

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

**DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE LLAMA LAMINAR EN
UN QUEMADOR DE PREMEZCLA**

JOSÉ LUIS BISSO CARRASCO

ASESOR: Freddy Jesús Rojas Chávez

Lima, Abril 2015

RESUMEN

En el presente trabajo se calculó la velocidad de llama laminar del gas licuado de petróleo (GLP) con una concentración de 70% de propano y 30% de Butano en un quemador de llamas de premezcla tipo Powling y se comparó los resultados obtenidos con los determinados por el método de cálculo aprendido en pregrado y también empleando el software NASA Lewis 89.

La metodología consistió en realizar ensayos en el módulo del quemador de llamas de premezclas, variando la cantidad de aire y combustible que ingresa al sistema. Es de esta forma que se consiguió una serie de datos de fracción estequiométrica (Φ) versus velocidad de llama laminar (S_L).

Luego en la siguiente parte del estudio se realizó el cálculo de la velocidad de llama laminar de forma analítica, empleando las ecuaciones químicas de balance de especies y de energía para poder calcular la temperatura de llama adiabática y con ella poder realizar el cálculo de la velocidad de llama. Por otra parte también se empleo el software NASA Lewis 89, dicho software contiene un análisis más sensible acerca de la combustión al calcular las composiciones de equilibrio de mezclas compuestas y sus propiedades. Este programa es usado para obtener un mejor resultado con respecto a la temperatura de llama adiabática y así poder obtener valores de velocidad de llama laminar más cercanos a la realidad.

Finalmente se construyen las tablas y gráficos comparativos para la elaboración de las conclusiones y la evaluación de los resultados obtenidos en la parte experimental contra los determinados en la parte analítica por medio del software empleado. Por último se obtuvieron resultados experimentales de velocidad de llama laminar en el rango de 12,35 cm/s hasta 17,16 cm/s; correspondientes a una fracción estequiométrica de 0,58 a 0,68 respectivamente.

DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a mis padres, Luis y Margarita, por su apoyo incondicional a lo largo de los años mientras cursaba la carrera de Ingeniería Mecánica.

En segundo lugar también le agradezco a mis demás miembros de familia, así como a mis amigos y a mi asesor por apoyarme y nunca abandonarme.

Gracias totales.



ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	II
DEDICATORIA.....	III
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	IV
NOMENCLATURA	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS	X
INTRODUCCIÓN	1
I. EL PROBLEMA.....	3
1.1 El problema en investigación.....	3
1.2 Objetivo General	4
1.3 Objetivos particulares	4
1.4 Importancia del estudio	5
1.5 Propiedades del gas licuado de petróleo (GLP).....	7
II. MARCO TEÓRICO.....	10
2.1 Combustión	10
2.1.1 Velocidad de llama laminar.....	12
2.1.2 Límites de inflamabilidad	14
2.1.3 Temperatura de combustión.....	15
2.2 Llamas	16
2.2.1 Clasificación de llamas	16
2.2.1.1 Llamas turbulentas	17
2.2.1.2 Llamas laminares	17
2.2.1.2.1 Llamas laminares de difusión	18
2.2.1.2.2 Llamas laminares de premezcla	19
2.2.2 Estudios similares	19
2.2.2.1 Estudios teóricos	20
2.2.2.2 Estudios experimentales.....	21

III. DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE LLAMA DE FORMA EXPERIMENTAL	26
3.1 Descripción del quemador de llama plana	26
3.1.1 Cono de admisión	27
3.1.2 Tubo mezclador.....	27
3.1.3 Boquilla	28
3.1.4 Manómetros de columna de agua	30
3.1.5 Medidores de flujo	31
3.1.6 Tubo de vidrio.....	31
3.1.7 Conductos y mangueras del sistema.....	32
3.1.8 Sistema de admisión de gas combustible.....	32
3.1.9 Sistema de admisión de aire	33
3.1.10 Banco de ensayos.....	34
3.2 Desarrollo de la parte experimental.....	35
3.2.1 Descripción del equipo	36
3.2.2 Procedimiento para la obtención de llamas	37
3.2.3 Ecuaciones de continuidad y de energía	38
3.2.4 Datos tomados del laboratorio.....	43
3.2.5 Ejemplo de cálculo	45
3.2.6 Tabla de resultados obtenidos.....	49
IV. DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE LLAMA DE FORMA ANALÍTICA Y MEDIANTE SOFTWARE.....	51
4.1 La teoría térmica de Mallard y Le Chatelier's.....	51
4.2 Cálculos numéricos de la combustión ideal del GLP con aire.....	54
4.2.1 Combustión ideal del GLP con aire estequiométrico.....	54
4.2.2 Relación de aire/combustible estequiométrico.....	55
4.2.3 Cálculo de la temperatura de llama adiabática	56
4.2.4 Cálculo de la velocidad de llama laminar.....	57
4.3 Programa computacional NASA Lewis 89	58
4.3.1 Cálculo de la velocidad de llama laminar.....	61
4.3.2 Tabla de resultados obtenidos.....	62
V. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	63

5.1 Comparación de los resultados obtenidos teóricos y experimentales	63
5.2 Discusión de los errores de la parte experimental	67
5.2.1 Error debido al operador.....	67
5.2.2 Error de tipo sistemático.....	68
5.2.2.1 Error por el instrumento de medición	68
5.2.2.2 Error por aparatos	68
5.2.2.3 Error debido a agentes externos.....	68
5.3 Cálculo de errores de la parte experimental	69
5.3.1 Errores en la toma de datos de entrada.....	69
5.3.1.1 Tabulación de los errores en la toma de datos de entrada	70
5.3.2 Errores arrastrados en las variables de salida	71
5.3.2.1 Tabulación de los errores calculados en las variables de salida.....	78
5.3.3 Comparación de los resultados obtenidos con el análisis de errores.....	81
CONCLUSIONES	83
RECOMENDACIONES	85
BIBLIOGRAFÍA	86

NOMENCLATURA

- \bar{V}_{GLP} := Volumen promedio de gas combustible GLP (m^3)
 V_f := Volumen final consumido de combustible GLP (m^3)
 V_i := Volumen inicial consumido de combustible GLP (m^3)
 n := Número de pruebas para cada dato tomado
 Q_{GLP} := Caudal de gas combustible, GLP (m^3/min)
 t := Tiempo transcurrido para el cambio de volumen (min)
 \dot{m} := Flujo másico de la sustancia (g/s)
 Q := Caudal de GLP o aire (L/s)
 ρ := Densidad de la sustancia (g/L)
 P := Presión absoluta de la sustancia (atm)
 M := Peso molecular de la sustancia (g/mol)
 T := Temperatura de ingreso (K)
 R_u := Constante universal de los gases (0.0821 L-atm/K-mol)
 ρ_{mezcla} := Densidad de la mezcla combustible (g/L)
 ρ_{aire} := Densidad de aire (g/L)
 ρ_{GLP} := Densidad de GLP (g/L)
 \dot{m}_{GLP} := Flujo másico de GLP (g/s)
 \dot{m}_{aire} := Flujo másico de aire (g/s)
 A_{llama} := Área que forma la llama (cm^2)
 d := Diámetro del quemador (cm)
 r := Radio del quemador (cm)
 h := Altura del cono de la llama (cm)
 S_L := Velocidad de la llama laminar de la mezcla combustible (cm/s)
 Q_{mezcla} := Caudal de la mezcla combustible (cm^3/s)
 $r_{a/c}$:= Relación de aire-combustible de la mezcla (kg aire/ kg comb)
 Φ := Fracción estequiométrica
 $r_{a/c_{Ideal}}$:= Relación de aire-combustible estequiométrica (kg aire/ kg comb)
 H_R := Entalpía de los reactantes:
 H_P := Entalpía de los productos:
 E_a := Energía de activación 30 000 cal/mol
 R_u := Constante universal de los gases 1.987 cal/mol-K

- T_f := Temperatura de llama adiabática (K)
 ΔV_{GLP} := Error absoluto en el volumen promedio de GLP (m^3 o L)
 ΔQ_{GLP} := Error absoluto en el caudal de GLP (L/min)
 $\Delta \rho$:= Error absoluto en la densidad de la sustancia (g/L)
 ΔP := Error absoluto en la presión de la sustancia (atm)
 ΔT := Error absoluto en la temperatura de ingreso (K)
 $\Delta \dot{m}$:= Error absoluto en el flujo másico de la sustancia (g/s)
 ΔQ := Error absoluto en el caudal de GLP o aire (L/s)
 $\Delta \rho$:= Error absoluto en la densidad de la sustancia (g/L)
 $\Delta \dot{m}_{mezcla}$:= Error absoluto en el flujo másico de la mezcla (g/s)
 $\Delta \dot{m}_{GLP}$:= Error absoluto en el flujo másico de GLP (g/s)
 $\Delta \dot{m}_{aire}$:= Error absoluto en el flujo másico de aire (g/s)
 $\Delta \rho_{mezcla}$:= Error absoluto en la densidad de la mezcla combustible (g/L)
 $\Delta \rho_{GLP}$:= Error absoluto en la densidad de GLP (g/L)
 $\Delta \rho_{aire}$:= Error absoluto en la densidad de aire (g/L)
 ΔQ_{mezcla} := Error absoluto en el caudal de la mezcla combustible (L/s)
 ΔA_{llama} := Error absoluto en el área que forma la llama (cm^2)
 Δd := Error absoluto en el diámetro del quemador (cm)
 $\Delta r_{a/c}$:= Error en la relación de aire-combustible (kg aire/ kg comb)
 $\Delta \Phi$:= Error en la fracción estequiométrica
 ΔS_L := Error absoluto en la velocidad de la llama laminar (cm/s)

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Velocidad de llama laminar [3].....	13
Figura 2.2: Velocidad de llama laminar del gas propano	13
Figura 2.3: Velocidad de llama laminar del gas butano	13
Figura 2.4: Llama laminar de difusión [3].....	18
Figura 2.5: Variación de temperatura en una llama laminar [7].....	20
Figura 2.6: Quemador Bunsen [7]	22
Figura 2.7: Quemador Bunsen adaptado por Glassman [7].....	23
Figura 2.8: Tubos cilíndricos horizontales [12].....	23
Figura 2.9: Burbuja de jabón [7]	24
Figura 2.10: Bomba esférica cerrada [8].....	25
Figura 3.1: Cono de admisión	27
Figura 3.3. Perfil de velocidades y capa límite del fluido	29
Figura 3.4. Boquilla con pieza cerámica refractaria	30
Figura 3.4 Esquema del manómetro en U de columna de agua	30
Figura 3.5 Flujómetro de gas.....	31
Figura 3.6 Tubo de vidrio pírex.....	32
Figura 3.7 Sistema de admisión de gas combustible.....	33
Figura 3.8 Sistema de admisión de aire	34
Figura 3.9 Banco de ensayos	35
Figura 3.10 Llama plana en el laboratorio	45
Figura 3.11 Velocidades de llama laminar y mezcla de gases en equilibrio.....	46
Figura 5.1 Gráfico de resultados experimentales	64
Figura 5.2 Gráfico de resultados por software NASA Lewis 89	65
Figura 5.3 Gráfico de comparación de resultados	66
Figura 5.4 Gráfico de comparación de los resultados obtenidos entre el software, la parte analítica y los resultados experimentales	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Propiedades del GLP	8
Tabla 3.1 Toma de datos en los ensayos	44
Tabla 3.2 Resultados obtenidos de las propiedades de los gases en estudio	49
Tabla 3.3 Resultados finales del proceso de combustión	50
Tabla 4.1: Resumen de los resultados del análisis por medio de software	61
Tabla 4.2: Resumen de los resultados del análisis del software para el cálculo de la velocidad de llama adiabática	62
Tabla 5.1: Resumen de los resultados del análisis comparativo entre los valores del software NASA Lewis 89, los experimentales y los analíticos	67
Tabla 5.2: Toma de datos con incertidumbre.....	70
Tabla 5.3: Tabla con el error absoluto para las variables en estudio	80
Tabla 5.3: Tabla comparativa entre el software NL89 y los resultados experimentales con el error absoluto.....	81

INTRODUCCION

En la actualidad se está tomando mayor importancia al mejor aprovechamiento de los combustibles. El profesor Ignacio Lira en su libro Termotecnia señala que la combustión es la más importante fuente de energía debido a que actualmente se tiene múltiples aplicaciones en los motores, turbinas, calefacción, generación de vapor, industrias, etc. El estudio de la combustión es una rama muy especializada que junta conocimientos en termodinámica, mecánica de fluidos, transferencia de calor, cinética de reacciones, etc.

La velocidad de llama laminar es una propiedad que toma importancia debido a que esta se aproxima a la velocidad de reacción en una mezcla combustible, mientras mayor sea esta significa que la reacción de combustión es más rápida. Mientras mayor sea la velocidad de reacción, la llama se propaga más rápidamente en la mezcla combustible. Esto es favorable porque al ser más rápida la detonación que se produce en la cámara de combustión, hace que aumente la temperatura en una zona localizada. Los problemas en quemadores o motores pueden ocurrir al cambiar las presiones y temperaturas iniciales, es así como el trabajar en alturas afecta la velocidad de reacción de la mezcla y causa que esta velocidad sea más lenta. Sin embargo controlando adecuadamente estos parámetros y también otros como la relación aire-combustible es posible modificar esta velocidad para realizar una combustión más rápida y eficiente.

Los estudios teóricos se vienen desarrollando desde 1883 gracias a Mallard y Le Chatelier's, que tomando en cuenta unas suposiciones para idealizar la combustión se acercaron bastante a la velocidad de llama laminar de forma analítica. Así lo hicieron también otros autores como Zel'Dovich y Tanford, pero se vio necesario validar sus resultados de forma práctica. Actualmente no hay una forma estandarizada de medir la velocidad de llama laminar, pero existen varios tipos de métodos de ensayo, variando en su complejidad y exactitud. Siendo el que se pretende usar el método del quemador bunsen modificado por Powling, que es uno de los más fáciles en su construcción y en medición con una buena exactitud para velocidades de hasta 15cm/s.

El ensayo que se pretende realizar en el laboratorio de energía es relativamente nuevo, porque no hay investigaciones al respecto dentro de la universidad que

aborden específicamente este tema, mas si se está llevando a cabo en otros países. En India, los investigadores Mukunda, Paul y Sridhar llevaron a cabo estudios computacionales sobre la velocidad de llama laminar en el 2004. En Colombia, donde Pedro Benjumea y otros midieron directamente la velocidad de llama laminar usando el método de ángulo de cono. En Rusia, el investigador Zamashchikov estudió el comportamiento de la propagación de la llama en tubos angostos. En China, donde Pinghui Zhao y otros investigadores en el 2003 realizaron simulaciones numéricas sobre la combustión laminar con llamas premezcladas en quemadores porosos, y también los estudios más recientes de Jing Gong y su grupo en el 2009 sobre las características de las llamas premezcladas de alto octanaje a altas presiones y temperatura. Las investigaciones marcan un paso importante para el futuro desarrollo de nuevos sistemas de motores o quemadores más eficientes y amigables con el medio ambiente.

En el primer capítulo se hará una introducción a las aplicaciones y la importancia que este tema representa en la actualidad. Luego en el segundo capítulo se hará mención de los conocimientos y parámetros básicos que son necesarios para el desarrollo experimental y numérico. Después en el tercer capítulo se explicará con mayor precisión el método experimental que se empleará en el laboratorio de energía de la Universidad Católica del Perú. En el cuarto capítulo se empleará un método analítico para obtener resultados teóricos que serán comparados con los resultados de la parte experimental en el quinto capítulo. Finalmente se elaborarán conclusiones acerca de los estudios realizados.

CAPITULO 1

EL PROBLEMA

1.1 El problema de investigación

La velocidad de llama laminar es un parámetro importante dentro del proceso de combustión. Muchas reacciones físicas y procesos químicos involucran llamas laminares [7]. Los estudios acerca del tema han servido de guía para lograr una efectiva estabilización de las llamas en los puertos del quemador obteniéndose como resultado una mejor combustión. En la actualidad se están desarrollando estudios sobre la velocidad de llama laminar de forma experimental con los combustibles y gases más usados, tales como el metano, propano, hidrógeno, etc. Sin embargo no hay estudios relacionados con el GLP en los porcentajes que se está tratando. (70% de Propano y 30% de Butano).

A partir de 1883 investigadores como Mallard y Le Chatellier's comenzaron a prestar importancia a este parámetro, siendo unos de los primeros en calcular la velocidad de llama laminar de forma teórica [7]. Actualmente es posible obtener valores teóricos a partir de principios fundamentales como la conservación de masa, conservación de energía, cinética de reacciones, etc [2]. Sin embargo el análisis empleado se hace mucho más complejo al incluir tantas variables que afectan la velocidad de la llama.

La otra forma que existe para determinar la velocidad de llama laminar es medirla de forma experimental. En la literatura se encuentran diferentes tipos de métodos a emplear, mencionados más adelante. Actualmente no existe un único método de medición, es decir no hay un método estandarizado, pero existe una amplia variedad de métodos diferenciados por la complejidad en la construcción del módulo de pruebas, la forma de la medición, la forma que adopta la llama, etc [7].

Por otro lado también existen nuevos métodos computacionales para facilitar el cálculo, estos han facilitado el cálculo y su desarrollo toma en cuenta los estudios teóricos.

1.2 Objetivo general

El objetivo general es la determinación de la velocidad de llama laminar en un quemador de premezcla tipo Powling, usando el gas licuado de petróleo (GLP), con 70% de propano y 30% de butano. Esta se hará de forma experimental y de forma analítica para comparar los resultados obtenidos.

1.3 Objetivos particulares

Los objetivos particulares en la determinación de la velocidad laminar de forma experimental son los siguientes:

- Establecer una metodología para el desarrollo experimental en el banco de pruebas de llama laminar premezclada que se encuentra en el laboratorio de energía de la universidad Católica.
- Encontrar las relaciones apropiadas de caudal de ingreso para las cuales la llama tiene un comportamiento laminar.

Por otra parte los objetivos particulares en la determinación de la velocidad de llama de forma analítica son:

- Encontrar una formulación teórica sobre el estudio de la velocidad de llama laminar para llevar a cabo el desarrollo analítico.

-Encontrar el margen de error del método analítico.

Finalmente se llevará a cabo un contraste de resultados, para ello será necesario:

-Analizar los resultados obtenidos individualmente con el fin de encontrar los factores que hallan podido influir en los resultados.

-Elaborar tablas y gráficos de los resultados obtenidos.

1.4 Importancia del estudio

La combustión es una de las fuentes de energía más importantes y el proceso térmico de mayor interés práctico debido a su utilización mundial. Esta tiene múltiples aplicaciones: fuente de energía en los motores de combustión, turbinas a gas, secado de sustancias alimenticias, calefacción de ambientes, preparación de diversas materias primas, calentamiento de agua, producción de vapor, etc. [9]

El proceso de combustión es el más importante en ingeniería porque actualmente la mayor parte de la producción mundial de energía se realiza por combustión de petróleo, carbón y gas natural. Y no sólo es importante el estudio de la combustión controlada de los recursos primarios usados en la producción de trabajo y calor, sino que también es preciso estudiar los procesos de combustión incontrolada (incendios) para tratar de prevenirlos y luchar contra ellos. Además, cada vez va siendo más importante analizar la combustión controlada de materiales de desecho (incineración), con el fin de minimizar la contaminación ambiental.

La combustión es un proceso fácil de realizar porque genera mucha entropía y por tanto su tendencia a reaccionar es muy alta. Este proceso libera energía en forma de luz y calor, la cual proviene de la energía ordenada en los enlaces químicos de las sustancias que al reaccionar pasan bruscamente a energía térmica de las partículas producidas. El mundo que nos rodea está integrado por mezclas reactivas, como el oxígeno en el aire, y a veces basta con forzar localmente la reacción, como producir una chispa, para que esta se autopropague, normalmente formando un frente luminoso comúnmente llamado llama. Sin embargo, el proceso de combustión es difícil de analizar porque es un proceso que involucra varias disciplinas. La termodinámica,

que enseña si el proceso es viable y predice la composición final, la energía liberada y la temperatura alcanzada. La cinética química, que busca predecir el mecanismo detallado de la reacción, la velocidad de reacción, el por qué se producen radicales luminiscentes e ionizados, etc. La transmisión de calor y de masa, que enseña cómo se difunde la energía térmica. La mecánica de fluidos, que con los datos de las anteriores disciplinas, enseña a establecer los balances de flujos apropiados para abordar la solución del problema en forma teórica.

Los reactantes pueden llegar, o ser previamente mezclados por un mismo lado de la llama (llama premezclada) y los productos salir por el otro lado, o bien separados cada uno por un lado de la llama (llama de difusión), saliendo los productos también por difusión por ambos lados. En las llamas de gases premezclados la cinética química es el mecanismo dominante, el cual controla la velocidad de propagación y los límites de ignición. La combustión es más intensa y eficiente que en las de difusión, es decir, se consigue más potencia térmica, y se generan menos contaminantes. El color de la llama suele ser azulado, debido a la emisión luminiscente de algunos radicales activos. La velocidad de la llama varía mucho con la composición y es máxima para riquezas un poco superiores a la relación estequiométrica (precisamente cuando la temperatura de combustión es máxima). Mientras que en las llamas de difusión es la difusión de especies el mecanismo dominante. Estas llamas no presentan características propias como velocidad de propagación, espesor de llama, límites de ignición, etc. El rango de velocidades en que puede arder es mucho más extenso, son de un color amarillento (al ser peor la combustión se forma más hollín, que emite más radiación como cuerpo negro), son mucho más voluminosas para una misma potencia térmica y son más seguras, porque no se forma una mezcla reactiva hasta la salida del inyector.

En situaciones cuando el combustible y el comburente (elementos necesarios para llevar a cabo la combustión) se encuentran formando una mezcla homogénea antes de reaccionar e iniciar la combustión la llama producida se encuentra en función de la velocidad de propagación de la onda de combustión. Es así que esta velocidad conocida como la velocidad de propagación adquiere importancia.

El conocimiento de la velocidad de propagación de llama es importante tanto para el desarrollo de modelos teóricos y la solución de problemas prácticos. Para fines

prácticos se trabaja con la velocidad de llama laminar, que se asemeja a la velocidad de propagación del frente de llama. Esta velocidad es importante en el diseño de quemadores para lograr una efectiva estabilización de llamas. También en el estudio del comportamiento de los combustibles a diferentes concentraciones en su composición es relevante debido a que la concentración de los componentes del combustible influye en la velocidad de propagación, así como también la altura o la presión en la que se esté trabajando [9].

1.5 Propiedades del gas licuado de petróleo (GLP)

El gas licuado de petróleo (GLP) es una mezcla de gases, cuyos componentes principales son el propano y el butano. Estos gases a condiciones ambientales normales se encuentran en fase gaseosa, pero son fácilmente condensables bajo presiones moderadas. Debido a esta propiedad resulta más conveniente transportar estos hidrocarburos en fase líquida, mientras que en fase gaseosa se emplean como fuente de combustible. El GLP es más pesado que el aire y ante alguna fuga del combustible, este va a acumularse o asentarse al nivel del piso. En estado natural es invisible y no es tóxico, sin embargo puede desplazar el aire necesario para respirar causando asfixia. De forma comercial el GLP está odorizado para facilitar las detecciones por fuga. Debido a que este se encuentra presente como combustible en dos fases (líquido y gaseoso), la concentración del aroma depende del volumen de combustible que queda en el tanque [15]. En el Perú se comercializa GLP en las siguientes proporciones: 40/60, 50/50, 60/40, 70/30 y 80/20 (cada una representa la proporción entre propanos y butanos respectivamente). De estas las más usadas comercialmente para el uso doméstico y vehicular son las mezclas de GLP 70/30 y de GLP 60/40.

Para el caso del presente estudio se emplea una mezcla gaseosa de GLP con 70% de propano y 30% de butano, una mezcla muy usada comercialmente en el país y por ello es importante su estudio. A continuación se presenta las siguientes características de la mezcla en la tabla 1.1.

Tabla 1.1: Propiedades del GLP
Fuente: Extracto de Repsol, Norma ASTM D-1835

Características Químicas de Mezclas de GLP						
Nombre Alternativo		Propano Puro	Mezcla Comercial			Butano Puro
Número de Fórmula		1	2	3	4	5
INSPECCIONES	Unid.	CARACTERÍSTICAS DE MEZCLAS				
COMPOSICION (%Vol.)		-				
Propanos	%	100.00	75.00	70.00	65.00	0.00
Butanos	%	0.00	25.00	30.00	35.00	100.00
COMPOSICION (%Mol.)		-				
Propanos	%	100.00	77.46	72.77	68.02	0.00
Butanos	%	0.00	22.54	27.23	31.98	100.00
COMPOSICION (%Peso)		-				
Propanos	%	100.00	72.27	66.97	61.74	0.00
Butanos	%	0.00	27.73	33.03	38.26	100.00
PROPIEDADES FÍSICO/QUÍMICAS		-				
Presión de Vapor a 37.8 °C debe ser absoluta	Psig	208	183	176	168	70.00
Presión de Vapor a 37.8 °C	kg/cm2	14.62	12.87	12.37	11.81	4.92
Presión de Vapor a 15.0 °C	Psig	107.00	87	83	79	25
Presión de Vapor a 15.0 °C	Barg	7.38	6.00	5.72	5.45	1.72
Presión de Vapor a 0.0 °C	Psig	70.00	56	53	50	15
Peso Molecular	g/mol	44.097	47.604	48.305	49.006	58.123
Punto de Ebullición @ 1 Atm	°C	-42.1	-31.7	-29.6	-27.5	-0.5
Punto de Ebullición @ 1 Atm	°C	-42.1	-31.6	-29.5	-27.4	-0.5
Líquido:						
Gravedad Especifica @ 60/60°F (Agua=1)	---	0.5083	0.5274	0.5312	0.5350	0.5847
Factor de Conversion @ 60°F	kg/gal	1.9239	1.9962	2.0107	2.0251	2.2131
Densidad @ 60°F	lbs/gal	4.2265	4.3871	4.4192	4.4513	4.8689
Volumen Específico @ 60°F	bbl / TM	12.42	11.96	11.88	11.79	10.78
Densidad @ 15 °C	kg/gal	1.922	1.995	2.009	2.023	2.211
Densidad Absoluta @ 15 °C (en Vacío)	kg/m3	507.80	526.90	530.72	534.54	584.20
Densidad Aparente @ 15 °C (en Aire)	kg/m3	506.70	525.80	529.62	533.44	583.10

Características Químicas de Mezclas de GLP						
Nombre Alternativo		Propano Puro	Mezcla Comercial			Butano Puro
Número de Fórmula		1	2	3	4	5
Vapor:						
Densidad Relativa (Aire = 1,225 kg/m ³)	---	1.5224	1.6435	1.6677	1.6919	2.0067
Densidad @ 15 °C	kg/m ³	1.8650	2.0133	2.0429	2.0726	2.4582
Densidad Ficticia (ds)	---	1.1600	1.2300	1.2440	1.2580	1.4400
INFLAMABILIDAD						
Límite Inferior (LEL), %	-					
Vol. Aire	%	2.00	1.88	1.85	1.83	1.50
Límite Superior (UEL), %						
Vol. Aire	%	9.50	9.38	9.35	9.33	9.00
COMBUSTION						
Volumen Aire/Gas para combustión (Ideal)	-	23.86	25.65	26.01	26.37	31.02
Poder Calorífico (PCS)	BTU / kg	47,375	47,180	47,141	47,102	46,596
Poder Calorífico (Vapor @ 15°C) (PCS)	BTU / m ³	88,353	94,987	96,307	97,625	114,544
Poder Calorífico (Líquido @ 60°F)	BTU / gal	90,823	93,845	94,449	95,053	102,909
Poder Calorífico (PCI)	Kcal / kg	11,944	11,894	11,884	11,873	11,741
Poder Calorífico (PCS)	Kcal / gal	22,960	23,711	23,862	24,012	25,965
OCTANAJE						
M.O.N. Número de Octano Motor		97.1	95.2	95	94	89.6
R.O.N. Número de Octano de Investigación		112.0	107.8	106.9	106.1	95.0
USOS (Norma ASTM D-1835-91)		Industrial - Domestico - Comercial				
Clima (Norma ASTM D-1835 - 91)		Frío	Frío	Frío	Frío	Cálidos
Requisito de Combustible (Norma ASTM D - 1835 - 91)		Alta	Alta	Alta	Moderado	Baja
		Volatilidad	Volatilidad	Volatilidad	Volatilidad	Volatilidad

CAPITULO 2

MARCO TEORICO

2.1 Combustión

La combustión se define como el proceso en donde parte de la energía interna, que proviene de los enlaces químicos del combustible, es liberada en forma de luz y calor cuando el combustible reacciona con el comburente a su temperatura de ignición. También se le conoce como una reacción de oxidación rápida con presencia de llama en donde se libera una gran cantidad de calor. En este proceso existen dos modos diferentes de realizar una combustión controlada. El primer modo es quemar en régimen discontinuo una pequeña cantidad de mezcla combustible (motores alternativos y pulsorreactores), si se tratase de quemar en grandes cantidades se considera como una combustión incontrolada y se le denomina fuego. El segundo es quemar en régimen estacionario, es decir sus características no varían en el tiempo, y se trata de una llama anclada (velas, candiles, mecheros, etc.). Para que la combustión se lleve a cabo es necesario tres factores: el combustible, el comburente y la energía de activación. Estos tres factores son conocidos como el triángulo de fuego, ya que al cortar uno de ellos la combustión no se llevaría a cabo [13].

El combustible es una sustancia o una mezcla de estas con características particulares que en su composición contiene elementos oxidables. El combustible puede encontrarse como sólido (carbón, leña, etc.), como líquido (gasóleo, etanol, etc.), o

como gas (gas licuado de petróleo, gas natural, etc.) [10]. Los combustibles comerciales se pueden clasificar en dos clases, que son combustibles primarios o naturales y secundarios o artificiales. Estos últimos se diferencian porque son combustibles procesados de los primarios. Los combustibles primarios se encuentran en la naturaleza como sólidos (carbón, madera y otros tipos de biomasa), líquidos (petróleo y líquidos extraídos del gas natural) y gaseosos (gas natural y gases licuados del petróleo). Por otra parte los combustibles secundarios son derivados de los primarios encontrándose también en forma de sólidos (coque, carbón vegetal, biomasa residual, etc), líquidos (alcoholes, destilados de la biomasa, aceites de nafta y benzol) y gaseosos (gas licuado de propano, gas pobre, destilados de la hulla, gas de ciudad, destilados de las naftas del petróleo, etc). Es en este último grupo que se encuentra el gas, GLP, que va a ser objeto de estudio en las concentraciones de 70% de gas propano y 30% de gas butano.

El comburente, también conocido como oxidante es la sustancia que provoca la combustión, oxidando al combustible. El oxígeno es conocido como el comburente universal pero en la práctica se usa el aire por tener en su composición 21% de oxígeno, 78% de nitrógeno y 1% de gases nobles y por tener la facilidad de poder encontrarse en todas partes. [10] En procesos en donde se requiera una mejor combustión más limpia y eficiente se usa oxígeno, porque no genera gases de nitratos y se alcanzan mayores temperaturas, con lo cual se aprovecha mejor la energía liberada. Sin embargo, el empleo de oxígeno puro en los procesos resulta más costoso comparado con el uso de aire. Las mezclas combustible/comburente pueden prepararse previamente (gases premezclados) o ir generándose a medida que avanza la combustión (gases difundándose o líquidos y sólidos evaporándose). Antiguamente, la combustión ha sido de esta segunda forma (de difusión), pero a partir de los años 1855 con Bunsen se viene utilizando la premezclada de sustancias.

La energía de activación es la energía necesaria para que se produzca la combustión de los reactantes. También es conocida como la temperatura de ignición y más recientemente como el calor necesario para iniciar la combustión, el cual marca el punto mínimo para que los vapores de la mezcla del combustible con el comburente comiencen a arder [10]. La combustión se realiza cuando los gases no quemados (mezcla combustible y comburente) alcancen su temperatura de ignición.

2.1.1 Velocidad de llama laminar

La velocidad de llama laminar también conocida como: velocidad de deflagración, velocidad normal, velocidad de transformación y velocidad de quemado, esta basada en el modelo ideal unidimensional de llama, el cual supone llamas planas, adiabáticas y laminares. En la práctica estas condiciones no se dan, debido a que coexiste una mezcla entre llamas laminares de difusión y de premezcla, pero la teoría nos ayuda a entender mejor la realidad. [3] La velocidad de llama laminar es la rapidez relativa a la mezcla de gases con la cual el frente de llama, la zona que separa el gas quemado del gas sin quemar, se desplaza desde la zona de reacción hacia la mezcla inflamable en una combustión. Esta se mide en dirección normal a la superficie del frente de llama. Esta velocidad depende de la transmisión de calor entre la llama y las zonas cercanas (gases quemados y no quemados). [2]

Esta velocidad depende de diversos factores que limitan la combustión. La relación aire-combustible, la cual marca límites de inflamabilidad inferior, si se trata de una mezcla pobre de combustible con exceso de aire y límites de inflamabilidad superior si por el contrario se trata de una mezcla rica con exceso de combustible. La temperatura de ignición sin la cual el inicio de la combustión no se llevaría a cabo. La presión de ingreso del aire, la cual varía dependiendo de la altura en donde se realice la combustión, este valor repercute en la presión final de la mezcla modificando la temperatura de ignición, que controla el inicio de la combustión. También influye la presencia de otras sustancias que estén presentes en la combustión, el comburente, ya que si es oxígeno puro o aire se cambia la mezcla y por tanto se modifica la temperatura de ignición, esto sucede por la influencia que tiene la reacción química de la combustión. [9]

En la figura 2.1 se muestra la tendencia de la velocidad de llama laminar en función de la fracción estequiométrica de la mezcla en condiciones atmosféricas estándar (Presión=1 atm, Temperatura=300 K). En donde se ve que existe una velocidad máxima, este punto máximo se halla teóricamente para la relación de combustión estequiométrica.

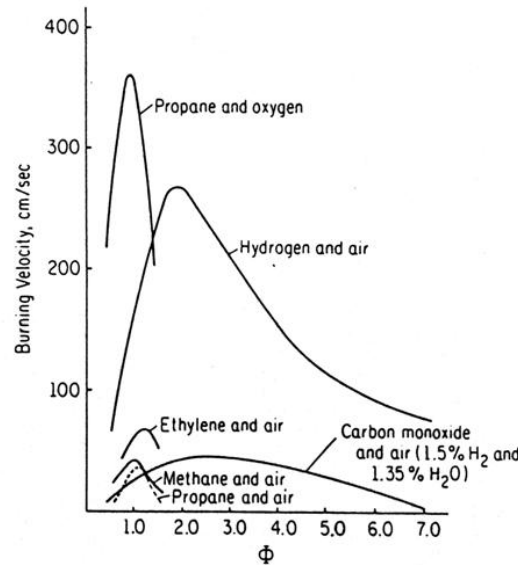


Figura 2.1: Velocidad de llama laminar [3]

En la figura 2.2 se puede observar la curva de la velocidad de llama laminar que toma el gas propano. Esta curva fue desarrollada en el libro de “Procesos de Combustión” por los investigadores Vagelopoulos y Egolfopoulos en el año 1998. Los puntos muestran las magnitudes de la velocidad de llama para las distintas concentraciones de la mezcla de gas propano con aire conseguidos en el laboratorio, mientras que la línea negra muestra la tendencia de los resultados. Estos datos se consiguieron en condiciones atmosféricas estándar.

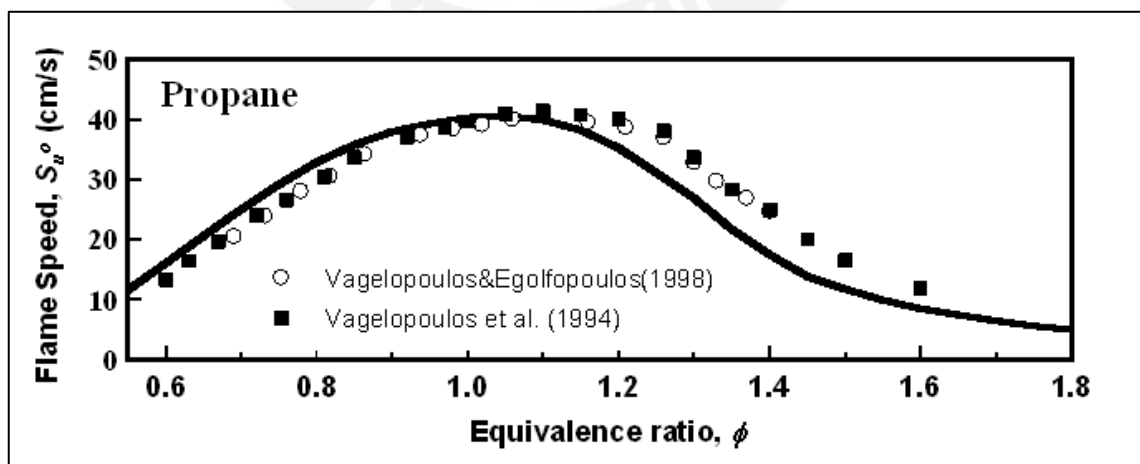


Figura 2.2: Velocidad de llama laminar del gas propano

Por otro lado también hay estudios sobre la velocidad de llama laminar para el caso de la mezcla de gas butano con aire. En la figura 2.3 se puede observar los resultados de la investigación de los científicos Davis y Law, quienes en su libro de la “Ciencia de la Combustión” también abordaron el tema. Los resultados que consiguieron también fueron a condiciones atmosféricas estándar.

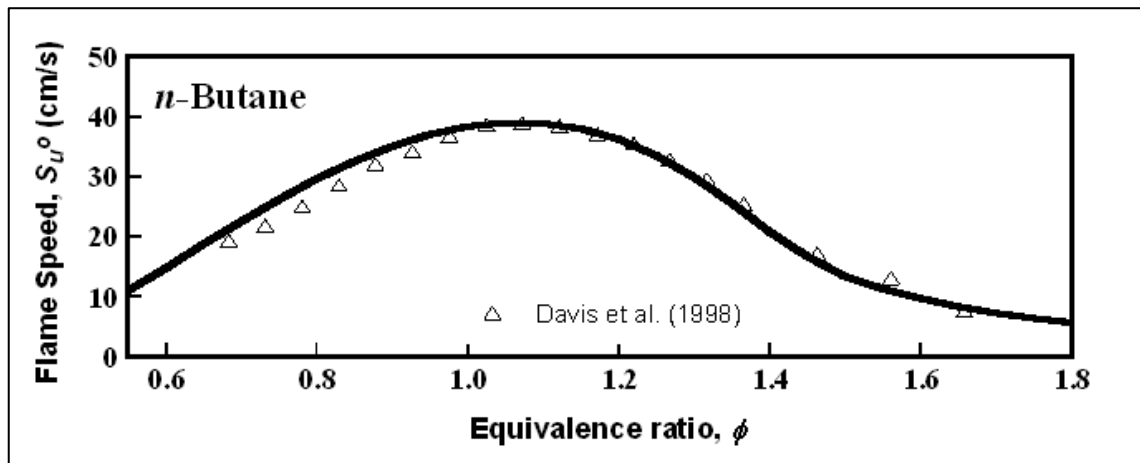


Figura 2.3: Velocidad de llama laminar del gas butano

Los resultados que se espera conseguir en el laboratorio deben de estar entre estas gráficas. Como se puede observar para ambos casos la velocidad de llama laminar máxima para el caso de la fracción estequiométrica de $\Phi=1$ debe de estar cerca de los 40 cm/s, esta relación se mantiene para la mayoría de mezclas de gases a base de carbono con aire. Naturalmente si se reemplazará el aire por oxígeno puro, en donde no habría subproductos que alteren la temperatura de llama, se obtendría velocidades muy superiores como se puede apreciar en la figura 2.1. En el caso de la mezcla de gas propano con oxígeno para la fracción estequiométrica antes mencionada, el valor de la velocidad de llama laminar estaría cerca de los 350 cm/s.

2.1.2 Límites de inflamabilidad

Los límites de inflamabilidad marcan un límite inferior y un límite superior, y es dentro de este límite que la combustión puede llevarse a cabo. Para entender esto es necesario conocer el concepto de relación aire-combustible, la cual es la relación que existe entre los kilogramos de aire, cuando el comburente es el aire, y los kilogramos de combustible de la mezcla. Se establece el límite inferior como la cantidad mínima

de combustible necesario para que la combustión pueda llevarse a cabo y asimismo se establece el límite superior como la cantidad máxima de combustible para iniciarse la combustión [10].

Dentro de los límites de inflamabilidad existen varias relaciones de aire (comburente) y combustible para las cuales se puede llevar a cabo la combustión a una temperatura de ignición. Si se emplearan otras que estén afuera de los límites de inflamabilidad por más que se aumente la temperatura no se produciría la combustión. Estos límites establecidos a su vez dependen de condiciones externas como la presión y la geometría de la cámara de combustión [3]. Es importante tener presente los límites de inflamabilidad de las sustancias porque afectan directamente en la combustión limitando el rango de aplicación de las sustancias combustibles como fuente de energía.

2.1.3 Temperatura en la combustión

Para iniciar el proceso de combustión es necesario calor y para esto se necesita una temperatura mínima a la cual se de inicio la combustión, esta temperatura se conoce como la temperatura de ignición. Mientras que por otro lado se le conoce como temperatura de combustión a la temperatura máxima que alcanza la llama en el proceso de combustión [3]. Sin el calor necesario en la combustión la reacción no se produciría. Este parámetro depende de varios factores como la altura en la que se encuentra, el comburente si se tratase de aire u oxígeno, los compuestos que intervienen en la reacción química, etc.

En la literatura se encuentra que los autores suelen tomar la temperatura de llama adiabática en sus cálculos, siendo más fácil de calcular al suponer condiciones ideales, y porque en la mayoría de los casos de combustión esta temperatura se asemeja a la temperatura de combustión. Sin embargo esto no se puede generalizar, porque no es cierto para todos los casos. [7] La temperatura de llama adiabática viene a ser la temperatura máxima que se obtendría en una combustión estequiométrica, donde se emplea el aire necesario para la combustión. [10]

2.2 Llamas

La llama se puede definir como el medio gaseoso en donde se produce la combustión, caracterizada por la emisión de luz y energía radiante. La llama es provocada por los átomos de las partículas presentes en los gases de combustión que reaccionan ante el calor liberado en la reacción de combustión.

La forma que adopta depende del medio técnico y de la forma del quemador. El medio técnico se refiere al lugar en donde se realiza la combustión, y el quemador es el dispositivo para quemar el combustible y liberar la energía en forma de luz y calor por medio de una llama. [12] Dentro del caso en estudio se espera conseguir una llama plana formando una circunferencia horizontal, esto debido al quemador tubular que se encuentra protegido del medio ambiente a través de un tubo transparente.

2.2.1 Clasificación de llamas

Las formas de clasificación de la llama están basadas según la velocidad de la mezcla gaseosa, la mezcla comburente-combustible y la posición de la llama con respecto al quemador.

Las llamas se pueden clasificar según la velocidad de la mezcla gaseosa, y se dividen en dos llamas turbulentas y llamas laminares. Estas están separadas por el número de Reynolds de 2000 aproximadamente, si son mayores a este Reynolds se consideran turbulentas, mientras que al ser menores se consideran laminares. En la práctica coexisten ambos tipos de llama, es decir no se tiene un Reynolds estático.

Otra forma de clasificar las llamas esta basado en que tan bien ha sido la mezcla comburente-combustible, de esta manea se tiene llamas de difusión en donde no ha habido una mezcla previa, es decir el combustible y el comburente se mezclan justo antes de la combustión, mientras que las llamas de premezcla, lo hacen antes de alcanzar la cámara de combustión. Cabe resaltar que el quemador que se va a utilizar permite que los componentes se mezclen de manera uniforme antes de iniciar la combustión, para así trabajar con llamas de premezcla.

Por último está la posición de la llama con respecto a la boca del quemador, bajo este criterio se distingue: la llama estacionaria, donde el combustible se quema poco a poco y la llama explosiva libre, una combustión explosiva en movimiento. [12]

2.2.1.1 Llamas turbulentas

Las llamas turbulentas son aquellas cuyo número de Reynolds es superior a 2000 y se caracterizan por tener un flujo no uniforme afectado por la variación de presiones, temperatura y la relación aire-combustible, que pueden aumentar o disminuir según la regulación que se maneje. [3] Hay algunos investigadores como Liao y Jiang que realizaron estudios en combustiones de llamas turbulentas premezcladas en la Universidad de Xi'an Jiaotong en China. Ellos encontraron evidencia del incremento de turbulencia externa al decrecer la turbulencia de la llama. Sus estudios son importantes debido a que la llama tiene comportamientos laminares y turbulentos. Los estudios teóricos no abarcan el aspecto turbulento porque al considerar las llamas laminares se facilitan los cálculos y se pueden analizar más fácilmente los resultados obtenidos. [8]

2.2.1.2 Llamas laminares

Las llamas laminares se caracterizan por tener un número de Reynolds menor a 2000, este parámetro nos indica que el flujo es más uniforme y se aproxima a las condiciones ideales y necesarias para el cálculo teórico. [3] En realidad no se pueden encontrar llamas laminares debido a que estas tienden a encontrarse en un estado de turbulencia, por diversas razones como las perturbaciones del exterior, las corrientes de aire, etc. Es difícil aislar todas las perturbaciones que existen, sin embargo se han obtenido buenos resultados con quemadores de poros que ayudan a direccionar el flujo de la mezcla haciendo que esta sea más uniforme.

Los estudios sobre las llamas laminares han servido a lo largo de los años para lograr un mejor control sobre la combustión. Además siendo este tema de estudio relativamente nuevo aún se continúa investigando en varios países.

2.2.1.2.1 Llamas laminares de difusión

Las llamas laminares de difusión ocurren cuando el combustible y el comburente se encuentran separados, es decir no hay una mezcla reactiva que ingrese en el quemador, y cuando el número de Reynolds es lo suficientemente bajo como para no haber turbulencia. La combustión se controla por el mezclado de los reactantes (combustible y comburente). En este caso el comburente se difunde hacia la llama por difusión molecular. [3]

Estas llamas tienen varias ventajas porque poseen buenas propiedades radiantes, lo que permiten obtener un rendimiento elevado, se pueden lograr llamas de grandes longitudes y la llama soporta altas variaciones de caudal en combustibles con altos contenidos de hidrógeno.

Por otro lado se presentan ligeros inconvenientes como la temperatura de la llama que es menos elevado que en el caso de las llamas de premezcla, son sensibles al contacto con las paredes, lo cual implica pérdidas de calor y formación de depósitos de carbono (hollín). [1]

El caudal de aire tiene una gran influencia en la forma de la llama, es así que si el caudal de aire que rodea la llama es suficiente para la combustión, se genera una llama cerrada de forma típica, el investigador Brizuela lo denomina como una llama pincel de artista. Por otro lado cuando el caudal de aire es insuficiente es decir la llama es subventilada en el conducto se forma una llama que el investigador denomina como tipo tulipa. [3] En la figura 2.2 se puede ver la forma de la llama de difusión cuando esta se encuentra subventilada.

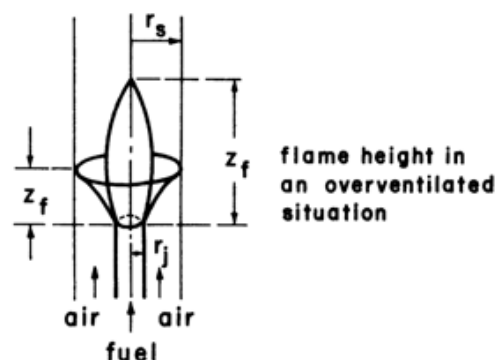


Figura 2.4: Llama laminar de difusión [3]

2.2.1.2.2 Llamas laminares de premezcla

Las llamas laminares de premezcla ocurren cuando el combustible y el comburente se mezclan antes de la zona de combustión. [3] Se asume que la mezcla resultante es homogénea, es decir ocurre una buena mezcla entre las sustancias, en donde no hay lugares localizados que tengan concentraciones mayores de una de las sustancias mezcladas. La mezcla de las sustancias favorece la reacción de combustión, haciendo que esta reacción se propague por toda la cámara.

Estas llamas presentan ventajas como la concentración de la fuente de calor, lo que permite reducir el tamaño de la cámara de combustión, se alcanzan mayores temperaturas de llama y no se presenta formación de depósito de carbono en las paredes, debido a que la reacción abarca toda la mezcla. Salvo que la mezcla presente un exceso de combustible y no se pueda llegar a reaccionar toda la mezcla, dejando residuos.

Por otro lado estas llamas presentan desventajas como el no poder establecer la combustión en zonas de grandes longitudes, se pueden presentar fenómenos como el desprendimiento de llama y retrollama. Los cuales causan problemas en el control de la llama. [1]

2.2.2 Estudios similares

El objetivo del estudio de las llamas laminares de premezcla es determinar la velocidad de propagación de llama. En los años recientes se han estudiado muchos procesos físicos y químicos que involucran llamas laminares. Existen varios estudios que abordan el tema y tratan de explicar el comportamiento de la velocidad de llama haciendo varias suposiciones al respecto, tomando en cuenta las ecuaciones de conservación de la energía, de conservación de masa, de reacciones químicas, mezclas de gas combustible ideales, etc.

En el transcurso del tiempo se han desarrollado nuevas teorías y paralelamente se han concebido métodos prácticos para su mejor análisis. Actualmente se están desarrollando nuevos softwares para realizar los cálculos de manera computacional.

2.2.2.1 Estudios teóricos

Los estudios teóricos se basan en ecuaciones de balance de energía, ecuaciones de conservación de masa, etc. Se desarrollaron una variedad de modelos para enfocar el estudio de la velocidad de propagación de llama. Para una mejor comprensión M. W. Evans en su libro, *Current Theoretical Concepts of Steady Flame Propagation*, clasificó las propuestas en tres grupos: teorías térmicas, teorías comprensivas y teorías de difusión. La clasificación está en base a las principales suposiciones que sus autores tienen en común.

En el grupo de teorías térmicas está el estudio de Mallard y Le Chatellier's, el cual utiliza el balance de energía para calcular la velocidad de llama laminar. Ellos postularon que la llama consiste en dos zonas separadas por un punto en donde se separan las llamas de la zona de precalentamiento con la zona de reacción. Su análisis encontró una relación entre esta velocidad con la difusividad térmica y el grado de reacción. Pero este análisis tiene limitaciones como el concepto de temperatura de ignición, el cual no existe en llamas laminares [5]. En la figura 2.3 se muestra la variación de temperatura en una llama laminar, en donde Mallard y Le Chatellier's dividieron la llama en dos, la zona I es en donde hay un precalentamiento antes de la ignición y la zona II en donde se produce la reacción química.

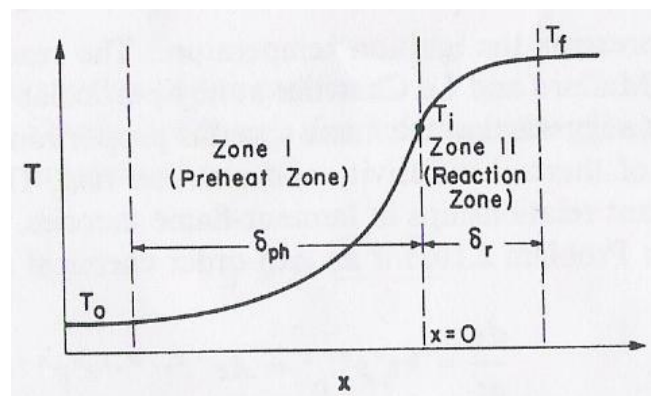


Figura 2.5: Variación de temperatura en una llama laminar [7]

En el grupo de teorías comprensivas está el estudio de Zel'Dovich, Semenov y Kamenetsky, quienes hacen un análisis similar al de Mallard y Le Chatellier's pero usan tanto el balance de energía como ecuaciones de continuidad en sus cálculos. Además asumen que la presión es constante, el número de moles no varía durante la reacción y que la llama es unidimensional y en estado estable. En su propuesta ellos asumen que la temperatura de ignición es muy cercana a la temperatura de llama adiabática y realizan ese reemplazo en sus cálculos de estimación del grado de reacción [7]. Sus resultados no son muy cercanos a la realidad, pero predicen la tendencia de la velocidad de llama laminar [5].

Por último están las teorías de difusión de partículas, como la de Tantford y Pease. Ellos postulan que la velocidad de difusión de los elementos, que intervienen en la combustión, es determinante en la magnitud de la velocidad de llama y no el gradiente de temperatura como así lo postulan las teorías térmicas. La propuesta de su teoría de difusión resultó distinta en el concepto físico, sin embargo las ecuaciones de difusión de masa son las mismas que en la teoría térmica [7].

Actualmente para el cálculo teórico de la velocidad de llama se utiliza un software especializado que tiene en cuenta diversos factores como el balance de energía, la reacción química, la mezcla de gases ideales, la estructura molecular del combustible, los aditivos, las presiones y temperaturas iniciales, etc.

2.2.2.2 Estudios experimentales

Los estudios experimentales llevan la teoría a la práctica. Para esto se crearon métodos y formas de ensayo que facilitaron el cálculo. A continuación se hace mención de algunos de ellos.

El método del quemador bunsen busca estimar la velocidad de llama calculando el área o el ángulo del cono de la llama que se genera cuando esta pasa por un tubo, como se muestra en la figura 2.4. Este método es muy práctico porque los equipos empleados son simples, pero la desventaja está en que es sensible a las perturbaciones ambientales. Hernández e Higueta encontraron que para mejorar la

precisión de las mediciones es necesario medir directamente la velocidad de salida de la mezcla inflamable [2].

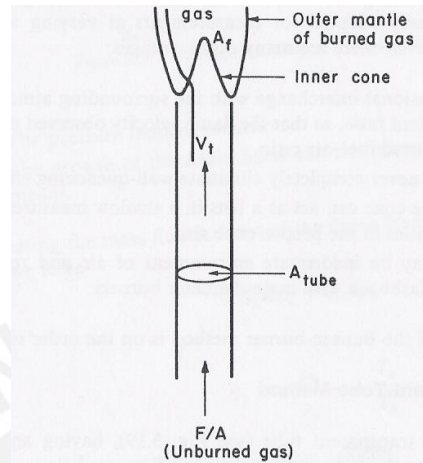


Figura 2.6: Quemador Bunsen [7]

Otro método más exacto y de fácil construcción es el quemador de llama plana, atribuido a Powling. En este método la mezcla gaseosa es regulada hasta conseguir una llama horizontalmente plana en donde es sencillo medir el área. Para conseguirlo se requiere que tanto la velocidad de salida de los gases así como la velocidad de llama laminar sean iguales, de lo contrario la llama adoptaría una forma cónica o podría apagarse. La desventaja es que funciona para mezclas de baja velocidad de llama, aproximadamente 15cm/s, de lo contrario la forma de la llama adoptaría la de un cono, sin embargo hay investigadores, como Glassman, que extendieron este método para velocidades más altas [7]. Este método es el que se usará para la determinación de la velocidad de llama laminar. En la figura 2.5 se muestra un quemador bunsen adaptado por Glassman en donde el investigador construyó un cilindro por donde hizo circular gases inertes y añadió una rejilla para disminuir las perturbaciones causadas por el ambiente. Esto permitió obtener resultados más precisos.

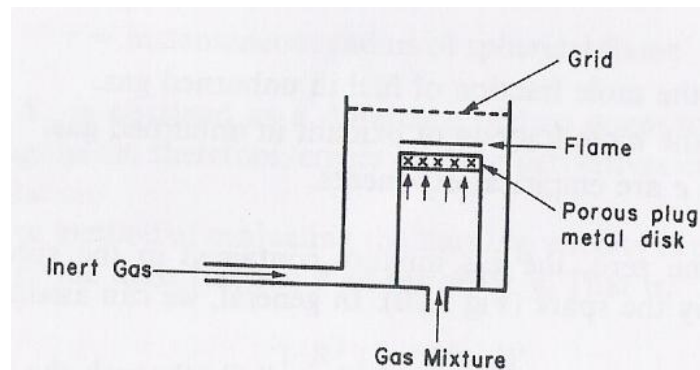


Figura 2.7: Quemador Bunsen adaptado por Glassman [7]

En el método de tubos cilíndricos se estima la velocidad de llama como el ritmo del progreso de la llama en el gas sin quemar. En donde, una mezcla de gas combustible pasa a través de un tubo transparente y esta es encendida, de manera que la llama viaja a través de la mezcla, como se muestra en la figura 2.6. La dificultad de este método radica en que la llama adopta una forma semiesférica o parabólica en donde es difícil estimar su área. Esto se debe a la viscosidad de la mezcla, al hacer que la velocidad de la mezcla en el centro del tubo sea mayor que la velocidad en las paredes, y también a la diferencia en las densidades de los gases quemados y la mezcla fresca. Zamashchikov encontró que en tubos estrechos es más probable que la forma simétrica de la llama se determine por el calor transferido entre la llama y la pared de los tubos y también que la velocidad del gas combustible y la velocidad de llama laminar afectan la forma de la llama. Por último también encontró que en tubos estrechos no había transición de régimen laminar al régimen turbulento, es decir que se trataba de llamas laminares [13].

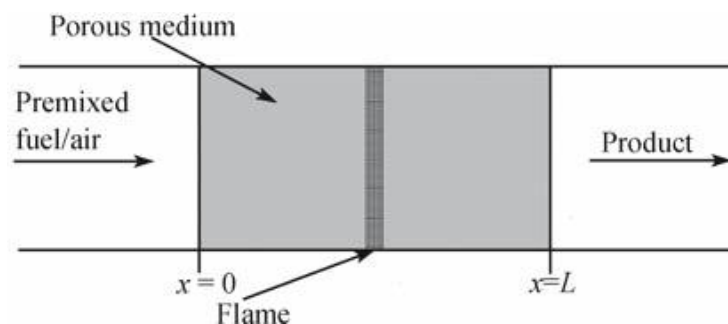


Figura 2.8: Tubos cilíndricos horizontales [12]

El método de la burbuja de jabón se utiliza para eliminar los efectos de la pared del tubo. En la figura 2.7 el gas combustible es contenido en una burbuja de jabón y luego encendido en el centro por una chispa, para así esparcir radialmente una llama desde el centro de la burbuja. Luego el crecimiento del frente de llama junto con el diámetro es fotografiado. Este método presenta algunas desventajas como: solo funciona para llamas de propagación rápidas para evitar así los efectos convectivos de los gases calientes, y no puede trabajar con gases combustibles secos [7].

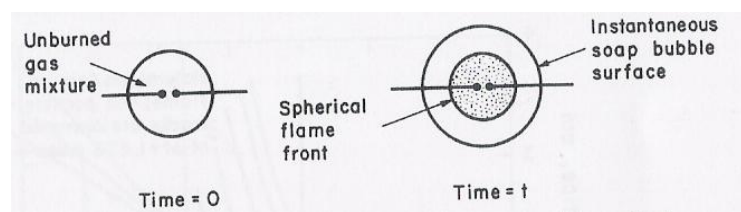


Figura 2.9: Burbuja de jabón [7]

Por último está el método de la bomba esférica cerrada, este método es similar al de la burbuja de jabón excepto que existe una condición de volumen constante que causa variaciones en la presión. El gas en donde la llama se está moviendo está cambiando constantemente y por eso la velocidad de llama laminar y la velocidad del gas combustible varían durante la explosión. Es debido a esto que en este método es muy difícil tener una precisión exacta. Jing Gong y Chun Jin realizaron estudios mediante este método usando la bomba esférica como se muestra en la figura 2.8. Se encontró que la velocidad de llama se incrementa con el incremento de la de la temperatura inicial y decrece con el incremento de la presión inicial. También se encontró que la inestabilidad en la llama era más sensible al efecto de la presión inicial en comparación con el efecto de la temperatura [6].

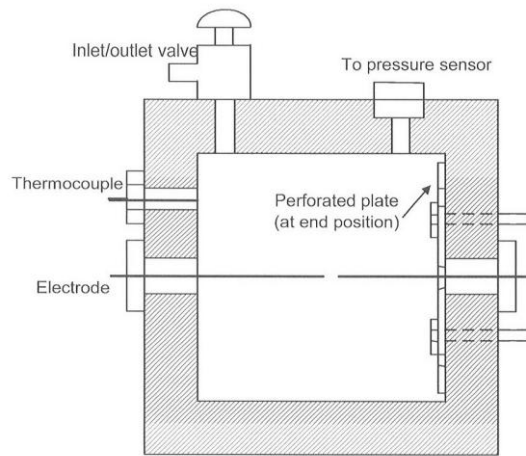


Figura 2.10: Bomba esférica cerrada [8]



CAPITULO 3

DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE LLAMA DE FORMA EXPERIMENTAL

3.1 Descripción del quemador de llama plana

El banco de pruebas utilizado para el estudio de la velocidad de llama laminar es el quemador de llama plana que se encuentra en el laboratorio de energía de la Pontificia Universidad Católica del Perú. El ingeniero Freddy Rojas Chávez implemento este banco teniendo en cuenta los materiales y medidas de estos proporcionados por el mercado local. Mientras que el diseño del aparato experimental fue realizado con criterios basados en las experiencias de otros autores (Derek Bradley, 1992) y en cálculos basados en leyes físicas y empíricas. Este quemador de llama plana ya había sido desarrollado por el investigador Powling, mencionado en el capítulo anterior.

La función del quemador de llama plana es proporcionar las condiciones, tanto de mezcla de combustible y comburente como de regulación de velocidad de dicha mezcla, necesarias para que una llama sea obtenida y mantenida. El quemador está compuesto de tres partes principales: el cono de admisión, el tubo mezclador y la boquilla.

3.1.1 Cono de admisión

La función del cono de admisión es admitir al interior del quemador el combustible (gas) y el comburente (aire). Para ello cuenta con dos entradas una en la parte inferior donde ingresa el aire, y otra lateral para el ingreso del gas combustible.

Esta pieza tiene una conicidad interior para lograr la adecuada recepción del chorro de aire que debe ingresar por el centro para que la distribución de la mezcla sea más regular en toda el área del mezclador. Para la alimentación de ambos flujos se roscaron conectores de manguera de latón en las entradas del cono. El cono está fabricado de bronce por ser fácil de mecanizar y por tener alta resistencia a la corrosión.



Figura 3.1: Cono de admisión

3.1.2 Tubo mezclador

La función del tubo mezclador es transportar el combustible y el comburente desde el cono de admisión hasta la boquilla, y que ambas sustancias se mezclen uniformemente durante el trayecto. Al este recipiente llegarán los conductos que transporta el aire desde el ventilador, y gas combustible. En el interior del mezclador los gases son mezclados de manera que forman un solo fluido uniforme. Este fluido se dirige ascendiendo hacia la boquilla.

El tubo mezclador es de acero inoxidable 316 con una longitud de 1 m, un diámetro interior de 59,5 mm y espesor de 2 mm. En ambos extremos tiene cinco milímetros de hilo fino con el fin de sujetar el cono de admisión y la boquilla.

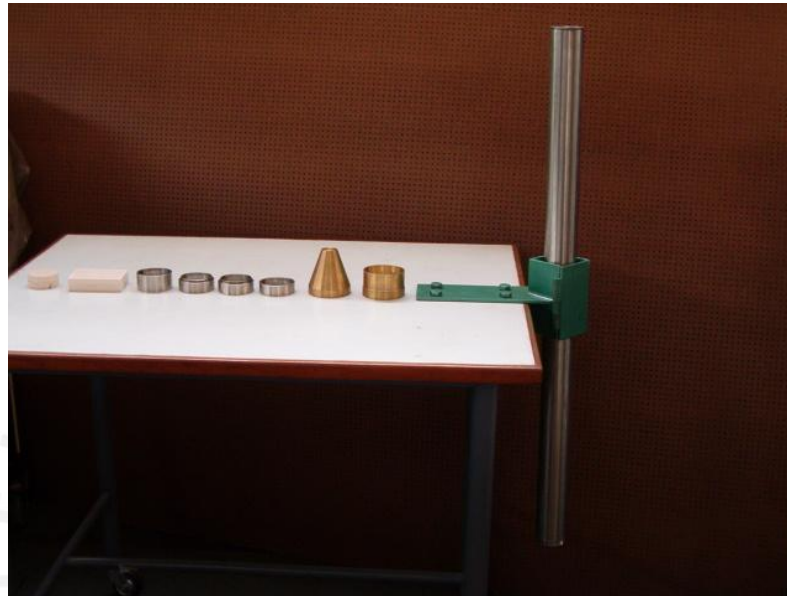


Figura 3.2: Tubo mezclador

3.1.3 Boquilla

En la boquilla se realiza la regulación del perfil de velocidad de los reactantes. Cuando los gases fluyen por una tubería, la velocidad que adquieren es la de un perfil parabólico ocasionado por los efectos de la viscosidad con la pared. Para corregirlo se hace pasar el flujo a través de una serie de matrices de cerámica perforadas que ocasionan una pérdida de presión uniforme. Esto obliga necesariamente a la mezcla de gases a pasar por los orificios de la placa rompiendo el perfil creado por la viscosidad. En la figura 3.3 se muestra el perfil de velocidad de la mezcla gaseosa y la formación de la capa límite debido a la viscosidad de la mezcla dentro del tubo mezclador de acero.

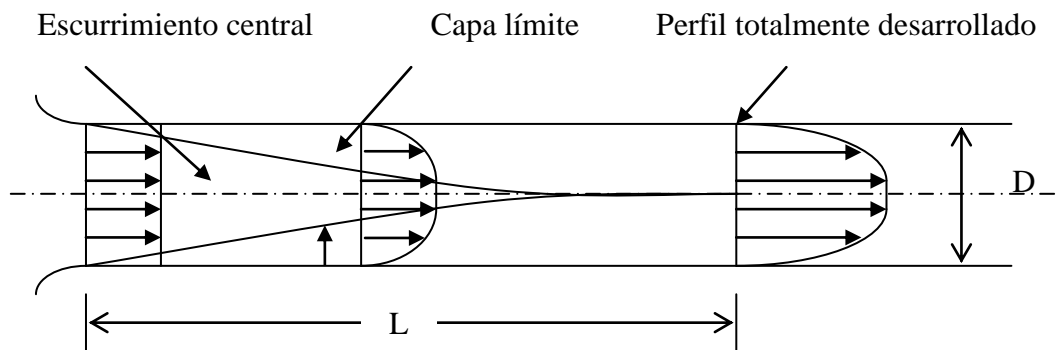


Figura 3.3. Perfil de velocidades y capa límite del fluido

Dentro de la boquilla se encuentran dos piezas de cerámica refractaria, las que se utilizan en las estufas de placa radiante (placa perforada infrarroja tipo SHWANK, espesor de 12 mm, diámetro de los orificios de 1,25 mm y 2 mm de separación entre estos). Además, el diámetro de 1,25 mm ofrece seguridad al momento de operar el quemador, ya que es bastante menor al diámetro de extinción del propano (2 mm) y etano (2,3 mm) en aire, que junto con el butano son los componentes principales del gas licuado, lo que impediría en un momento dado que la llama pase a través de las matrices.

Las matrices de cerámica fueron torneadas para que tuvieran las medidas adecuadas. Esto significa que se formaron cilindros de 63 mm de diámetro y 12 mm de altura. Una de las matrices fue torneada en forma diferente, con la parte superior más angosta de manera que pase por la base y la inferior más ancha para que se soporte sobre ella, con el objetivo de evitar el efecto negativo de extinción de la llama por parte de la pared. En la figura 3.4 se encuentra una fotografía de la boquilla ensamblada con una de las piezas de cerámica refractaria.



Figura 3.4. Boquilla con pieza cerámica refractaria

3.1.4 Manómetros de columna de agua

Para realizar las mediciones de presión necesarias en diversos puntos del sistema experimental se usaron 3 manómetros de forma U de columna de agua, tal como se muestran en la figura 3.4. Estos son fáciles de leer y además permiten medir con gran exactitud dentro del rango de presiones de trabajo del sistema experimental. Los rangos de los manómetros permiten medir presiones de hasta 500 mm de agua. Estos manómetros miden la diferencia de presiones entre dos extremos del tubo mediante una medición de diferencia de alturas entre los extremos del fluido.

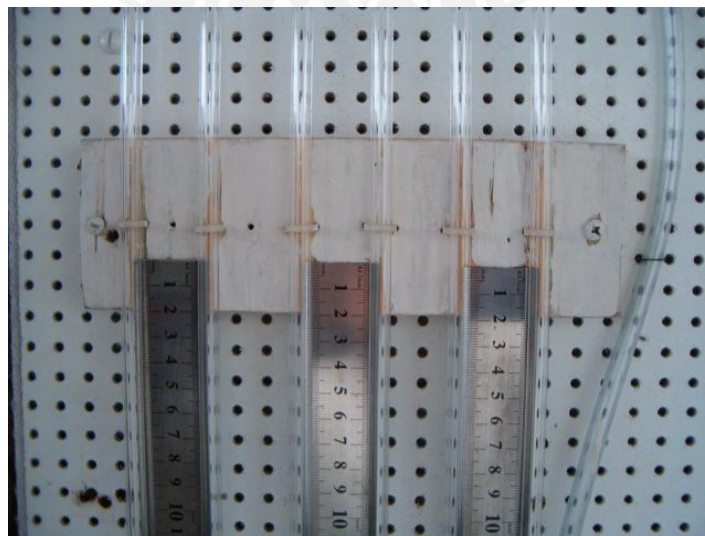


Figura 3.4 Esquema del manómetro en U de columna de agua

3.1.5 Medidores de flujo

Para realizar las mediciones tanto del flujo del aire y del gas que entra al sistema se emplearon flujómetros de marca Cole Parmer, cuyo rango de trabajo es de 2 a 25 L/min como se muestra en la figura 3.5. Estos consisten básicamente de un tubo vertical ligeramente cónico hacia arriba en el que hay un flotador que tiene libertad para subir y bajar por el tubo. El fluido entra por debajo y su velocidad ocasiona que el flotador se levante, y esto sucede hasta que el área anular entre el flotador y el tubo sea tal que la caída de presión apenas le permite sostenerlo.



Figura 3.5 Flujómetro de gas

3.1.6 Tubo de vidrio

El tubo de vidrio se encarga de rodear la llama producida en la combustión de la mezcla gaseosa lo cual permite la formación de una llama plana no sujeta a perturbaciones producto de los desplazamientos de aire dentro del laboratorio. El cilindro de vidrio pirex está adherido en el extremo superior del quemador, sobresaliendo aproximadamente 250 mm sobre la placa perforada. El diámetro interior del vidrio es de 68 mm y el exterior es de 72 mm.



Figura 3.6 Tubo de vidrio pirex

3.1.7 Conductos y mangueras del sistema

Se usaron diversos conductos y mangueras para el sistema experimental. Para transportar el aire desde el ventilador hacia el quemador se usó en primer lugar una manguera de $\frac{3}{4}$ " de diámetro y una válvula de bola de $\frac{3}{4}$ ". También está una manguera de diámetro interior de 7,94 mm ($5/16$ "). Finalmente se encuentra un niple de bronce de 10 mm, que recibe a la manguera de unión. Estas mangueras son de la marca Solgas de Repsol, son de color anaranjado y soportan una presión de trabajo máxima de hasta 150 mbar.

3.1.8 Sistema de admisión de gas combustible

Para alimentar gas licuado al mezclador se usó un conjunto compuesto por un balón de gas, un regulador de alta presión, mangueras de alta presión, un manómetro tipo Bourdon, un regulador de presión de baja y una válvula de tipo aguja-membrana. La presión de salida del gas se mide con un manómetro en U de columna de agua. El gas fluye finalmente por la manguera hacia el mezclador donde se conecta en un niple de bronce de 10 mm. En la figura 3.7 se detalla el esquema para la instalación.

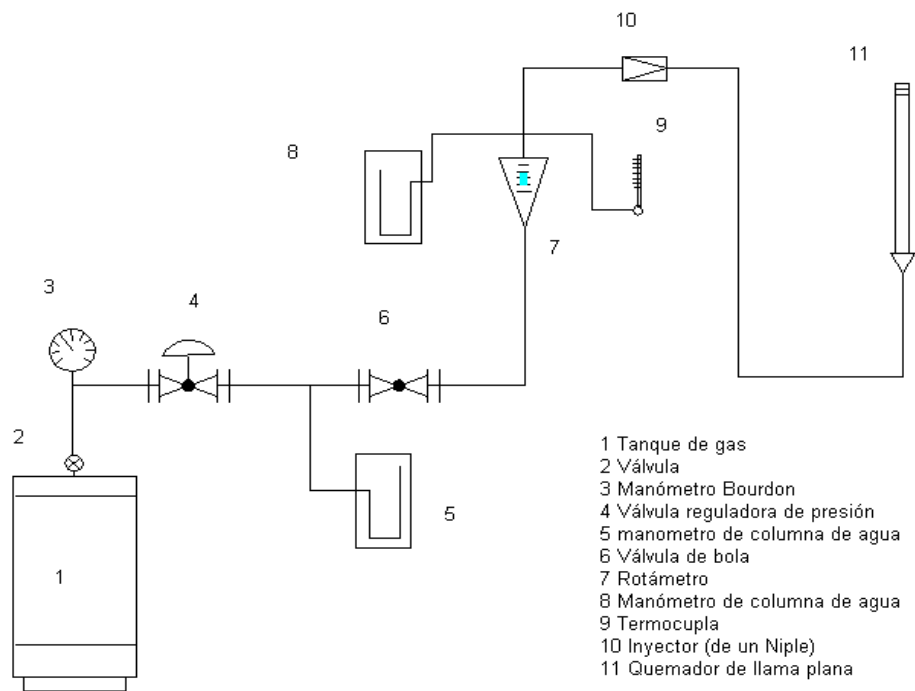


Figura 3.7 Sistema de admisión de gas combustible

3.1.9 Sistema de admisión de aire

Para nuestro experimento se necesita el aire como el comburente, de manera que se utilizó el ventilador del laboratorio de energía de Ingeniería Mecánica, movido con un motor eléctrico 0,750/0,375 kW; 3410/1755 rpm a 60 Hz. El esquema se muestra en la figura 3.8, en donde se detallan también los componentes del sistema.

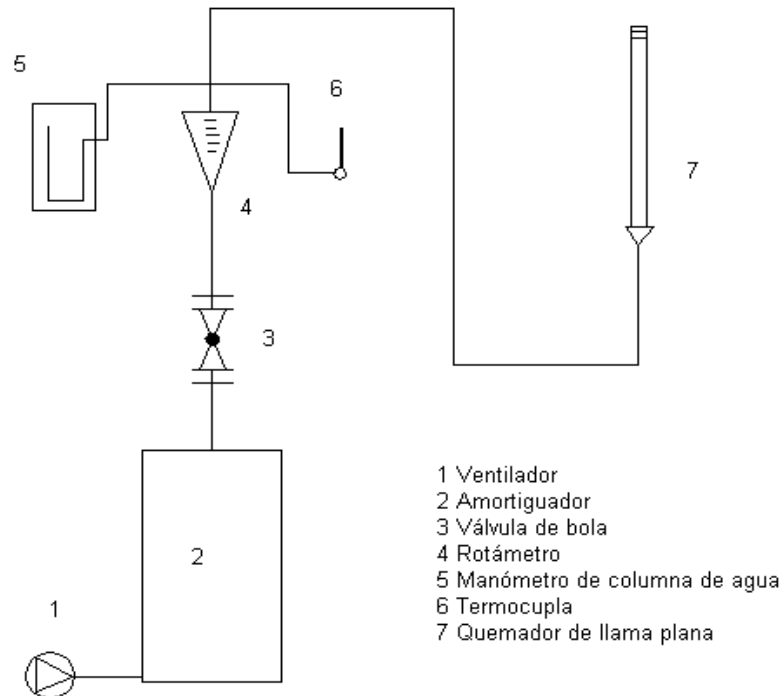


Figura 3.8 Sistema de admisión de aire

3.1.10 Banco de ensayos

El banco de ensayos está construido con el objeto de poder controlar todos los flujos necesarios para la puesta en marcha y operación del quemador (válvulas de paso y reguladoras). Asimismo, en el banco se encuentran instalados todos los elementos necesarios para realizar las mediciones, como los manómetros en U de columna de H_2O , de Bourdon, los flujómetros y las termocuplas.

Todos estos instrumentos están colocados al alcance de un solo operador que no necesita desplazarse para controlar el proceso, montados sobre tablas de madera de 10mm de espesor, las medidas de las tablas son de 2x2 m, y una mesa de trabajo; en la figura 3.9 se muestra una fotografía del panel de control.



Figura 3.9 Banco de ensayos

3.2 Desarrollo de la parte experimental

En esta experiencia se debe lograr estabilizar una llama plana laminar a una cierta altura desde la superficie de la boquilla y determinar posteriormente su velocidad.

Para poder determinar la velocidad de la llama, se debe primeramente lograr estabilizar la llama y luego de esto se debe estimar la superficie de ésta, para lo cual se utilizará las fotografías tomadas en la experiencia. Además de esto se debe medir el caudal y la temperatura tanto del combustible y del aire que ingresan al quemador.

Al lograr estabilizar la llama se obtiene que la velocidad de salida de los gases de la boquilla del quemador es igual a la velocidad de llama, cuando se habla de velocidad de llama se refiere a la velocidad con que se queman los reactantes (para este ensayo el GLP más el aire). Por lo tanto si la llama es estacionaria y adquiere un perfil plano uniforme, la velocidad de llama laminar se debería determinar al encontrar la velocidad de salida de los gases. La cual se calcula dividiendo el caudal de la mezcla combustible entre el área de la llama plana.

3.2.1 Descripción del equipo

Para el desarrollo de la experiencia se necesitaron los siguientes instrumentos y equipos para su correcta ejecución:

1. Quemador de llama laminar tipo Powling, el que está constituido, a grandes rasgos, de un mezclador de aire y de gas combustible, de un inyector de gases de premezcla, de una boquilla con placas refractaria y un visor de vidrio Pyrex.
2. Medidor de volumen rotatorio con sello de agua, marca American meter Co., el cual se utiliza para medir el consumo de gas, en este caso GLP. Su rango de medidas es de 3 litros por revolución y su división de escala es de un centésimo de litro.
3. Rotámetro calibrado para medir el consumo de aire, su rango de medición varía entre 0,4 y 3,8 m³/h; mientras que su división de escala es de 0,2 m³/h. Las medidas entregadas están normalizadas tomando como referencia un bar y 20 °C de presión y temperatura respectivamente.
4. Termocupla calibrada de marca Ama digit, con un rango de medidas de -50 a 280 °C, con una división de escala de 0,1 °C.
5. Balón de gas de gas licuado de petróleo (GLP de mezcla 70% de propano y 30% de butano) de marca Repsol de 15 Kg.
6. Cámara Olympus, con trípode, la que se utilizó para tomar fotografías de la llama, y con ello poder estimar su superficie.
7. Cronómetro, utilizado durante la experiencia para registrar un tiempo de 5min. Su rango de medidas es de vuelta por minuto, siendo su escala de una centésima de minuto.

3.2.2 Procedimiento para la obtención de llamas laminares

El laboratorio se inició con la calibración del rotámetro que mide el consumo de aire. Para lograrlo se conectaron los dos rotámetros en serie, sirviendo el primero como base de referencia, es decir, los valores mostrados en el segundo rotámetro se asumen como correctos si coinciden con los del primero. A través de la variación de consumo de aire entregado por el ventilador, conseguido por el grado de obstrucción de la manguera que conecta el ventilador con el resto del sistema, el cual permite obtener un set de datos debido a las marcas en la ranura de cierre del ventilador. Estos relacionan los valores reales con los mostrados por el rotámetro, cuya lectura se desea corregir.

Una vez terminada la calibración, se comenzó con el objetivo mismo de la experiencia, lograr una llama plana laminar. A continuación se detallan los pasos necesarios para la realizar la experiencia luego de haber realizado la calibración correspondiente.

1. Realizar la instalación del sistema de admisión del gas combustible y aire.
2. Verificar que las mangueras e instrumentos estén bien conectados, con el fin de evitar posibles fugas. Se realizó las pruebas de hermeticidad en las conexiones del sistema de admisión de gas (seguridad) y aire.
3. Instalar el balón de gas en el sistema de admisión de gas combustible.
4. Con la compuerta del ventilador cerrada, se enciende el sistema de admisión de aire.
5. Tomar lectura de los manómetros en posición de vacío.
6. Se abre la válvula del sistema de gas combustible que lleva el GLP para una presión dada, el cual se mezclará con el aire en el tubo del quemador y la mezcla viajará pasando por las placas de cerámica Shank.

7. Forzar la combustión con una chispa para que la mezcla de aire y GLP reaccione y se produzca una llama. Luego colocar el visor encima del tubo de vidrio.
8. Se procede a la estabilización de la llama, mediante la regulación de la obstrucción del paso de aire del ventilador. Para ello es necesario esperar unos 10 minutos aproximadamente para que se amortiguen las perturbaciones.
9. Una vez estabilizada la llama, se debe efectuar el registro de las medidas de interés, es decir, de la temperatura, consumo de combustible, y presiones de alimentación, tanto para el aire como para el gas. Con el cronómetro se verifica que pasen 5 minutos para tener la data antes y el después.
10. Tomar fotografías del perfil de la llama estabilizada, lo cual permite la estimación del área de su superficie.
11. Repetir el procedimiento anterior desde el punto N°8 variando la presión en el sistema de gas combustible.
12. Una vez terminado los ensayos se debe cortar el flujo de combustible cerrando la válvula de alimentación del gas, y con la compuerta del ventilador cerrada se apaga el motor del ventilador.

3.2.3 Ecuaciones de continuidad y de energía

Para el desarrollo de la parte cuantitativa de la experiencia se necesita emplear las siguientes fórmulas matemáticas que relacionan las variables en estudio.

El volumen promedio de gas GLP se calcula tomando la diferencia entre los volúmenes iniciales y finales de los datos de cada experiencia en el laboratorio. Siguiendo la ecuación para cálculo de la media aritmética:

Cálculo del volumen promedio del GLP:

$$\bar{V}_{GLP} = \frac{1}{n} \sum_{a=1}^n (V_f - V_i)_a \quad (3.1)$$

En donde:

\bar{V}_{GLP} := Volumen promedio de gas combustible GLP (m³)

V_f := Volumen final consumido de combustible GLP (m³)

V_i := Volumen inicial consumido de combustible GLP (m³)

n := Número de experiencias para cada dato tomado

Para el cálculo del caudal de gas de GLP se emplean las siguientes ecuaciones:

$$Q_{GLP} = \frac{\bar{V}_{GLP}}{t} \quad (3.2)$$

En donde:

Q_{GLP} := Caudal de gas combustible, GLP (m³/min)

\bar{V}_{GLP} := Volumen promedio de gas combustible, GLP (m³)

t := Tiempo transcurrido para el cambio de volumen (min)

Se debe obtener el caudal total de la mezcla gaseosa para que con el área se obtenga la velocidad de llama, pero los caudales de los gases no se pueden sumar, así que es necesario obtener el flujo total de la mezcla, que es a su vez la suma del flujo del aire más el flujo del gas.

$$\dot{m} = Q \times \rho \quad (3.3)$$

En donde:

\dot{m} := Flujo másico de la sustancia (g/s)

Q := Caudal de GLP o aire (L/s)

ρ := Densidad de la sustancia (g/L)

Para determinar la densidad de los componentes de la mezcla combustible se emplea la siguiente fórmula.

$$\rho = \frac{P \times M}{Ru \times T} \quad (3.4)$$

En donde:

ρ := Densidad de la sustancia (g/L)

P := Presión absoluta de la sustancia (atm)

M := Peso molecular de la sustancia (g/mol)

T := Temperatura de ingreso (K)

Ru := Constante universal de los gases (0.0821 L-atm/K-mol)

$$\dot{m}_{mezcla} = \dot{m}_{GLP} + \dot{m}_{aire} \quad (3.5)$$

En donde:

\dot{m}_{mezcla} := Flujo másico de la mezcla combustible (g/s)

\dot{m}_{GLP} := Flujo másico de GLP (g/s)

\dot{m}_{aire} := Flujo másico de aire (g/s)

Para calcular la densidad de la mezcla combustible de debe emplear la siguiente fórmula de densidades parciales:

$$\rho_{mezcla} = \left[\frac{1}{\rho_{aire}} + \frac{\dot{m}_{GLP}}{\dot{m}_{aire}} \left(\frac{1}{\rho_{GLP}} \right) \right]^{-1} \quad (3.6)$$

En donde:

ρ_{mezcla} := Densidad de la mezcla combustible (g/L)

ρ_{aire} := Densidad de aire (g/L)

ρ_{GLP} := Densidad de GLP (g/L)

\dot{m}_{GLP} := Flujo másico de GLP (g/s)

\dot{m}_{aire} := Flujo másico de aire (g/s)

Fórmula del cálculo del área de la llama plana.

$$A_{llama} = \frac{\pi \times d^2}{4} \quad (3.7)$$

En donde:

A_{llama} := Área que forma la llama (cm²)

d := Diámetro del quemador (cm)

Para el caso de que no se consiga obtener una llama totalmente plana y esta se obtenga con forma cónica se usará la siguiente ecuación:

$$A_{llama} = \pi r \sqrt{r^2 + h^2} \quad (3.8)$$

En donde:

A_{llama} := Área que forma la llama cónica (cm²)

r := Radio del quemador (cm)

h := Altura del cono de la llama (cm)

Finalmente para poder determinar la velocidad de llama laminar, esta se iguala a la velocidad de salida de los gases quemados cuando se trata de un flujo laminar en llamas planas.

$$S_L = \frac{Q_{mezcla}}{A_{llama}} \quad (3.9)$$

En donde:

S_L := Velocidad de la llama laminar de la mezcla combustible (cm/s)

Q_{mezcla} := Caudal de la mezcla combustible (cm³/s)

A_{llama} := Área que forma la llama (cm²)

Cálculos complementarios:

Se necesitan otros cálculos con respecto a la relación de aire combustible para comprender mejor el valor de la velocidad de llama laminar.

El primero de estos valores es la relación de aire-combustible que ingresa para formar la mezcla, la cual está dada por la siguiente ecuación:

$$r_{a/c} = \frac{\dot{m}_{aire}}{\dot{m}_{GLP}} \quad (3.10)$$

En donde:

$r_{a/c}$:= Relación de aire-combustible de la mezcla (kg aire/ kg comb)

\dot{m}_{GLP} := Flujo másico de GLP (g/s)

\dot{m}_{aire} := Flujo másico de aire (g/s)

Posteriormente, se realiza el cálculo de ϕ (Φ), el cual es una variable adimensional que establece la relación entre la concentración de aire-combustible de la mezcla en estudio con la concentración de aire-combustible estequiométrica (en condiciones ideales).

$$\phi = \frac{r_{a/c_{Ideal}}}{r_{a/c}} \quad (3.11)$$

En donde:

Φ := Fracción estequiométrica

$r_{a/c_{Ideal}}$:= Relación de aire-combustible estequiométrica (15.50 kg aire/ kg comb)

$r_{a/c}$:= Relación de aire-combustible de la mezcla (kg aire/ kg comb)

Para el caso de estudio, se está trabajando con una mezcla de GLP de 70% de propano y 30% de butano, esto nos lleva al cálculo de la relación de aire-combustible estequiométrico para esta sustancia en particular. Este valor se encuentra calculado tanto de forma experimental así como a través del software NASA Lewis 89. Ambos valores son muy cercanos y se tomará el valor de 15.50 kg aire/ kg comb (valor calculado por el software NASA Lewis 89), para efectos del cálculo.

3.2.4 Datos tomados en el laboratorio

Tabla 3.1 Toma de datos en los ensayos

N° Dato	Tipo de llama	Presión GLP (mm H ₂ O)	Presión aire (mm H ₂ O)	Volumen inicial GLP V _i (m ³)	Volumen final GLP V _f (m ³)	Tiempo (min)	Caudal aire (L/min)	Temperatura GLP (°C)	Temperatura aire (°C)
1	Plana	19	63	0.1630 0.1656 0.1684	0.1654 0.1682 0.1708	5	20	27	26
2	Plana	25	82	0.1106 0.1138 0.1170 0.1202	0.1134 0.1168 0.1200 0.1232	5	22	27	26
3	Plana	30	95	0.1960 0.1994 0.2028 0.2062	0.1992 0.2026 0.2060 0.2094	5	26	26	25
4	Cono truncada h=14 mm	35	108	0.2234 0.2274 0.2312 0.2350	0.2270 0.2310 0.2346 0.2384	5	28	27	25
5	Cono truncada h=18 mm	40	124	0.3434 0.3474 0.3514	0.3472 0.3512 0.355	5	30	30	29
6	Cono truncada h=22 mm	45	134	0.4262 0.4304 0.4346	0.4302 0.4344 0.4386	5	32	26	25
7	Cono truncada h=23 mm	50	150	0.5154 0.5198 0.5240 0.5284	0.5196 0.5239 0.5282 0.5326	5	34	28	27
8	Cono truncada h= 25 mm	55	154	0.5838 0.5884 0.5930 0.5976	0.5882 0.5927 0.5973 0.602	5	35	28	27
9	Cono truncada h=27 mm	60	175	0.6958 0.6996 0.7044 0.7092	0.6994 0.7042 0.709 0.7138	5	36	29	26
10	Cono truncada h=30 mm	65	189	0.7820 0.7870 0.7922 0.7970	0.7867 0.7917 0.7969 0.8018	5	38	28	26
11	Cono truncada h=31 mm	70	200	0.8160 0.8212 0.8264 0.8316	0.8210 0.8261 0.8314 0.8365	5	40	28	26

N° Dato	Tipo de llama	Presión GLP (mm H ₂ O)	Presión aire (mm H ₂ O)	Volumen inicial GLP Vi(m ³)	Volumen final GLP Vf(m ³)	Tiempo (min)	Caudal aire (L/min)	Temperatura GLP (°C)	Temperatura aire (°C)
12	Cono truncada h=32 mm	75	218	0.8502 0.8556	0.8553 0.8608	5	42	28	26
13	Inestable h=45mm	80	239	0.9100	0.9153	5	46	28	26
14	Plana	21	71	0.9332 0.9362 0.9392	0.9360 0.9390 0.9418	5	22	28	27
15	Plana	15	54	0.9468 0.9492 0.9516	0.9491 0.9514 0.9538	5	18	29	28
16	plana	10	42	0.9588 0.9628 0.9608	0.9607 0.9648 0.9627	5	10	29	28
17	Plana	10	40	0.9776 0.9798 0.9818 0.9838	0.9796 0.9817 0.9837 0.9857	5	16	26	27
18	Plana	8	37	0.9962 0.9982 1.0002 1.0022	0.9980 1.0000 1.0020 1.0040	5	16	27	27

En esta tabla podemos apreciar que la llama resulto ser muy inestable en el dato N° 13, es por ello que este dato no formara parte de los datos trabajados en los gráficos que se presentarán en los capítulos siguientes, sin embargo si aparecerá en las tablas de resultados.

3.2.5 Ejemplo de cálculo

El ejemplo de cálculo que aparece a continuación es tomado con los datos del primer ensayo de laboratorio. Este ensayo en particular corresponde al de una llama totalmente plana como se observa en la figura 3.10. En la cual se observa que la superficie de la llama es totalmente plana, esto indica que la velocidad de los gases no quemados se iguala a la velocidad de la llama, con lo cual se logra obtener una estabilización de la llama y se observa que esta queda plana en condiciones laminares ($Re < 2000$).

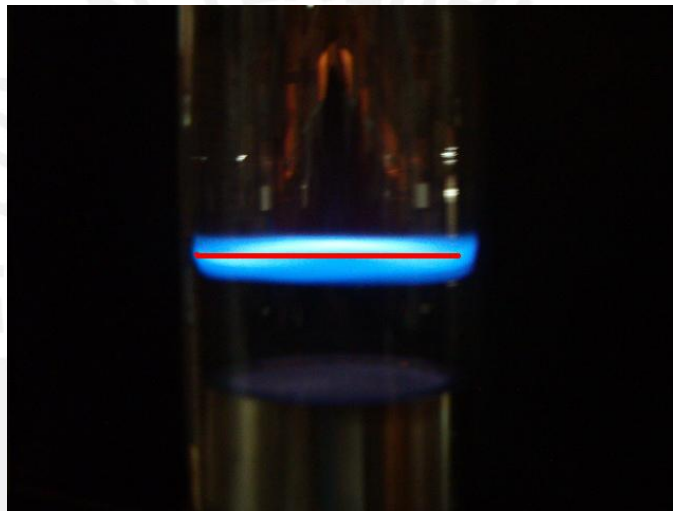


Figura 3.10 Llama plana en el laboratorio

Los siguientes datos para el cálculo son tomados de la tabla 3.1 correspondiente al dato N°1, para el primer ensayo en un tiempo de 5 min entre cada medición de volumen de GLP.

N° Dato	Tipo de llama	Presión GLP (mm H ₂ O)	Presión aire (mm H ₂ O)	Volumen inicial GLP V _i (m ³)	Volumen final GLP V _f (m ³)	Tiempo (min)	Caudal aire (L/min)	Temperatura GLP (°C)	Temperatura aire (°C)
1	Plana	19	63	0.1630	0.1654	5	20	27	26
				0.1656	0.1682				
				0.1684	0.1708				

Procedimiento seguido:

El primer paso es calcular el volumen promedio del gas. Para ello se calcula la diferencia entre los volúmenes finales e iniciales para luego encontrar el valor promedio.

1. $V_1 = (0.1654 - 0.1630) = 0.0024 \text{ m}^3$
2. $V_2 = (0.1682 - 0.1656) = 0.0026 \text{ m}^3$
3. $V_3 = (0.1708 - 0.1684) = 0.0024 \text{ m}^3$

Empleando la ecuación 3.1 se obtiene lo siguiente:

$$\bar{V}_{GLP} = \frac{1}{3} (0.0024 + 0.0026 + 0.0024) = 0.0025 \text{ m}^3$$

Luego se emplea la ecuación 3.2 para así calcular el caudal de gas.

$$Q_{GLP} = \frac{0.0025 \text{ m}^3}{5 \text{ min}} = 0.0005 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} * \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} = 0.50 \text{ L/min}$$

Para el cálculo de la velocidad de llama laminar es necesario obtener el caudal total de la mezcla combustible para dividirla entre el área y obtener la velocidad de la mezcla de gases. Al obtenerse una llama totalmente plana el sistema se encuentra en equilibrio y tanto la velocidad de llama como la velocidad de la mezcla son iguales (figura 3.11). Así que primero se debe calcular el flujo total de la mezcla, que es a su vez la suma del flujo másico del aire más el flujo másico del gas en estudio.

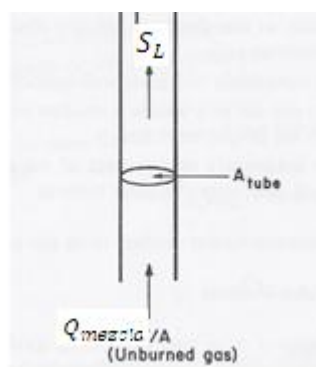


Figura 3.11 Velocidades de llama laminar y mezcla de gases en equilibrio

Antes de usar la ecuación 3.3 se debe calcular la densidad de la sustancia. Para el cálculo de la densidad del gas se emplea la ecuación 3.4 de la siguiente manera:

$$P_{man\ GLP} = 19\ \text{mm H}_2\text{O} * \frac{0.009806\ \text{kPa}}{10\ \text{mm H}_2\text{O}} * \frac{0.009869233\ \text{atm}}{1\ \text{Kpa}} = 0.0018\ \text{atm}$$

De la tabla 1.1 se extrae peso molecular del GLP (70%, 30%):

$$M_{GLP} = 48.305\ \text{g/mol (tabla 1.1, peso molecular)}$$

Con los datos obtenidos en las correctas unidades se procede a usar la ecuación 3.4 para el cálculo de la densidad del gas en estudio.

$$\rho_{GLP} = \frac{(1 + 0.0018\ \text{atm}) * (48.305\ \text{g/mol})}{(0.0821\ \frac{\text{L atm}}{\text{K mol}}) * (300\ \text{K})} = 1.9646\ \text{g/L}$$

Luego de haber realizado este cálculo se utiliza la ecuación 3.3 para determinar el flujo de gas combustible que ingresa al sistema.

$$\dot{m}_{GLP} = 0.50\ \frac{\text{L}}{\text{min}} * \frac{1\ \text{min}}{60\ \text{s}} * 1.9646\ \frac{\text{g}}{\text{L}} = 0.0162\ \text{g/s}$$

Ahora para el cálculo del flujo másico del aire se procede de la siguiente manera:

Primero se calcula la densidad del aire con la ecuación 3.4:

$$P_{man\ aire} = 6.3\ \text{cm H}_2\text{O} * \frac{0.09806\ \text{kPa}}{1\ \text{cm H}_2\text{O}} * \frac{0.009869233\ \text{atm}}{1\ \text{Kpa}} = 0.0061\ \text{atm}$$

De las tablas de termodinámica se obtiene que $M_{aire} = 28.97\ \text{g/mol}$

$$\rho_{aire} = \frac{(1 + 0.0061\ \text{atm}) * (28.97\ \text{g/mol})}{(0.0821\ \frac{\text{L atm}}{\text{K mol}}) * (299\ \text{K})} = 1.18\ \text{g/L}$$

Luego con la ecuación 3.3 se puede calcular el flujo de aire empleado en el ensayo.

$$\dot{m}_{aire} = 20 \frac{L}{min} * \frac{1min}{60s} * 1.18 \frac{g}{L} = 0.3948 g/s$$

En el siguiente paso se debe calcular el caudal de la mezcla gaseosa. Para esto se debe calcular el flujo másico total y la densidad de la mezcla combustible. Con la ecuación 3.5 se calcula el flujo másico total.

$$\dot{m}_{mezcla} = \dot{m}_{GLP} + \dot{m}_{aire} = 0.0162 g/s + 0.3948 g/s = 0.4110 g/s$$

Para el cálculo de la densidad de la mezcla combustible se debe emplear la ecuación 3.6, la cual relaciona las propiedades de dos gases para determinar el resultado de la mezcla.

$$\rho_{mezcla} = \left[\frac{1}{1.18 g/L} + \frac{0.0162 g/s}{0.3948 g/s} \left(\frac{1}{1.96 g/L} \right) \right]^{-1} = 1.1561 g/L$$

Luego se emplea la ecuación 3.3 para el cálculo del caudal de la mezcla:

$$Q_{mezcla} = \frac{0.4110 g/s}{1.1561 g/L} = 0.35554 \frac{L}{s} = 355.54 cm^3/s$$

Luego de esto es necesario realizar el cálculo del área de la llama plana, tomando en cuenta que el diámetro efectivo de la salida de gases del quemador es de 5.4 cm y con ayuda de la ecuación 3.7.

$$A_{llama} = \frac{\pi * 5.4^2}{4} = 22.9 cm^2$$

Finalmente para determinar la velocidad de llama laminar se emplea la ecuación 3.9 en donde se divide el caudal mezcla combustible entre el área de la llama plana, hallados anteriormente:

$$S_L = \frac{355.54 cm^3/s}{22.9 cm^2} = 15.52 cm/s$$

Cálculo de la relación de aire-combustible usando la ecuación 3.10:

$$r_{a/c} = \frac{0.3948 \text{ g/s}}{0.0162 \text{ g/s}} = 24.44 \frac{\text{kg aire}}{\text{kg comb}}$$

Finalmente se puede calcular la fracción estequiométrica de la mezcla para poder tabular los resultados usando la ecuación 3.11:

$$\Phi = \frac{15.50 \frac{\text{kg aire}}{\text{kg comb}}}{24.44 \frac{\text{kg aire}}{\text{kg comb}}} = 0.63$$

3.2.6 Tabla de resultados obtenidos

Tabla 3.2 Resultados obtenidos de las propiedades de los gases en estudio

DATO Nº	Densidad GLP (g/L)	Flujo GLP (g/s)	Densidad aire (g/L)	Flujo aire (g/s)	Densidad mezcla (g/L)	Flujo mezcla (g/s)
1	1.9646	0.0162	1.1845	0.3948	1.1561	0.4110
2	1.9657	0.0192	1.1866	0.4351	1.1560	0.4543
3	1.9733	0.0210	1.1921	0.5166	1.1637	0.5376
4	1.9676	0.0232	1.1936	0.5570	1.1645	0.5802
5	1.9491	0.0243	1.1796	0.5898	1.1512	0.6140
6	1.9761	0.0263	1.1966	0.6382	1.1676	0.6645
7	1.9639	0.0273	1.1904	0.6746	1.1622	0.7018
8	1.9649	0.0284	1.1909	0.6947	1.1624	0.7230
9	1.9593	0.0279	1.1972	0.7183	1.1700	0.7462
10	1.9668	0.0308	1.1988	0.7593	1.1703	0.7901
11	1.9677	0.0326	1.2001	0.8001	1.1715	0.8326
12	1.9687	0.0338	1.2021	0.8415	1.1739	0.8753
13	1.9696	0.0266	1.2045	0.9235	1.1841	0.9501
14	1.9584	0.0178	1.1814	0.4332	1.1529	0.4510
15	1.9508	0.0145	1.1756	0.3527	1.1472	0.3672
16	1.9499	0.0126	1.1742	0.3131	1.1466	0.3257
17	1.9694	0.0127	1.1779	0.3141	1.1500	0.3268
18	1.9625	0.0118	1.1776	0.3140	1.1517	0.3258

Tabla 3.3 Resultados finales del proceso de combustión

DATO N°	Relación (aire/comb)	Fracción estequiométrica (Φ)	Caudal mezcla (cm^3/s)	Area de llama (cm^2)	Velocidad de llama laminar (cm/s)
1	24.44	0.63	355.49	22.90	15.52
2	22.64	0.68	393.01	22.90	17.16
3	24.54	0.63	462.01	22.90	20.17
4	24.04	0.64	498.21	31.74	15.70
5	24.32	0.64	533.40	34.80	15.33
6	24.22	0.64	569.11	40.13	14.18
7	24.73	0.63	603.88	37.25	16.21
8	24.48	0.63	622.05	38.75	16.05
9	25.78	0.60	637.78	42.94	14.85
10	24.64	0.63	675.08	44.39	15.21
11	24.56	0.63	710.76	47.82	14.86
12	24.90	0.62	745.65	44.84	16.63
13	34.73	0.45	802.36	46.71	17.18
14	24.28	0.64	391.20	22.90	17.08
15	24.28	0.64	320.07	22.90	13.98
16	24.92	0.62	284.04	22.90	12.40
17	24.75	0.63	284.17	22.90	12.41
18	26.67	0.58	282.89	22.90	12.35

CAPITULO 4

DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE LLAMA DE FORMA ANALÍTICA Y MEDIANTE SOFTWARE

4.1 La teoría térmica de Mallard y Le Chatellier`s

En el capítulo 2 se habló acerca de la teoría térmica de Mallard y Le Chatellier`s, en este nuevo capítulo se busca profundizar acerca de sus estudios. El desarrollo de esta teoría se remonta a 1883, en esta época estos investigadores elaboraron los primeros postulados de la primera teoría acerca de la velocidad de llama laminar, la cual conserva validez [5].

El postulado de los investigadores es que el calor conducido desde la zona I, en la figura 2.3 del capítulo 2, es el calor necesario para aumentar la temperatura de los gases no quemados hasta la temperatura de ignición (temperatura que separa las zonas I y II) necesaria para producir la combustión. El balance de energía queda como la siguiente expresión:

$$\dot{m}C_p(T_i - T_o) = \lambda \frac{(T_i - T_f)}{\delta} \quad (4.1)$$

En donde en el lado izquierdo de la ecuación representa la cantidad de energía absorbida mientras que la mezcla de gases no quemados fluye en la entrada de la zona de precalentamiento a T_o y es calentada hasta T_i a la salida de la zona de precalentamiento [5]. Mientras que en el lado derecho se encuentra el flujo de calor necesario para la interface, asumiendo que la pendiente de la curva de temperatura fuese lineal, es entonces que la pendiente se aproximaría a la expresión $[(T_f-T_i)/\delta]$ multiplicado por λ (conductividad térmica). En donde T_f es la temperatura de flama, T_i la temperatura de ignición y δ el espesor de la zona de reacción [7]. La ecuación para el flujo másico de los gases no quemados puede escribirse como:

$$\dot{m} = \rho u = \rho S_L \quad (4.2)$$

En donde ρ es la densidad, u es la velocidad de los gases no quemados y S_L es la velocidad de llama. Debido a que los gases no quemados entran en dirección normal a la onda se cumple que:

$$S_L = u \quad (4.3)$$

Con esto la ecuación 4.1 se convierte en:

$$S_L = \lambda \frac{(T_i - T_f)}{\rho \delta C_p (T_i - T_o)} \quad (4.4)$$

Esta expresión para la velocidad de llama laminar es la obtenida por Mallard y Le Chatellier's. Desafortunadamente la variable δ no es conocida y por tanto se necesita una mejor representación. Dado que δ es el espesor de la zona de reacción, se puede relacionar con la velocidad de llama. Entonces:

$$\delta = S_L \cdot \tau = S_L \frac{1}{\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)} = S_L \frac{1}{RR} \quad (4.5)$$

En esta nueva ecuación se define τ como el tiempo de reacción y $(d\varepsilon/dt)$ la tasa de reacción (RR). Substituyendo esta ecuación se obtiene que:

$$S_L = \sqrt{\frac{\lambda(T_i - T_f)}{\rho c_p (T_i - T_o)} \frac{d\varepsilon}{dt}} \sim \sqrt{\alpha RR} \quad (4.6)$$

La tasa de reacción (RR) no fue especificada por los investigadores en alguna temperatura particular, pero el análisis sugiere que la velocidad de llama es proporcional a la raíz cuadrada del producto de la difusividad térmica (α) y la tasa de reacción [5]. Este resultado es una de las relaciones más importantes en las teorías de llamas laminares.

$$\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right) = k\varepsilon^n p^{n-1} = Ae^{-E_a/R_u T} \varepsilon^n p^{n-1} \quad (4.7)$$

Una vez ya desarrollado la tasa de reacción, es posible obtener una ecuación que nos permita comparar la velocidad de llama laminar de forma analítica. Para esto tenemos que la velocidad de llama laminar es independiente de la presión para las reacciones de segundo orden. Debido a que la mayoría de las reacciones de hidrocarburos tienen reacciones de orden 2 [7]. Además la dependencia de la temperatura en la expresión de velocidad de llama es dominada por la exponencial, con lo cual es posible asumir que:

$$S_L \sim \sqrt{e^{-E_a/R_u T}} \quad (4.8)$$

Finalmente, debido a que la mayoría de las reacciones y liberaciones de calor deben ocurrir cerca a la temperatura máxima, T es reemplazado por T_f , que es la temperatura de llama adiabática [5].

$$S_L \sim \sqrt{e^{-E_a/R_u T_f}} \quad (4.9)$$

Esta es la expresión que se utilizará para evaluar la velocidad de llama laminar de la mezcla combustible del GLP y aire. Cabe señalar que la variación en la temperatura inicial altera la temperatura de llama adiabática [7]. Es decir que los resultados son sensibles a la variación de las condiciones iniciales.

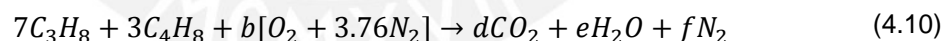
4.2 Cálculos numéricos de la combustión ideal del GLP con aire

En la ecuación 4.9 se encontró que para la obtención de la velocidad de llama laminar es necesario la temperatura de llama adiabática y antes de realizar este cálculo es necesario obtener la ecuación de reacción del GLP con aire. Para obtenerla se debe analizar como una combustión ideal sin exceso de aire para fines prácticos.

En la combustión ideal con aire consideramos que el hidrógeno molecular (H_2) se oxida hasta formar moléculas de agua (H_2O), mientras que el carbono (C) lo hace formando dióxido de carbono (CO_2). En la siguiente reacción se determinó la fórmula de la combustión del gas licuado de petróleo (GLP), considerando el aire estrictamente necesario para realizar la combustión (aire estequiométrico).

4.2.1 Combustión ideal del GLP con aire estequiométrico

El GLP en estudio posee una configuración de 70% de propano con 30% de butano, estos reactantes reaccionarán con el oxígeno del aire formando como productos el dióxido de carbono, vapor de agua y nitrógeno molecular. Esto debido a que se trata de un caso ideal en donde el nitrógeno no reacciona formando compuestos, la realidad es distinta y existen más compuestos de nitrógeno y carbono que no se contemplan en la siguiente ecuación.



Los balances de los átomos son los siguientes:

$$\text{Balance de C: } 7 \times 3 + 3 \times 4 = d$$

$$d = 33$$

$$\text{Balance de H: } 7 \times 8 + 3 \times 10 = 2e$$

$$e = 43$$

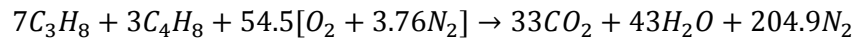
$$\text{Balance de O: } 2b = 2 \times 33 + 1 \times 43$$

$$b = 54.5$$

$$\text{Balance de N: } 54.5 \times 3.73 \times 2 = f$$

$$f = 204.9$$

La ecuación del GLP con aire estequiométrico sería la siguiente:



4.2.2 Relación de aire/combustible estequiométrico

Dentro de los cálculos termodinámicos, la relación de aire/combustible es uno de los más importantes, porque este es el cociente entre la masa de aire la masa de combustible utilizados en la combustión. Se expresa en kg de aire por kg de combustible. Para la determinación de esta relación se hace necesario primero realizar el cálculo de las moles del combustible y del aire.

Cálculo del número de moles del propano (C_3H_8)

$$M_{prop} = 3(12.01) + 8(1.008) = 44.09 \text{ kg/kmol}$$

Cálculo del número de moles del butano (C_4H_{10})

$$M_{but} = 4(12.01) + 10(1.008) = 58.12 \text{ kg/kmol}$$

Cálculo del número de moles del aire [$O_2 + 3.76N_2$]

$$M_{aire} = 2(16) + 3.76 \times 2(14) = 137.28 \text{ kg/kmol}$$

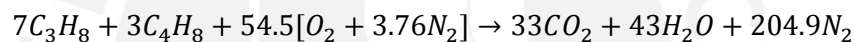
Una vez terminado el cálculo de las moles de los reactantes, estos deben ser multiplicados por el número de moles que aparece en la reacción estequiométrica del combustible. De esta forma se determina la masa tanto del aire y del combustible. Finalmente se efectúa la división entre los resultados obteniéndose la relación que se busca.

$$r_{a/c} = \frac{54.5(M_{aire})}{7(M_{prop}) + 3(M_{but})} \quad (4.11)$$

$$r_{a/c} = 15.49 \frac{\text{kg de aire}}{\text{kg de comb}}$$

4.2.3 Cálculo de la temperatura de llama adiabática

Otro de los factores importantes dentro del cálculo es la temperatura de llama adiabática, esta temperatura es la temperatura máxima alcanzada por los productos de la combustión, en una combustión adiabática cuando no hay producción de trabajo [10]. El siguiente cálculo que se presenta corresponde a la obtención de la temperatura de llama adiabática interpolando entre dos extremos cercanos. Cabe mencionar que estos cálculos teóricos nunca se alcanzan en forma práctica. Esto se debe a que en la práctica no hay sistemas completamente adiabáticos. Las entalpías para el siguiente cálculo se han sacado del Anexo 3.



Entalpía de los reactantes:

$$H_R = \sum_R n_i (h_{fi} + (h_T - h_{298})) \quad (4.12)$$

$$H_R = 7(-103847) + 3(-126148) = -1105373 \text{ kJ/kmol}$$

Entalpía de los productos:

$$H_P = \sum_P n_i (h_{fi} + (h_T - h_{298})) \quad (4.13)$$

$$H_P = 33(-393522 + \Delta h)_{CO_2} + 43(-241827 + \Delta h)_{H_2O} + 204.92(\Delta h)_{N_2}$$

La temperatura de llama adiabática será cuando:

$$H_R = H_P = -1105373 \text{ kJ/kmol}$$

Asumiendo una temperatura de $T=2500K$

$$H_P = -907224.96 \text{ kJ/kmol}$$

Asumiendo una temperatura de $T=2400\text{K}$

$$H_p = -2018102.08 \text{ kJ/kmol}$$

Interpolando entre las temperaturas $T=2500\text{K}$ y $T=2400\text{K}$

$$x = 2400 + (-1105373 + 2018102.08) \frac{(2500 - 2400)}{(-907224.96 + 2018102.08)}$$

$$x = 2482.16\text{K}$$

4.2.4 Cálculo de la velocidad de llama laminar

Para el cálculo de la velocidad de llama laminar en la ecuación 4.9 estipulada por Mallard y Le Chatellier's es necesario conocer la temperatura de llama adiabática. Este dato fue calculado y se emplea en la siguiente ecuación:

$$S_L = \sqrt{e^{-E_a/R_u T_f}}$$

En donde:

S_L := Velocidad de la llama laminar de la mezcla combustible (cm/s)

E_a := Energía de activación 30 000 cal/mol (Propiedad de los gases propano y butano)

R_u := Constante universal de los gases 1.987 cal/mol-K

T_f := Temperatura de llama adiabática (K)

$$S_L = 47.8 \text{ cm/s}$$

Con la temperatura de flama adiabática se obtiene el siguiente valor para la velocidad de llama adiabática. Este cálculo es posible debido a que se aproximó el valor de la temperatura de llama adiabática de forma lineal. Esto no es cierto debido a que las curvas de temperatura no son lineales, con lo cual se introduce una fuente de error en el cálculo y hace que no sea preciso el análisis.

4.3 Programa computacional NASA Lewis 89

Para un mejor estudio de la velocidad de llama laminar se han creado nuevos softwares que facilitan el cálculo y permiten obtener un resultado más cercano a la realidad. Para este caso en particular se empleo el programa NASA Lewis 89 (NL89) para obtener el dato de la temperatura de llama adiabática. Para que luego de esto se emplee la ecuación resultante de la teoría de Mallard y Le Chatelier's y se pueda obtener unos valores de velocidad de llama más cercanos a la realidad.

Para el empleo del software (realizado en fortran) se deben llenar los siguientes datos en un archivo con extensión .IN (formato en fortran), el cual luego se correrá en el programa.

```

REACTANTS
C 4.      H 10.      00      30.      M      G
298.15 F
C 3.      H 8.      00      70.      M      G
298.15 F
O 2.      00      21.      M      G
298.15 O
N 2.      00      79.      M      G
298.15 O
  
```

NOTE The equilibrium state will be calculated for P=1 atm.

NOTE Transport properties are also calculated.

! MS-FORTRAN uses & and / for the namelist delimiters.

NAMELISTS

&INPT2 P=1,T=273, **TRNSPT**=t, **TRACE**=1.E-5, **HP**=T,

KASE=1,eratio=T,

mix=1,0.8,0.7,0.6,0.5, /

En este programa se debe ingresar los datos de los hidrocarburos, específicamente cuales son los comburentes y su porcentaje de volumen ocupado, así como el comburente usado, para este caso el aire cuya mezcla puede reducirse en oxígeno molecular y en nitrógeno molecular. Luego de esto también se hace necesario ingresar los datos de presión y temperatura iniciales en la parte de INPT 2, así como también establecer como verdaderos (T) los criterios de HP (entalpía y presión constante) y TRNSPT (función de transferencia), mientras que la parte de TRACE establece la sensibilidad de los datos obtenidos. Por último los otros valores de importancia son los

mix, los cuales establecen la relación de aire-combustible real entre la relación aire-combustible ideal determinada en una mezcla estequiométrica.

Una vez que se haya corrido el archivo a través del software, el programa arrojará una serie de datos mostrados a continuación (se muestra un ejemplo de cálculo):

COMBUSTION PROPERTIES AT ASSIGNED

PRESSURES

CASE NO. 1

MOLES	ENERGY	STATE	TEMP	DENSITY
CAL/MOL	DEG K	G/CC		
FUEL C	4.00000	H	10.00000	
30.000	-32181.540	G	298.15	
FUEL C	3.00000	H	8.00000	
70.000	-24821.680	G	298.15	
OXIDANT O	2.00000			
21.000	.000	G	298.15	
OXIDANT N	2.00000			
79.000	.000	G	298.15	

O/F= 15.5003 PERCENT FUEL= 6.0605
 EQUIVALENCE RATIO= 1.0000 **PHI= 1.0000**

THERMODYNAMIC PROPERTIES

P, ATM 1.0000
T, DEG K 2266.22
 RHO, G/CC 1.5111-4
 H, CAL/G -33.912
 U, CAL/G -194.17
 G, CAL/G -5281.60
 S, CAL/ (G) (K) 2.3156

M, MOL WT 28.101
 (DLV/DLP) T -1.00301
 (DLV/DLT) P 1.0890
 CP, CAL/ (G) (K) .5424
 GAMMA (S) 1.1787
 SON VEL, M/SEC 889.0

TRANSPORT PROPERTIES (GASES ONLY)

CONDUCTIVITY IN UNITS OF MILLICALORIES/ (CM) (K) (SEC)

VISC, MILLIPOISE .71942

WITH EQUILIBRIUM REACTIONS

CP, CAL/ (G) (K)	.5441
CONDUCTIVITY	.6181
PRANDTL NUMBER	.6333

WITH FROZEN REACTIONS

CP, CAL/ (G) (K)	.3518
CONDUCTIVITY	.3559
PRANDTL NUMBER	.7111

MOLE FRACTIONS

CO	1.2539-2
CO2	1.0381-1
H	4.5911-4
H2	3.2488-3
H2O	1.4650-1
NO	2.3401-3
N2	7.2167-1
O	3.0980-4
OH	3.2542-3
O2	5.8693-3

De los resultados obtenidos mediante este programa los datos más importantes que se deben rescatar son la fracción estequiométrica, la relación aire/combustible y la temperatura de llama adiabática. En la tabla 4.1 se muestran los resultados obtenidos mediante el software. El proceso de cálculo en el software se encuentra en el Anexo 2, la descripción completa del software se encuentran en el Anexo 1.

Tabla 4.1: Resumen de los resultados del análisis por medio de software

ϕ	$r_{a/c}$	T_f (K)
1.80	8.6113	1759.87
1.70	9.1178	1828.12
1.60	9.6877	1898.47
1.50	10.3335	1971.05
1.40	11.0717	2045.93
1.30	11.9233	2122.79
1.20	12.9169	2199.6
1.10	14.0912	2264.33
1.00	15.5003	2266.22
0.90	17.2226	2178.72
0.80	19.3754	2041.3
0.70	22.1433	1878.36
0.60	25.8339	1699.45
0.50	31.0006	1507.25

4.3.1 Cálculo de la velocidad de llama laminar

El cálculo de la velocidad de llama laminar se lleva a cabo utilizando la ecuación 4.9 estipulada por Mallard y Le Chatellier's. En este cálculo es necesario conocer la temperatura de llama adiabática, este dato fue calculado por el software a distintas concentraciones de aire-combustible empleando la siguiente ecuación:

$$S_L = \sqrt{e^{-E_a/R_u T_f}} \quad (4.14)$$

En donde:

S_L := Velocidad de la llama laminar de la mezcla combustible (cm/s)

E_a := Energía de activación 30 000 cal/mol

R_u := Constante universal de los gases 1.987 cal/mol-K

T_f := Temperatura de llama adiabática (K)

Tomando el primer caso de la tabla 4.1 y la ecuación 4.14 en donde tenemos que la concentración es:

Φ	$r_{a/c}$	T_f (K)
1	15.5003	2266.22

$$S_L = 35.75 \text{ cm/s}$$

Con el valor de la temperatura de flama adiabática se obtiene el siguiente valor para la velocidad de flama adiabática a condiciones ideales y correspondiendo a una mezcla estequiométrica. Este cálculo es más sensible debido a que el software NASA Lewis 89 tiene consideraciones más precisas en su análisis.

4.3.2 Tabla de resultados obtenidos del análisis con el software NASA Lewis 89

Tabla 4.2: Resumen de los resultados del análisis del software para el cálculo de la velocidad de flama adiabática

ϕ	$r_{a/c}$	T_f (K)	S_L (cm/s)
1.80	8.6113	1759.87	13.71
1.70	9.1178	1828.12	16.09
1.60	9.6877	1898.47	18.75
1.50	10.3335	1971.05	21.71
1.40	11.0717	2045.93	24.98
1.30	11.9233	2122.79	28.55
1.20	12.9169	2199.6	32.32
1.10	14.0912	2264.33	35.65
1.00	15.5003	2266.22	35.75
0.90	17.2226	2178.72	31.28
0.80	19.3754	2041.3	24.77
0.70	22.1433	1878.36	17.97
0.60	25.8339	1699.45	11.77
0.50	31.0006	1507.25	6.68

CAPITULO 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Comparación de los resultados obtenidos teóricos y experimentales

El análisis de la velocidad de llama laminar que se presenta corresponde a los resultados obtenidos en el capítulo 3 y 4. Los resultados de la parte experimental han sido tomados con la temperatura de llama adiabática calculada por el software NASA Lewis 89.

Estos resultados han podido ser calculados de forma manual, sin embargo el cálculo para cada relación de aire combustible hubiese sido muy largo y además los resultados obtenidos se hubieran alejado demasiado de la realidad. En el capítulo anterior se determinó la velocidad de llama laminar con la temperatura de llama adiabática calculada analíticamente y por medio del software. Los resultados fueron muy distintos, y esto llevo a que la velocidad de la llama laminar del GLP tenga valores muy diferentes. Debido a que los valores de la velocidad de llama laminar se encuentran alrededor de los 40 cm/s para fracciones estequiométricas alrededor de 1 que es el caso de la mayoría de los hidrocarburos [16]. Es por ello que se puede afirmar que los valores encontrados con ayuda del software NASA Lewis 89 (NL89) son más cercanos a la realidad ($S_L=35.75$ cm/s), que los encontrados de forma analítica (47.80 cm/s). Para la experiencia desarrollada en el laboratorio el intervalo de

comparación es más pequeño. Si se establece un punto de comparación alrededor de una fracción estequiométrica de 0.6 se encuentra que mediante el cálculo empleado con las ecuaciones y propiedades aprendidas de pregrado se obtiene un resultado de una velocidad de 11.99 cm/s, lo cual se acerca al resultado empleando el software de NL89 11.77 cm/s, mientras que mediante la forma experimental se logra obtener 14.85 cm/s. Esto indica que valor de la velocidad de llama laminar para el caso de la relación aire-combustible de 0.6 debe de estar cerca de la magnitud encontrada por el software NASA Lewis 89, cerca de los 12 cm/s, esto debido a que dentro de los métodos de cálculo empleados es quien posee un mayor grado de exactitud debido a las complejas ecuaciones que maneja y a las sustancias y valores que considera.

Los resultados que se presentan a continuación están en gráficas que muestran la relación de la velocidad de llama laminar con la fracción estequiométrica. En la figura 5.1 se muestra que los ensayos realizados en el laboratorio han permitido establecer una comparación en un intervalo pequeño de fracciones estequiométricas (0.58 a 0.68). Esta limitante se debe principalmente al diseño del quemador y las pulsaciones producto del compresor de aire del equipo, las cuales impedían obtener relaciones de aire-combustibles más altas y afectaban la estabilidad de la llama en el tubo de vidrio. Cabe señalar que en la siguiente gráfica y las subsecuentes se han suprimido los resultados más alejados de la línea de tendencia que afectaban el propósito del experimento.

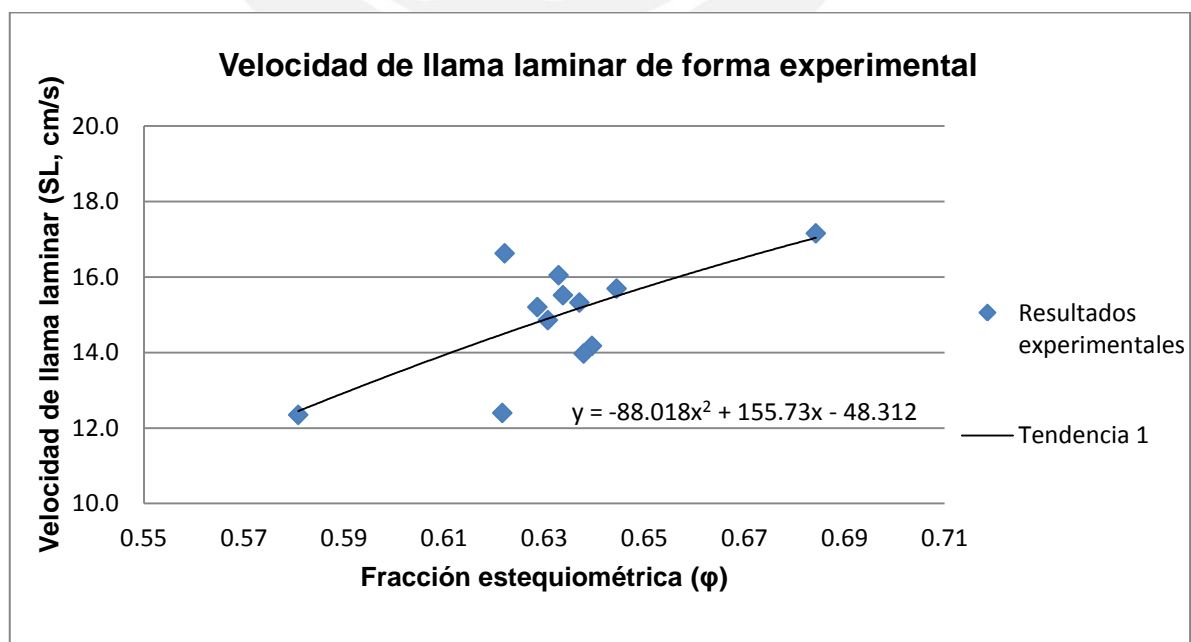


Figura 5.1 Gráfico de resultados experimentales

En el gráfico 5.2 se muestra los resultados obtenidos de las velocidades de llama laminar calculadas analíticamente con la ecuación 4.9, tomando los datos de la temperatura de llama adiabática calculados por el software NASA Lewis 89. El rango de datos que se presenta a continuación corresponde a fracciones estequiométricas comprendidas entre 0.5 a 1.8 del gas licuado de petróleo en concentraciones de 70% de propano y 30% de butano (esta concentración es importante porque se trata de la proporción en que habitualmente se vende en el mercado y por ello es motivo de estudio en esta tesis). La elipse roja marca el rango de estudio que se consiguió experimentalmente en el laboratorio y que será motivo de análisis para contrastar los resultados experimentales con los obtenidos por el software y por el método teórico. (Ver anexo 4)

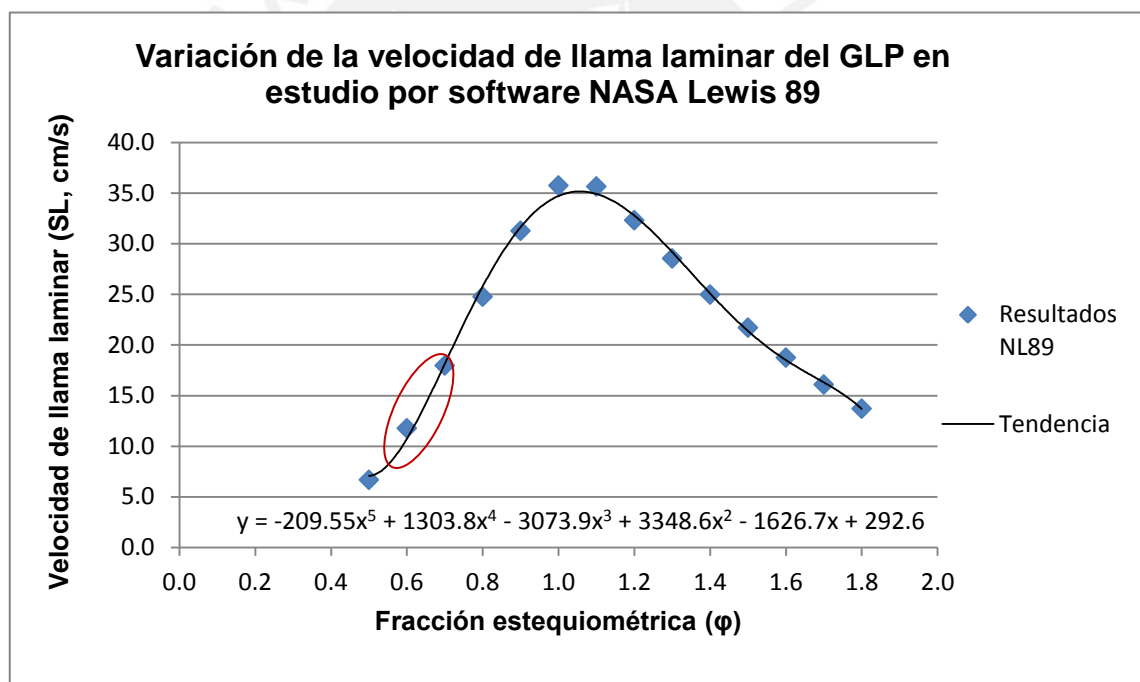


Figura 5.2 Gráfico de resultados por software NASA Lewis 89, ($\phi=0,5\dots\phi=1,8$)

La comparación de los resultados obtenidos tanto por el método experimental y el método analítico con ayuda del software NL89 se presentan en la figura 5.3. La parte experimental corresponde a los resultados del banco de ensayos, en donde se obtuvieron fracciones estequiométricas en el rango de $\phi=0,58$ hasta $\phi=0,68$. En la otra parte están los resultados del software NL89 de los cuales solo se tomará el segmento de elipse roja de la figura anterior. En la nueva gráfica (figura 5.3) se puede observar que las líneas de tendencia entre ambos resultados no se asemejan mucho, cabe

señalar que en parte se debe a que el rango de comparación es pequeño, y como resultado la percepción de la desviación entre las pendientes del gráfico es mayor a lo que realmente es. Cabe resaltar que la dispersión de los resultados experimentales se encuentran entre la línea de tendencia de los resultados encontrados por el software, con una mayor concentración en la parte superior de la línea de tendencia. Esto es esperable debido a las perturbaciones del ambiente y las pulsaciones producto del ingreso de aire a través del compresor, que alteran los resultados experimentales, obteniéndose una velocidad de llama laminar mayor a lo calculado por el software.

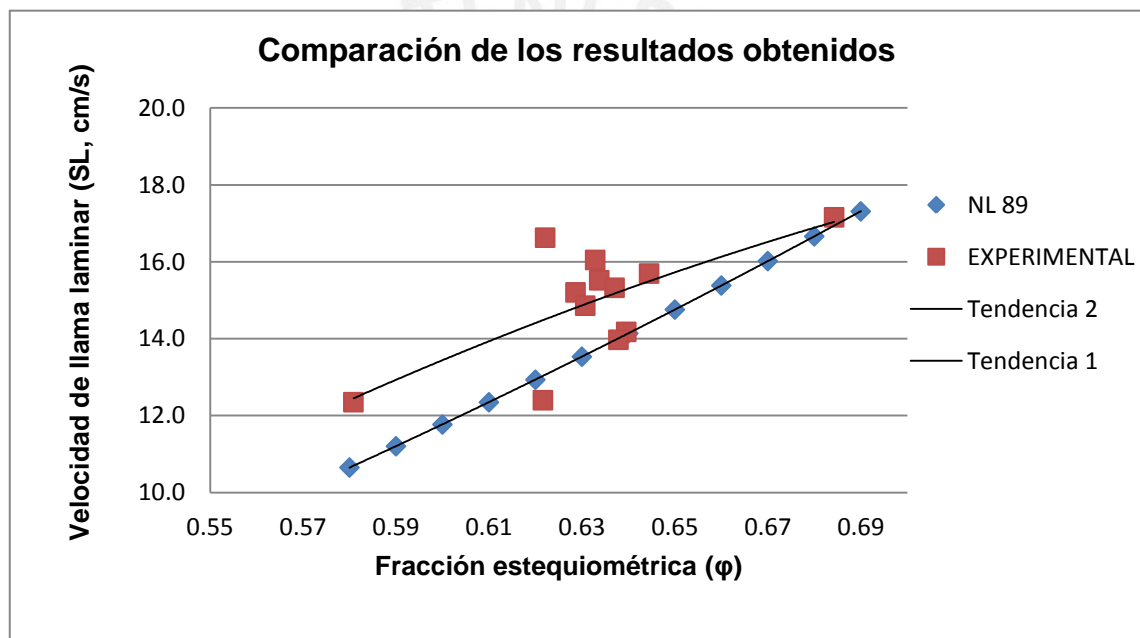


Figura 5.3 Gráfico de comparación de resultados

En la siguiente tabla 5.1 se puede apreciar el detalle de los valores obtenidos por el quemador Powling contra los resultados encontrados por el software de NASA Lewis 89. Cabe señalar que en la determinación de la velocidad de llama laminar de forma experimental se colocó los promedios de los resultados obtenidos, en el intervalo estudiado experimentalmente se observa además como la velocidad de llama adiabática es mayor a la calculada por el software NL89. En la columna de resultados experimentales solo se muestran los resultados que se determinaron en el laboratorio, estos resultados finales representan el valor promedio conseguido en el quemador de llama laminar.

Tabla 5.1: Resumen de los resultados del análisis comparativo entre los valores del software NASA Lewis 89, los experimentales y los analíticos

ϕ	r aire/comb	ANALITICO S_L (cm/s)	NASA LEWIS 89 S_L (cm/s)	EXPERIMENTAL S_L (cm/s)
0.68	22.79	17.10	16.66	17.16
0.64	24.22	14.45	14.14	14.80
0.63	24.60	13.82	13.53	15.20
0.62	25.00	13.20	12.94	14.52
0.58	26.72	10.83	10.65	12.35

5.2 Discusión de los errores de la parte experimental

El trabajo realizado estuvo sujeto a mediciones, las cuales presentan variabilidad lo que nos lleva a tener errores. Estos pueden ser de muy distinta naturaleza. A continuación se hará una discusión cualitativa más que un análisis estadístico sobre los errores en la medición.

5.2.1 Error debido al operador

Los errores debidos a la lectura de los instrumentos, debido a que la medición está limitada por las habilidades de lectura del operario. Por ejemplo en éste laboratorio se llevó a cabo la lectura en el termómetro de mercurio, el cual debía medir la temperatura del aire de entrada para la premezcla requerida, dicha observación genera un error de apreciación, lo mismo ocurrió cuando se debía regular la presión del gas por ser una regla milimétrica producía un error de apreciación, pues dicha presión cambiaba al tratar de estabilizar la llama. Otros errores de apreciación surgieron al estimar el flujo del gas en el rotámetro, ya que para ciertas condiciones de operación la aguja del rotámetro giraba demasiado rápido lo que dificultaba una observación precisa. Otros errores de lectura son con el uso del cronómetro al hacerlo funcionar y al detenerlo, debido a que este depende de la coordinación correcta del operario.

5.2.2 Error de tipo sistemático

Los errores de tipo sistemático son los originados por instrumentos, aparatos y elementos diversos usados en el laboratorio. Su resultado produce una cierta desviación constante respecto su valor real.

5.2.2.1 Error por el instrumento de medición

Este tipo de error es el introducido por los instrumentos, debido a que estos tienen un límite de exactitud, o simplemente porque estos no se encuentran bien calibrados. Dentro de los elementos utilizados en la medición se encuentran: los rotámetros para la medición del caudal de GLP y del aire, los termómetros, y la medición del cálculo del área. Dentro de este grupo los errores los instrumentos que presentan un mayor grado de importancia se encuentran los rotámetros que debido al miden los caudales del GLP y del aire, ya que para el cálculo del caudal total estos datos son los más importantes. Pero para el cálculo de la estimación del área la medición del área a través de la toma de fotografías es la que representa la mayor dificultad y es a su vez en donde puede haber mayor grado de incertidumbre.

5.2.2.2 Error por aparatos

Este tipo de error es generado por las vibraciones de aparatos cercanos, e incluso por las vibraciones del mismo sistema. Las vibraciones causan perturbaciones en la estabilización de la llama. Por ejemplo se encuentra que al encender el compresor el ruido y las vibraciones originadas por el aparato se difunden afectando el ensayo. Además esta las vibraciones del banco de ensayos que al no contar con una cimentación adecuada se ve susceptible a las perturbaciones externas. También se debe mencionar las perturbaciones originadas por los fluidos en el mismo banco de ensayos al transportar los gases combustibles por los conductos y aparatos.

5.2.2.3 Error debido a agentes externos

Es el error debido a perturbaciones externas, como el polvo, la humedad atmosférica, el viento, etc. Para el caso en análisis los errores han sido producidos por las perturbaciones externas, como lo son el viento y el ruido. Estas perturbaciones afectan la correcta estabilización de la llama, e impiden que esta logre estar totalmente estable. Este tipo de errores puede ser mitigado, pero no del todo eliminado porque es

necesario que el quemador tenga una salida al ambiente para expulsar los productos de la combustión.

5.3 Cálculo de errores de la parte experimental

El cálculo de errores comienza a partir de la resolución o apreciación de los instrumentos de medición en el laboratorio. Es así que se toma como error absoluto la apreciación de estos instrumentos. Por otro lado también está la toma de medidas para un mismo dato que se busca obtener a través del cálculo de la media aritmética, también se genera un error absoluto que se puede calcular. A continuación se presenta el cálculo de los errores encontrados en la toma de medidas.

5.3.1 Errores en la toma de datos de entrada

El error absoluto en una serie de toma de medidas menor que cinco se le conoce como desviación media y está dado por la siguiente expresión:

$$\Delta V_{GLP} = \frac{1}{n} \sum_{a=1}^n |(V_f - V_i)_a - \bar{V}_{GLP}| \quad (5.1)$$

En donde,

ΔV_{GLP} := Error absoluto en el volumen promedio de GLP (m³)

\bar{V}_{GLP} := Volumen promedio de GLP (m³)

V_f := Volumen final consumido de GLP (m³)

V_i := Volumen inicial consumido de GLP (m³)

n := Número de experiencias para cada dato tomado

También se puede tomar el error absoluto como la menor división de escala si es que se da el caso que el error absoluto encontrado es de cero.

De la tabla de ingreso de datos (ver capítulo 3.2.4 Datos tomados en el laboratorio) se extraen las variables necesarias para el cálculo y con el volumen promedio de GLP calculado anteriormente se puede encontrar el error absoluto del volumen de GLP.

$$\Delta V_{GLP} = \frac{1}{3} (|0.0024 - 0.0025| + |0.0026 - 0.0025| + |0.0024 - 0.0025|)$$

$$\Delta V_{GLP} = 0.0001 \text{ m}^3$$

5.3.1.1 Tabulación de los errores en la toma de datos de entrada

Para el caso de los instrumentos de medición se toma la apreciación de cada uno indicada por el fabricante o dada por la menor resolución que posea el instrumento. Los datos de los errores absolutos se aprecian en la siguiente tabla 5.2.

En el caso de la temperatura teníamos que la termocupla contaba con una división de escala de 0,1°C. Asimismo en el caso de los manómetros la menor división es de 1 mm, y por último en el rotámetro su menor división es de 1 L/min. Teniendo estos datos en cuenta se tabula el error absoluto encontrado.

Tabla 5.2: Toma de datos con incertidumbre

DATO N°	Temperatura GLP (°C)	Error absoluto	Presión GLP (mm H2O)	Error absoluto	Volumen promedio GLP (m3)	Error absoluto
1	27	±0.1	19	±1	0.0025	±0.0001
2	27	±0.1	25	±1	0.0029	±0.0001
3	26	±0.1	30	±1	0.0032	±0.0001
4	27	±0.1	35	±1	0.0035	±0.0001
5	30	±0.1	40	±1	0.0037	±0.0001
6	26	±0.1	45	±1	0.0040	±0.0001
7	28	±0.1	50	±1	0.0042	±0.0001
8	28	±0.1	55	±1	0.0043	±0.0001
9	29	±0.1	60	±1	0.0043	±0.0004
10	28	±0.1	65	±1	0.0047	±0.0001
11	28	±0.1	70	±1	0.0050	±0.0001
12	28	±0.1	75	±1	0.0051	±0.0001
13	28	±0.1	80	±1	0.0041	±0.0001
14	28	±0.1	21	±1	0.0027	±0.0001
15	29	±0.1	15	±1	0.0022	±0.0001
16	29	±0.1	10	±1	0.0019	±0.0001
17	26	±0.1	10	±1	0.0019	±0.0001
18	27	±0.1	8	±1	0.0018	±0.0001

DATO N°	Temperatura aire (°C)	Error absoluto	Presión aire (mm H ₂ O)	Error absoluto	Caudal aire (L/min)	Error absoluto
1	26	±0.1	63	±1	20	±1
2	26	±0.1	82	±1	22	±1
3	25	±0.1	95	±1	26	±1
4	25	±0.1	108	±1	28	±1
5	29	±0.1	124	±1	30	±1
6	25	±0.1	134	±1	32	±1
7	27	±0.1	150	±1	34	±1
8	27	±0.1	154	±1	35	±1
9	26	±0.1	175	±1	36	±1
10	26	±0.1	189	±1	38	±1
11	26	±0.1	200	±1	40	±1
12	26	±0.1	218	±1	42	±1
13	26	±0.1	239	±1	46	±1
14	27	±0.1	71	±1	22	±1
15	28	±0.1	54	±1	18	±1
16	28	±0.1	42	±1	16	±1
17	27	±0.1	40	±1	16	±1
18	27	±0.1	37	±1	16	±1

5.3.2 Errores arrastrados en las variables de salida

Para el cálculo de los errores arrastrados en el análisis es importante considerar las variables y su relación con los datos tomados del laboratorio. A continuación se muestran las ecuaciones para el cálculo de los errores de las variables en estudio. (Ver anexo 5 para el cálculo de las ecuaciones usadas)

En el caso de la determinación del error en el caudal del GLP, solo necesitamos realizar la división del error encontrado en el volumen del gas y dividirlo entre el tiempo cronometrado.

$$\Delta Q_{GLP} = \frac{\Delta V_{GLP}}{t} \quad (5.2)$$

En donde,

ΔQ_{GLP} := Error absoluto en el caudal de GLP (L/min)

ΔV_{GLP} := Error absoluto en el volumen promedio de GLP (L)

t := Tiempo transcurrido para el cambio de volumen (min)

En el caso de la densidad hay dos variables con error asociadas y para encontrar el error se hace necesario efectuar la suma de los errores parciales para luego multiplicar el valor encontrado por la magnitud de la densidad de la sustancia trabajada.

$$\Delta\rho = \left(\frac{\delta P}{P} + \frac{\delta T}{T} \right) * \rho \quad (5.3)$$

En donde:

$\Delta\rho$:= Error absoluto en la densidad de la sustancia (g/L)

ΔP := Error absoluto en la presión de la sustancia (atm)

ΔT := Error absoluto en la temperatura de ingreso (K)

ρ := Densidad de la sustancia (g/L)

P := Presión absoluta de la sustancia (atm)

T := Temperatura de ingreso (K)

Asimismo como se trabajo el caso de la densidad también se trabaja el error en el caso del flujo másico tanto para el aire como para el GLP, en este caso el error está asociado a una multiplicación de dos variables.

$$\Delta\dot{m} = \left(\frac{\Delta Q}{Q} + \frac{\Delta\rho}{\rho} \right) * \dot{m} \quad (5.4)$$

En donde:

$\Delta\dot{m}$:= Error absoluto en el flujo másico de la sustancia (g/s)

ΔQ := Error absoluto en el caudal de GLP o aire (L/s)

$\Delta\rho$:= Error absoluto en la densidad de la sustancia (g/L)

\dot{m} := Flujo másico de la sustancia (g/s)

Q := Caudal de GLP o aire (L/s)

ρ := Densidad de la sustancia (g/L)

Para el caso del flujo másico de la mezcla combustible al tratarse de ser el resultado de dos variables que arrastran error la suma de los errores de las variables da como resultado el error del flujo másico de la mezcla combustible.

$$\dot{m}\Delta\dot{m}_{mezcla} = \dot{m}\Delta\dot{m}_{GLP} + \Delta\dot{m}\dot{m}_{aire} \quad (5.5)$$

En donde:

$\dot{m}\Delta\dot{m}_{mezcla}$:= Error absoluto en el flujo másico de la mezcla combustible (g/s)

$\Delta\dot{m}\dot{m}_{GLP}$:= Error absoluto en el flujo másico de GLP (g/s)

$\dot{m}\Delta\dot{m}_{aire}$:= Error absoluto en el flujo másico de aire (g/s)

En el caso de la densidad de la mezcla combustible el error está afectado por cuatro variables que forman una ecuación compleja, para este caso es necesario emplear derivadas hasta encontrar la ecuación que relacione el error de la densidad de la mezcla combustible.

$$\Delta\rho_{mezcla} \quad (5.6)$$

$$= \frac{\frac{\Delta\rho_{aire}}{\rho_{aire}^2} + \frac{(\dot{m}\Delta\dot{m}_{GLP} * \dot{m}\dot{m}_{aire} * \rho_{GLP}) + (\Delta\dot{m}\dot{m}_{aire} * \rho_{GLP} * \dot{m}\dot{m}_{GLP}) + (\Delta\rho_{GLP} * \dot{m}\dot{m}_{GLP} * \dot{m}\dot{m}_{aire})}{\dot{m}\dot{m}_{aire}^2 * \rho_{GLP}^2}}{\left[\frac{1}{\rho_{aire}} + \frac{\dot{m}\dot{m}_{GLP}}{\dot{m}\dot{m}_{aire}} \left(\frac{1}{\rho_{GLP}}\right)\right]^2}$$

En donde:

$\Delta\rho_{mezcla}$:= Error absoluto en la densidad de la mezcla combustible (g/L)

$\Delta\rho_{GLP}$:= Error absoluto en la densidad de GLP (g/L)

$\Delta\rho_{aire}$:= Error absoluto en la densidad de aire (g/L)

$\Delta\dot{m}\dot{m}_{GLP}$:= Error absoluto en el flujo másico de GLP (g/s)

$\dot{m}\Delta\dot{m}_{aire}$:= Error absoluto en el flujo másico de aire (g/s)

ρ_{mezcla} := Densidad de la mezcla combustible (g/L)

ρ_{aire} := Densidad de aire (g/L)

ρ_{GLP} := Densidad de GLP (g/L)

$\dot{m}\dot{m}_{GLP}$:= Flujo másico de GLP (g/s)

$\dot{m}\dot{m}_{aire}$:= Flujo másico de aire (g/s)

En el caso del error asociado a la mezcla combustible, debido a que es producto de una división el error queda como la sumatoria de los errores parciales multiplicada por la magnitud del caudal de la mezcla.

$$\Delta Q_{mezcla} = \left(\frac{\dot{m} \Delta \dot{m}_{mezcla}}{\dot{m} \dot{m}_{mezcla}} + \frac{\Delta \rho_{mezcla}}{\rho_{mezcla}} \right) * Q_{mezcla} \quad (5.7)$$

En donde:

$\dot{m} \Delta Q_{mezcla}$:= Error absoluto en el caudal de la mezcla combustible (L/s)

$\dot{m} \Delta \dot{m}_{mezcla}$:= Error absoluto en el flujo de la mezcla combustible (g/s)

$\Delta \rho_{mezcla}$:= Error absoluto en la densidad de la mezcla combustible (g/L)

$\dot{m} Q_{mezcla}$:= Caudal de la mezcla combustible (L/s)

$\dot{m} \dot{m}_{mezcla}$:= Flujo de la mezcla combustible (g/s)

ρ_{mezcla} := Densidad de la mezcla combustible (g/L)

Para el caso del cálculo del área de la llama el error esta dado por el valor del diámetro calculado por el vernier. En este caso tenemos que el vernier tiene una apreciación de 0,005 cm y el error se puede calcular fácilmente aplicando la derivada del área.

$$\Delta A_{llama} = \frac{\pi * d * \Delta d}{2} \quad (5.8)$$

En donde:

ΔA_{llama} := Error absoluto en el área que forma la llama (cm²)

Δd := Error absoluto en el diámetro del quemador (cm)

A_{llama} := Área que forma la llama (cm²)

d := Diámetro del quemador (cm)

Finalmente para el cálculo del error en la velocidad de llama laminar se toman los errores parciales del caudal de la mezcla y del área de la llama para luego ser multiplicadas por el valor de la velocidad de llama laminar

(5.9)

$$\Delta S_L = \left(\frac{\Delta Q_{mezcla}}{Q_{mezcla}} + \frac{\Delta A_{llama}}{A_{llama}} \right) * S_L$$

En donde:

ΔS_L := Error absoluto en la velocidad de la llama laminar de la mezcla (cm/s)

ΔQ_{mezcla} := Error absoluto en el caudal de la mezcla combustible (cm³/s)

ΔA_{llama} := Error absoluto en el área que forma la llama (cm²)

S_L := Velocidad de la llama laminar de la mezcla combustible (cm/s)

Q_{mezcla} := Caudal de la mezcla combustible (cm³/s)

A_{llama} := Área que forma la llama (cm²)

Siguiendo el análisis también se puede calcular los errores asociados a los cálculos complementarios para la determinación de los mismos en el caso de la relación de aire-combustible de la mezcla y el valor de Φ .

$$\Delta r_{a/c} = \left(\frac{\Delta \dot{m}_{aire}}{\dot{m}_{aire}} + \frac{\Delta \dot{m}_{GLP}}{\dot{m}_{GLP}} \right) * r_{a/c} \quad (5.10)$$

En donde:

$\Delta r_{a/c}$:= Error en la relación de aire-combustible de la mezcla (kg aire/ kg comb)

$\dot{m} \Delta \dot{m}_{GLP}$:= Error absoluto en el flujo másico de GLP (g/s)

$\dot{m} \Delta \dot{m}_{aire}$:= Error absoluto en el flujo másico de aire (g/s)

$r_{a/c}$:= Relación de aire-combustible de la mezcla (kg aire/ kg comb)

$\dot{m} \dot{m}_{GLP}$:= Flujo másico de GLP (g/s)

$\dot{m} \dot{m}_{aire}$:= Flujo másico de aire (g/s)

$$\Delta \Phi = \frac{\Delta r_{a/c}}{r_{a/c}} * \Phi \quad (5.11)$$

En donde:

$\Delta \Phi$:= Error absoluto en la fracción estequiométrica

$\Delta r_{a/c}$:= Error en la relación de aire-combustible de la mezcla (kg aire/ kg comb)

Φ := Fracción estequiométrica

$r_{a/c_{Ideal}}$:= Relación de aire-combustible estequiométrico (15.50 kg aire/ kg comb)

$r_{a/c}$:= Relación de aire-combustible de la mezcla (kg aire/ kg comb)

Realizando los cálculos correspondientes podemos encontrar los siguientes datos tomando la primera experiencia.

En el caso del error asociado al caudal de GLP, se obtiene lo siguiente a partir de la ecuación 5.2:

$$\Delta Q_{GLP} = \frac{0.0001 m^3}{5 min} * \frac{1000 L}{1 m^3} = 0.02 L/min$$

Ahora siguiendo con los demás cálculos tenemos el error asociado a la densidad del GLP en estudio, para el caso de la presión esta debe estar en presión absoluta y esto significa que previamente se debe convertir el valor del error de la presión en atmósferas:

$$\Delta P_{GLP} = 1 \text{ mm H}_2\text{O} * \frac{0.009806 \text{ kPa}}{10 \text{ mm H}_2\text{O}} * \frac{0.009869233 \text{ atm}}{1 \text{ Kpa}} = 0.0001 \text{ atm}$$

Luego siguiendo con la ecuación 5.3 ya podemos encontrar el error asociado a la densidad del GLP.

$$\Delta \rho_{GLP} = \left(\frac{0.0001 \text{ atm}}{(1 + 0.0018) \text{ atm}} + \frac{0.1 \text{ K}}{300 \text{ K}} \right) * 1.9646 \text{ g/L} = 0.0008 \text{ g/L}$$

Con los datos ya se puede calcular el error asociado al flujo másico de GLP usando la ecuación 5.4:

$$\Delta \dot{m}_{GLP} = \left(\frac{0.02 L/min}{0.50 L/min} + \frac{0.0008 g/L}{1.9646 g/L} \right) * 0.0162 \text{ g/s} = 0.0006 \text{ g/s}$$

Luego calculamos para el aire los errores asociados a la densidad al igual que se hizo para el caso del error asociado a la densidad usando la ecuación 5.3.

$$\Delta \rho_{aire} = \left(\frac{0.0001 \text{ atm}}{(1 + 0.0061) \text{ atm}} + \frac{0.1 \text{ K}}{299 \text{ K}} \right) * 1.1845 \text{ g/L} = 0.0005 \text{ g/L}$$

Luego con la ecuación 5.4 se calcula también el error asociado al flujo másico de aire.

$$\Delta \dot{m}_{\text{aire}} = \left(\frac{1 \text{ L/min}}{20 \text{ L/min}} + \frac{0.0005 \text{ g/L}}{1.1845 \text{ g/L}} \right) * 0.3948 \text{ g/s} = 0.0199 \text{ g/s}$$

Ahora con estos datos de los errores asociados al flujo másico calculamos el error con respecto al flujo másico de la mezcla combustible usando la ecuación 5.5.

$$\Delta \dot{m}_{\text{mezcla}} = 0.0006 \text{ g/s} + 0.0199 \text{ g/s} = 0.0205 \text{ g/s}$$

El siguiente paso es el cálculo del error asociado a la densidad de la mezcla, con la ecuación 5.6, encontrada por la derivación de la ecuación de la densidad de la mezcla.

$$\Delta \rho_{\text{mezcla}} = \frac{0.0005 \frac{\text{g}}{\text{L}}}{\left(1.1845 \frac{\text{g}}{\text{L}}\right)^2} + \frac{\left(0.0006 \frac{\text{g}}{\text{s}} * 0.3948 \frac{\text{g}}{\text{s}} * 1.9646 \frac{\text{g}}{\text{L}}\right) + \left(0.0199 \frac{\text{g}}{\text{s}} * 1.9646 \frac{\text{g}}{\text{L}} * 0.0162 \frac{\text{g}}{\text{s}}\right) + \left(0.0008 \frac{\text{g}}{\text{L}} * 0.0162 \frac{\text{g}}{\text{s}} * 0.3948 \frac{\text{g}}{\text{s}}\right)}{\left(0.3948 \frac{\text{g}}{\text{s}}\right)^2 * \left(1.9646 \frac{\text{g}}{\text{L}}\right)^2} + \frac{\left[\frac{1}{1.1845 \frac{\text{g}}{\text{L}}} + \frac{0.0162 \frac{\text{g}}{\text{s}}}{0.3948 \frac{\text{g}}{\text{s}}} \left(\frac{1}{1.9646 \frac{\text{g}}{\text{L}}}\right)\right]^2}{\left(0.3948 \frac{\text{g}}{\text{s}}\right)^2 * \left(1.9646 \frac{\text{g}}{\text{L}}\right)^2}$$

$$\Delta \rho_{\text{mezcla}} = 0.0029 \text{ g/L}$$

Posterior a este cálculo sigue encontrar el error asociado al caudal de la mezcla combustible. Para esto es importante la ecuación 5.7.

$$\Delta Q_{\text{mezcla}} = \left(\frac{0.0205 \text{ g/s}}{0.4109 \text{ g/s}} + \frac{0.0029 \text{ g/L}}{1.1561 \text{ g/L}} \right) * 0.35554 \frac{\text{L}}{\text{s}} = 18.62 \text{ cm}^3/\text{s}$$

Luego realizamos el cálculo para el error asociado al área de la llama con la ecuación 5.8, y tomando en cuenta que ya se conoce la apreciación en el vernier.

$$\Delta A_{\text{llama}} = \frac{\pi * (5.4 \text{ cm}) * (0.005 \text{ cm})}{2} = 0.04 \text{ cm}^2$$

Por último se procede a calcular el error asociado a la velocidad de llama laminar con la ecuación 5.9.

$$\Delta S_L = \left(\frac{18.62 \text{ cm}^3/\text{s}}{355.54 \text{ cm}^3/\text{s}} + \frac{0.04 \text{ cm}^2}{22.9 \text{ cm}^2} \right) * 15.52 \text{ cm/s} = 0.84 \text{ cm/s}$$

Para complementar estos cálculos también se procede al cálculo de los errores absolutos en las variables complementarias. Usando la ecuación 5.10 tenemos lo siguiente:

$$\Delta r_{a/c} = \left(\frac{0.0199 \text{ g/s}}{0.3948 \text{ g/s}} + \frac{0.0006 \text{ g/s}}{0.0161 \text{ g/s}} \right) * 24.44 \frac{\text{kg aire}}{\text{kg comb}} = 2.12 \frac{\text{kg aire}}{\text{kg comb}}$$

Ahora finalmente terminamos con el cálculo en el error absoluto de Φ , usando la ecuación 5.11.

$$\Delta \Phi = \frac{2.12 \frac{\text{kg aire}}{\text{kg comb}}}{24.44 \frac{\text{kg aire}}{\text{kg comb}}} * 0.63 = 0.06$$

5.3.2.1 Tabulación de los errores calculados en las variables de salida

Ahora que se ha calculado todos los errores asociados por la parte de los instrumentos de medición se puede establecer un mejor gráfico para relacionar las velocidades de llama laminar calculadas en el laboratorio con el software de NASA Lewis 89.

Tabla 5.3: Tabla con el error absoluto para las variables en estudio

DATO N°	Caudal GLP (L/min)	Error absoluto	Densidad GLP (g/L)	Error absoluto	Flujo másico GLP (g/s)	Error absoluto
1	0.49	±0.02	1.9646	±0.0008	0.0162	±0.0006
2	0.59	±0.02	1.9657	±0.0008	0.0192	±0.0006
3	0.64	±0.02	1.9733	±0.0009	0.0210	±0.0007
4	0.71	±0.02	1.9676	±0.0008	0.0232	±0.0007
5	0.75	±0.02	1.9491	±0.0008	0.0243	±0.0006
6	0.80	±0.02	1.9761	±0.0009	0.0263	±0.0007
7	0.83	±0.02	1.9639	±0.0008	0.0273	±0.0007
8	0.87	±0.02	1.9649	±0.0008	0.0284	±0.0007
9	0.85	±0.08	1.9593	±0.0008	0.0279	±0.0027
10	0.94	±0.02	1.9668	±0.0008	0.0308	±0.0007
11	0.99	±0.01	1.9677	±0.0008	0.0326	±0.0003
12	1.03	±0.02	1.9687	±0.0008	0.0338	±0.0007
13	0.81	±0.01	1.9696	±0.0008	0.0266	±0.0000
14	0.55	±0.02	1.9584	±0.0008	0.0178	±0.0006
15	0.45	±0.02	1.9508	±0.0008	0.0145	±0.0007
16	0.39	±0.02	1.9499	±0.0008	0.0126	±0.0007
17	0.39	±0.02	1.9694	±0.0008	0.0127	±0.0007
18	0.36	±0.02	1.9625	±0.0008	0.0118	±0.0007

DATO N°	Densidad aire (g/L)	Error absoluto	Flujo másico aire (g/s)	Error absoluto	Relación (aire/comb)	Error absoluto
1	1.1845	±0.0005	0.3948	±0.0199	24.44	±2.12
2	1.1866	±0.0005	0.4351	±0.0200	22.64	±1.69
3	1.1921	±0.0005	0.5166	±0.0201	24.54	±1.73
4	1.1936	±0.0005	0.5570	±0.0201	24.04	±1.56
5	1.1796	±0.0005	0.5898	±0.0199	24.32	±1.41
6	1.1966	±0.0005	0.6382	±0.0202	24.22	±1.38
7	1.1904	±0.0005	0.6746	±0.0201	24.73	±1.34
8	1.1909	±0.0005	0.6947	±0.0201	24.48	±1.29
9	1.1972	±0.0005	0.7183	±0.0203	25.78	±3.26
10	1.1988	±0.0005	0.7593	±0.0203	24.64	±1.19
11	1.2001	±0.0005	0.8001	±0.0203	24.56	±0.88
12	1.2021	±0.0005	0.8415	±0.0204	24.90	±1.10
13	1.2045	±0.0005	0.9235	±0.0205	34.73	±0.78
14	1.1814	±0.0005	0.4332	±0.0199	24.28	±1.91
15	1.1756	±0.0005	0.3527	±0.0197	24.28	±2.46
16	1.1742	±0.0005	0.3131	±0.0197	24.92	±2.87
17	1.1779	±0.0005	0.3141	±0.0198	24.75	±2.85
18	1.1776	±0.0005	0.3140	±0.0198	26.67	±3.17

DATO N°	Flujo másico mezcla (g/s)	Error absoluto	Densidad mezcla (g/L)	Error absoluto	Caudal mezcla (cm ³ /s)	Error absoluto
1	0.4110	±0.0205	1.1561	±0.0029	355.49	±18.63
2	0.4543	±0.0205	1.1560	±0.0027	393.01	±18.68
3	0.5376	±0.0208	1.1637	±0.0025	462.01	±18.82
4	0.5802	±0.0208	1.1645	±0.0024	498.21	±18.87
5	0.6140	±0.0205	1.1512	±0.0021	533.40	±18.79
6	0.6645	±0.0209	1.1676	±0.0021	569.11	±18.93
7	0.7018	±0.0208	1.1622	±0.0020	603.88	±18.94
8	0.7230	±0.0208	1.1624	±0.0020	622.05	±18.96
9	0.7462	±0.0230	1.1700	±0.0039	637.78	±21.79
10	0.7901	±0.0210	1.1703	±0.0019	675.08	±19.00
11	0.8326	±0.0207	1.1715	±0.0015	710.76	±18.58
12	0.8753	±0.0211	1.1739	±0.0017	745.65	±19.05
13	0.9501	±0.0205	1.1841	±0.0010	802.36	±17.96
14	0.4510	±0.0205	1.1529	±0.0027	391.20	±18.67
15	0.3672	±0.0204	1.1472	±0.0033	320.07	±18.70
16	0.3257	±0.0204	1.1466	±0.0036	284.04	±18.65
17	0.3268	±0.0204	1.1500	±0.0036	284.17	±18.66
18	0.3258	±0.0204	1.1517	±0.0035	282.89	±18.59

DATO N°	Fracción estequiométrica (Φ)	Error absoluto	Área de llama (cm ²)	Error absoluto	Velocidad de llama laminar (cm/s)	Error absoluto
1	0.63	±0.06	22.90	±0.04	15.52	±0.84
2	0.68	±0.05	22.90	±0.04	17.16	±0.85
3	0.63	±0.04	22.90	±0.04	20.17	±0.86
4	0.64	±0.04	31.74	±0.04	15.70	±0.62
5	0.64	±0.04	34.80	±0.04	15.33	±0.56
6	0.64	±0.04	40.13	±0.04	14.18	±0.49
7	0.63	±0.03	37.25	±0.04	16.21	±0.53
8	0.63	±0.03	38.75	±0.04	16.05	±0.51
9	0.60	±0.08	42.94	±0.04	14.85	±0.52
10	0.63	±0.03	44.39	±0.04	15.21	±0.44
11	0.63	±0.02	47.82	±0.04	14.86	±0.40
12	0.62	±0.03	44.84	±0.04	16.63	±0.44
13	0.45	±0.01	46.71	±0.04	17.18	±0.40
14	0.64	±0.05	22.90	±0.04	17.08	±0.85
15	0.64	±0.06	22.90	±0.04	13.98	±0.84
16	0.62	±0.07	22.90	±0.04	12.40	±0.84
17	0.63	±0.07	22.90	±0.04	12.41	±0.84
18	0.58	±0.07	22.90	±0.04	12.35	±0.83

5.3.3 Comparación de los resultados obtenidos con el análisis de errores

Con los datos obtenidos se puede armar una mejor tabla de comparación entre los resultados experimentales y los del software NL89. De la misma forma que se calculó el promedio de la velocidad de llama laminar en los resultados experimentales se calcula el promedio para el error absoluto de la misma forma en los resultados del quemador.

Tabla 5.3: Tabla comparativa entre el software NL89 y los resultados experimentales con el error absoluto

ϕ	Relación aire/comb	NASA LEWIS S_L (cm/s)	EXPERIMENTAL S_L (cm/s)	Error Absoluto
0.68	22.79	16.66	17.16	± 0.85
0.64	24.22	14.14	14.80	± 0.63
0.63	24.60	13.53	15.20	± 0.56
0.62	25.00	12.94	14.52	± 0.64
0.58	26.72	10.65	12.35	± 0.83

Luego de haber tabulado los resultados se puede graficar los resultados considerando los errores asociados a los resultados experimentales. Para esta gráfica es importante resaltar que solo se han podido considerar los resultados experimentales que se han podido medir en el laboratorio y por las dificultades del mismo sistema originado por las turbulencias del compresor es que no se ha podido obtener resultados más sensibles para el estudio. Además cabe señalar que se está considerando que los valores de la fracción estequiométrica (Φ) son exactos para la experiencia. Como se puede apreciar en el gráfico 5.4 se está tomando un intervalo de comparación pequeño en donde se observa que para el valor de la fracción estequiométrica de 0.68, el resultado del software NL89 está dentro del margen del resultado experimental. Este comportamiento idealmente debería darse en todos los demás puntos del gráfico, sin embargo no sucede así y los resultados se desvían al reducirse el valor de la fracción estequiométrica.

Cabe recordar que debido a las limitaciones del quemador del laboratorio, los resultados se vean afectados por las perturbaciones del sistema, principalmente debido a las pulsaciones del compresor de aire. Los resultados mostrados corresponden al estudio de la velocidad de llama laminar para una concentración de

gas licuado de petróleo con 70% de propano y 30% de butano, la mezcla comercializada más comúnmente en la actualidad.

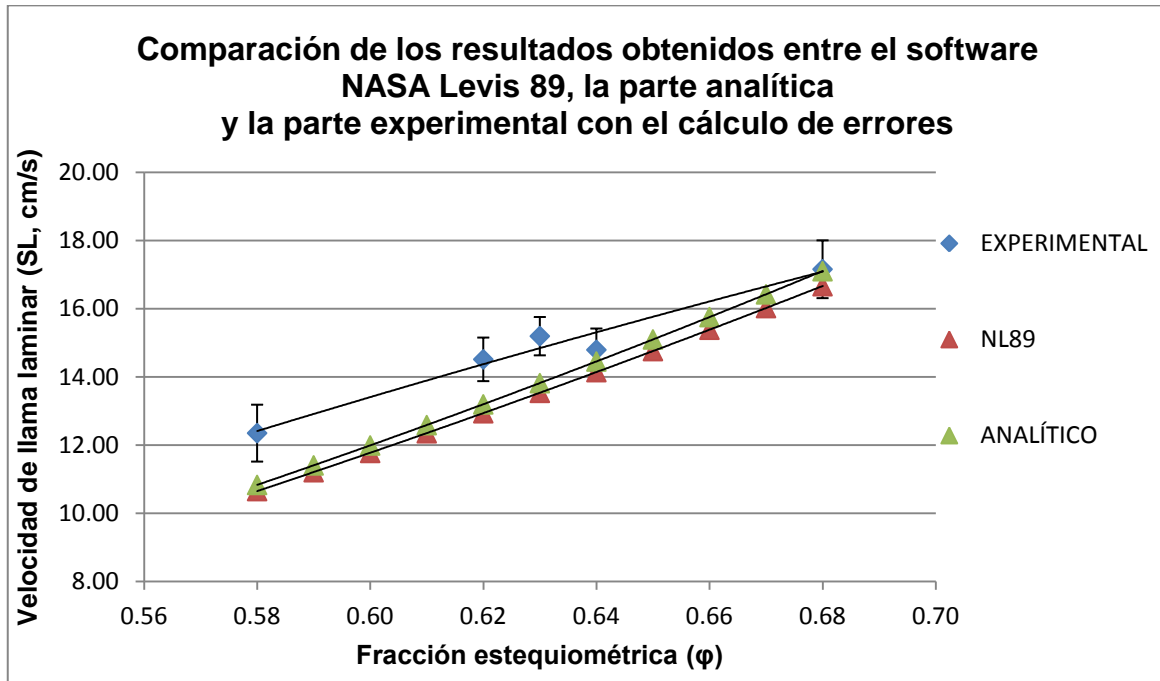


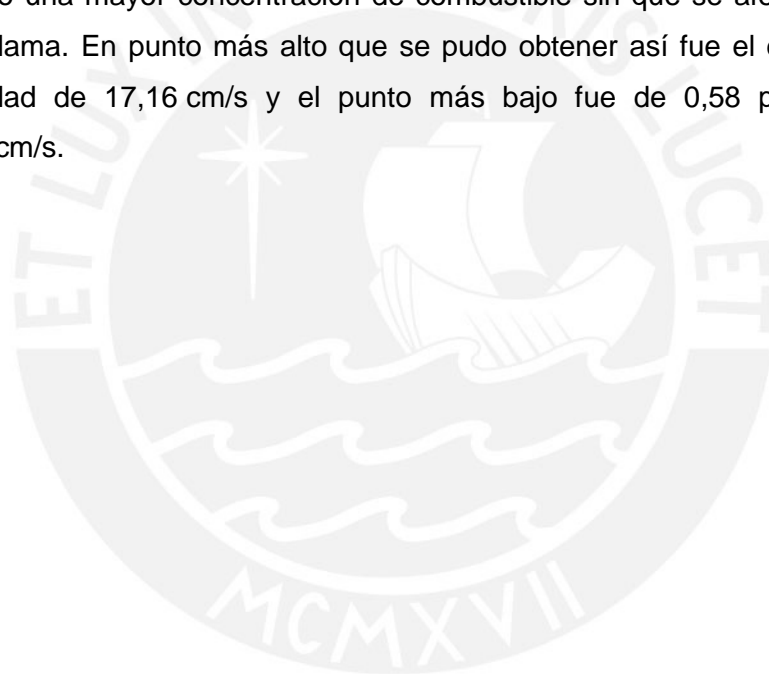
Figura 5.4 Gráfico de comparación de los resultados obtenidos entre el software, la parte analítica y los resultados experimentales

CONCLUSIONES

1. Las velocidades de llama laminar para la mezcla de GLP encontradas en los ensayos corresponden al de una mezcla con 70% de propano y 30% de butano. Estos resultados obtenidos corresponden a valores de la fracción estequiométrica comprendidos entre el rango de 0,68 a 0,58; para valores de velocidad de llama de 17,16 cm/s y 12,85 cm/s respectivamente.
2. De la figura 5.4 se observa que para el valor de fracción estequiométrica (Φ) de 0,68 el resultado de la velocidad de llama laminar por parte del software NL89 se encuentra dentro del rango del resultado experimental. Esto indica justamente que los valores experimentales se han acercado a la magnitud calculada por el software de la velocidad de llama laminar en la combustión del GLP en estudio. Sin embargo en los demás puntos antes calculados se observa que hay un alejamiento entre los resultados, a pesar que hay una tendencia similar. En gran parte esto se debe a las perturbaciones propias del sistema de ingreso de aire en el quemador, que se debieron principalmente al ingreso de aire a través del compresor, lo que causó pulsaciones que no permitían controlar un adecuado flujo de aire al sistema.
3. En los análisis de comparación de la figura 5.3 se observa una mayor dispersión de datos por encima de la línea de tendencia de los resultados obtenidos mediante el software NL89. Sin embargo también es importante resaltar que en valores cerca de la fracción estequiométrica tanto de 0,64 y 0,68 los valores de la velocidad de llama laminar son más cercanos a los calculados por el software, lo cual también se puede ver en la figura 5.4. Es decir si bien tenemos dispersión final entre los resultados experimentales y los del software que están dentro del rango de 0,5 cm/s y 1,7 cm/s en los resultados finales; estos se encuentran cercanos a los cálculos proporcionados por el software cuando se toma en cuenta el análisis del error absoluto.
4. El quemador de llama plana tipo Powling empleado en el laboratorio se usa principalmente para el estudio de velocidades de llama laminar bajas, normalmente en el orden de los 15 cm/s, sin embargo con la ayuda del tubo de vidrio y el visor en la parte superior se pueden amortiguar perturbaciones propias del ambiente lo que le permite un rango de estudio más amplio. Esto se pudo comprobar al

encontrar velocidades de 17,16 cm/s para el caso de la fracción estequiométrica de 0,68; dicho resultado es uno de los más cercanos que se consiguió al valor teórico de la velocidad de llama laminar para la concentración de GLP en estudio.

- De la tabla 5.1 se observa la comparación entre los resultados experimentales y los calculados mediante el software. Ambos resultados siguen una tendencia similar, al aumentar el valor de la fracción estequiométrica, es decir, mientras más aumenta la masa molecular del GLP la velocidad de llama laminar se va incrementando, en la figura 5.2 se puede ver claro este comportamiento, sin embargo no fue posible obtenerlo en el ensayo debido a que el quemador no alcanzó una mayor concentración de combustible sin que se afecte la estabilidad de la llama. En punto más alto que se pudo obtener así fue el de 0,68 para una velocidad de 17,16 cm/s y el punto más bajo fue de 0,58 para un valor de 12,35 cm/s.



RECOMENDACIONES

1. La principal fuente de incertidumbre en la estimación del área de la llama cuando esta no es totalmente plana es que siempre se aproximó como una función parabólica y además se supuso una simetría que en las fotografías no mostraban. En los datos tomados desde el N°4 al N°13 se aproximó la figura de la llama al de una parábola para poder estimar el valor del área de la llama. Además las fotografías solo permiten ver un plano transversal de la llama. Por lo que se supone que los demás planos son similares, lo que en la realidad no ocurre. Se recomienda trabajar con fotografías lo más cercanas a una llama plana.
2. La estabilidad de la llama se encuentra fuertemente influenciada por las condiciones ambientales y principalmente por las corrientes de aire la que se intentó disminuir con el visor de vidrio, buscando amortiguar estas perturbaciones. Sin embargo existen otras perturbaciones más difíciles de atenuar, como lo son el ruido y las pulsaciones del compresor de aire.
3. Las distintas densidades entre el gas y el aire, muestran que el volumen de aire utilizado es mucho mayor que el volumen del gas, por lo tanto el problema principal es la capacidad del quemador. Este problema está relacionado con el suministro del aire y no el del combustible. Para futuros ensayos se necesita un equipo que puede regular el ingreso de aire de forma más precisa, justamente para poder controlar adecuadamente el ingreso de aire y así obtener fracciones estequiométricas más altas.
4. Se puede concluir al apreciar la forma de la llama que esta queda determinada principalmente por las características de la alimentación del aire al quemador, esto se apreció en la sensibilidad de la llama ante variaciones en el suministro de aire.

BIBLIOGRAFÍA

1. AMELL, Andrés. *Tipos de Llama*. Medellín: Universidad de Antioquía. Consulta: 4 de noviembre del 2010. Disponible desde Internet: <<http://www.scribd.com/doc/20430663/Tipos-de-Llamas>>
2. BENJUMEA, Pedro, HIGUITA, Carlos y CORDOVA, Camilo. “Medición de la velocidad propagación de llamas premezcladas de Metano-Aire y Gas Natural Guajira-Aire utilizando el método de ángulo de cono”. *DYNA*, 2004, 71, 141, pp. 7-14.
3. BRIZUELA, Eduardo y ROMANO, S.. *Combustión*. Material de enseñanza. Buenos Aires, Argentina: Universidad de Buenos Aires. Consulta: 4 de noviembre del 2010. Disponible desde Internet: <<http://materias.fi.uba.ar/6730/Tomo1Unidad5a.pdf>>
4. FERGUSON, Collin y KIRKPATRICK, Allan. 2001. *Internal Combustion Engines*. Segunda edición. Estados Unidos: John Wiley & Sons.
5. GLASSMAN, Irvin. 1987. *Combustion*. Orlando, Florida: Academic Press Inc.
6. GONG Jing y otros. “Study on Laminar Burning Characteristics of Premixed High-Octane Fuel-Air Mixtures at Elevated Pressures and Temperatures”. *Energy and Fuels*, 2009.
7. KUO, Kenneth. 1986. *Principles of Combustion*. Segunda edición. Estados Unidos: John Wiley & Sons.
8. LIAO, S. y otros. “Turbulence effects on accelerating turbulent premixed combustion”. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part D Journal of Automobile Engineering*, 2004, 218, 9, pp.1035-1040.
9. LIRA, Ignacio.1992. *Termotecnia: teoría y métodos en termodinámica aplicada*. Segunda edición. Santiago de Chile, Chile: Universidad Católica de Chile.

10. POSTIGO, Jaime y CRUZ, Juan. 1991. *Termodinámica Aplicada*. Segunda edición. Facultad de Ingeniería Mecánica UNI. Lima: W.H. Editores.
11. SRIDHAR G., PAUL P., y MUKUNDA H.. “Computational studies of the laminar burning velocity of a producer gas and air mixture under typical engine conditions”. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part A Journal of Power and Energy*, 2005, 219, A3, pp.195-201.
12. TEXTOS CIENTIFICOS. 2006. *Teoría de la llama*. Consulta: 4 de Noviembre del 2010. Disponible desde Internet: <<http://www.textoscientificos.com/energia/combustibles/teoria-llama>>
13. ZAMASHCHIKOV, V. “Some Features of Gas-Flame Propagation in Narrow Tubes”. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2004, 40, 5, pp. 545–552.
14. ZHAO, P. y otros “Numerical simulation of laminar premixed combustion in a porous burner”. *Frontiers of Energy and Power Engineering in China*, 2007, 1(2), pp. 233-238.
15. MUSTAFA, B. “The Significance of LPG in Turkish Vehicular Transportation: Liquefied Petroleum Gases (LPG) in Fueled Systems”. *Energy Sources*, 2005, 27, pp. 485-488.
16. LEWIS B. 1961. *Combustion, flames and explosions of gases*. Segunda edición. New York: Academic Press.
17. D'HAINAUT, L.. 1978. *Cálculo de incertidumbres en las medidas*. Editorial Trillas. S.A.: México.
18. MEDIDAS, GRÁFICAS Y CALCULO DE ERRORES EN EL LABORATORIO DE FÍSICA. 2010. *Combinación de Incertidumbres*. Consulta: 10 de Febrero del 2015. Disponible desde Internet: <http://www.eueti.uvigo.es/files/curso_cero/material/2_datos.pdf>