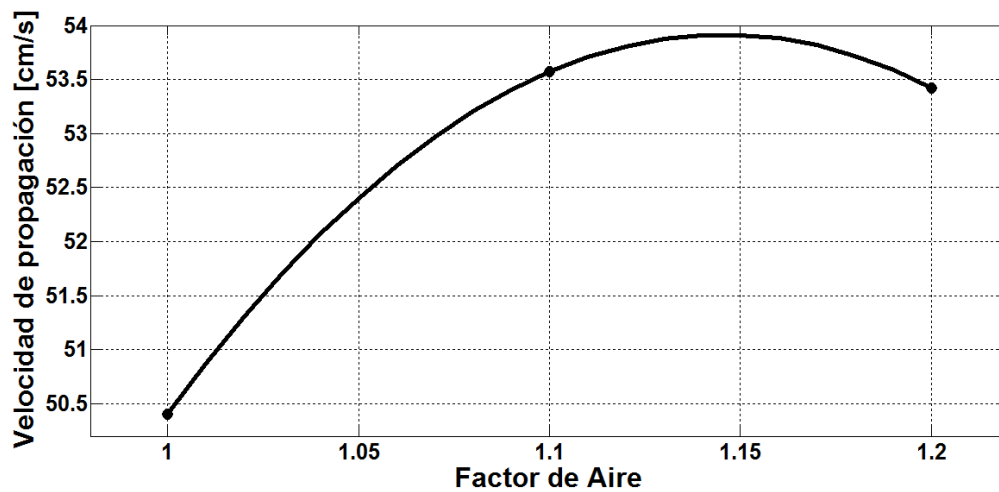
Para el combustible SME B25 se encontró que el menor valor de velocidad de propagación de llama se presenta para un factor de aire igual a 1. Los valores de velocidad de llama para los factores de aire de 1.1 y 1.2 son muy cercanos estando alrededor de 53 cm/s y con una diferencia entre ellos de tan solo 0.15 cm/s.

Tabla 7. Velocidad de propagación de llama SME B25

Factor de aire		SL [cm/s]
ϕ_1	1.00	50.404
ϕ_2	1.10	53.571
ϕ_3	1.20	53.425

Fuente: Autor

Figura 20. Velocidad de propagación de llama vs factor de aire - SME B25



Fuente: Autor

5.1.7 SME B50

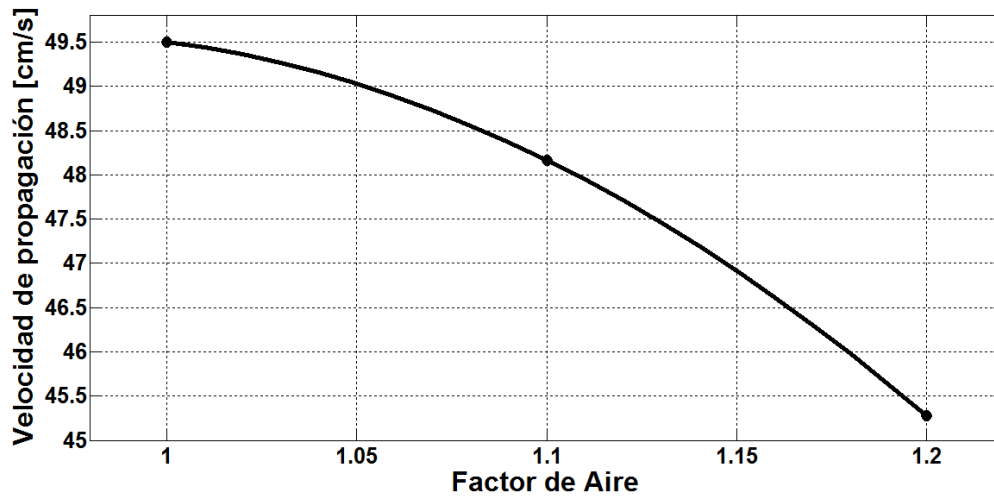
Para el combustible SME B50 se encontró que los valores de velocidad de propagación de llama varían entre 45 y 49.5 cm/s. El mayor valor se presenta para la combustión estequiométrica, mientras que el menor para un factor de aire igual a 1.2.

Tabla 8. Velocidad de propagación de llama SME B50

	Factor de aire	SL [cm/s]
$\phi 1$	1.00	49.505
$\phi 2$	1.10	48.167
$\phi 3$	1.20	45.275

Fuente: Autor

Figura 21. Velocidad de propagación de llama vs factor de aire - SME B50



Fuente: Autor

5.1.8 SME B75

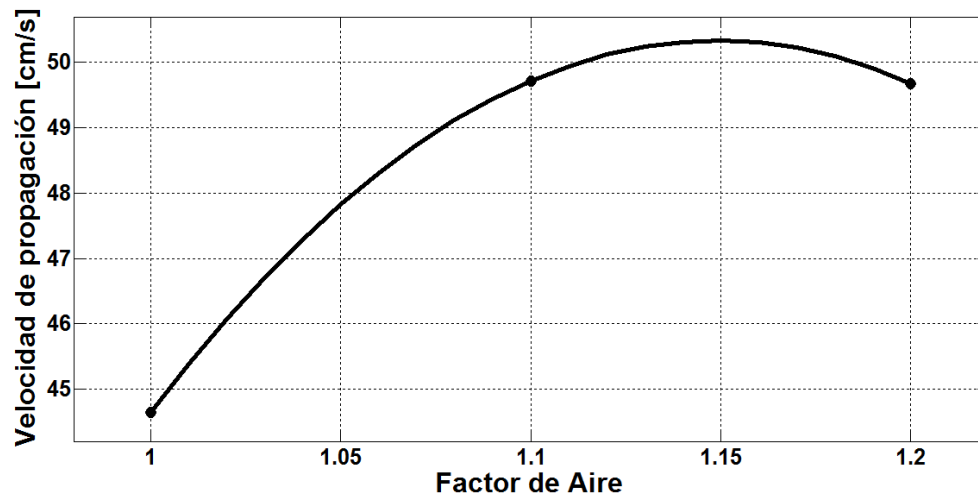
Para el combustible SME B75 se encontró que el menor valor de velocidad de propagación de llama se encuentra para la combustión estequiométrica con un valor de 44.646 cm/s. Para los casos en donde ocurre la combustión a un factor de aire de 1.1 y 1.2, se obtuvieron resultados cercanos encontrando una diferencia entre ellos de tan solo 0.05cm/s.

Tabla 9. Velocidad de propagación de llama SME B75

Factor de aire		SL [cm/s]
$\phi 1$	1.00	44.646
$\phi 2$	1.10	49.720
$\phi 3$	1.20	49.675

Fuente: Autor

Figura 22. Velocidad de propagación de llama vs factor de aire - SME B75



Fuente: Autor

5.1.9 SME

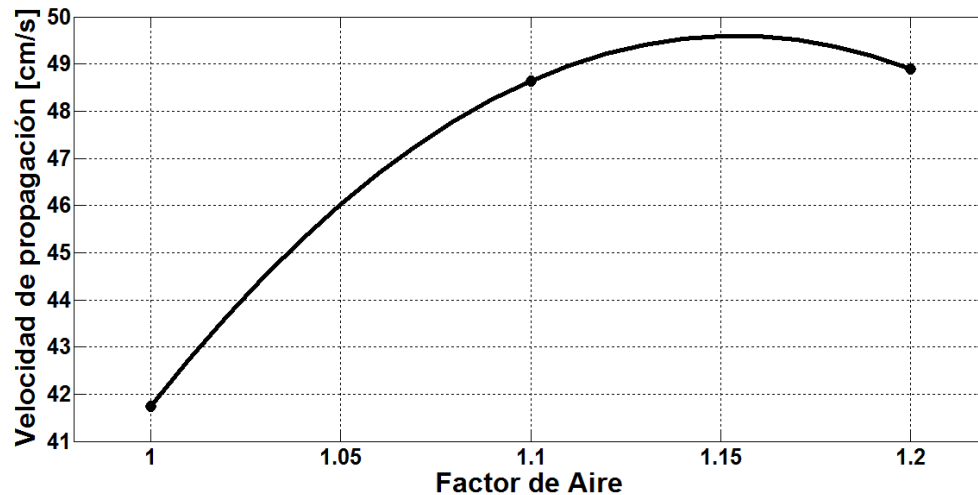
Para el combustible SME se encontró que el menor valor de velocidad de propagación de llama se presenta para la combustión estequiométrica. Los valores de velocidad de propagación de llama se encuentran entre 41.5 y 49 cm/s aproximadamente. Para los factores de aire de 1.1 y 1.2 se puede observar que los valores son bastante cercanos, habiendo una diferencia entre ellos de tan solo 0.262 cm/s.

Tabla 10. Velocidad de propagación de llama SME

	Factor de aire	SL [cm/s]
$\phi 1$	1.00	41.742
$\phi 2$	1.10	48.635
$\phi 3$	1.20	48.897

Fuente: Autor

Figura 23. Velocidad de propagación de llama vs factor de aire - SME

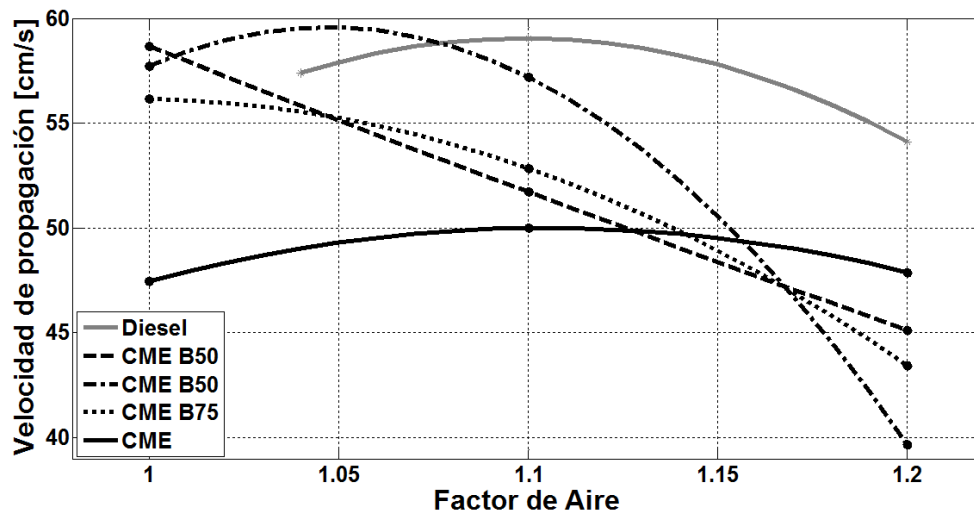


Fuente: Autor

5.1.10 CME, Diesel y mezclas

Al realizar los experimentos se puede observar que el combustible diesel presentó valores más altos que los presentes para el combustible a base de canola (CME), ambos presentando su valor más alto para un factor de aire igual a 1.1. Para el caso de las mezclas de combustibles se encontraron diferentes tendencias. Para el caso de los combustibles CME B25 y CME B75 se encontró que a medida que aumentaba el factor de aire, es decir, aumentaba la cantidad de aire suministrada para la combustión la velocidad de propagación de llama. Esto quiere decir que estos combustibles presentaron el valor más alto medido cuando se obtenía una combustión estequiométrica. El combustible CME B50, el cual contiene 50% Diesel y 50% Biocombustible a base de canola, mostró unos resultados diferentes. Para los factores de aire de 1 y 1.1 presenta una velocidad de propagación de llama cercana a los 58 cm/s la cual es bastante cercana a los valores medidos en el diesel para un factor de aire de 1.04. Mientras que para un factor de aire de 1.2 el combustible CME B50 presentó el valor más bajo registrado para todos los combustibles analizados con un valor de 39.697 cm/s.

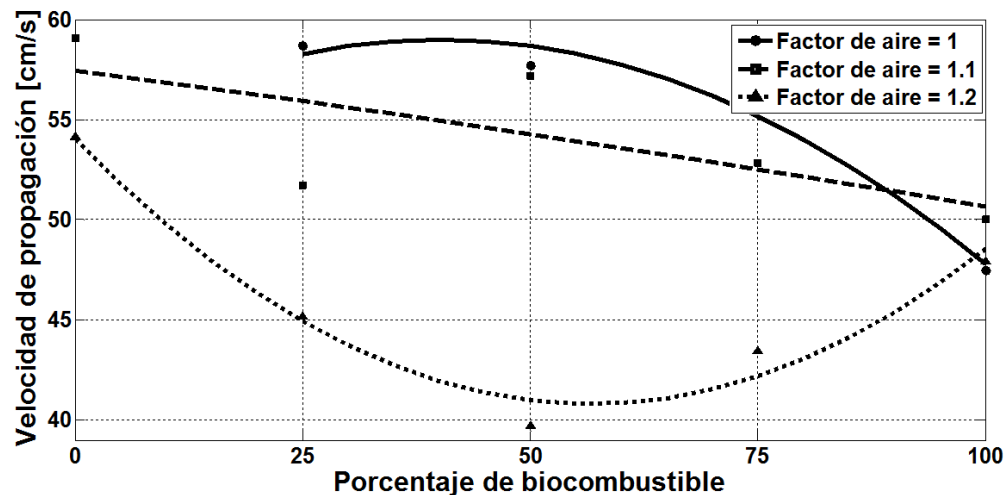
Figura 24. Velocidad de propagación de llama vs factor de aire – CME y Mezclas con Diesel



Fuente: Autor

Analizando los resultados por porcentaje de combustible se puede observar que los valores de velocidad de propagación de llama se encuentran para combustión estequiométrica excepto para CME puro. No se puede afirmar para el Diesel debido a que no se pudo evaluar. Así mismo los valores más bajos encontrados son para el factor de aire igual a 1.2. Los combustibles CME B25 y CME B75 presentan velocidades de propagación muy parecidas.

Figura 25. Velocidad de propagación de llama vs porcentaje de biocombustible – CME y Mezclas con Diesel

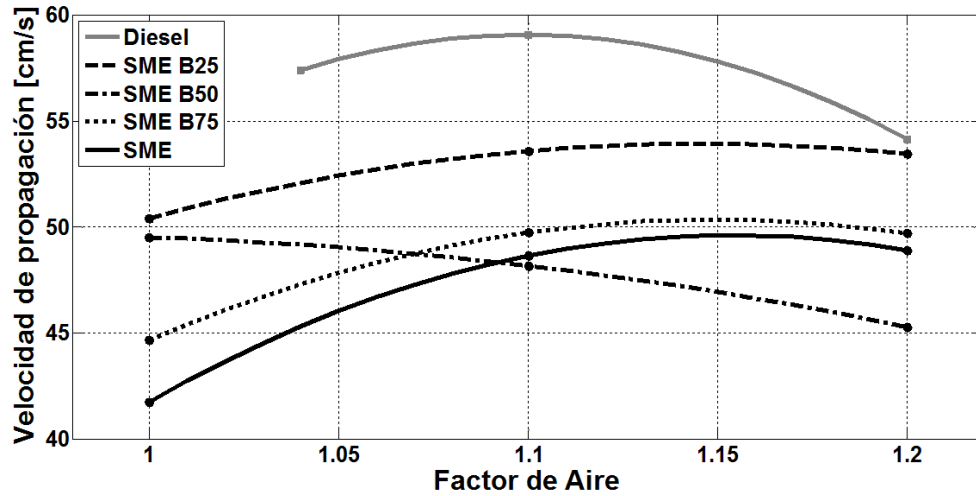


Fuente: Autor

5.1.11 SME, Diesel y mezclas

Para el caso de los combustibles a base de soya, se puede observar que el diesel sigue presentando valores de velocidad de propagación de llama mayores. Los combustibles SME, SME B25 y SME B75 presentan una similitud en los resultados. Estos combustibles presentan el menor valor de velocidad de propagación de llama cuando ocurre combustión estequiométrica. Y el mayor valor registrado para estos combustibles se presenta cuando el factor de aire es igual a 1.2, siendo los valores del SME B25 los más altos y los de SME los más bajo entre estos 3. El combustible SME B50, el cual contiene 50% de diesel y 50% de SME, presenta su mayor valor para la combustión estequiométrica y el menor para un factor de aire igual a 1.2.

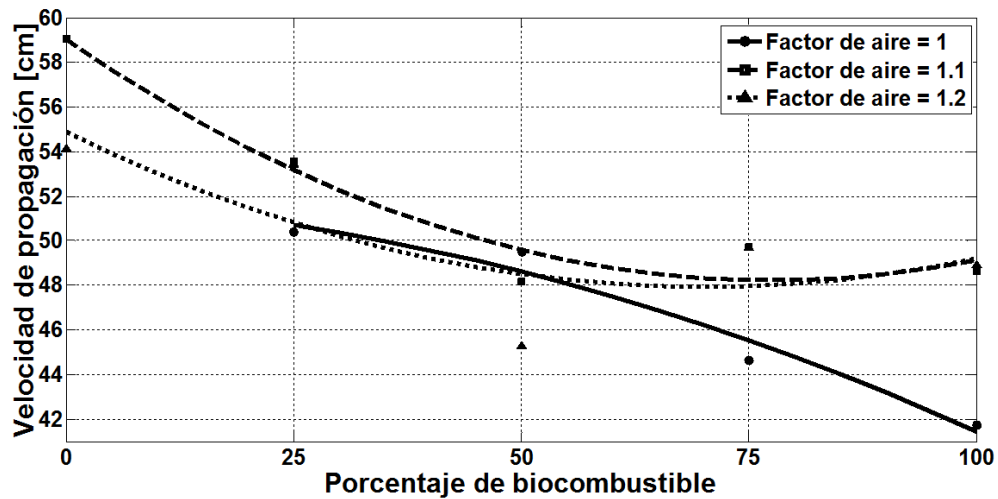
Figura 26. Velocidad de propagación de llama vs factor de aire – SME y Mezclas con Diesel



Fuente: Autor

Analizando los resultados obtenidos por porcentaje de combustible, se puede observar que los más altos después del diesel son los del CME B25. También se puede observar que los combustibles CME B25, CME B75 y CME presentan una particularidad y es que su valor de velocidad de propagación de llama es prácticamente el mismo para los factores de aire de 1.1 y 1.2. El combustible CME B50 fue el único para el cual la velocidad de propagación de llama fue mayor para la combustión estequiométrica que para el resto de los factores evaluados. Para los otros combustibles la velocidad de propagación de llama fue menor cuando el factor de aire es igual a 1. El diesel no se puede incluir en esta afirmación debido a que no se pudo evaluar para combustión estequiométrica.

Figura 27. Velocidad de propagación de llama vs porcentaje de biocombustible – SME y Mezclas con Diesel



Fuente: Autor

5.2 FORMA DE LA LLAMA

Al ser llamas premezcladas la forma de la llama estará determinada más que todo por la altura de llama. Debido a que la base se adaptará a la base del quemador. Otro factor importante para analizar es el color de la llama, debido a que este da una idea de la temperatura que posee la llama.

5.2.1 Diesel

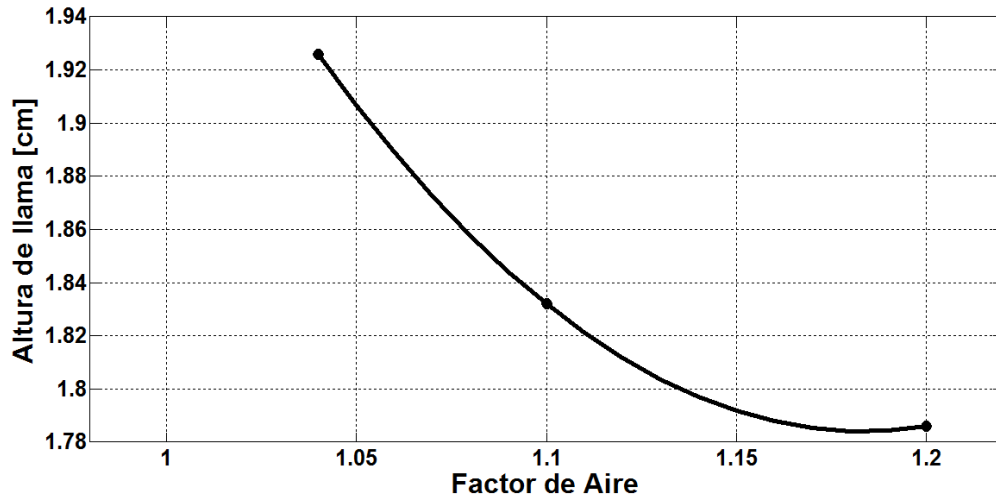
Analizando los resultados obtenidos para el diesel, se puede observar que la llama es más alta para la combustión cercana a la estequiométrica, que para este caso fue de un factor de aire igual a 1.04, recordando que para el diesel no fue posible obtener la llama estequiométrica. Y la llama más pequeña se obtuvo para el factor de aire igual a 1.2. Se puede observar que la diferencia de altura entre el factor de aire 1.02 y el de 1.1 es de aproximadamente 1 mm. Mientras que la diferencia entre el factor de aire de 1.1 y el de 1.2 es de aproximadamente 0.5 mm.

Tabla 11. Altura de llama - Diesel

Factor de aire	h [cm]
ϕ_1	1.926
ϕ_2	1.832
ϕ_3	1.786

Fuente: Autor

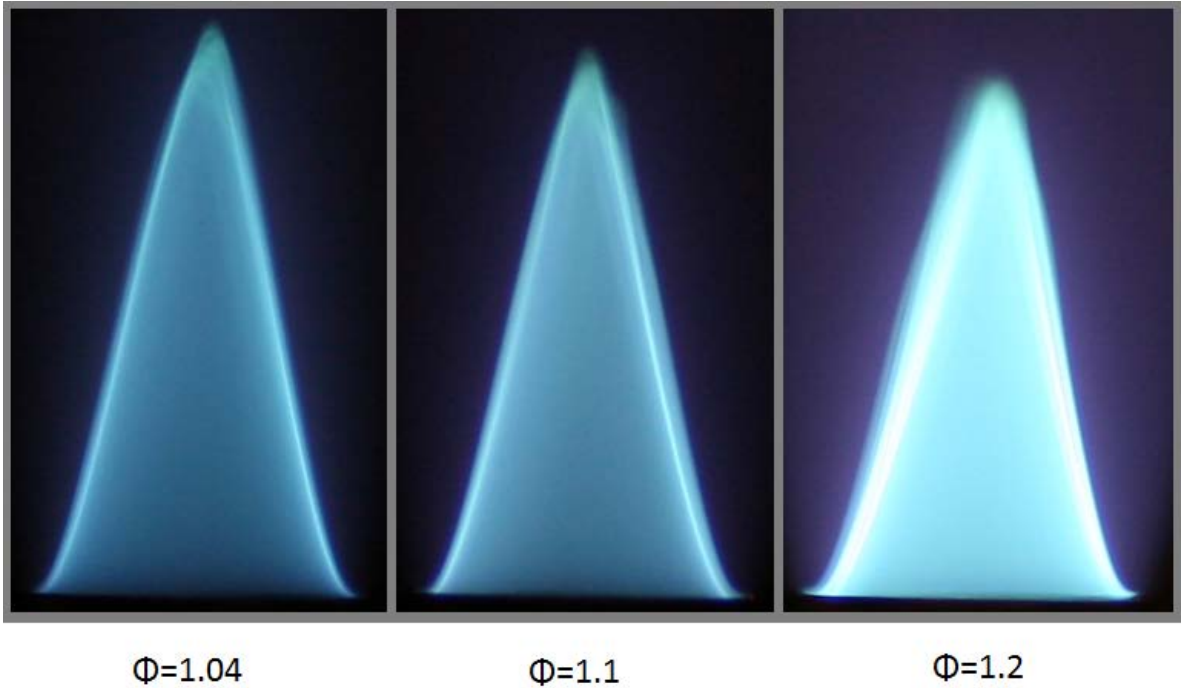
Figura 28. Altura de llama vs Factor de aire – Diesel



Fuente: Autor

Luego de analizar las fotografías obtenidas para este combustible, se puede observar que el cambio de color de la llama a medida que se varía la cantidad de aire suministrada para la combustión, es bastante notorio. La llama de factor de aire igual a 1.2 se ve mucho más radiante, con un color azul más claro. Mientras que la llama de factor de aire igual a 1.04 se ve de un color azul más oscuro, además es menos radiante es decir se puede ver más a través de ella. Con esto se puede hacer una aproximación a la diferencia de temperaturas que existe entre las llamas, diciendo que la que posee mayor temperatura es la más brillante. Según lo dicho anteriormente se podría decir que la llama que tiene mayor temperatura es la de factor de aire igual a 1.2 y la de menor temperatura es la de factor de aire igual a 1.04

Figura 29. Fotografías llama diesel



Fuente: Autor

5.2.2 CME B25

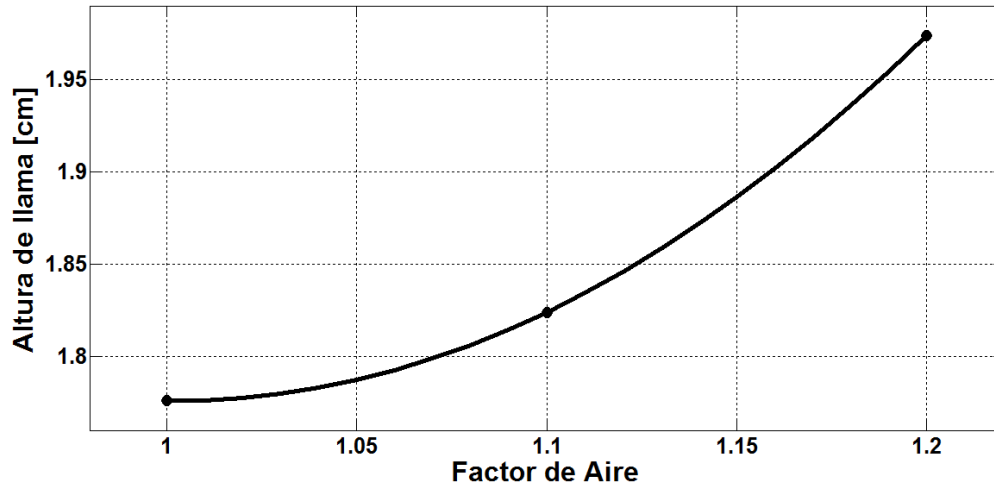
Se puede observar que la llama mas alta fue para el factor de aire igual a 1.2 con una altura de 1.974, Mientras que la llama más pequeña fue para la combustión estequiométrica con una altura de 1.776. La diferencia de alturas entre la combustión estequiométrica y con un factor de aire igual a 1.1 es de aproximadamente 0.5 mm. Y la diferencia de alturas entre la llama de factor de aire igual a 1.1 y la de 1.2 es de aproximadamente 1.5 mm.

Tabla 12. Altura de llama – CME B25

Factor de aire		h [cm]
ϕ_1	1.00	1.776
ϕ_2	1.10	1.824
ϕ_3	1.20	1.974

Fuente: Autor

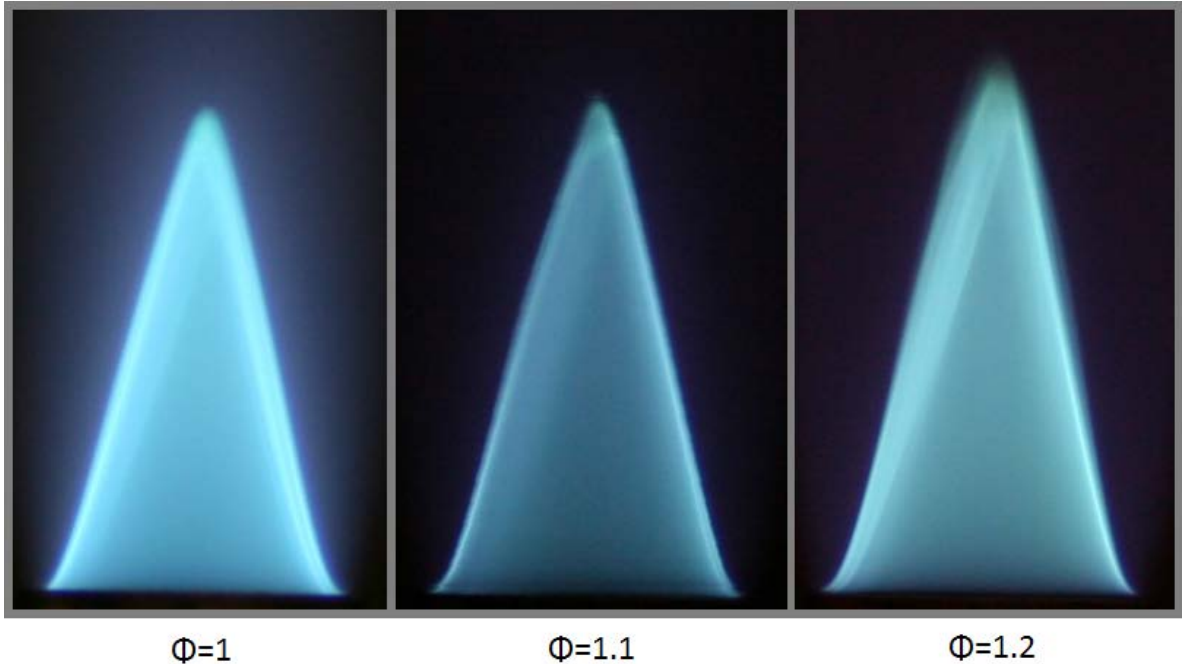
Figura 30. Altura de llama vs factor de aire – CME B25



Fuente: Autor

Analizando el color de la llama del combustible CME B25 a diferentes factores de aire, se pueden ver ciertos cambios. La llama más brillante y de color azul más claro es la formada cuando existe combustión estequiométrica. Esto indica que es la que presenta la temperatura más alta. Mientras que la llama menos brillante y de color azul más oscuro se obtiene cuando el factor de aire es igual a 1.1, de allí se puede concluir que es la que tiene menor temperatura.

Figura 31. Fotografías llama CME B25



Fuente: Autor

5.2.3 CME B50

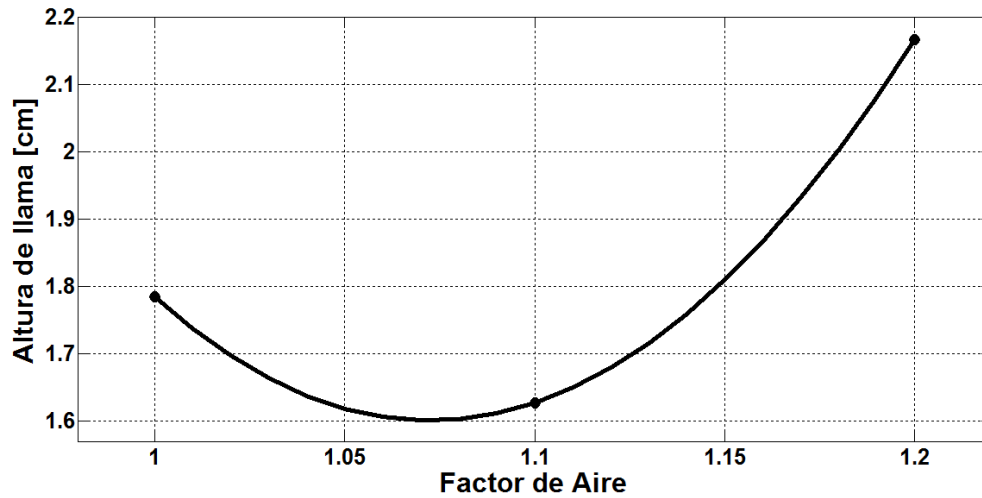
Para el combustible CME B50 se encontró que la llama más alta fue encontrada para el factor de aire igual a 1.2 con una gran diferencia con las llamas de este mismo combustible a los otros 2 factores de aire evaluados. La diferencia de alturas entre la llama para el factor de aire igual a 1.1 y 1.2 es de aproximadamente 5 mm, mientras que la diferencia entre la llama de un factor de 1.2 y la llama de factor igual a 1 es de aproximadamente 4mm. La llama más pequeña fue encontrada para el factor de aire igual a 1.1.

Tabla 13. Altura de llama – CME B50

Factor de aire		h [cm]
$\phi 1$	1.00	1.784
$\phi 2$	1.10	1.627
$\phi 3$	1.20	2.166

Fuente: Autor

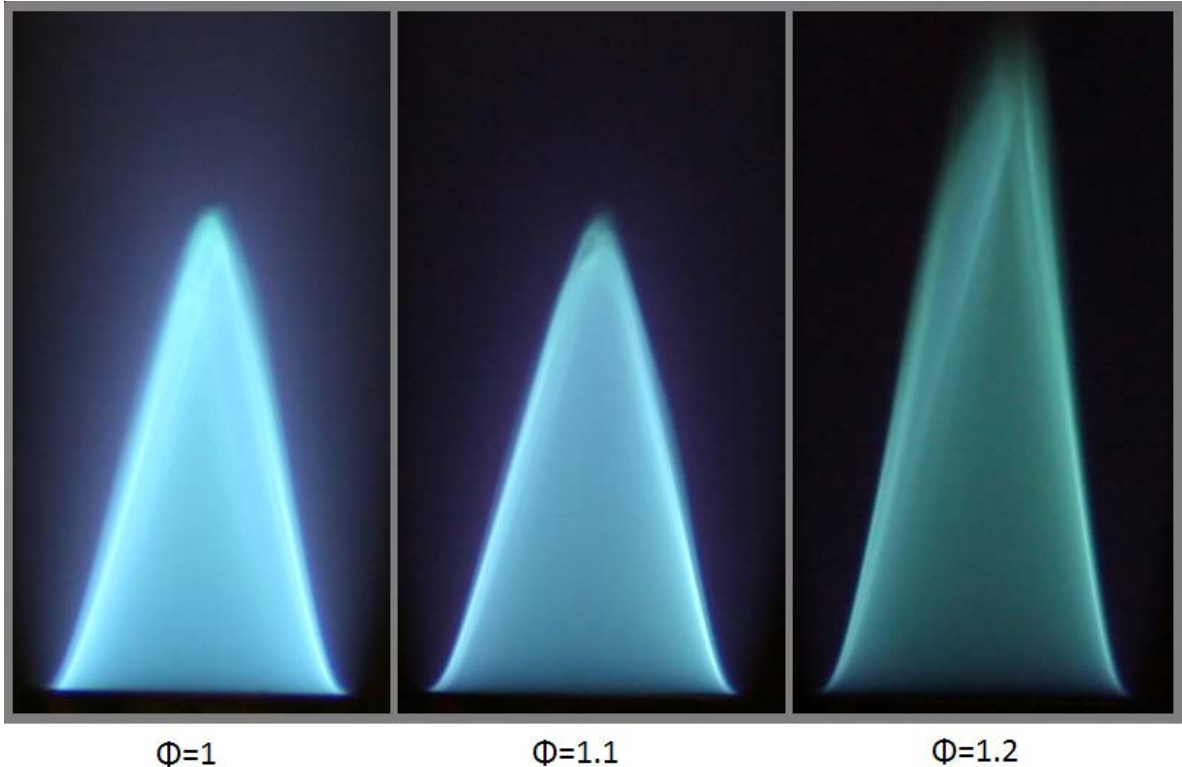
Figura 32. Altura de llama vs factor de aire – CME B50



Fuente: Autor

Analizando el color de la llama para de los experimentos realizados para este combustible, se encontró que la llama más brillante y con color azul más claro es la llama presente en la combustión con factor de aire igual a 1. Esto indica que es la llama con la temperatura más alta. La llama más oscura se encontró cuando para el factor de aire igual a 1.2, es decir esta es la que posee menor temperatura de las 3 evaluadas.

Figura 33. Fotografías llama CME B50



Fuente: Autor

5.2.4 CME B75

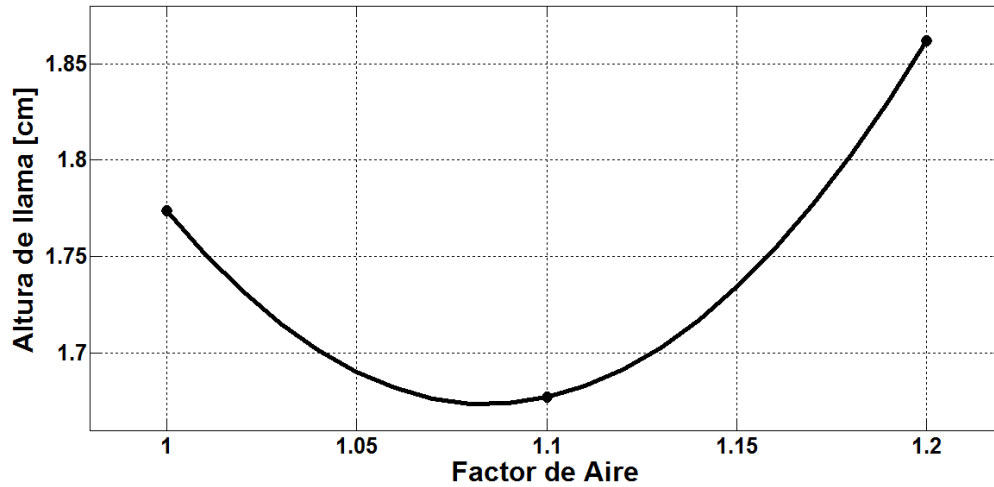
Para el combustible CME B75 se encontró que la llama más pequeña entre las 3 evaluadas se presenta cuando el factor de aire es igual a 1.1. Mientras que la llama más alta se presenta cuando el factor de aire es igual a 1.2. La diferencia de alturas entre las llamas de factores de aire iguales a 1 y 1.1 es de aproximadamente 1 mm, siendo la de factor igual a 1 más alta. En cambio la diferencia de alturas entre las llamas de 1.1 y 1.2 es de 1.8 mm aproximadamente, siendo la de factor 1.2 la más alta.

Tabla 14. Altura de llama – CME B75

Factor de aire		h [cm]
ϕ_1	1.00	1.774
ϕ_2	1.10	1.677
ϕ_3	1.20	1.862

Fuente: Autor

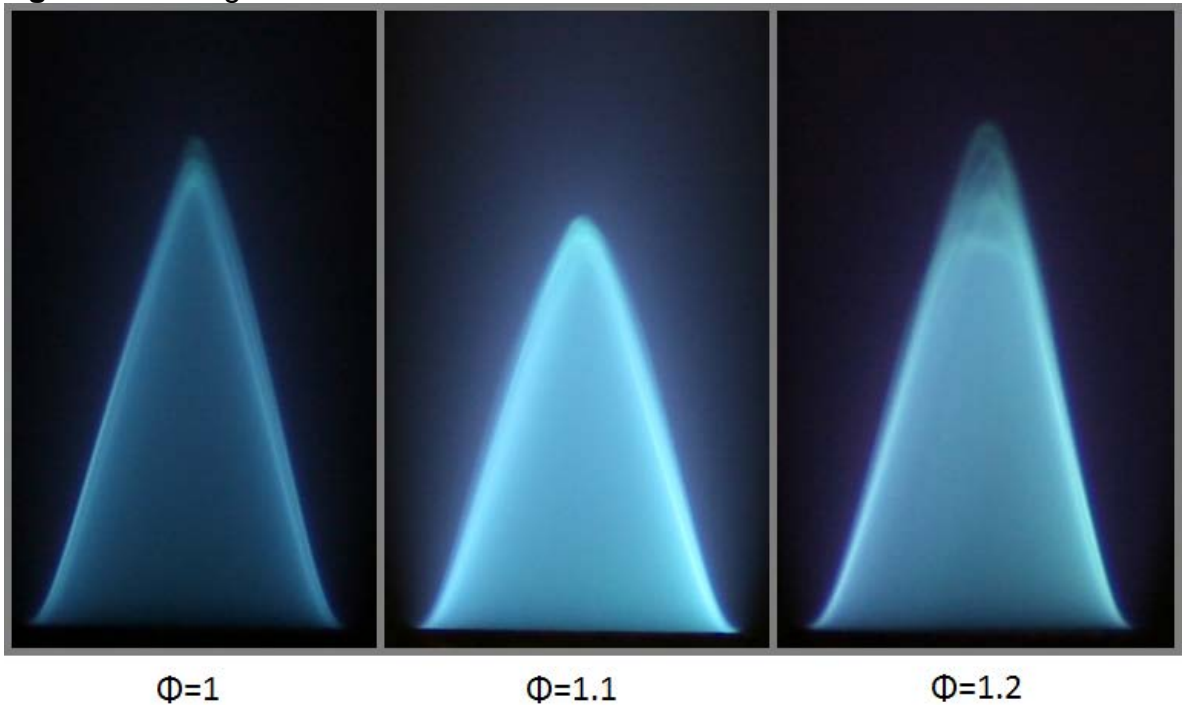
Figura 34. Altura de llama vs factor de aire – CME B75



Fuente: Autor

Analizando el color de las llamas se encontró que la más brillante para este combustible fue cuando el factor de aire es igual a 1.1. Mientras que la más oscura cuando el factor de aire es igual a 1. En este orden de ideas se podría decir que la llama con temperatura más alta entre las 3 analizadas se presenta cuando el factor de aire es igual a 1.1, la siguiente más alta sería para el factor igual a 1.2 y la de más baja temperatura la de factor igual a 1.

Figura 35. Fotografías llama CME B75



Fuente: Autor

5.2.5 CME

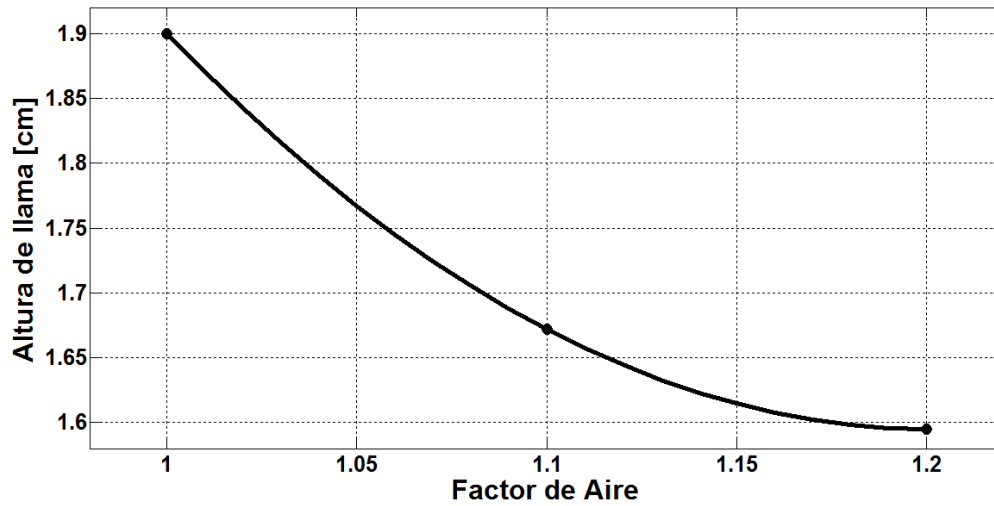
Para el caso del combustible puro a base de canola se encontró que la llama con mayor altura se presenta cuando el factor de aire de la combustión es igual a 1, es decir cuando se da combustión estequiométrica. Mientras que la llama más pequeña se presenta cuando el factor de aire es igual a 1.2. La diferencia de alturas entre las llamas de factores de aire iguales a 1 y 1.1 es aproximadamente 2.3 mm. En cambio la diferencia de alturas entre las llamas de factores 1.1 y 1.2 es de aproximadamente 0.8 mm.

Tabla 15. Altura de llama - CME

Factor de aire		h [cm]
ϕ_1	1.00	1.900
ϕ_2	1.10	1.672
ϕ_3	1.20	1.595

Fuente: Autor

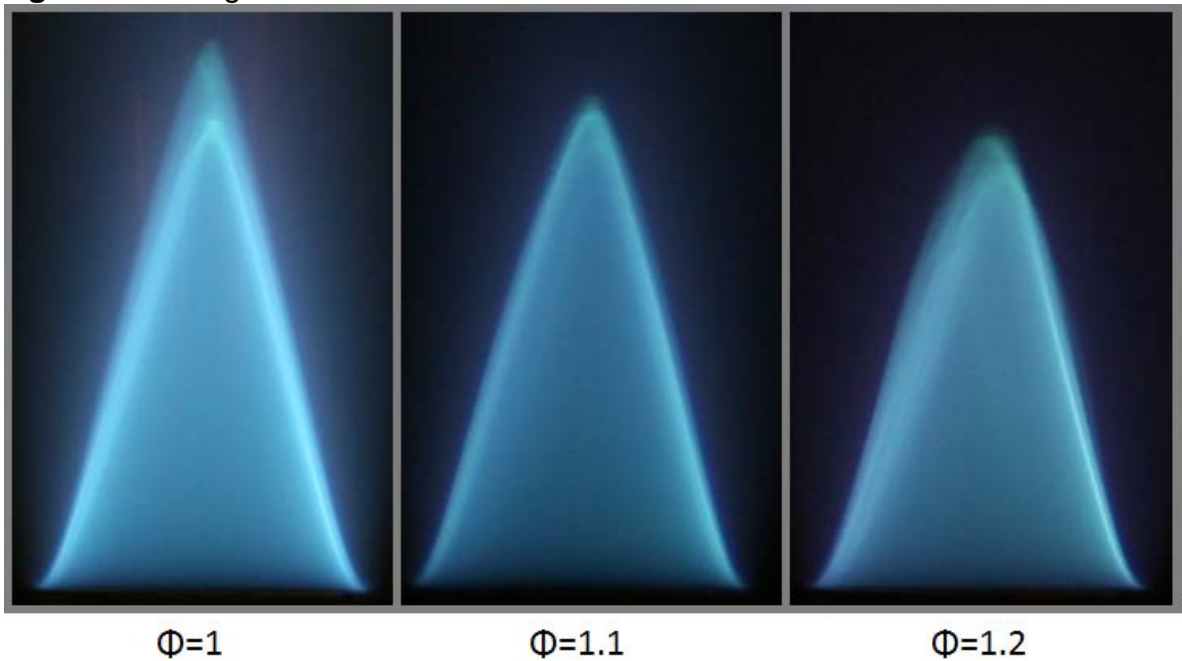
Figura 36. Altura de llama vs factor de aire – CME



Fuente: Autor

Para este combustible se encontró que la llama más brillante y de color azul más claro se presenta cuando el factor de aire es igual a 1. Mientras que la más oscura cuando el factor de aire es igual a 1.1. Esto implica que la llama con temperatura más alta es la de factor de aire igual a 1 y la de más baja temperatura la de 1.1.

Figura 37. Fotografías llama CME



Fuente: Autor

5.2.6 SME B25

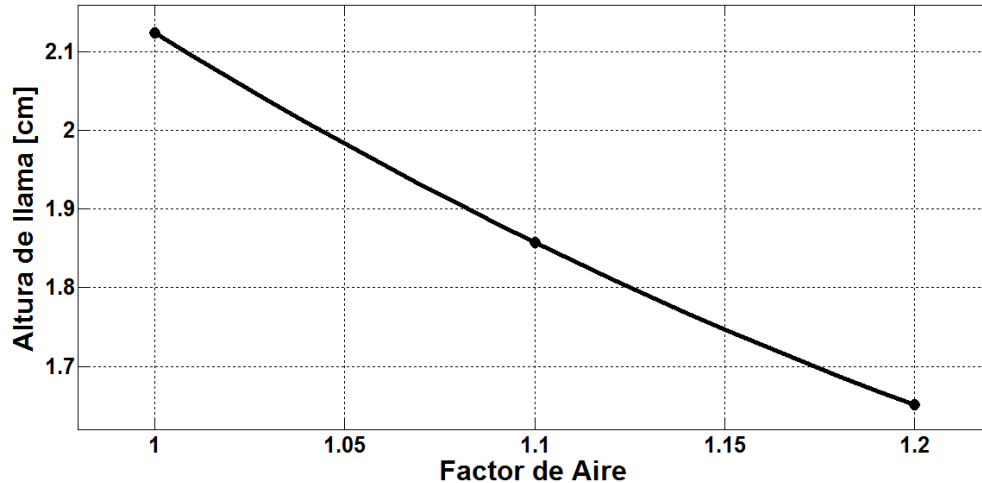
Para el combustible SME B25 se encontró que la llama mas alta se presenta cuando el factor de aire es igual a 1. Mientras que la más pequeña cuando el factor de aire es igual a 1.2. Existe una gran diferencia de altura entre las llamas. La diferencia de altura entre las llamas con factores de aire iguales a 1 y 1.1 es de aproximadamente 2.7 mm. Y la diferencia de altura entre las de factores 1.1 y 1.2 de 2 mm aproximadamente. Esto da una diferencia entre las llamas de 1 y 1.2 de casi 5 mm.

Tabla 16. Altura de llama – SME B25

Factor de aire		h [cm]
ϕ_1	1.00	2.124
ϕ_2	1.10	1.858
ϕ_3	1.20	1.651

Fuente: Autor

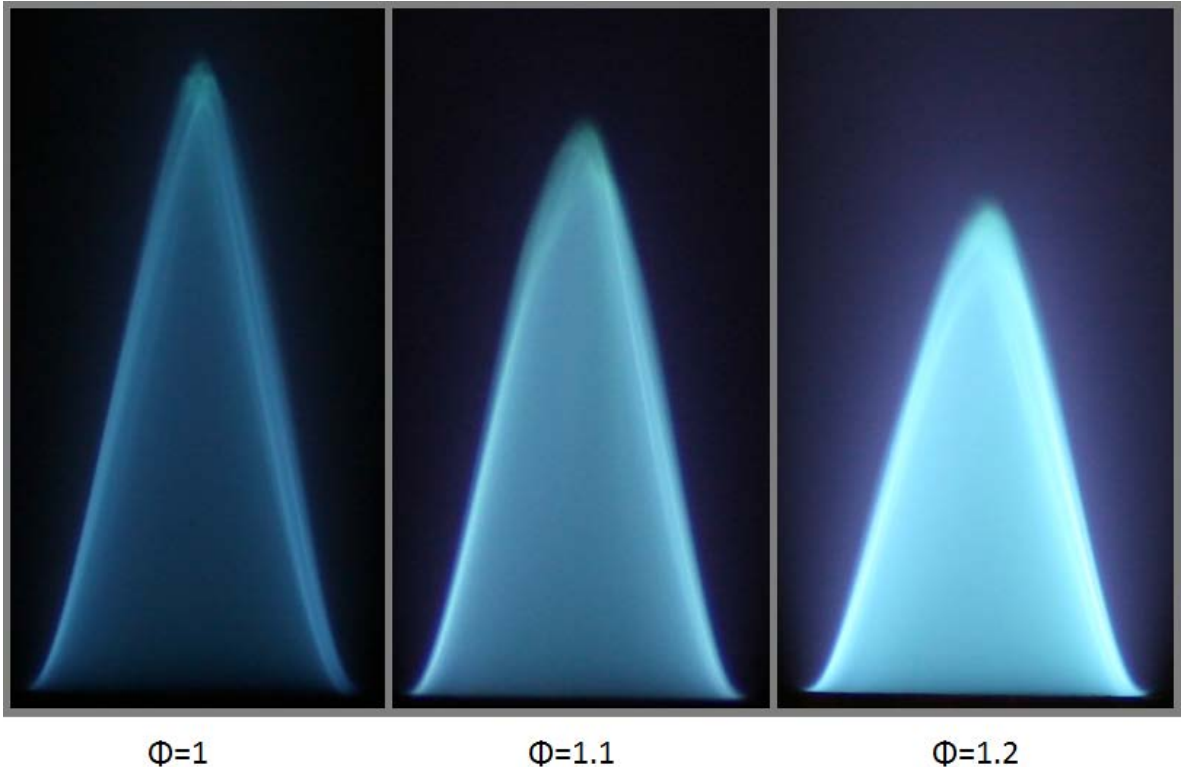
Figura 38. Altura de llama vs factor de aire – SME B25



Fuente: Autor

Se encontró que la llama más brillante y de color azul más claro entre las 3 llamas probadas, se presenta cuando el factor de aire es igual a 1.2. Mientras que la llama más oscura se presenta cuando el factor de aire es igual a 1. De allí se puede concluir que la llama con mayor temperatura es la de factor 1.2 y la de menor temperatura la de factor 1.

Figura 39. Fotografías llama SME B25



Fuente: Autor

5.2.7 SME B50

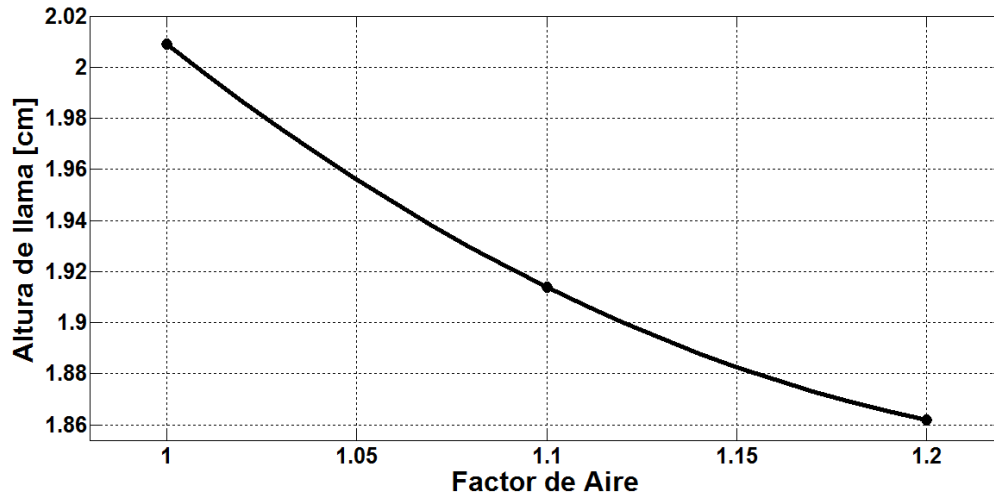
Para el caso del combustible SME B50, el cual contiene 50% diesel y 50% combustible a base de soya, se encontró que la llama mas alta se presenta cuando el factor de aire es igual a 1. Mientras que la llama más pequeña se presenta cuando el factor de aire es igual a 1.2. La diferencia de alturas entre las llamas de factores 1 y 1.1 es de aproximadamente 1mm, mientras que la diferencia de altura entre las llamas de 1.1 y 1.2 es de aproximadamente 0.5mm.

Tabla 17. Altura de llama – SME B50

Factor de aire		h [cm]
$\phi 1$	1.00	2.009
$\phi 2$	1.10	1.914
$\phi 3$	1.20	1.862

Fuente: Autor

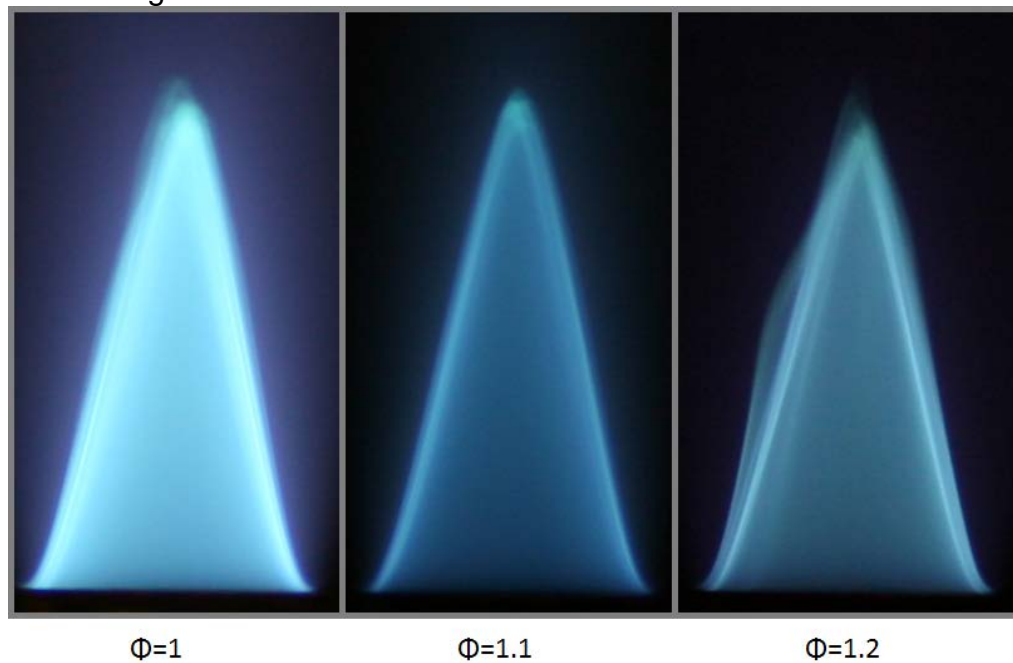
Figura 40. Altura de llama vs factor de aire – SME B50



Fuente: Autor

Para este combustible se encontró que la llama más brillante y de color más claro se presenta cuando el factor de aire es igual a 1. Mientras que la llama más oscura se presenta cuando el factor de aire es igual a 1.1. Esto implica que la llama con temperatura más alta es la de factor de aire igual a 1 y la de temperatura más baja la de factor igual a 1.1.

Figura 41. Fotografías llama SME B50



Fuente: Autor

5.2.8 SME B75

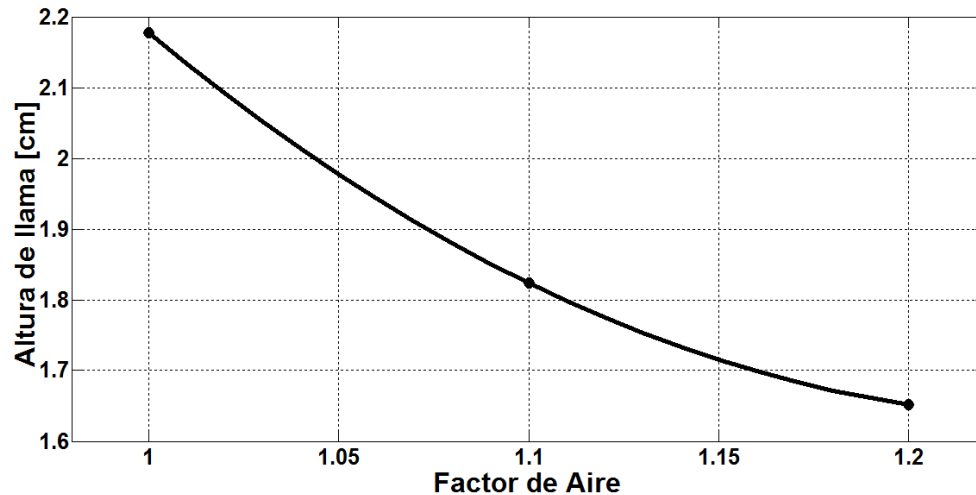
Para el combustible SME B75 se encontró que la llama más alta entre las 3 evaluadas se presenta cuando el factor es igual a 1. En cambio la llama mas baja de las 3 se encontró para el factor de aire igual a 1.2. La diferencia de alturas entre las llamas de factores de aire iguales a 1 y 1.1 fue de aproximadamente 3.5 mm, mientras que la diferencia de alturas entre las llamas de 1.1 y 1.2 fue de aproximadamente 1.7mm.

Tabla 18. Altura de llama – SME B75

	Factor de aire	h [cm]
$\phi 1$	1.00	2.177
$\phi 2$	1.10	1.824
$\phi 3$	1.20	1.652

Fuente: Autor

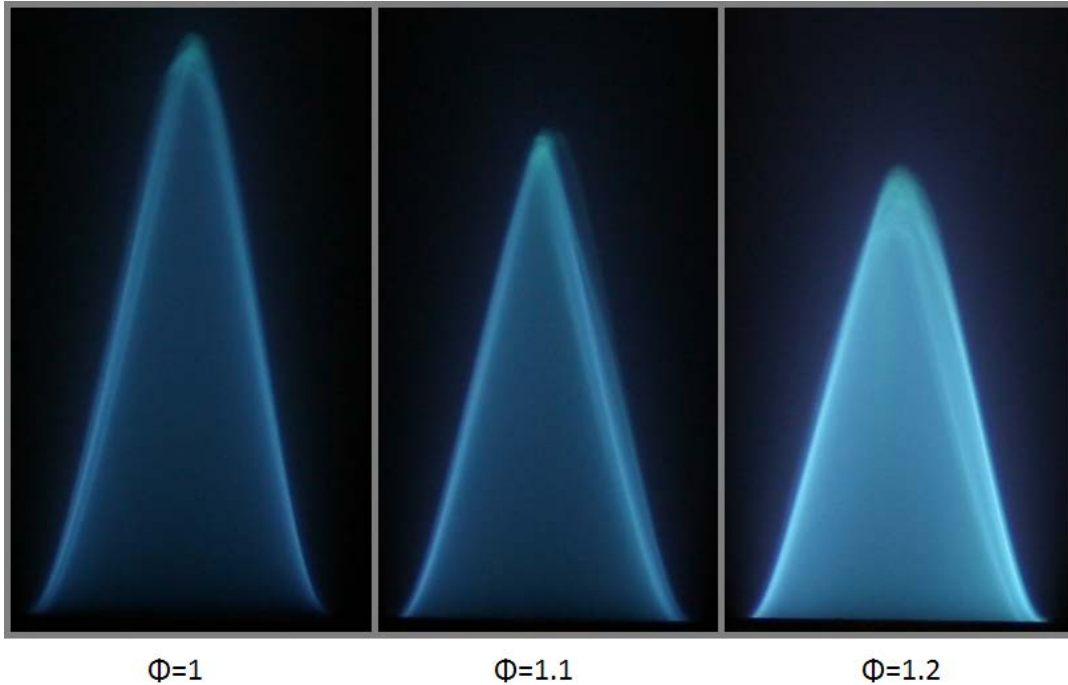
Figura 42. Altura de llama vs factor de aire – SME B75



Fuente: Autor

A pesar que la llama más baja fue la de factor de aire igual a 1.2, esta fue la que presentó un color más brillante que las otras. Así mismo la llama de factor de aire igual a 1, fue la que presentó el color más oscuro. En este orden de ideas se podría decir que la llama que presenta mayor temperatura es la de factor de 1.2 y la de menor temperatura la de factor igual a 1.

Figura 43. Fotografías llama SME B75



Fuente: Autor

5.2.9 SME

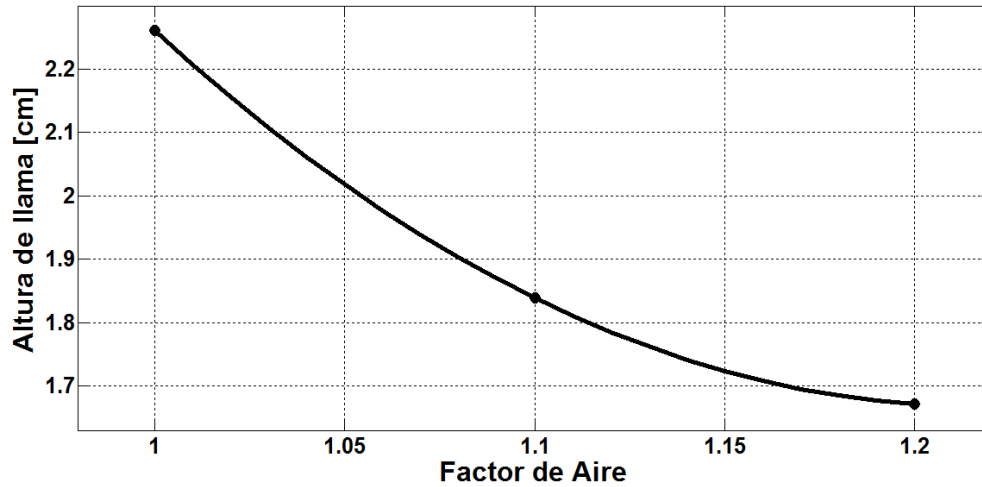
Para el caso del combustible puro a base de soya se encontró que la llama de mayor altura entre las evaluadas se presenta cuando el factor de aire es igual a 1. Mientras que la de menor altura se presenta cuando el factor aire es igual a 1.2. La diferencia de alturas entre las llamas de factores de aire iguales a 1 y 1.1 es de aproximadamente 4.2 mm, en cambio la diferencia entre las llamas de factores 1.1 y 1.2 es de aproximadamente 1.7 mm.

Tabla 19. Altura de llama – SME

Factor de aire		h [cm]
$\phi 1$	1.00	2.261
$\phi 2$	1.10	1.839
$\phi 3$	1.20	1.672

Fuente: Autor

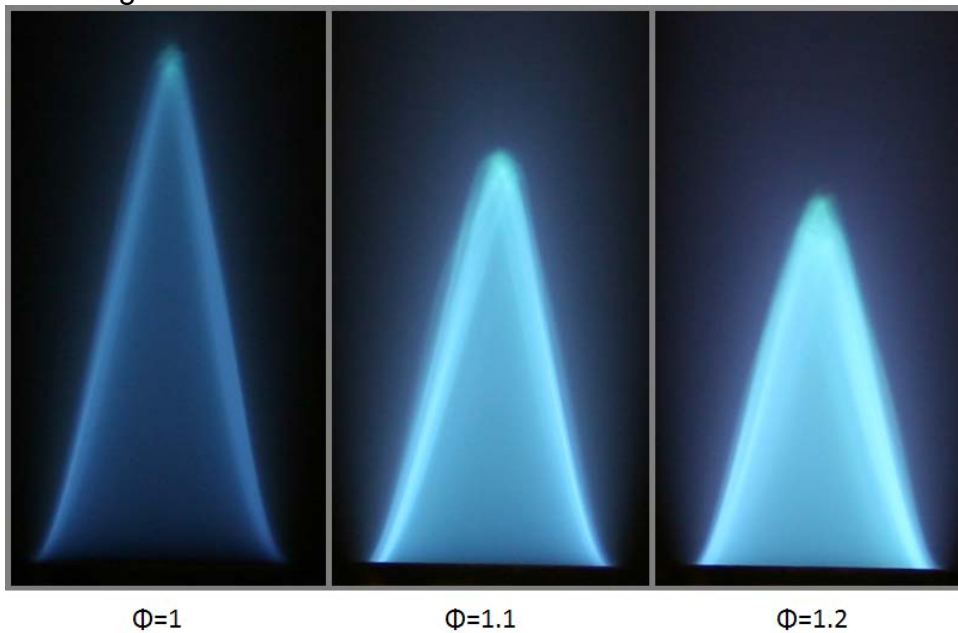
Figura 44. Altura de llama vs factor de aire – SME



Fuente: Autor

Se encontró que la llama más brillante se presenta cuando el factor de aire es igual a 1.2, mientras que la llama más oscura cuando el factor de aire es igual a 1. De esto se puede concluir que la llama que tiene mayor temperatura es la de factor de aire igual a 1.2, mientras que la de menor temperatura la de factor igual a 1.

Figura 45. Fotografías llama SME



Fuente: Autor

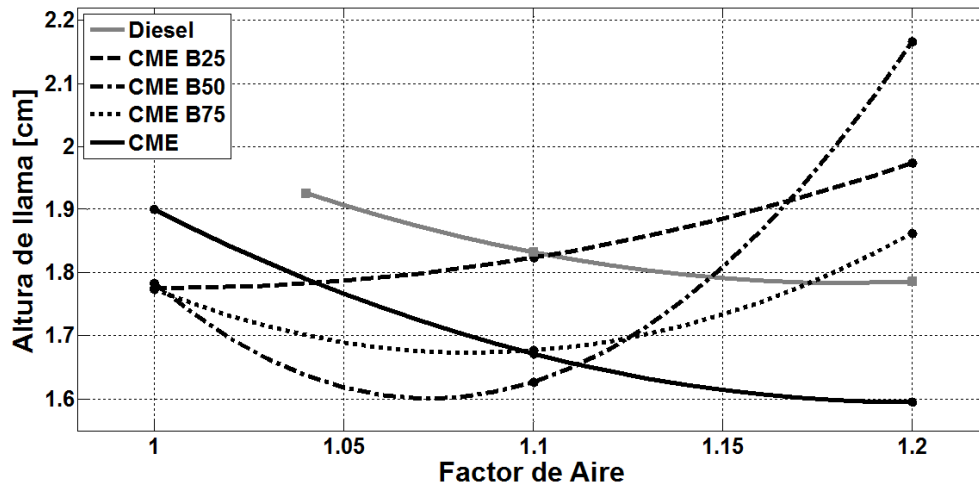
5.2.10 CME, Diesel y mezclas

Analizando los resultados de los combustibles a base de canola se puede observar que para el factor de aire igual a 1, el combustible que presentó la mayor altura de llama fue el combustible puro (CME). En esta afirmación no se puede tener en cuenta el diesel por lo que no pudo ser evaluado a este factor de aire. Los otros 3 combustibles (CME B25, CME B50 y CME B75) presentaron una altura de llama muy cercana entre los tres para este factor de aire.

Para el factor de aire igual a 1.1 el combustible que presentó la mayor altura de llama fue el diesel, aunque este valor es muy cercano al presente en el combustible CME B25. El combustible que presentó la menor altura de llama fue el CME B50. Y los combustibles CME y CME B75 presentaron valores muy cercanos entre ellos para este factor de aire, su valor fue mayor que el presente para el CME B50 pero menor que el presente para el diesel y el CME B25.

Para el factor de aire igual a 1.2 se encontró que los datos estuvieron más dispersos que para los otros factores, el rango de valores va desde 2.2 hasta 1.6 aproximadamente. El combustible que presentó la mayor altura de llama fue el CME B50 y el que presentó la menor altura fue el CME.

Figura 46. Altura de llama vs factor de aire – CME y mezclas con diesel

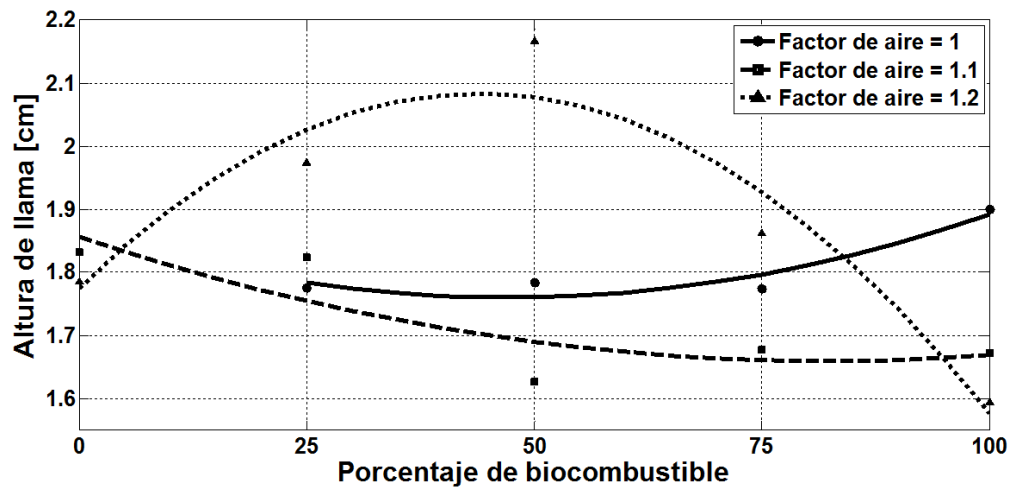


Fuente: Autor

Es importante mirar también que para los combustibles CME B25, CME B50 y CME B75, se presentó la altura de llama más alta cuando el factor de aire es igual a 1.2. Mientras que para los combustibles puros, es decir Diesel y CME, a este

factor de aire presentaron la altura más baja registrada. También es importante resaltar que para los 3 combustibles anteriormente mencionados (CME B25, CME B50 y CME B75) la altura de la llama para el factor de aire igual a 1, fue muy cercana.

Figura 47. Altura de llama vs porcentaje de combustible – CME y mezclas con diesel



Fuente: Autor

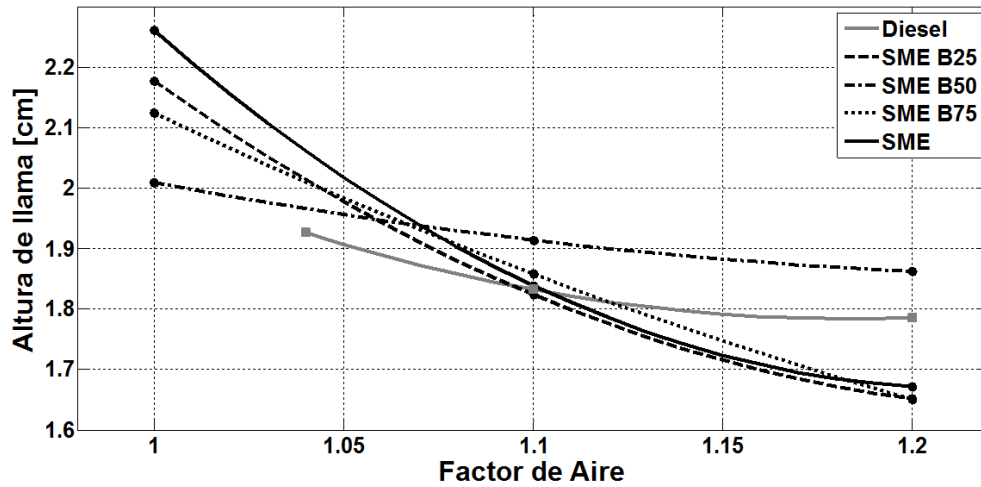
5.2.11 SME, Diesel y mezclas

Para el factor de aire igual a 1 el combustible que presentó mayor altura fue el combustible puro a base de soya SME, mientras que el de menor altura fue el SME B75. El diesel no se tiene en cuenta para esta afirmación debido a que no pudo ser evaluado a este factor de aire.

Para el caso del factor de aire igual a 1.1 los valores registrados para todos los combustibles estuvieron bastante cercanos. El rango en el cual están los valores es de 1.9 a 1.8 aproximadamente. El combustible que presentó la mayor altura de llama fue el SME B50, y el que presentó la menor altura fue el SME B25 aunque este último estuvo muy cercano a los demás combustibles.

Al analizar los resultados para el factor de aire 1.2 se puede observar que el combustible que presentó la mayor altura fue el SME B50. La menor altura fue presentada por los combustibles SME B25 y SME B50 estos 2 presentaron alturas prácticamente iguales y muy cercanas a la altura registrada por el SME.

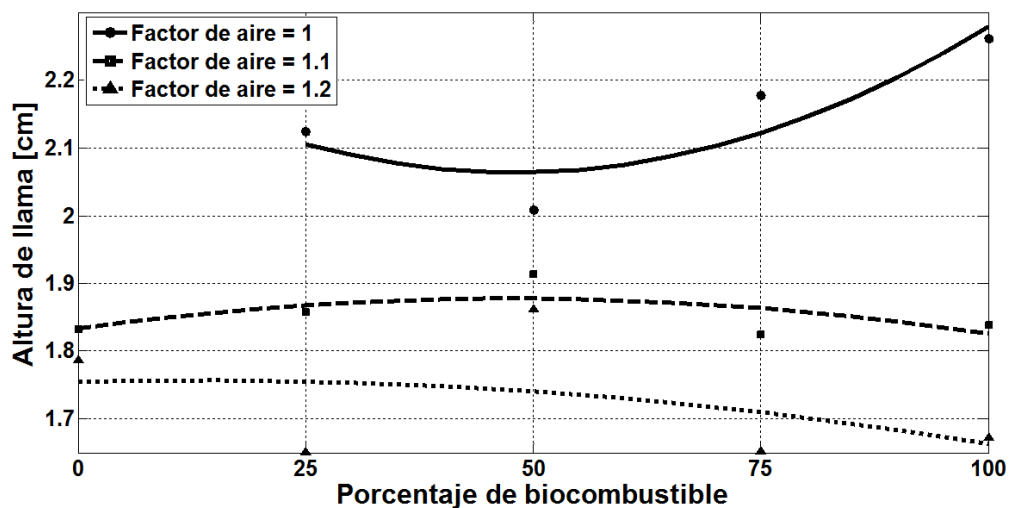
Figura 48. Altura de llama vs factor de aire – SME y mezclas con diesel



Fuente: Autor

Para el caso de los combustibles a base de soya se pudo observar que todos mostraron la misma tendencia en los datos. Las llamas más altas para todos los combustibles se presentaron cuando el factor de aire es igual a 1, exceptuando el diesel. Aun así la altura más alta registrada para el diesel fue para el factor 1.04. Además las llamas más pequeñas para todos los combustibles fueron encontradas para el factor de aire 1.2.

Figura 49. Altura de llama vs porcentaje de combustible – SME y mezclas con diesel



Fuente: Autor

5.3 PROCESO DE RETROCESO DE LLAMA – FLASHBACK

El proceso de retroceso de llama o flash back se presenta cuando la velocidad de salida de los gases es menor que la velocidad de propagación de llama. La velocidad de salida de los gases está determinada por el caudal de la mezcla aire combustible, la densidad del gas y el área transversal de tubería. Cuando se presenta el fenómeno de retroceso de llama, esta viaja por la tubería de alimentación. Es un fenómeno muy peligroso, ya que si no se tienen los accesorios de protección la llama podría llegar a la fuente de alimentación de combustible o de aire causando un accidente. Es por esto que es necesario instalar siempre una válvula arrestadora de llama, para que dado el caso que ocurra un fenómeno de este la llama sea bloqueada en la tubería previniendo que esta llegue a causar algún daño.

Existen factores que incitan a que este fenómeno ocurra. El primero de ellos es la velocidad de precalentado de la mezcla aire combustible. La temperatura afecta la densidad de los gases, por lo tanto al cambiar la temperatura de precalentado cambiará la densidad de la mezcla. A medida que se reduce la temperatura de precalentado, la densidad se hace mayor, luego el caudal de la mezcla se hace menor por lo tanto la velocidad de salida de los gases también menor. Para el caso de los experimentos realizados en este estudio, la velocidad de precalentado de todos los combustibles está en un rango de 350-400 C, ya que esta temperatura es seleccionada dependiendo de la temperatura de ebullición de cada combustible. En los experimentos se encontró que bajo ninguna circunstancia se podía correr los experimentos bajo una temperatura de precalentado menor a 300 C, ya que se presentaban procesos de retroceso de llama, además que se encontró que a esta temperatura parte del combustible inyectado se quedaba líquido en la tubería.

Otro factor que incita el proceso de retroceso de llama es el cambio brusco del caudal de aire suministrado. Si se reduce drásticamente la cantidad de aire que viaja por las tuberías, la llama viajara automáticamente a través de ellas debido a que la velocidad de salida de los gases se verá reducida automáticamente. Es por eso que cuando se cambia las condiciones de combustión de la llama se debe hacer con precaución.

5.4 PROCESO DE LEVANTAMIENTO DE LLAMA – LIFT OFF

El proceso de levantamiento de llama o lift off se presenta cuando la velocidad de salida de los gases es mayor que la velocidad de propagación de la llama. La velocidad de salida de los gases está determinada por el caudal de la mezcla aire combustible, la densidad del gas y el área transversal de la tubería. El proceso de levantamiento de llama se manifiesta con la inestabilidad de la llama. Cuando este fenómeno ocurre, la llama se levanta del quemador y se desvanece. Este fenómeno no tiene tantos riesgos como el de retroceso de llama, pero es importante debido a que si el proceso ocurre la llama no se puede asentar en el quemador, luego la combustión no ocurre. En este caso es importante tener un buen sistema de expulsión de gases, para que cuando la llama se apague, los gases puedan ser retirados a la atmósfera y no se queden en el recinto.

Los factores que incitan este proceso son los mismos que promueven el proceso de retroceso de llama. La temperatura de precalentado es uno de los más importantes. Cuando la temperatura de precalentado aumenta, la densidad de los gases disminuye y por lo tanto el caudal se hace mayor aumentando también la velocidad de salida de los gases. Para el caso de los experimentos realizados la temperatura se pudo llevar hasta 450C sin problemas, a partir de esta temperatura la velocidad de salida de los gases era muy alta y ocurría el levantamiento de llama.

Otro factor que promueve el fenómeno es el cambio brusco del caudal de aire, al aumentarlo bruscamente la velocidad de salida de los gases también aumenta llevando a que esta sea mayor que la velocidad de propagación de llama y ocurra el levantamiento. Es por esto que se recomienda los cambios de caudal con precaución para evitar que la llama se extinga.

6. CONCLUSIONES

- El propósito de este estudio era analizar el efecto del factor de aire sobre la velocidad de propagación de llama y la forma de llama de 2 biocombustibles puros y sus mezclas a diferentes proporciones con diesel No. 2. La importancia del estudio es documentar los valores de estas propiedades ya que en el momento no se encuentra estos datos sobre estos combustibles.
- El diesel No.2 presentó los mayores valores de velocidad de propagación de llama como era esperado. Esta afirmación no se puede hacer para el factor de aire igual a 1 ya que el diesel no pudo ser probado a este valor. Los biocombustibles evaluados presentan valores cercanos al diesel. Para el caso del biocombustible derivado de la soya, las mejores propiedades fueron encontradas para una mezcla B25. Mientras que para el caso del derivado de canola las propiedades cambian con el factor de aire.
- Analizando desde el punto de vista de la velocidad de propagación de llama, los biocombustibles evaluados no muestran una mejoría determinante respecto al diesel.
- El biodiesel a base de soya presentó tendencias más claras en los datos que el biodiesel a base de canola, tanto para la velocidad de propagación de llama como para la forma. Esto permitió tener una interpretación de los datos más fácil.
- Las llamas más altas se vieron presentes para los combustibles a base de soya, mientras que las velocidades de propagación de llama más altas se encontraron para los combustibles a base de canola.

7. BIBLIOGRAFÍA

ALDANA, Cristian. Combustion properties of spray flames of soy methyl ester blended with No. 2 diesel fuel. Master of Science. Norman: The University of Oklahoma. College of Engineering, School of aerospace & mechanical engineering, 2010.

BENJUMEA HERNÁNDEZ, Pedro Nel et al. Medición de la velocidad de propagación de llamas premezcladas de metano-aire y gas natural guajira-aire utilizando el método del ángulo del cono. Ingeniería de petróleos. Medellín : Universidad Nacional de Colombia. Facultad de minas, Ingeniería de petróleos, 2003.

CLAVIJO LOPEZ, Hugo F. Uso del Aceite de Soya como Combustible Diesel. Ingeniería Química. Bucaramanga : Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería Química, 1985.

ERAZO, Jaime et al. Atomization and combustion of canola methyl ester biofuel spray. Mechanical Engineering. Norman: The University of Oklahoma. College of Engineering, School of aerospace & mechanical engineering, 2010.

FORE, Seth R. et al. Net energy balance of small-scale on-farm biodiesel production from canola and soybean. Agronomy and plant genetics. Saint Paul: The University of Minnesota. Department of Agronomy and Plant Genetics, 2011.

FORO NACIONAL BUENAS PRÁCTICAS DE MANEJO DE BIODIÉSEL Y SUS MEZCLAS. (1: 8, febrero, 2011:Bucaramanga, Colombia). Memorias. 2011.

HABIB, Zehra et al. Performance and emission characteristics of biofuel in a small-scale gas turbine engine. Mechanical Engineering. Norman: The University of Oklahoma. College of Engineering, School of aerospace & mechanical engineering, 2010.

HUANG, Zuohua et al. Measurements of laminar burning velocities for natural gas-hydrogen-air mixtures. Energy and Power Engineering. Xi'an: Xi'an Jiaotong University. College of engineering, School of energy and power engineering, 2006.

NATARAJAN, J. et al. Laminar flame speeds of H₂/CO mixtures: Effect of CO₂ dilution, preheat temperature, and pressure. Aerospace engineering. Atlanta: Georgia Institute of Technology. College of engineering, School of aerospace engineering, 2007.


SINGH, Vinay et al. Effects of Equivalence Ratio on Emission and Radiation from Laminar Partially Premixed Flames of Petroleum Biofuel Blends. Mechanical Engineering. Norman: The University of Oklahoma. College of Engineering, School of aerospace & mechanical engineering, 2010.

SINGH, Vinay et al. Effects of Equivalence Ratio on combustion characteristics from Laminar Partially Premixed Flames of Petroleum diesel fuel, Biofuel and their Blends. Mechanical Engineering. Norman : The University of Oklahoma. College of Engineering, School of aerospace & mechanical engineering, 2010.

TURNS, Stephen R. An introduction to combustion: concepts and applications. New York : McGraw-Hill, 1996.

VAGELOPUOLOS, Christine M. y ECOLFOPOULOS, Fokion N. Direct experimental determination of laminar flame speeds. Mechanical Engineering. Los Angeles: University of Southern California. College of engineering, Department of aerospace and mechanical engineering, 1998.

ANEXO A. ARTÍCULO CIENTÍFICO

	FLAME SPEED FOR SOY AND CANOLA BIOFUELS AND THEIR BLENDS WITH DIESEL	
	VALORIZACIÓN DE TECNOLOGIAS UNIDAD DE GESTIÓN DE CONOCIMIENTO Y TECNOLOGÍA	
	IPC-UGC-F-028	Elaborado 12/06/2011

FLAME SPEED FOR SOY AND CANOLA BIOFUELS AND THEIR BLENDS WITH DIESEL


Juan S. Gomez Meyer¹, Jabid Quiroga¹

¹ Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Santander, Colombia
E-mail addresses: j_gomez_meyer@hotmail.com (J. Gomez Meyer), , jabib@uis.edu.co (J. Quiroga)

Abstract:

In this article flame speed is determined experimentally for laminar premixed flames for two biofuels. Using fuels obtained from soy and canola and their blends with diesel. The blends studied correspond to proportions of 25%, 50% and 75% of biofuel. The experiments are performed in a set-up dedicated to this kind of experiments. The flame speed for equivalence ratios of 1, 1.1 and 1.2 is obtained studying the geometry of the flame. The experimental results showed that the diesel fuel presented the highest flame speed. In the case of the soy biofuel it is found that the blend with the higher flame speed is the 25% biofuel one. However for the canola biofuel the higher flame speed was different for each equivalence ratio.

KeyWords: Combustion, biofuels, flame speed, soy, canola.

	FLAME SPEED FOR SOY AND CANOLA BIOFUELS AND THEIR BLENDS WITH DIESEL		
	VALORIZACIÓN DE TECNOLOGÍAS UNIDAD DE GESTIÓN DE CONOCIMIENTO Y TECNOLOGÍA		
	IPC-UGC-F-028	Elaborado 12/06/2011	Versión:

INTRODUCTION

Biofuels are fuels which are derived from biomass. Biofuels include solid biomass, liquid fuels and various biogases. Biofuels are divided in bioalcohols, biodiesel and biogas. Biodiesel is produced from oils or fats using transesterification and is a liquid similar in composition to fossil/mineral diesel. Biodiesel can be used as a fuel in any diesel engine in its pure form, but it is usually used as a diesel additive in different quantities to reduce levels of particulates, carbon monoxide, and hydrocarbons from diesel-powered vehicles.


Biofuels are gaining increased public and scientific attention, driven by factors such as oil price spikes, the need for increased energy security and, concern over greenhouse gas emissions from fossil fuels. The combustion properties of this new alternative source of energy are being investigated. Different studies have been made to different type of biofuels. Singh et al determinate the heat fraction and the global emission of CO and NO_x in laminar premixed flames of blends of Canola Methyl Ester (CME) and diesel No. 2 for equivalence ratios of 1.2, 2, 3 y 7. Cristian Aldana studied the combustion properties and the global emissions of spray flames of Soy Methyl Ester (SME) and CME blended with diesel No.2. Erazo et al determinate the radial concentrations of NO, CO, CO₂ y O₂, and the temperature profile of pure CME and diesel. Habib et al analyzed the performance and emissions of a 30kW gas turbine engine burning Jet A, SME, CME, rapeseed methyl ester, hog-fat biofuel, and their 50% (volume) blends in Jet A. They found that the addition of biofuel resulted in the reduction of the static thrust, the thrust-specific fuel consumption, and increased the thermal efficiency. While the CO and NO emission were reduced with the biofuel blends.

In this paper, flame speed is measured for two biodiesels obtained from soy and canola and their blends with diesel for different equivalence ratios. The flame speed for different equivalence ratios is obtained from the geometry of the flame produced in a Bunsen burner. Different blends are studied changing the percentage of biofuel in the blend.

METHODOLOGY

FLAME STRUCTURE

In the flame frame (Figure 1) the upstream mixture reaches the flame with $u_u = s_u^o$, where u_u is the velocity of the fuel-air gaseous mixture and s_u^o is the standard premixed flame with the superscript o indicating the particular mode of propagation. The upstream mixture approaches the flame with temperature T_u , and leaves the flame with velocity u_b^o and temperature T_b^o . The upstream mixture reaches with mass fraction of species Y_u , and leaves the flame with $Y_b^o=0$ indicating its complete consumption upon crossing the flame. The temperature change occurs in the pre-heat zone which has characteristic thickness l_D^o and governed by heat and mass diffusion processes. As shown in the Figure 1, the mixture is gradually heated up by the heat produced by the chemical reactions, resulting in a continuously increasing temperature profile until T_b^o is reached. The profile is not linear due to the presence of convective transport. The reaction zone has characteristic thickness $l_R^o \ll l_D^o$

	FLAME SPEED FOR SOY AND CANOLA BIOFUELS AND THEIR BLENDS WITH DIESEL	
	VALORIZACIÓN DE TECNOLOGÍAS	
	UNIDAD DE GESTIÓN DE CONOCIMIENTO Y TECNOLOGÍA	
IPC-UGC-F-028	Elaborado 12/06/2011	Versión:

and is a highly peaked function, consisting of a rapidly increasing portion due to activation of the reaction, followed by a rapidly decreasing portion due to depletion of the reactant.

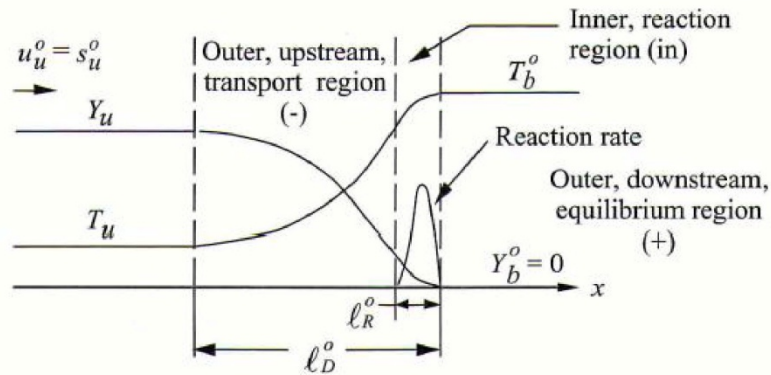


Figure 1. Schematic showing the premixed flame detailed structure including the reaction zone. Source: LAW, Chung K. Combustion physics.

Since $l_R \ll l_D$, the entire flame thickness can be basically identified as l_D . Across this flame, the overall conservation of mass and energy holds. Thus, from continuity, $d(\rho u) dx = 0$, we have


$$f = \rho u = \rho_u u_u^o = \rho_b u_b^o$$

where f is the constant mass flux and will be referred to as the laminar burning flux.

FLAME SPEED

The flame speed is the measured rate of expansion of the flame front in a combustion reaction. A non-stable flame speed could produce flashback or lift-off, both affecting the quality and security of the combustion process. Flame speed depends on the fuel and it is affected by properties like temperature and pressure in combustion.

Because of the fundamental significance of the laminar burning velocities of premixed flames, a considerable amount of effort has been expended toward their determination. The major difficulty in their determination is that it can be rarely seen a planar, stationary and adiabatic flame which is very important in the accuracy of the measurements. Usually the upstream flow is nonuniform while the flame is also either propagating and/or curved. In the Figure 2 it is shown that the upstream unburned mixture approaches the flame front with velocity u_u and at an angle α_u . After passing through the flame the flow is refracted and the burned mixture leaves the flame with velocity u_b and at an angle α_b . In that case if we assume that, in crossing the flame,

	FLAME SPEED FOR SOY AND CANOLA BIOFUELS AND THEIR BLENDS WITH DIESEL	
	VALORIZACIÓN DE TECNOLOGÍAS UNIDAD DE GESTIÓN DE CONOCIMIENTO Y TECNOLOGÍA	
	IPC-UGC-F-028	Elaborado 12/06/2011

continuity of velocity holds in the tangential direction, then the laminar flame speed can be defined as the normal component of u_u , pointed in the direction away from the flame.

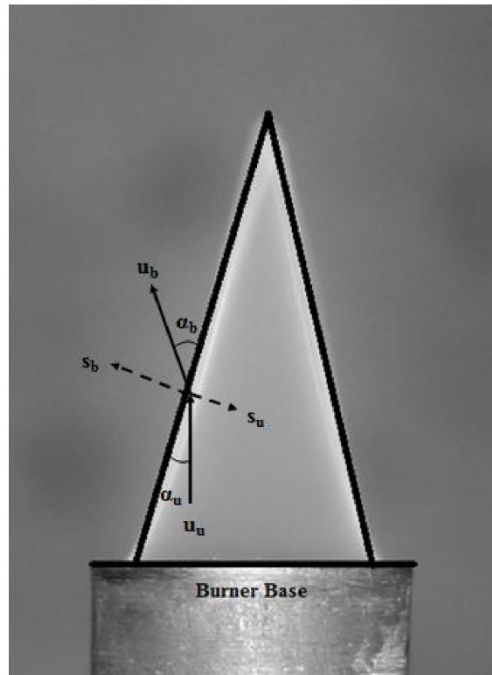



Figure 2. Definitions of the upstream and downstream laminar flame speeds

Another problem in the flame speed measurement is the definition of the flame front and how it can be determined. Since the flame has finite thickness and structure, it becomes quite uncertain to define either the upstream boundary of the preheat zone for s_u or the downstream boundary of the reaction zone for s_b . If the flame is also curved, then there is an uncertainty of defining a local tangential plane for the evaluation of the flow velocities. This can be handled by taking multiple pictures to have several data to select. Different methods exist to determine the flame speed for laminar flames, from stationary burner flames fixed by an upstream flow, to propagating flames in open and closed chambers.

	FLAME SPEED FOR SOY AND CANOLA BIOFUELS AND THEIR BLENDS WITH DIESEL	
	VALORIZACIÓN DE TECNOLOGÍAS UNIDAD DE GESTIÓN DE CONOCIMIENTO Y TECNOLOGÍA	
	IPC-UGC-F-028	Elaborado 12/06/2011

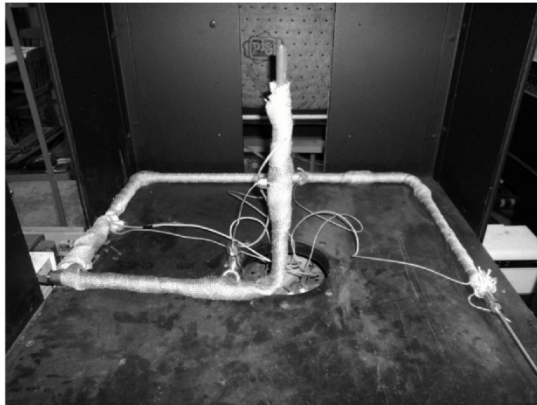
EXPERIMENTAL PROCEDURE

The Bunsen flame method is used to measure the flame speed. In this method a premixture flows up a circular tube and burns after it exists from the tube. The fuel is injected to a hot air stream using a syringe pump, Figure 3 (a), which provides a constant volumetric flow. The air stream is pre-heated using heating tapes wrapped around the tubes where the air flows, Figure 3 (b). As the tube is sufficiently long and its cross-sectional area constant, the velocity profile at the exit is parabolic.


The test bench used for the experimentation is showed in Figure 3 (c). The set up must provide a fixed temperature value to achieve the complete evaporation of the fuel, for the experiments a temperature of 400C and a pressure of 8 psig is used. Different tests for different mixtures are performed varying the air equivalence ratio. When a stable combustion is obtained multiple pictures are taken shifting the exposure settings between 1/30 and 1/40 s.

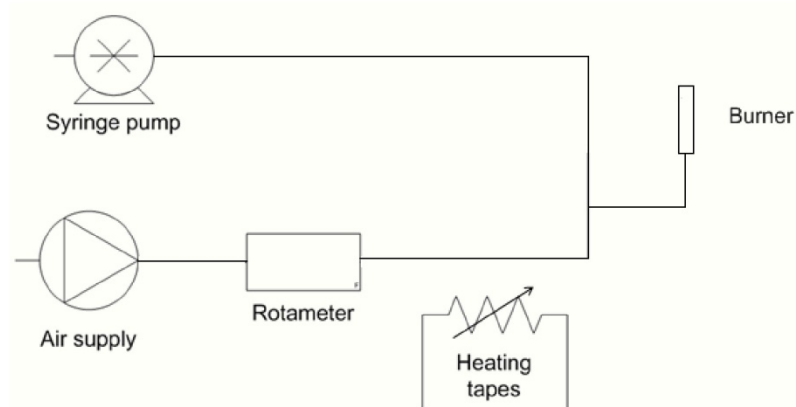


(a)



(b)

	FLAME SPEED FOR SOY AND CANOLA BIOFUELS AND THEIR BLENDS WITH DIESEL		
	VALORIZACIÓN DE TECNOLOGÍAS UNIDAD DE GESTIÓN DE CONOCIMIENTO Y TECNOLOGÍA		
	IPC-UGC-F-028	Elaborado 12/06/2011	Versión:



(c)

Figure 3. (a) Syringe pump (b) Heating tapes and burner (c) Schematic representation of the experimental Set-up


In each test condition several pictures are taken, from each picture the flame geometry is obtained and an average is calculated from all the values obtained in each case. The flame speed is calculated using (3).

$$\frac{dm}{dt} = \rho_u S_u A_f \quad (3)$$

where S_u is the flame speed, dm/dt is the mass flow of the air-fuel mix, A_f is the superficial area of the outer cone and ρ_u is the density of the air-fuel mix. The superficial area of the outer cone is calculated using the pictures taken to the flame.

RESULTS

The experimental results for the different tests are shown in Table 1 and Figures 4-7. And the corresponding results for the flame height are shown in Table 2 and Figures 8-11. Unstable flame is obtained for stoichiometric combustion of pure diesel, therefore diesel is evaluated for an equivalence ratio of 1.04. It is used to call biofuel blends with abbreviations, with the letter B and the percentage of biofuel: B100 when it is pure biodiesel, or B5, B15, B30 or B50 for different percentages. Pictures of the flames are shown in Figure 12.

	FLAME SPEED FOR SOY AND CANOLA BIOFUELS AND THEIR BLENDS WITH DIESEL		
	VALORIZACIÓN DE TECNOLOGÍAS UNIDAD DE GESTIÓN DE CONOCIMIENTO Y TECNOLOGÍA		
	IPC-UGC-F-028	Elaborado 12/06/2011	Versión:

DIESEL			CME B25		CME B50	CME B75	CME	
Equivalence ratio		SL [cm/s]	Equivalence ratio	SL [cm/s]	SL [cm/s]	SL [cm/s]	SL [cm/s]	
$\phi 1$	1.04	57.386	$\phi 1$	1.1	58.670	57.715	56.147	47.461
$\phi 2$	1.10	59.052	$\phi 2$	1.1	51.719	57.191	52.860	49.998
$\phi 3$	1.20	54.119	$\phi 3$	1.2	45.142	39.697	43.443	47.891

SME B25		SME B50	SME B75	SME	
Equivalence ratio	SL [cm/s]	SL [cm/s]	SL [cm/s]	SL [cm/s]	
$\phi 1$	1.1	50.404	49.505	44.646	41.742
$\phi 2$	1.1	53.571	48.167	49.720	48.635
$\phi 3$	1.2	53.425	45.275	49.675	48.897

Table 1. Flame speed obtained for different soy and canola blends

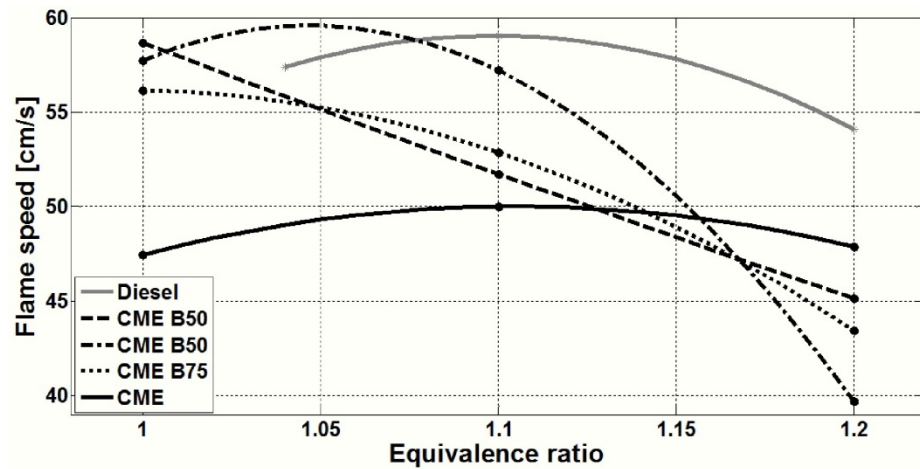



Figure 4. Flame speed vs Equivalence ratio – CME and blends with diesel

	FLAME SPEED FOR SOY AND CANOLA BIOFUELS AND THEIR BLENDS WITH DIESEL		
	VALORIZACIÓN DE TECNOLOGÍAS UNIDAD DE GESTIÓN DE CONOCIMIENTO Y TECNOLOGÍA		
	IPC-UGC-F-028	Elaborado 12/06/2011	Versión:

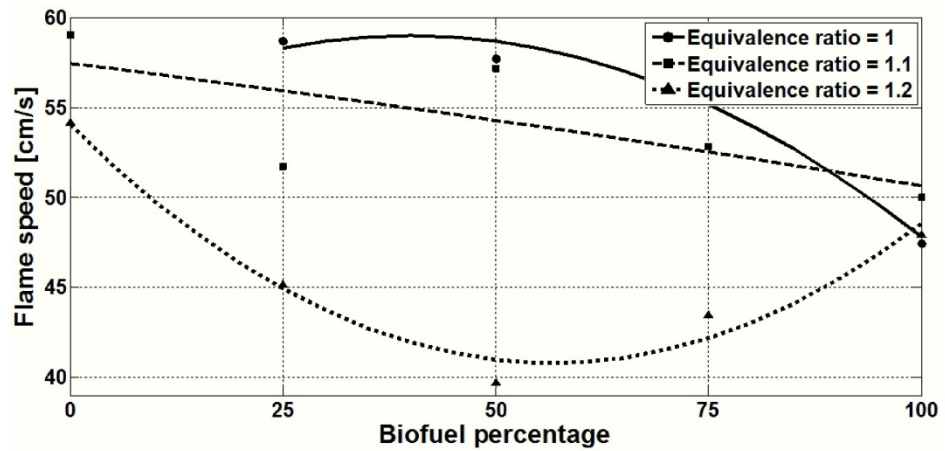


Figure 5. Flame speed vs Biofuel percentage – CME and blends with diesel

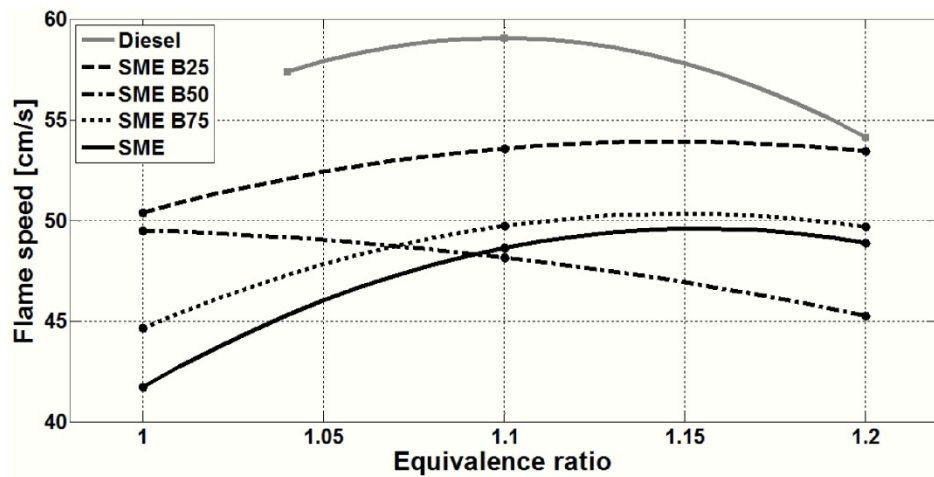



Figure 6. Flame speed vs Equivalence ratio – SME and blends with diesel

	FLAME SPEED FOR SOY AND CANOLA BIOFUELS AND THEIR BLENDS WITH DIESEL		
	VALORIZACIÓN DE TECNOLOGÍAS UNIDAD DE GESTIÓN DE CONOCIMIENTO Y TECNOLOGÍA		
	IPC-UGC-F-028	Elaborado 12/06/2011	Versión:

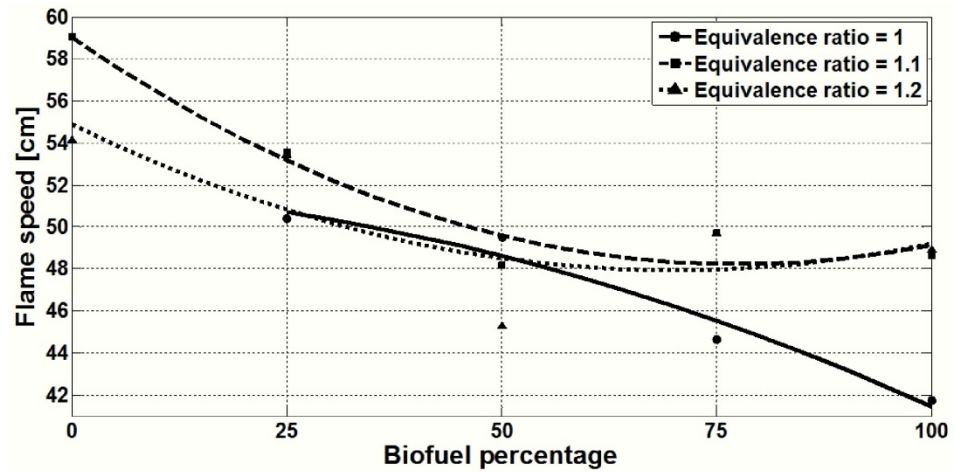



Figure 7. Flame speed vs biofuel percentage – SME and blends with diesel

DIESEL			CME B25		CME B50	CME B75	CME	
Equivalence ratio	h [cm]		Equivalence ratio	h [cm]	h [cm]	h [cm]	h [cm]	
φ1	1.04	1.926	φ1	1.1	1.776	1.784	1.774	1.900
φ2	1.10	1.832	φ2	1.1	1.824	1.627	1.677	1.672
φ3	1.20	1.786	φ3	1.2	1.974	2.166	1.862	1.595

SME B25		SME B50	SME B75	SME	
Equivalence ratio	h [cm]	h [cm]	h [cm]	h [cm]	
φ1	1.1	2.124	2.009	2.177	2.261
φ2	1.1	1.858	1.914	1.824	1.839
φ3	1.2	1.651	1.862	1.652	1.672

Table 2. Flame height for different soy and canola blends

	FLAME SPEED FOR SOY AND CANOLA BIOFUELS AND THEIR BLENDS WITH DIESEL		
	VALORIZACIÓN DE TECNOLOGÍAS UNIDAD DE GESTIÓN DE CONOCIMIENTO Y TECNOLOGÍA		
	IPC-UGC-F-028	Elaborado 12/06/2011	Versión:

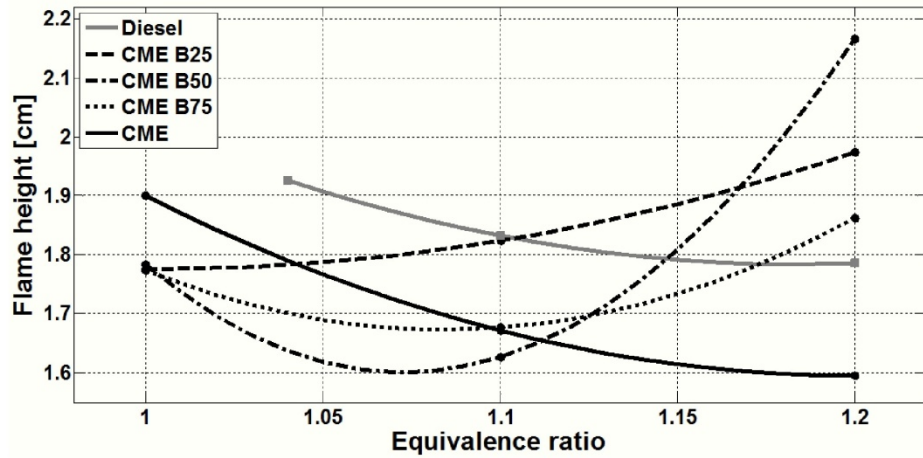


Figure 8. Flame height vs Equivalence ratio – CME and blends with diesel

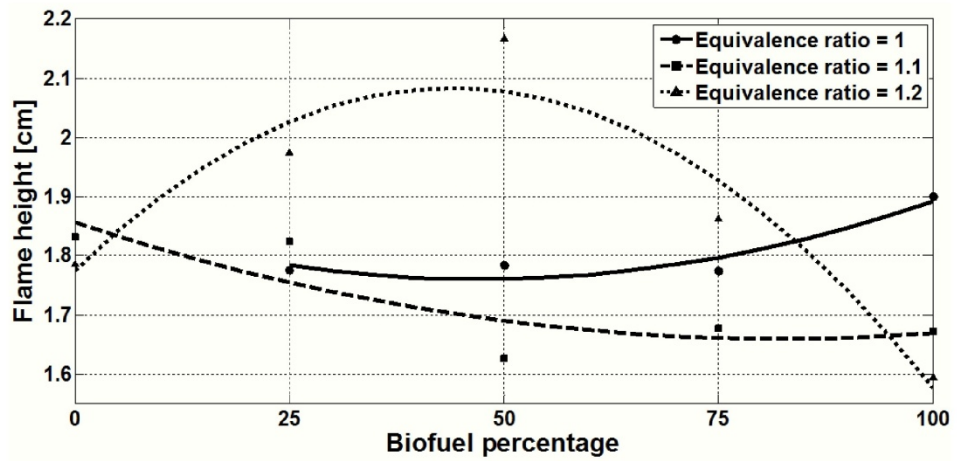



Figure 9. Flame height vs Biofuel percentage – CME and blends with diesel

	FLAME SPEED FOR SOY AND CANOLA BIOFUELS AND THEIR BLENDS WITH DIESEL		
	VALORIZACIÓN DE TECNOLOGÍAS UNIDAD DE GESTIÓN DE CONOCIMIENTO Y TECNOLOGÍA		
	IPC-UGC-F-028	Elaborado 12/06/2011	Versión:

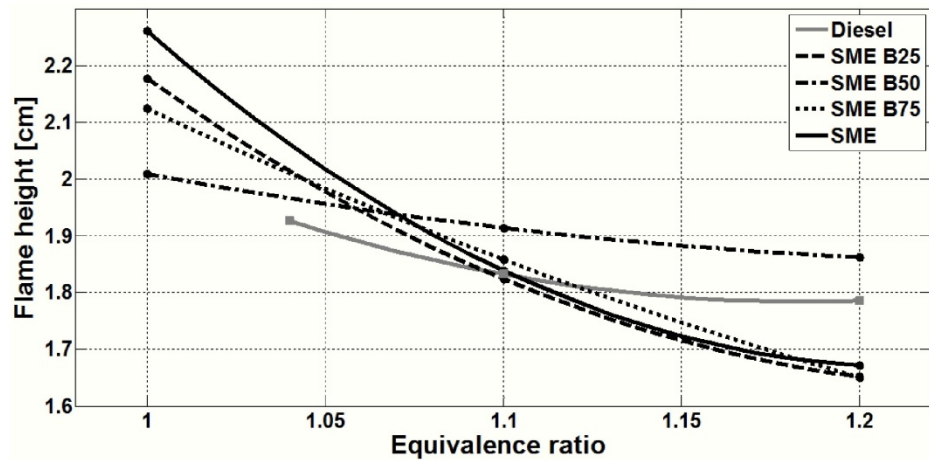


Figure 10. Flame height vs Equivalence ratio – SME and blends with diesel

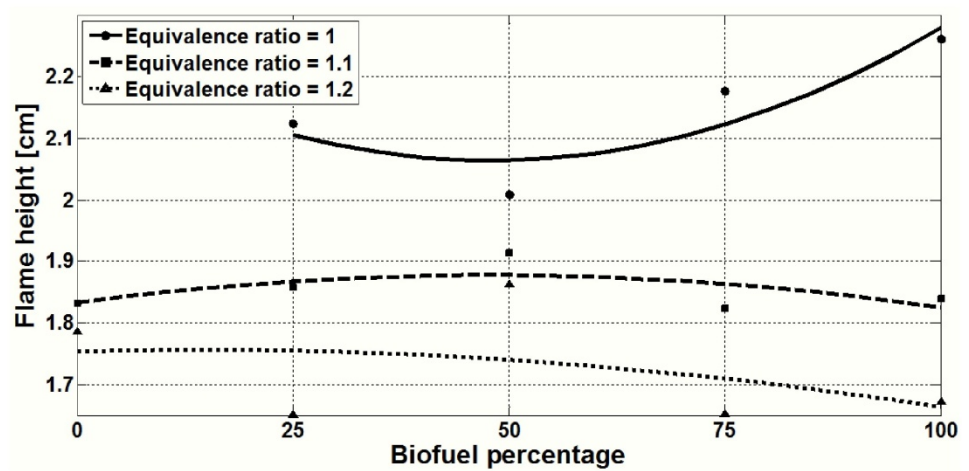



Figure 11. Flame height vs biofuel percentage – SME and blends with diesel

	FLAME SPEED FOR SOY AND CANOLA BIOFUELS AND THEIR BLENDS WITH DIESEL		
	VALORIZACIÓN DE TECNOLOGÍAS		
	UNIDAD DE GESTIÓN DE CONOCIMIENTO Y TECNOLOGÍA		
	IPC-UGC-F-028	Elaborado 12/06/2011	Versión:

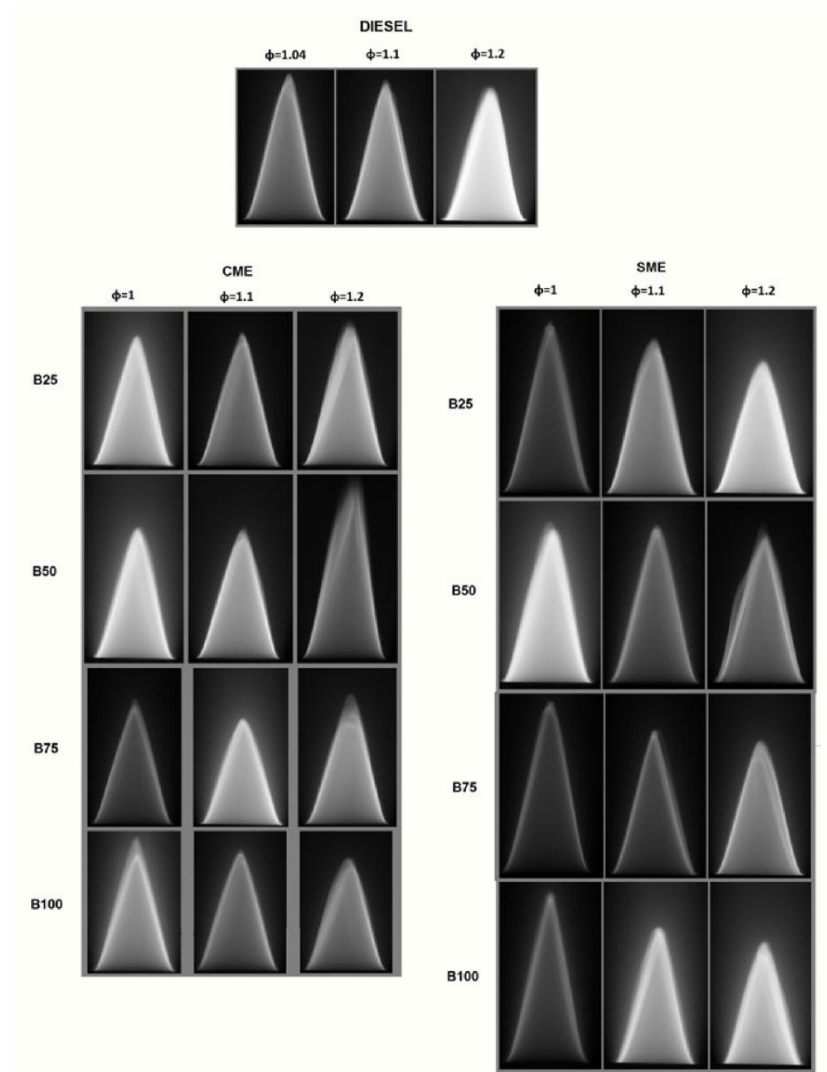



Figure 12. Pictures of each fuel tested at each equivalence ratio.

	FLAME SPEED FOR SOY AND CANOLA BIOFUELS AND THEIR BLENDS WITH DIESEL		
	VALORIZACIÓN DE TECNOLOGÍAS UNIDAD DE GESTIÓN DE CONOCIMIENTO Y TECNOLOGÍA		
	IPC-UGC-F-028	Elaborado 12/06/2011	Versión:

RESULTS AND DISCUSSION

Experimental results showed that pure diesel present the highest flame speed values for all the fuels in all the equivalence ratios tested. For the canola-based fuels it is found that the highest flame speeds are for the CME B25, CME B50 and CME for the equivalence ratios of $\phi=1$, $\phi=1.1$ y $\phi=1.2$ respectively. In Table 1 it can be seen that when the equivalence ratio increases the flame speed decrease for most of the fuels.

For the soy-based fuel, the blend SME B25, presented the highest flame speed for all the equivalence ratios tested. For $\phi=1$ the fuel that showed the lower flame speed is the pure biofuel and as the percentage of the diesel in the blend increased, the flame speed increased also. The lower flame speed values for $\phi=1.1$ y $\phi=1.2$ are for the SME B50. In Figure 5 it can be observed that for soy-based fuels as the percentage of the biodiesel increase in the blend the flame speed decreases.

The flame height changed for each equivalence ratio, but for the canola-based fuels a trend is not found in the experimental results. For $\phi=1$, the highest flame is for the pure biofuel, while the blends have close values between them. For $\phi=1$ the lowest flame is for the CME B50 and the highest for diesel. But for $\phi=1.2$ the difference between each fuel is higher, being the CME the fuel who have the lower height and the CME B50 the higher. For the soy-based fuels it is found that the higher flames when $\phi=1$ and the lower flames for $\phi=1.2$ for all fuels tested. The highest flame is for the pure biofuel when $\phi=1$. In Figure 8 it can be seen that when the equivalence ratio increases the flame height decrease. In addition, when changing the percentage of the biofuel in the blend the change in the flame height is not higher than the 16%.


CONCLUSIONS

In this research it is found that for the soy-based biofuel, the highest values are for the blend SME B25. In the other hand for the case of the canola-based biofuel the higher values change for each equivalence ratio. Analyzing the flame speed difference between pure diesel and biofuel blends it can be seen that for the canola-based fuels the difference is not higher than the 30% approximately, while for the soy-based fuels the difference is not higher than the 20% approximately. The soy-based biofuel presented more clearly trends for both flame speed and flame height. The highest flame height is found for soy-based blends while the highest flame speed for canola-based blends.

REFERENCES

ALDANA, Cristian. Combustion properties of spray flames of soy methyl ester blended with No. 2 diesel fuel. Master of Science. Norman: The University of Oklahoma. College of Engineering, School of aerospace & mechanical engineering, 2010.

BENJUMEA HERNÁNDEZ, Pedro Nel et al. Medición de la velocidad de propagación de llamas premezcladas de metano-aire y gas natural guajira-aire utilizando el método del ángulo del

	FLAME SPEED FOR SOY AND CANOLA BIOFUELS AND THEIR BLENDS WITH DIESEL		
	VALORIZACIÓN DE TECNOLOGÍAS UNIDAD DE GESTIÓN DE CONOCIMIENTO Y TECNOLOGÍA		
	IPC-UGC-F-028	Elaborado 12/06/2011	Versión:

cono. Ingeniería de petróleos. Medellín : Universidad Nacional de Colombia. Facultad de minas, Ingeniería de petróleos, 2003.

CLAVIJO LOPEZ, Hugo F. Uso del Aceite de Soya como Combustible Diesel. Ingeniería Química. Bucaramanga : Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería Química, 1985.

ERAZO, Jaime et al. Atomization and combustion of canola methyl ester biofuel spray. Mechanical Engineering. Norman: The University of Oklahoma. College of Engineering, School of aerospace & mechanical engineering, 2010.

FORE, Seth R. et al. Net energy balance of small-scale on-farm biodiesel production from canola and soybean. Agronomy and plant genetics. Saint Paul: The University of Minnesota. Department of Agronomy and Plant Genetics, 2011.

FORO NACIONAL BUENAS PRÁCTICAS DE MANEJO DE BIODIÉSEL Y SUS MEZCLAS. (1: 8, febrero, 2011:Bucaramanga, Colombia). Memorias. 2011.


HABIB, Zehra et al. Performance and emission characteristics of biofuel in a small-scale gas turbine engine. Mechanical Engineering. Norman: The University of Oklahoma. College of Engineering, School of aerospace & mechanical engineering, 2010.

HUANG, Zuohua et al. Measurements of laminar burning velocities for natural gas-hydrogen-air mixtures. Energy and Power Engineering. Xi'an: Xi'an Jiaotong University. College of engineering, School of energy and power engineering, 2006.

LAW, Chung K. Combustion physics. New York : Cambridge University Press, 2006.

NATARAJAN, J. et al. Laminar flame speeds of H₂/CO mixtures: Effect of CO₂ dilution, preheat temperature, and pressure. Aerospace engineering. Atlanta: Georgia Institute of Technology. College of engineering, School of aerospace engineering, 2007.

SINGH, Vinay et al. Effects of Equivalence Ratio on Emission and Radiation from Laminar Partially Premixed Flames of Petroleum Biofuel Blends. Mechanical Engineering. Norman: The University of Oklahoma. College of Engineering, School of aerospace & mechanical engineering, 2010.

	FLAME SPEED FOR SOY AND CANOLA BIOFUELS AND THEIR BLENDS WITH DIESEL	
	VALORIZACIÓN DE TECNOLOGÍAS UNIDAD DE GESTIÓN DE CONOCIMIENTO Y TECNOLÓGIA	
	IPC-UGC-F-028	Elaborado 12/06/2011

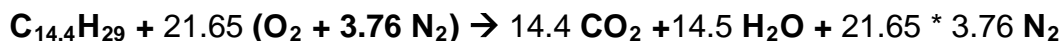
SINGH, Vinay et al. Effects of Equivalence Ratio on combustion characteristics from Laminar Partially Premixed Flames of Petroleum diesel fuel, Biofuel and their Blends. Mechanical Engineering. Norman : The University of Oklahoma. College of Engineering, School of aerospace & mechanical engineering, 2010.

TURNS, Stephen R. An introduction to combustion: concepts and applications. New York : McGraw-Hill, 1996.

VAGELOPUOLOS, Christine M. y ECOLFOPOULOS, Fokion N. Direct experimental determination of laminar flame speeds. Mechanical Engineering. Los Angeles: University of Southern California. College of engineering, Department of aerospace and mechanical engineering, 1998.

ANEXO B. TABLAS DE CÁLCULO

1. DIESEL



$$AF_{STO} = 14.73 \quad \rho = 850 \text{ kg/m}^3 \quad m = 0.000935 \text{ kg/min Combustible}$$

Tabla 1. Cálculo del caudal de aire para diesel

	Φ	AF	m_{AIRE} [kg/min]	V_{AIRE} [m ³ /min]	V_{AIRE} [m ³ /min]	Rotámetro
1	1.04	12.16	0.01324	0.011034	11.03	8.2
2	1.1	13.39	0.01252	0.010433	10.43	7.8
3	1.2	12.27	0.01148	0.009563	9.56	7.1

Tabla 2. Cálculo de la densidad de la mezcla aire-combustible para el diesel

Φ	COMBUSTIBLE		AIRE		MEZCLA
	X	ρ [kg/m ³]	X	ρ [kg/m ³]	ρ [kg/m ³]
1.04	0.04	3.9495599	0.96	1.2	1.316922941
1.1	0.04	3.9495599	0.96	1.2	1.310802333
1.2	0.04	3.9495599	0.96	1.2	1.301911041

Tabla 3. Cálculo del flujo másico de mezcla aire-combustible para el diesel

Φ	COMBUSTIBLE		AIRE		MEZCLA
	[cc/min]	[kg/min]	[lpm]	[kg/min]	[kg/min]
1.04	1.1	0.000935	11.03	0.01324	0.01417605
1.1	2.1	0.000935	10.43	0.01252	0.01345381
1.2	3.1	0.000935	9.56	0.01148	0.01241057

Tabla 4. Cálculo de la velocidad de propagación de llama para los diferentes factores de aire para el diesel

$\Phi=1.04$

Foto	Base Real Quemador [cm]	Base Quemador [cm]	Base Quemador [cm]	Base Real Llama [cm]	Altura Llama[cm]	Altura Real Llama[cm]	α [deg]	hcono [cm]	Area [cm ²]	S_L [cm/s]
0916	1.27	8.57	6.91	1.024	13.16	1.950	14.710	2.016	3.243	55.318
0917	1.27	8.57	6.77	1.003	12.98	1.924	14.616	1.988	3.133	57.270
0918	1.27	8.57	6.84	1.014	13.23	1.961	14.494	2.025	3.224	55.644
0920	1.27	8.57	6.77	1.003	12.91	1.913	14.692	1.978	3.117	57.561
0924	1.27	8.57	6.49	0.962	12.73	1.886	14.301	1.947	2.941	61.001
0925	1.27	8.57	6.7	0.993	12.91	1.913	14.547	1.977	3.083	58.200
0926	1.27	8.57	6.77	1.003	12.95	1.919	14.649	1.984	3.126	57.394
0928	1.27	8.57	6.77	1.003	13.12	1.944	14.467	2.008	3.164	56.697
Promedio				1.001		1.926	14.560	1.990	3.129	57.386

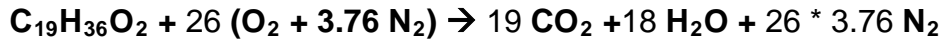
$\Phi=1.1$

Foto	Base Real Quemador	Base Quemador [cm]	Base Quemador [cm]	Base Real Llama [cm]	Altura Llama[cm]	Altura Real Llama[cm]	α [deg]	hcono [cm]	Area [cm ²]	S_L [cm/s]
0949	1.27	8.54	6.46	0.961	11.92	1.773	15.162	1.837	2.771	61.723
0950	1.27	8.54	6.46	0.961	12.38	1.841	14.623	1.903	2.871	59.579
0951	1.27	8.54	6.54	0.973	11.99	1.783	15.255	1.848	2.823	60.586
0953	1.27	8.54	6.53	0.971	12.87	1.914	14.235	1.975	3.012	56.795
0954	1.27	8.54	6.49	0.965	12.2	1.814	14.895	1.877	2.846	60.103
0955	1.27	8.54	6.5	0.967	12.2	1.814	14.917	1.878	2.851	60.005
0956	1.27	8.54	6.74	1.002	12.45	1.851	15.146	1.918	3.020	56.645
0957	1.27	8.54	6.67	0.992	12.52	1.862	14.916	1.927	3.002	56.981
Promedio				0.974		1.832	14.893	1.895	2.900	59.052

$\Phi=1.2$

Foto	Base Real Quemador [cm]	Base Quemador [cm]	Base Quemador [cm]	Base Real Llama [cm]	Altura Llama[cm]	Altura Real Llama[cm]	α [deg]	hcono [cm]	Area [cm ²]	S _t [cm/s]
1017	1.27	8.54	6.98	1.038	12.03	1.789	16.178	1.863	3.037	52.309
1018	1.27	8.54	6.77	1.007	11.85	1.762	15.942	1.833	2.898	54.816
1019	1.27	8.54	6.81	1.013	12.63	1.878	15.088	1.945	3.095	51.341
1020	1.27	8.54	6.88	1.023	12.25	1.822	15.686	1.892	3.041	52.245
1021	1.27	8.54	6.77	1.007	12.1	1.799	15.629	1.869	2.955	53.766
1023	1.27	8.54	6.56	0.976	11.92	1.773	15.385	1.839	2.817	56.392
1024	1.27	8.54	6.77	1.007	11.6	1.725	16.268	1.797	2.842	55.906
1025	1.27	8.54	6.7	0.996	11.68	1.737	16.004	1.807	2.828	56.178
			Promedio	1.008		1.786	15.772	1.855	2.939	54.119

2. CME



$$\text{AF}_{\text{STO}} = 12.06 \quad \rho = 881 \text{ kg/m}^3 \quad m = 0.000969 \text{ kg/min Combustible}$$

Tabla 5. Cálculo del caudal de aire para CME

	Φ	AF	m_{AIRE} [kg/min]	V_{AIRE} [m ³ /min]	V_{AIRE} [m ³ /min]	Rotámetro
1	1	12.06	0.01169	0.009738	9.74	7.3
2	1.1	10.96	0.01062	0.008853	8.85	6.6
3	1.2	10.05	0.00974	0.008115	8.12	6.1

Tabla 6. Cálculo de la densidad de la mezcla aire-combustible para CME

Φ	COMBUSTIBLE		AIRE		MEZCLA
	X	ρ [kg/m ³]	X	ρ [kg/m ³]	ρ [kg/m ³]
1	0.04	5.7932098	0.96	1.2	1.3701189
1.1	0.03	5.7932098	0.97	1.2	1.355176
1.2	0.03	5.7932098	0.97	1.2	1.3426463

Tabla 7. Cálculo del flujo másico de mezcla aire-combustible para CME

Φ	COMBUSTIBLE		AIRE		MEZCLA
	[cc/min]	[kg/min]	[lpm]	[kg/min]	[kg/min]
1	1.1	0.0009691	9.74	0.01169	0.01265487
1.1	2.1	0.0009691	8.85	0.01062	0.01159253
1.2	3.1	0.0009691	8.12	0.00974	0.01070725

Tabla 8. Cálculo de la velocidad de propagación de llama para los diferentes factores de aire para CME

$\Phi=1$

Foto	Base Real Quemador [cm]	Base Quemador [cm]	Quemador [cm]	Base Real Llama [cm]	Altura Llama[cm]	Altura Real Llama[cm]	α [deg]	hcono [cm]	Area [cm ²]	S_L [cm/s]
1417	1.27	8.36	6.77	1.028	12.98	1.972	14.616	2.038	3.292	46.761
1418	1.27	8.36	6.81	1.035	11.85	1.800	16.032	1.873	3.044	50.576
1419	1.27	8.36	7.09	1.077	13.26	2.014	14.968	2.085	3.528	43.637
1420	1.27	8.36	6.98	1.060	13.05	1.982	14.972	2.052	3.418	45.037
1421	1.27	8.36	6.95	1.056	12.06	1.832	16.074	1.907	3.162	48.684
1422	1.27	8.36	6.91	1.050	13.16	1.999	14.710	2.067	3.408	45.167
1423	1.27	8.36	6.91	1.050	11.64	1.768	16.532	1.845	3.041	50.614
1424	1.27	8.36	6.88	1.045	12.06	1.832	15.920	1.905	3.128	49.217
Promedio				1.050		1.900	15.478	1.971	3.253	47.461

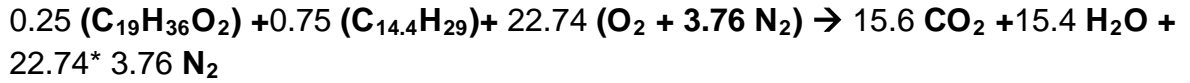
$\Phi=1.1$

Foto	Base Real Quemador [cm]	Base Quemador [cm]	Quemador [cm]	Base Real Llama [cm]	Altura Llama[cm]	Altura Real Llama[cm]	α [deg]	hcono [cm]	Area [cm ²]	S_L [cm/s]
1399	1.27	8.4	6.7	1.013	11.32	1.711	16.485	1.785	2.840	50.201
1400	1.27	8.4	6.91	1.045	11.36	1.718	16.916	1.795	2.946	48.394
1401	1.27	8.4	6.77	1.024	11.98	1.811	15.778	1.882	3.026	47.113
1402	1.27	8.4	6.67	1.008	10.62	1.606	17.434	1.683	2.666	53.480
1404	1.27	8.4	6.95	1.051	10.79	1.631	17.852	1.714	2.829	50.400
1406	1.27	8.4	6.95	1.051	10.79	1.631	17.852	1.714	2.829	50.400
1407	1.27	8.4	6.98	1.055	10.62	1.606	18.192	1.690	2.802	50.888
1408	1.27	8.4	7.02	1.061	10.97	1.659	17.743	1.741	2.903	49.108
Promedio				1.038		1.672	17.281	1.751	2.855	49.998

$\Phi=1.2$

Foto	Base Real Quemador [cm]	Base Quemador [cm]	Quemador [cm]	Base Real Llama [cm]	Altura Llama[cm]	Altura Real Llama[cm]	α [deg]	hcono [cm]	Area [cm ²]	S _L [cm/s]
1434	1.27	8.4	7.02	1.061	10.35	1.565	18.733	1.652	2.755	48.248
1435	1.27	8.4	7.02	1.061	10.35	1.565	18.733	1.652	2.755	48.248
1436	1.27	8.4	6.91	1.045	10.55	1.595	18.133	1.678	2.754	48.255
1437	1.27	8.4	7.05	1.066	10.79	1.631	18.092	1.716	2.873	46.256
1438	1.27	8.4	6.91	1.045	10.69	1.616	17.911	1.699	2.787	47.683
1440	1.27	8.4	6.84	1.034	10.76	1.627	17.633	1.707	2.773	47.932
1441	1.27	8.4	6.91	1.045	10.55	1.595	18.133	1.678	2.754	48.255
1442	1.27	8.4	7.02	1.061	10.35	1.565	18.733	1.652	2.755	48.248
			Promedio	1.052		1.595	18.263	1.679	2.776	47.891

3. CME B25



$\text{AF}_{\text{STO}} = 13.85$ $\rho = 857.75 \text{ kg/m}^3$ $m = 0.000944 \text{ kg/min}$ Combustible

Tabla 9. Cálculo del caudal de aire para CME B25

	Φ	AF	m_{AIRE} [kg/min]	V_{AIRE} [m ³ /min]	V_{AIRE} [m ³ /min]	Rotámetro
1	1	13.85	0.01307	0.010891	10.89	8.1
2	1.1	12.59	0.01188	0.009901	9.90	7.4
3	1.2	11.54	0.01089	0.009076	9.08	6.8

Tabla 10. Cálculo de la densidad de la mezcla aire-combustible para CME B25

Φ	COMBUSTIBLE		AIRE		MEZCLA
	X	ρ [kg/m ³]	X	ρ [kg/m ³]	ρ [kg/m ³]
1	0.04	4.410472356	0.96	1.2	1.335249
1.1	0.04	4.410472356	0.96	1.2	1.3234263
1.2	0.04	4.410472356	0.96	1.2	1.3135044

Tabla 11. Cálculo del flujo másico de mezcla aire-combustible para CME B25

Φ	COMBUSTIBLE		AIRE		MEZCLA
	[cc/min]	[kg/min]	[lpm]	[kg/min]	[kg/min]
1	1.1	0.00094353	10.89	0.01307	0.01401263
1.1	2.1	0.00094353	9.90	0.01188	0.01282453
1.2	3.1	0.00094353	9.08	0.01089	0.01183445

Tabla 12. Cálculo de la velocidad de propagación de llama para los diferentes factores de aire para CME B25

$\Phi=1$

Foto	Base Real Quemador [cm]	Base Quemador [cm]	Quemador [cm]	Base Real Llama [cm]	Altura Llama[cm]	Altura Real Llama[cm]	α [deg]	hcono [cm]	Area [cm ²]	S_L [cm/s]
1178	1.27	8.5	6.88	1.028	12.17	1.818	15.784	1.890	3.051	57.325
1179	1.27	8.5	7.05	1.053	12.14	1.814	16.191	1.889	3.125	55.967
1180	1.27	8.5	6.98	1.043	11.89	1.777	16.358	1.851	3.033	57.668
1181	1.27	8.5	6.88	1.028	12.13	1.812	15.833	1.884	3.042	57.500
1182	1.27	8.5	6.74	1.007	11.57	1.729	16.239	1.801	2.848	61.410
1183	1.27	8.5	6.89	1.029	11.67	1.744	16.447	1.818	2.940	59.495
1184	1.27	8.5	6.84	1.022	11.82	1.766	16.137	1.838	2.951	59.263
1185	1.27	8.5	6.74	1.007	11.71	1.750	16.055	1.821	2.880	60.733
Promedio				1.027		1.776	16.131	1.849	2.984	58.670

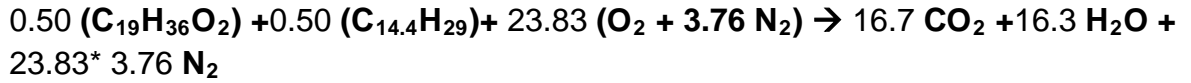
$\Phi=1.1$

Foto	Base Real Quemador [cm]	Base Quemador [cm]	Quemador [cm]	Base Real Llama [cm]	Altura Llama[cm]	Altura Real Llama[cm]	α [deg]	hcono [cm]	Area [cm ²]	S_L [cm/s]
1195	1.27	8.5	7.16	1.070	11.15	1.666	17.801	1.750	2.940	54.930
1196	1.27	8.5	7.05	1.053	12.45	1.860	15.809	1.933	3.199	50.489
1197	1.27	8.5	6.91	1.032	11.96	1.787	16.113	1.860	3.017	53.541
1198	1.27	8.5	7.09	1.059	14.43	2.156	13.802	2.220	3.694	43.718
1199	1.27	8.5	6.98	1.043	12.03	1.797	16.178	1.872	3.066	52.678
1201	1.27	8.5	7.02	1.049	11.22	1.676	17.371	1.757	2.894	55.808
1202	1.27	8.5	7.05	1.053	13.19	1.971	14.963	2.040	3.375	47.851
1203	1.27	8.5	7.13	1.065	11.25	1.681	17.583	1.763	2.951	54.737
Promedio				1.053		1.824	16.202	1.899	3.142	51.719

$\Phi=1.2$

Foto	Base Real Quemador [cm]	Base Quemador [cm]	Quemador [cm]	Base Real Llama [cm]	Altura Llama[cm]	Altura Real Llama[cm]	α [deg]	hcono [cm]	Area [cm ²]	S _l [cm/s]
1229	1.27	8.5	7.02	1.049	11.75	1.756	16.632	1.832	3.019	49.744
1230	1.27	8.5	6.89	1.029	13.69	2.045	14.125	2.109	3.411	44.027
1232	1.27	8.5	7.05	1.053	13.47	2.013	14.665	2.080	3.442	43.625
1234	1.27	8.5	6.91	1.032	13.3	1.987	14.562	2.053	3.330	45.099
1237	1.27	8.5	7.02	1.049	13.3	1.987	14.784	2.055	3.386	44.347
1239	1.27	8.5	7.02	1.049	14.8	2.211	13.342	2.273	3.744	40.105
1241	1.27	8.5	6.98	1.043	12.45	1.860	15.659	1.932	3.165	47.449
1242	1.27	8.5	6.84	1.022	12.95	1.935	14.794	2.001	3.213	46.742
Promedio				1.041		1.974	14.820	2.042	3.339	45.142

4. CME B50



$$\text{AF}_{\text{STO}} = 13.14 \quad \rho = 865.5 \text{ kg/m}^3 \quad m = 0.000952 \text{ kg/min Combustible}$$

Tabla 13. Cálculo del caudal de aire para CME B50

	Φ	AF	m_{AIRE} [kg/min]	V_{AIRE} [m ³ /min]	V_{AIRE} [m ³ /min]	Rotámetro
1	1	13.14	0.01251	0.010425	10.43	7.8
2	1.1	11.95	0.01137	0.009478	9.48	7.1
3	1.2	10.95	0.01043	0.008679	8.69	6.5

Tabla 14. Cálculo de la densidad de la mezcla aire-combustible para CME B50

Φ	COMBUSTIBLE		AIRE		MEZCLA
	X	ρ [kg/m ³]	X	ρ [kg/m ³]	ρ [kg/m ³]
1	0.04	4.871384821	0.96	1.2	1.3478906
1.1	0.04	4.871384821	0.96	1.2	1.3349402
1.2	0.03	4.871384821	0.97	1.2	1.3240752

Tabla 15. Cálculo del flujo másico de mezcla aire-combustible para CME B50

Φ	COMBUSTIBLE		AIRE		MEZCLA
	[cc/min]	[kg/min]	[lpm]	[kg/min]	[kg/min]
1	1.1	0.00095205	10.43	0.01251	0.01346256
1.1	2.1	0.00095205	9.48	0.01137	0.01232524
1.2	3.1	0.00095205	8.69	0.01043	0.01137748

Tabla 16. Cálculo de la velocidad de propagación de llama para los diferentes factores de aire para CME B50

$\Phi=1$

Foto	Base Real Quemador [cm]	Base Quemador [cm]	Quemador [cm]	Base Real Llama [cm]	Altura Llama[cm]	Altura Real Llama[cm]	α [deg]	hcono [cm]	Area [cm ²]	S_L [cm/s]
1261	1.27	8.54	6.67	0.992	11.78	1.752	15.807	1.821	2.837	58.681
1262	1.27	8.54	6.84	1.017	12.31	1.831	15.527	1.900	3.036	54.834
1263	1.27	8.54	6.56	0.976	12.03	1.789	15.251	1.854	2.842	58.583
1264	1.27	8.54	6.81	1.013	12.59	1.872	15.134	1.940	3.085	53.952
1265	1.27	8.54	6.53	0.971	12.03	1.789	15.185	1.854	2.828	58.871
1266	1.27	8.54	6.74	1.002	11.82	1.758	15.913	1.828	2.878	57.845
1267	1.27	8.54	6.7	0.996	11.82	1.758	15.824	1.827	2.859	58.216
1268	1.27	8.54	6.56	0.976	11.57	1.721	15.828	1.788	2.741	60.742
Promedio				0.993		1.784	15.558	1.851	2.888	57.715

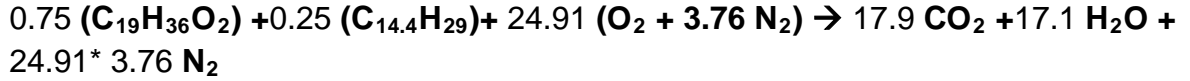
$\Phi=1.1$

Foto	Base Real Quemador [cm]	Base Quemador [cm]	Quemador [cm]	Base Real Llama [cm]	Altura Llama[cm]	Altura Real Llama[cm]	α [deg]	hcono [cm]	Area [cm ²]	S_L [cm/s]
1278	1.27	8.54	6.91	1.028	11.39	1.694	16.874	1.770	2.857	53.859
1279	1.27	8.54	6.88	1.023	11.32	1.683	16.903	1.759	2.828	54.420
1280	1.27	8.54	6.81	1.013	10.62	1.579	17.777	1.659	2.638	58.325
1281	1.27	8.54	6.91	1.028	10.16	1.511	18.781	1.596	2.576	59.736
1282	1.27	8.54	6.7	0.996	10.58	1.573	17.570	1.650	2.583	59.575
1283	1.27	8.54	6.8	1.011	10.6	1.576	17.784	1.655	2.630	58.518
1284	1.27	8.54	6.42	0.955	11.22	1.669	15.966	1.735	2.603	59.123
1285	1.27	8.54	6.77	1.007	11.64	1.731	16.215	1.803	2.851	53.976
Promedio				1.008		1.627	17.234	1.703	2.696	57.191

$\Phi=1.2$

Foto	Base Real Quemador [cm]	Base Quemador [cm]	Quemador [cm]	Base Real Llama [cm]	Altura Llama[cm]	Altura Real Llama[cm]	α [deg]	hcono [cm]	Area [cm ²]	S _L [cm/s]
1295	1.27	8.54	6.98	1.038	14.92	2.219	13.166	2.279	3.715	38.546
1296	1.27	8.54	7.05	1.048	15.27	2.271	12.999	2.331	3.838	37.314
1298	1.27	8.54	6.98	1.038	12.95	1.926	15.083	1.995	3.252	44.037
1299	1.27	8.54	6.98	1.038	14.11	2.098	13.893	2.162	3.524	40.634
1301	1.27	8.54	6.74	1.002	13.97	2.078	13.562	2.137	3.365	42.563
1302	1.27	8.54	6.88	1.023	15.13	2.250	12.809	2.307	3.708	38.619
1303	1.27	8.54	7.05	1.048	15.27	2.271	12.999	2.331	3.838	37.314
1304	1.27	8.54	6.98	1.038	14.92	2.219	13.166	2.279	3.715	38.546
Promedio				1.034		2.166	13.459	2.227	3.620	39.697

5. CME B75



$$\text{AF}_{\text{STO}} = 12.55 \quad \rho = 873.25 \text{ kg/m}^3 \quad m = 0.000961 \text{ kg/min Combustible}$$

Tabla 17. Cálculo del caudal de aire para CME B75

	Φ	AF	m_{AIRE} [kg/min]	V_{AIRE} [m ³ /min]	V_{AIRE} [m ³ /min]	Rotámetro
1	1	12.55	0.01206	0.010048	10.05	7.5
2	1.1	11.41	0.01096	0.009134	9.13	6.8
3	1.2	10.46	0.01005	0.008373	8.37	6.2

Tabla 18. Cálculo de la densidad de la mezcla aire-combustible para CME B75

Φ	COMBUSTIBLE		AIRE		MEZCLA
	X	ρ [kg/m ³]	X	ρ [kg/m ³]	ρ [kg/m ³]
1	0.04	5.332297286	0.96	1.2	1.3594712
1.1	0.04	5.332297286	0.96	1.2	1.3454842
1.2	0.03	5.332297286	0.97	1.2	1.3337529

Tabla 19. Cálculo del flujo másico de mezcla aire-combustible para CME B75

Φ	COMBUSTIBLE		AIRE		MEZCLA
	[cc/min]	[kg/min]	[lpm]	[kg/min]	[kg/min]
1	1.1	0.00096058	10.05	0.01206	0.0130184
1.1	2.1	0.00096058	9.13	0.01096	0.01192224
1.2	3.1	0.00096058	8.37	0.01005	0.01100876

Tabla 20. Cálculo de la velocidad de propagación de llama para los diferentes factores de aire para CME B75

$\Phi=1$

Foto	Base Real Quemador [cm]	Base Quemador [cm]	Quemador [cm]	Base Real Llama [cm]	Altura Llama[cm]	Altura Real Llama[cm]	α [deg]	hcono [cm]	Area [cm ²]	S _L [cm/s]
1327	1.27	8.47	6.74	1.011	12.28	1.841	15.346	1.909	3.031	52.656
1328	1.27	8.47	6.7	1.005	12.06	1.808	15.524	1.877	2.962	53.891
1329	1.27	8.47	6.6	0.990	12.03	1.804	15.340	1.870	2.908	54.892
1330	1.27	8.47	6.49	0.973	11.68	1.751	15.527	1.818	2.778	57.444
1331	1.27	8.47	6.63	0.994	11.82	1.772	15.667	1.841	2.874	55.527
1332	1.27	8.47	6.63	0.994	11.60	1.739	15.949	1.809	2.825	56.501
1333	1.27	8.47	6.21	0.931	11.39	1.708	15.249	1.770	2.589	61.645
1334	1.27	8.47	6.53	0.979	11.78	1.766	15.491	1.833	2.819	56.617
Promedio				0.985		1.774	15.511	1.841	2.848	56.147

$\Phi=1.1$

Foto	Base Real Quemador [cm]	Base Quemador [cm]	Quemador [cm]	Base Real Llama [cm]	Altura Llama[cm]	Altura Real Llama[cm]	α [deg]	hcono [cm]	Area [cm ²]	S _L [cm/s]
1344	1.27	8.47	6.84	1.026	11.89	1.783	16.047	1.855	2.989	49.416
1345	1.27	8.47	6.7	1.005	10.37	1.555	17.903	1.634	2.579	57.274
1346	1.27	8.47	6.77	1.015	11.46	1.718	16.456	1.792	2.857	51.693
1347	1.27	8.47	6.98	1.047	11.53	1.729	16.840	1.806	2.969	49.733
1348	1.27	8.47	6.81	1.021	11.32	1.697	16.741	1.772	2.843	51.948
1349	1.27	8.47	6.84	1.026	10.48	1.571	18.073	1.653	2.663	55.459
1350	1.27	8.47	6.63	0.994	10.16	1.523	18.070	1.602	2.502	59.019
1351	1.27	8.47	6.81	1.021	12.24	1.835	15.546	1.905	3.055	48.334
Promedio				1.019		1.677	16.960	1.752	2.807	52.860

$\Phi=1.2$

Foto	Base Real Quemador [cm]	Base Quemador [cm]	Quemador [cm]	Base Real Llama [cm]	Altura Llama[cm]	Altura Real Llama[cm]	α [deg]	hcono [cm]	Area [cm ²]	S _l [cm/s]
1344	1.27	8.47	7.09	1.063	11.39	1.708	17.288	1.789	2.987	46.058
1345	1.27	8.47	7.1	1.065	11	1.649	17.886	1.733	2.898	47.466
1346	1.27	8.47	6.91	1.036	12.17	1.825	15.849	1.897	3.087	44.561
1347	1.27	8.47	7.05	1.057	12.73	1.909	15.478	1.981	3.289	41.830
1348	1.27	8.47	7.02	1.053	12.8	1.919	15.335	1.990	3.290	41.808
1349	1.27	8.47	7.05	1.057	13.44	2.015	14.696	2.083	3.459	39.766
1350	1.27	8.47	6.98	1.047	13.83	2.074	14.163	2.139	3.516	39.126
1351	1.27	8.47	6.67	1.000	11.99	1.798	15.544	1.866	2.931	46.927
Promedio				1.047		1.862	15.780	1.935	3.182	43.443

6. SME



$$AF_{STO} = 11.96 \quad \rho = 879 \text{ kg/m}^3 \quad m = 0.000967 \text{ kg/min Combustible}$$

Tabla 21. Cálculo del caudal de aire para SME

	Φ	AF	m_{AIRE} [kg/min]	V_{AIRE} [m ³ /min]	V_{AIRE} [m ³ /min]	Rotámetro
1	1	11.96	0.01156	0.009634	9.63	7.2
2	1.1	10.87	0.01051	0.008758	8.76	6.5
3	1.2	9.96	0.00963	0.008028	8.03	6

Tabla 22. Cálculo de la densidad de la mezcla aire-combustible para SME

Φ	COMBUSTIBLE		AIRE		MEZCLA
	X	ρ [kg/m ³]	X	ρ [kg/m ³]	ρ [kg/m ³]
1	0.0378	5.718837464	0.96	1.2	1.3708445
1.1	0.0345	5.718837464	0.97	1.2	1.3558489
1.2	0.0317	5.718837464	0.97	1.2	1.3432732

Tabla 23. Cálculo del flujo másico de mezcla aire-combustible para SME

Φ	COMBUSTIBLE		AIRE		MEZCLA
	[cc/min]	[kg/min]	[lpm]	[kg/min]	[kg/min]
1	1.1	0.0009669	9.63	0.01156	0.01252793
1.1	2.1	0.0009669	8.76	0.01051	0.01147692
1.2	3.1	0.0009669	8.03	0.00963	0.01060109

Tabla 24. Cálculo de la velocidad de propagación de llama para los diferentes factores de aire para SME

$\Phi=1$

Foto	Base Real Quemador [cm]	Base Quemador [cm]	Quemador [cm]	Base Real Llama [cm]	Altura Llama[cm]	Altura Real Llama[cm]	α [deg]	hcono [cm]	Area [cm ²]	S_L [cm/s]
1618	1.27	8.68	7.02	1.027	15.24	2.230	12.970	2.288	3.692	41.258
1619	1.27	8.68	6.63	0.970	15.17	2.220	12.327	2.272	3.462	43.997
1620	1.27	8.68	7.09	1.037	16.54	2.420	12.097	2.475	4.033	37.767
1621	1.27	8.68	6.95	1.017	14.81	2.167	13.205	2.226	3.555	42.842
1622	1.27	8.68	6.84	1.001	15.41	2.255	12.513	2.310	3.631	41.952
1623	1.27	8.68	6.84	1.001	15.77	2.307	12.236	2.361	3.712	41.038
1624	1.27	8.68	7.02	1.027	16.16	2.364	12.254	2.420	3.904	39.018
1625	1.27	8.68	6.6	0.966	14.53	2.126	12.796	2.180	3.307	46.060
Promedio				1.006		2.261	12.550	2.316	3.662	41.742

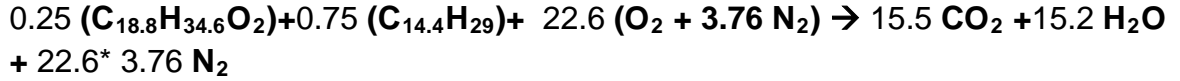
$\Phi=1.1$

Foto	Base Real Quemador [cm]	Base Quemador [cm]	Quemador [cm]	Base Real Llama [cm]	Altura Llama[cm]	Altura Real Llama[cm]	α [deg]	hcono [cm]	Area [cm ²]	S_L [cm/s]
1635	1.27	8.64	6.46	0.950	12.45	1.830	14.544	1.891	2.820	50.028
1636	1.27	8.64	6.56	0.964	12.66	1.861	14.525	1.922	2.912	48.453
1637	1.27	8.64	6.53	0.960	12.1	1.779	15.101	1.842	2.778	50.793
1638	1.27	8.64	6.77	0.995	12.35	1.815	15.328	1.882	2.942	47.949
1639	1.27	8.64	6.53	0.960	12.59	1.851	14.538	1.912	2.883	48.943
1640	1.27	8.64	6.53	0.960	12.77	1.877	14.342	1.937	2.921	48.296
1641	1.27	8.64	6.67	0.980	12.63	1.856	14.792	1.920	2.957	47.709
1642	1.27	8.64	6.81	1.001	12.56	1.846	15.168	1.913	3.008	46.906
Promedio				0.971		1.839	14.792	1.902	2.902	48.635

$\Phi=1.2$

Foto	Base Real Quemador [cm]	Base Quemador [cm]	Quemador [cm]	Base Real Llama [cm]	Altura Llama[cm]	Altura Real Llama[cm]	α [deg]	hcono [cm]	Area [cm ²]	S _L [cm/s]
1654	1.27	8.61	6.67	0.984	11.36	1.676	16.361	1.746	2.699	48.737
1655	1.27	8.61	6.74	0.994	11.18	1.649	16.774	1.722	2.690	48.902
1656	1.27	8.61	6.7	0.988	11.25	1.659	16.582	1.731	2.688	48.937
1657	1.27	8.61	6.7	0.988	11.43	1.686	16.335	1.757	2.727	48.228
1658	1.27	8.61	6.77	0.999	11.65	1.718	16.202	1.789	2.807	46.860
1659	1.27	8.61	6.56	0.968	11.29	1.665	16.200	1.734	2.636	49.902
1660	1.27	8.61	6.63	0.978	11.3	1.667	16.350	1.737	2.668	49.294
1661	1.27	8.61	6.54	0.965	11.23	1.656	16.235	1.725	2.614	50.313
Promedio				0.983		1.672	16.380	1.743	2.691	48.897

7. SME B25



AF_{STO} = 13.83
Combustible

$\rho = 857.25 \text{ kg/m}^3$

$m = 0.000943 \text{ kg/min}$

Tabla 25. Cálculo del caudal de aire para SME B25

	Φ	AF	m_{AIRE} [kg/min]	V_{AIRE} [m ³ /min]	V_{AIRE} [m ³ /min]	Rotámetro
1	1	13.83	0.01304	0.010865	10.86	8.1
2	1.1	12.57	0.01185	0.009877	9.88	7.3
3	1.2	11.52	0.01086	0.009054	9.05	6.7

Tabla 26. Cálculo de la densidad de la mezcla aire-combustible para SME B25

Φ	COMBUSTIBLE		AIRE		MEZCLA
	X	ρ [kg/m ³]	X	ρ [kg/m ³]	ρ [kg/m ³]
1	0.0424	4.391879284	0.96	1.2	1.3352491
1.1	0.0387	4.391879284	0.96	1.2	1.3234292
1.2	0.0356	4.391879284	0.96	1.2	1.3135092

Tabla 27. Cálculo del flujo másico de mezcla aire-combustible para SME B25

Φ	COMBUSTIBLE		AIRE		MEZCLA
	[cc/min]	[kg/min]	[lpm]	[kg/min]	[kg/min]
1	1.1	0.00094298	10.86	0.01304	0.01398044
1.1	2.1	0.00094298	9.88	0.01185	0.01279521
1.2	3.1	0.00094298	9.05	0.01086	0.01180753

Tabla 28. Cálculo de la velocidad de propagación de llama para los diferentes factores de aire para SME B25

$\Phi=1$

Foto	Base Real Quemador [cm]	Base Quemador [cm]	Quemador [cm]	Base Real Llama [cm]	Altura Llama[cm]	Altura Real Llama[cm]	α [deg]	hcono [cm]	Area [cm ²]	S_L [cm/s]
1499	1.27	9.35	7.37	1.001	16.51	2.243	12.582	2.298	3.613	48.298
1501	1.27	9.35	7.51	1.020	15.56	2.113	13.567	2.174	3.484	50.091
1502	1.27	9.35	7.55	1.026	16.23	2.205	13.094	2.263	3.646	47.863
1503	1.27	9.35	7.34	0.997	15.52	2.108	13.304	2.166	3.392	51.440
1504	1.27	9.35	7.3	0.992	15.59	2.118	13.177	2.175	3.387	51.516
1505	1.27	9.35	7.51	1.020	15.2	2.065	13.876	2.127	3.408	51.210
1506	1.27	9.35	7.55	1.026	15.27	2.074	13.886	2.137	3.442	50.703
1507	1.27	9.35	7.37	1.001	15.24	2.070	13.593	2.130	3.349	52.109
Promedio				1.010		2.124	13.385	2.184	3.465	50.404

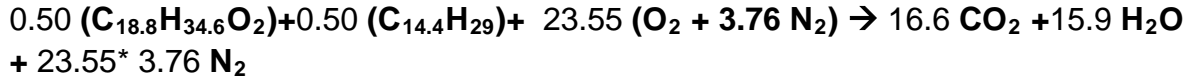
$\Phi=1.1$

Foto	Base Real Quemador [cm]	Base Quemador [cm]	Quemador [cm]	Base Real Llama [cm]	Altura Llama[cm]	Altura Real Llama[cm]	α [deg]	hcono [cm]	Area [cm ²]	S_L [cm/s]
1481	1.27	9.28	7.23	0.989	14.53	1.988	13.971	2.049	3.185	50.596
1482	1.27	9.28	7.13	0.976	13.16	1.801	15.157	1.866	2.860	56.343
1483	1.27	9.28	7.37	1.009	13.09	1.791	15.723	1.861	2.948	54.651
1484	1.27	9.28	7.2	0.985	13.69	1.874	14.733	1.937	2.998	53.741
1485	1.27	9.28	7.13	0.976	13.19	1.805	15.125	1.870	2.866	56.224
1486	1.27	9.28	7.27	0.995	13.23	1.811	15.363	1.878	2.934	54.912
1487	1.27	9.28	7.55	1.033	14.29	1.956	14.798	2.023	3.283	49.084
1488	1.27	9.28	7.41	1.014	13.44	1.839	15.412	1.908	3.039	53.020
Promedio				0.997		1.858	15.035	1.924	3.014	53.571

$\Phi=1.2$

Foto	Base Real Quemador [cm]	Base Quemador [cm]	Quemador [cm]	Base Real Llama [cm]	Altura Llama[cm]	Altura Real Llama[cm]	α [deg]	hcono [cm]	Area [cm ²]	S _L [cm/s]
1464	1.27	9.31	7.55	1.030	11.99	1.636	17.476	1.715	2.774	54.008
1465	1.27	9.31	7.41	1.011	12.03	1.641	17.118	1.717	2.726	54.952
1466	1.27	9.31	7.8	1.064	12.84	1.752	16.896	1.831	3.059	48.969
1467	1.27	9.31	7.37	1.005	11.89	1.622	17.219	1.698	2.682	55.870
1468	1.27	9.31	7.58	1.034	11.64	1.588	18.035	1.670	2.712	55.239
1469	1.27	9.31	7.55	1.030	12.38	1.689	16.958	1.766	2.856	52.453
1471	1.27	9.31	7.83	1.068	12.06	1.645	17.985	1.730	2.902	51.628
1472	1.27	9.31	7.51	1.024	12	1.637	17.376	1.715	2.760	54.280
Promedio				1.033		1.651	17.383	1.730	2.809	53.425

8. SME B50



$$\text{AF}_{\text{STO}} = 13.09 \quad \rho = 864.5 \text{ kg/m}^3 \quad m = 0.000951 \text{ kg/min Combustible}$$

Tabla 29. Cálculo del caudal de aire para SME B50

	Φ	AF	m_{AIRE} [kg/min]	V_{AIRE} [m ³ /min]	V_{AIRE} [m ³ /min]	Rotámetro
1	1	13.09	0.01245	0.010372	10.37	7.7
2	1.1	11.90	0.01132	0.009429	9.43	7
3	1.2	10.91	0.01037	0.008643	8.64	6.4

Tabla 30. Cálculo de la densidad de la mezcla aire-combustible para SME B50

Φ	COMBUSTIBLE		AIRE		MEZCLA
	X	ρ [kg/m ³]	X	ρ [kg/m ³]	ρ [kg/m ³]
1	0.0407	4.834198678	0.96	1.2	1.3480325
1.1	0.0372	4.834198678	0.96	1.2	1.3350752
1.2	0.0342	4.834198678	0.97	1.2	1.3242036

Tabla 31. Cálculo del flujo másico de mezcla aire-combustible para SME B50

Φ	COMBUSTIBLE		AIRE		MEZCLA
	[cc/min]	[kg/min]	[lpm]	[kg/min]	[kg/min]
1	1.1	0.00095095	10.37	0.01245	0.01339778
1.1	2.1	0.00095095	9.43	0.01132	0.01226625
1.2	3.1	0.00095095	8.64	0.01037	0.01132331

Tabla 32. Cálculo de la velocidad de propagación de llama para los diferentes factores de aire para SME B50

$\Phi=1$

Foto	Base Real Quemador [cm]	Base Quemador [cm]	Quemador [cm]	Base Real Llama [cm]	Altura Llama[cm]	Altura Real Llama[cm]	α [deg]	hcono [cm]	Area [cm ²]	S_L [cm/s]
1552	1.27	9.24	7.2	0.990	14.40	1.979	14.036	2.040	3.171	52.232
1553	1.27	9.24	7.44	1.023	14.85	2.041	14.063	2.104	3.380	49.010
1554	1.27	9.24	7.87	1.082	15.66	2.152	14.105	2.219	3.771	43.927
1555	1.27	9.24	7.61	1.046	14.22	1.954	14.980	2.023	3.324	49.831
1556	1.27	9.24	7.55	1.038	15.38	2.114	13.791	2.177	3.548	46.687
1558	1.27	9.24	7.48	1.028	14.50	1.993	14.463	2.058	3.324	49.836
1559	1.27	9.24	7.23	0.994	13.97	1.920	14.508	1.983	3.096	53.504
1560	1.27	9.24	7.58	1.042	13.93	1.915	15.220	1.984	3.247	51.012
Promedio				1.030		2.009	14.396	2.074	3.358	49.505

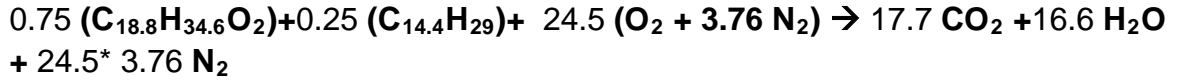
$\Phi=1.1$

Foto	Base Real Quemador [cm]	Base Quemador [cm]	Quemador [cm]	Base Real Llama [cm]	Altura Llama[cm]	Altura Real Llama[cm]	α [deg]	hcono [cm]	Area [cm ²]	S_L [cm/s]
1534	1.27	9.24	7.55	1.038	12.84	1.765	16.384	1.839	2.998	51.069
1535	1.27	9.24	7.62	1.047	14.14	1.943	15.080	2.013	3.311	46.243
1536	1.27	9.24	7.51	1.032	13.54	1.861	15.500	1.931	3.131	48.902
1537	1.27	9.24	7.27	0.999	13.93	1.915	14.625	1.979	3.106	49.304
1538	1.27	9.24	7.55	1.038	14.93	2.052	14.190	2.117	3.450	44.382
1539	1.27	9.24	7.37	1.013	14.04	1.930	14.706	1.995	3.175	48.236
1540	1.27	9.24	7.3	1.003	14.22	1.954	14.396	2.018	3.180	48.150
1541	1.27	9.24	7.37	1.013	13.79	1.895	14.961	1.962	3.122	49.053
Promedio				1.023		1.914	14.980	1.982	3.184	48.167

$\Phi=1.2$

Foto	Base Real Quemador [cm]	Base Quemador [cm]	Quemador [cm]	Base Real Llama [cm]	Altura Llama[cm]	Altura Real Llama[cm]	α [deg]	hcono [cm]	Area [cm ²]	S _L [cm/s]
1517	1.27	9.38	7.58	1.026	12.91	1.748	16.361	1.822	2.937	48.529
1518	1.27	9.38	7.58	1.026	13.97	1.891	15.179	1.960	3.159	45.109
1519	1.27	9.38	7.65	1.036	13.33	1.805	16.011	1.878	3.055	46.652
1520	1.27	9.38	7.62	1.032	14.43	1.954	14.790	2.021	3.275	43.520
1522	1.27	9.38	7.69	1.041	13.7	1.855	15.677	1.927	3.151	45.231
1523	1.27	9.38	7.65	1.036	13.44	1.820	15.886	1.892	3.078	46.299
1524	1.27	9.38	7.94	1.075	14.43	1.954	15.383	2.026	3.422	41.650
1525	1.27	9.38	7.65	1.036	13.79	1.867	15.503	1.938	3.152	45.209
Promedio				1.038		1.862	15.599	1.933	3.154	45.275

9. SME B75



$$\text{AF}_{\text{STO}} = 12.48 \quad \rho = 871.75 \text{ kg/m}^3 \quad m = 0.000959 \text{ kg/min Combustible}$$

Tabla 33. Cálculo del caudal de aire para SME B75

	Φ	AF	m_{AIRE} [kg/min]	V_{AIRE} [m ³ /min]	V_{AIRE} [m ³ /min]	Rotámetro
1	1	12.48	0.01196	0.009969	9.97	7.4
2	1.1	11.34	0.01088	0.009063	9.06	6.8
3	1.2	10.4	0.00997	0.008308	8.31	6.2

Tabla 34. Cálculo de la densidad de la mezcla aire-combustible para SME B75

Φ	COMBUSTIBLE		AIRE		MEZCLA
	X	ρ [kg/m ³]	X	ρ [kg/m ³]	ρ [kg/m ³]
1	0.0392	5.276518071	0.96	1.2	1.3598635
1.1	0.0358	5.276518071	0.96	1.2	1.3458504
1.2	0.0329	5.276518071	0.97	1.2	1.334096

Tabla 35. Cálculo del flujo másico de mezcla aire-combustible para SME B75

Φ	COMBUSTIBLE		AIRE		MEZCLA
	[cc/min]	[kg/min]	[lpm]	[kg/min]	[kg/min]
1	1.1	0.00095893	9.97	0.01196	0.01292187
1.1	2.1	0.00095893	9.06	0.01088	0.01183433
1.2	3.1	0.00095893	8.31	0.00997	0.01092805

Tabla 36. Cálculo de la velocidad de propagación de llama para los diferentes factores de aire para SME B75

$\Phi=1$

Foto	Base Real Quemador [cm]	Base Quemador [cm]	Quemador [cm]	Base Real Llama [cm]	Altura Llama[cm]	Altura Real Llama[cm]	α [deg]	hcono [cm]	Area [cm ²]	S_L [cm/s]
1599	1.27	9.24	7.41	1.018	15.27	2.099	13.638	2.160	3.455	45.837
1600	1.27	9.24	7.23	0.994	15.98	2.196	12.747	2.252	3.515	45.055
1601	1.27	9.24	7.58	1.042	15.80	2.172	13.489	2.233	3.655	43.333
1602	1.27	9.24	7.2	0.990	16.01	2.201	12.673	2.255	3.506	45.171
1603	1.27	9.24	7.51	1.032	16.69	2.294	12.680	2.351	3.812	41.541
1604	1.27	9.24	7.3	1.003	16.08	2.210	12.789	2.266	3.572	44.338
1605	1.27	9.24	7.27	0.999	15.13	2.080	13.509	2.139	3.357	47.178
1606	1.27	9.24	7.37	1.013	15.77	2.168	13.152	2.226	3.542	44.715
Promedio				1.011		2.177	13.085	2.235	3.552	44.646

$\Phi=1.1$

Foto	Base Real Quemador [cm]	Base Quemador [cm]	Quemador [cm]	Base Real Llama [cm]	Altura Llama[cm]	Altura Real Llama[cm]	α [deg]	hcono [cm]	Area [cm ²]	S_L [cm/s]
1582	1.27	9.28	7.27	0.995	13.44	1.839	15.134	1.905	2.978	49.215
1583	1.27	9.28	7.02	0.961	13.03	1.783	15.076	1.847	2.787	52.586
1584	1.27	9.28	7.44	1.018	13.97	1.912	14.911	1.978	3.164	46.315
1585	1.27	9.28	7.41	1.014	13.23	1.811	15.645	1.880	2.995	48.932
1586	1.27	9.28	7.23	0.989	13.02	1.782	15.517	1.849	2.874	50.990
1587	1.27	9.28	7.05	0.965	13.44	1.839	14.696	1.902	2.882	50.855
1588	1.27	9.28	7.51	1.028	13.05	1.786	16.053	1.858	3.000	48.847
1589	1.27	9.28	7.16	0.980	13.44	1.839	14.915	1.903	2.930	50.023
Promedio				0.994		1.824	15.243	1.890	2.951	49.720

$\Phi=1.2$

Foto	Base Real Quemador [cm]	Base Quemador [cm]	Quemador [cm]	Base Real Llama [cm]	Altura Llama[cm]	Altura Real Llama[cm]	α [deg]	hcono [cm]	Area [cm2]	S_L [cm/s]
1565	1.27	9.24	7.2	0.990	12.03	1.653	16.660	1.726	2.683	50.886
1566	1.27	9.24	7.44	1.023	12.1	1.663	17.089	1.740	2.795	48.848
1567	1.27	9.24	7.51	1.032	11.53	1.585	18.039	1.667	2.702	50.520
1568	1.27	9.24	7.44	1.023	11.92	1.638	17.332	1.716	2.757	49.521
1569	1.27	9.24	7.3	1.003	12.31	1.692	16.515	1.765	2.781	49.084
1570	1.27	9.24	7.16	0.984	11.89	1.634	16.757	1.707	2.638	51.747
1571	1.27	9.24	7.48	1.028	12.17	1.673	17.083	1.750	2.826	48.309
1572	1.27	9.24	7.44	1.023	12.2	1.677	16.957	1.753	2.816	48.482
Promedio				1.013		1.652	17.054	1.728	2.750	49.675