

2014

**MEDICIÓN EXPERIMENTAL DE LA
VELOCIDAD DE LLAMA DE MEZCLAS
AIRE-PROPANO MEDIANTE EL
MÉTODO DEL ÁNGULO DE CONO**



**MEDICIÓN EXPERIMENTAL DE LA VELOCIDAD DE LLAMA DE MEZCLAS
AIRE-PROPANO MEDIANTE EL MÉTODO DEL ÁNGULO DE CONO**

PROYECTO

ANTONY ELISEO YEPES OSORIO

DOC: 1088285734

ANDERSON FELIPE TANGARIFE ÁLVAREZ

DOC: 1088306047

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE TECNOLOGÍAS

ESCUELA DE TECNOLOGÍA MECÁNICA

PEREIRA

2014

**MEDICIÓN EXPERIMENTAL DE LA VELOCIDAD DE LLAMA DE MEZCLAS
AIRE-PROPANO MEDIANTE EL MÉTODO DEL ÁNGULO DE CONO**

ANTONY ELISEO YEPES OSORIO

DOC: 1088285734

ANDERSON FELIPE TANGARIFE ÁLVAREZ

DOC: 1088306047

PROYECTO

DIRECTORES:

M.SC. IM. YAMID ALBERTO CARRANZA SÁNCHEZ

PH.D. M.SC. CARLOS ALBERTO ROMERO PIEDRAHITA

ASESOR:

IM. M.SC. RICARDO ACOSTA ACOSTA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE TECNOLOGÍAS

ESCUELA DE TECNOLOGÍA MECÁNICA

PEREIRA

2014

NOTA DE ACEPTACION

YAMID ALBERTO CARRANZA S.
DIRECTOR

CARLOS ALBERTO ROMERO P.
DIRECTOR

EVALUADOR

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo experimental fue realizado bajo la supervisión del Ingeniero **Yamid Alberto Carranza Sánchez**, a quien queremos expresarle nuestro más profundo agradecimiento, por hacer posible la realización de este estudio quien a pesar de encontrarse fuera del país siempre estuvo para resolver nuestras dudas y lograr la finalización de este haciendo uso de los medios de comunicación. Además, de agradecer su paciencia a tanto inconveniente presentado a lo largo del desarrollo de nuestro proyecto de grado.

Al Ingeniero **Carlos Alberto Romero Piedrahita** por facilitarnos el Laboratorio de Máquinas de Combustión Interna, para el montaje y pruebas experimentales del proyecto y por estar siempre presente para indicarnos el rumbo a seguir para cumplir nuestros objetivos.

Al Ingeniero **Yamal Mustafá Iza** quien a pesar de no hacer parte del proyecto se involucró de forma directa para lograr un montaje exitoso, nos aportó de gran manera con sus amplios conocimientos en dinámica y estática de fluidos.

A **nuestros padres** por darnos la vida y la gran oportunidad de tener estudios de educación superior, por estar de nuestro lado en todos los momentos difíciles, y ahora disfrutando de nuestro éxitos,

A **Dios**, por brindarnos la oportunidad de vivir.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	5
INTRODUCCION.....	7
1. FUNDAMENTOS TEORICOS EN LOS PROCESOS DE COMBUSTION..	10
1.1 LA COMBUSTION	10
1.2 LA LLAMA	11
1.2.1 Propagación de la llama	13
1.2.2 Llamas de difusión	16
1.2.3 Llamas premezcladas.....	16
1.3 COMBUSTIBLE	18
1.4 COMBURENTE.....	22
1.5 MEDICION DE LA VELOCIDAD DE PROPAGACION DE LLAMA POR EL METODO DEL ANGULO DEL CONO	22
2. MONTAJE EXPERIMENTAL.....	24
2.1 MEDIDORES DE ÁREA VARIABLE (ROTÁMETROS)	24
2.2 ROTÁMETROS UTILIZADOS	25
2.3 FACTOR DE CORRECCIÓN.....	27
2.3.1 Factor de corrección para el flujo propano	27
2.3.2 Factor de corrección para el flujo de aire	28

2.4	FACTOR DE EQUIVALENCIA	29
2.5	PROCESO EXPERIMENTAL DE MEDICIÓN	32
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
	a. Caudal corregido para el gas.....	34
	b. Caudal corregido para el aire.....	35
	c. Caudal total de la premezcla	35
	d. Velocidad de la mezcla inflamable saliendo de la boquilla del Bunsen.....	35
	e. Seno del ángulo medio	36
	f. Velocidad de propagación de llama.....	36
	g. Factor de equivalencia.....	37
3.1	ANÁLISIS DE DATOS.....	43
4.	CONCLUSIONES	47
5.	RECOMENDACIONES	48
6.	BIBLIOGRAFÍA	49
7.	ANEXOS.....	51

FIGURAS

Figura 1. Perfil de temperatura de llama	12
Figura 2. Propagación de la llama.....	14
Figura 3. Fotografía de propagación de llama de una mezcla pobre de propano aire en el tubo	15
Figura 4. Llama premezcla aire/propano en un quemador Bunsen.....	17
Figura 5. Principales componentes del GLP	18
Figura 6. Medición del ángulo de llama en AutoCAD.....	23
Figura 7. Rotámetro	24
Figura 8. Rotámetros utilizados.....	26
Figura 9. Vista frontal y lateral de los rotámetros utilizados	26
Figura 10. Banco de prueba puesto a punto	33
Figura 11. Banco de prueba puesto a punto	33
Figura 12. Resultados teóricos.....	44
Figura 13. Resultados experimentales	45

TABLAS

Tabla 1. Comparación de la presión de vapor del propano y butano puros	21
Tabla 2. Rotámetros utilizados	25
Tabla 3. Datos de las variables para hacer correcciones del flujo de combustible y comburente	28
Tabla 4. Resultados premezcla 2	38
Tabla 5. Resultados premezcla 3	39
Tabla 6. Resultados premezcla 4	39
Tabla 7. Resultados premezcla 5	40
Tabla 8. Resultados premezcla 6	40
Tabla 9. Resultados premezcla 7	41
Tabla 10. Datos de velocidades promedio de cada premezcla	42

RESUMEN

En este trabajo se lleva a cabo la medición de la velocidad de propagación de llamas premezcladas de propano-aire, utilizando el método del ángulo de cono en un quemador Bunsen. Adicionalmente se desarrolla un análisis experimental y estadístico para determinar la variación de la velocidad en relación con el ángulo presente en la llama durante la combustión.

El conocimiento de la velocidad de propagación de llama de un gas combustible es importante, no solo para el desarrollo de modelos teóricos, si no para la solución de problemas prácticos en la utilización de los gases. Por ejemplo en el diseño de los quemadores más ampliamente utilizados. [1]

El montaje experimental y el desarrollo de las pruebas fueron realizados en el Laboratorio de Máquinas de Combustión Interna de la Universidad Tecnológica de Pereira, con instrumentos y elementos facilitados por la Escuela de Tecnología Mecánica y la Facultad de Ingeniería Mecánica; también se usaron las aplicaciones informáticas Excel y AutoCAD para garantizar exactitud en los resultados obtenidos.

Los resultados experimentales tuvieron un comportamiento similar a los teóricos, los valores de relación de equivalencia estuvieron en un orden de magnitud razonable, pero se puede evidenciar una amplia diferencia en los valores de la velocidad de propagación de llama.

Palabras clave: Velocidad de propagación, llamas laminares, combustión, quemador Bunsen, método del ángulo.

ABSTRACT

This work is performed by measuring the measurement of the propagation velocity of premixed flames of propane-air , using the method of the cone angle in a Bunsen burner . Additionally, an experimental and statistical analysis was developed to determine the variation of speed in relation to the present in the flame during combustion angle.

Knowledge of the propagation velocity of a fuel gas flame is important, not only for the development of theoretical models , but to solve practical problems in the use of gas . For example in the design of the most widely used burner . [1]

The experimental setup and the development of tests were performed at the Laboratory of Internal Combustion Machines Technological University of Pereira, instruments and material provided by the School of Mechanical Technology and the Faculty of Mechanical Engineering; the Excel and AutoCAD applications were also used to ensure accuracy in the results.

The experimental results were similar to the theoretical behavior , the equivalence ratio values were in an order of reasonable size , but may show a large difference in values of the flame propagation speed .

Keywords: propagation speed , laminar flames , combustion, Bunsen burner , angle method.

INTRODUCCION

En la actualidad, los procesos experimentales son parte fundamental para el desarrollo de nuevas teorías o modelos matemáticos, este proyecto abarca un análisis experimental acerca de la medición de la velocidad de propagación de llama, teniendo presente que para realizar las pruebas con base en el método del ángulo del cono se trabaja con la geometría de llama y el modelo ideal unidimensional de esta, realizándose la combustión con llamas laminares en un quemador Bunsen, puesto que si la llama no es de régimen laminar, no se podrá observar claramente el cono al interior de la llama y sería un error tratar de implementar este método.

El tubo del quemador Bunsen actúa como cámara de premezcla para el combustible (propano) y el comburente (aire), ambos caudales siendo regulados debidamente para adquirir la llama laminar adecuada para la obtención de diferentes ángulos de cono durante este proceso de combustión.

El presente trabajo de grado tiene su origen en el deseo de implementar el estudio de procesos experimentales en la formación académica, siendo este un pilar fundamental para el desarrollo de nuevos conocimientos, por lo tanto, es de vital importancia la adquisición de equipos demostrativos para conocer y estudiar diversos fenómenos.

La Escuela de Tecnología Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira al no contar con un equipo que permita cuantificar el comportamiento de la llama permitió establecer como objetivo general del proyecto: ***Medir la velocidad de propagación de llama, mediante prácticas experimentales a partir de la técnica del ángulo del cono en un Quemador Bunsen*** y, para ello, se definieron los siguientes objetivos específicos:

- **Verificar el buen estado de los equipos y materiales adquiridos en la Escuela de Tecnología Mecánica para el proyecto.**
- **Construir el dispositivo a partir del quemador Bunsen.**
- **Realizar un análisis estadístico para determinar la velocidad y ángulo de llama.**

De acuerdo a los parámetros planteados para el desarrollo del proyecto, se inició con el desarrollo del diseño, buscando establecer una fuente proveedora de aire con poca turbulencia ya que este factor podría afectar la calidad de llama necesaria para el proceso experimental, después de intentar con diferentes fuentes como ventiladores, compresores, la llama con mejor calidad se obtiene de la adaptación de un compresor de nevera y un cilindro que al acumular el aire en su interior hace el efecto de amortiguación de pulsaciones al aire proveniente de los pistones del compresor; la fuente de combustible (propano) fue un cilindro presurizado perteneciente al Laboratorio de Máquinas de Combustión Interna, teniendo las fuentes de combustible y comburente definidas, se realiza la adaptación necesaria para satisfacer la conexión de los elementos de medición (Rotámetros) suministrados por la Facultad de Ingeniería Mecánica. Se procede a realizar la puesta a punto del montaje experimental, y así obtener los datos con el fin de realizar un análisis estadístico que permite analizar y concluir los resultados en relación con los objetivos planteados.

Los datos obtenidos del proceso experimental serán comparados con los resultados del artículo ***“Studies of n-propanol, iso-propanol, and propane flames”*** de los autores **Peter S. Veloo y Fokion N. Egofoopoulos**.

En el desarrollo de este trabajo de grado se tratarán diferentes temas sobre la combustión y la medición de la velocidad de llama, en el **capítulo 1** se abordan los fundamentos, haciendo hincapié en los tipos de combustión, tipos de llamas y las características generales del combustible y del comburente, **El capítulo 2** argumenta el proceso de medición, las características de los equipos que se

utilizan durante el experimento y la puesta a punto del banco de prueba; **El capítulo 3** abarca el análisis estadístico de los resultados, allí se muestra el manejo que se le da a los datos experimentales, para al final satisfacer los objetivos planteados.

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS EN LOS PROCESOS DE COMBUSTIÓN

En esta parte del proyecto, se abordan los parámetros básicos para comprender el proceso de la combustión, identificando los elementos fundamentales para que este fenómeno ocurra; además de conocer los tipos de llama que se pueden presentar en relación a la cantidad de comburente y combustible presente en la reacción. Es importante comprender los datos teóricos que presenta este capítulo ya que será el punto de partida para entender el desarrollo de la investigación.

1.1. LA COMBUSTIÓN

La reacción de combustión se basa en la reacción química exotérmica de una sustancia o mezcla de sustancias llamada combustible con el oxígeno. Es característica de esta reacción la formación de una llama, que es la masa gaseosa incandescente que emite luz y calor, que está en contacto con la sustancia combustible. La reacción de combustión puede llevarse a cabo directamente con el oxígeno o bien con una mezcla de sustancias que contengan oxígeno, llamada comburente, siendo el aire atmosférico el comburente más habitual. La reacción del combustible con el oxígeno origina sustancias gaseosas entre las cuales las más comunes son CO_2 y H_2O . Se denominan en forma genérica productos, humos o gases de combustión. Es importante destacar que el combustible solo reacciona con el oxígeno y no con el nitrógeno, el otro componente del aire. Por lo tanto el nitrógeno del aire pasará íntegramente a los productos de combustión sin reaccionar. De acuerdo a como se produzcan las reacciones de combustión, estas pueden ser de distintos tipos [2].

1.1.1. COMBUSTIÓN COMPLETA:

Esta ocurre cuando las sustancias combustibles reaccionan hasta el máximo grado posible de oxidación. En este caso no habrá presencia de sustancias combustibles en los productos o humos de la reacción [2].

COMBUSTIÓN INCOMPLETA:

Es la combustión que se produce cuando no se alcanza el grado máximo de oxidación y hay presencia de sustancias combustibles en los gases o humos de la reacción [2].

COMBUSTIÓN ESTEQUIOMÉTRICA O TEÓRICA:

Es la combustión que se lleva a cabo con la cantidad mínima de aire para que no existan sustancias combustibles en los gases de reacción. En este tipo de combustión no hay presencia de oxígeno en los humos, debido a que este se ha empleado íntegramente en la reacción [2].

COMBUSTIÓN CON EXCESO DE AIRE:

Es la reacción que se produce con una cantidad de aire superior al mínimo necesario. Cuando se utiliza un exceso de aire, la combustión tiende a no producir sustancias combustibles en los gases de reacción. En este tipo de combustión es típica la presencia de oxígeno en los gases de combustión. La razón por la cual se utiliza normalmente un exceso de aire es hacer reaccionar completamente el combustible disponible en el proceso [2].

COMBUSTIÓN CON DEFECTO DE AIRE:

Es la reacción que se produce con una menor cantidad de aire que el mínimo necesario. En este tipo de reacción es característica la presencia de sustancias combustibles en los gases o humos de reacción [2].

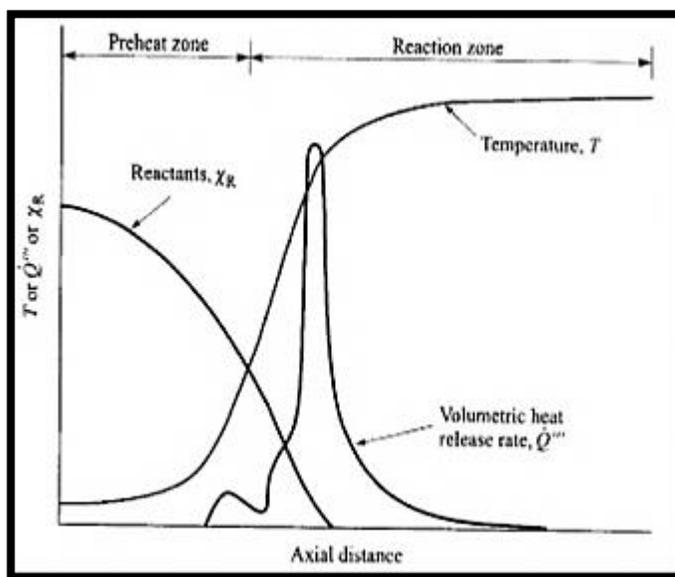
1.2. LA LLAMA

Una llama es una propagación que se auto sostiene de una zona de combustión localizada a velocidades subsónicas. El perfil de temperatura a través de una llama es a pesar de todo la característica más importante. La figura 1, ilustra un perfil de temperatura de llama típico en conjunto con otras características esenciales. Para entender esta figura, es necesario establecer un marco de

referencia para nuestro sistema de coordenadas. Una llama puede propagarse libremente, así ocurre cuando una llama es iniciada en un tubo con una mezcla de gas combustible. El sistema de coordenadas apropiado será arreglado debido a la propagación de la ola de combustión [3].

Un observador montando la llama experimentará la mezcla que no es quemada acercándose a la velocidad de la llama (S_L) esto es equivalente a la llama plana quemada en un quemador [3].

Figura 1. Perfil De Temperatura De Llama



Preheat zone:

Zona de precalentamiento.

Reaction zone:

Zona de reacción.

Reactants, X_R:

Reactores.

Temperature:

Temperatura.

Volumetric heat release rate:

Rango de liberación de calor volumétrico.

Fuente: [3]

Aquí la llama es relativamente estacionaria al marco de referencia del laboratorio y una vez más los reactores entran a la llama con una velocidad igual a la de la velocidad de propagación S_L . En ambos ejemplos, asumimos que la llama es unidimensional y que el gas no quemado entra la llama en una dirección normal a hoja de la llama. Desde que una llama golpee los productos, la densidad de los productos es menor a la densidad de reacción. Por otro lado se requiere que la velocidad del gas quemado sea mayor que la velocidad del gas no quemado [3].

La continuidad de la velocidad de propagación de llama está dada por:

$$\rho_u S_L A = \rho_u V_u A = \rho_b V_b A \quad (1)$$

Donde el subíndice "u" y "b" se refieren al gas quemado y al no quemado, respectivamente. Para una llama típica de aire-hidrocarbonado a presión atmosférica, la proporción de densidad (ρ) es aproximadamente siete. A pesar de esto, hay una aceleración considerable del flujo del gas a través de la llama [3].

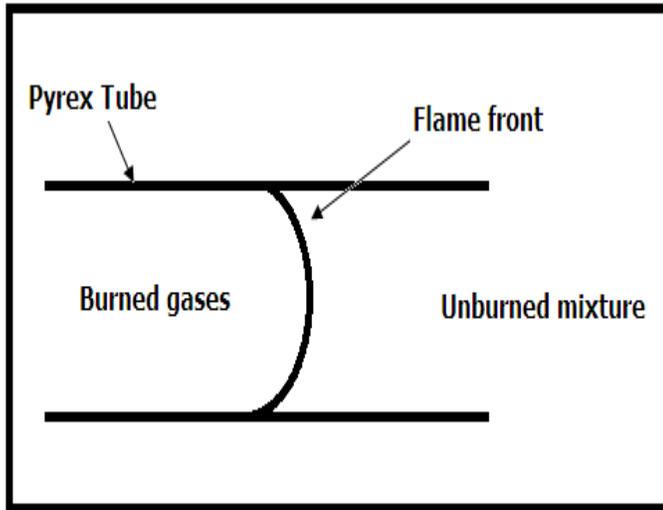
Es conveniente dividir la llama en dos zonas: la zona de precalentamiento, donde una pequeña parte del calor es liberado; la zona de reacción, donde el volumen de energía química es liberado. A presión atmosférica, el grosor de la llama es realmente delgado, de más o menos un milímetro. Es de gran ayuda dividir la zona de reacción en una región delgada de química rápida seguida por una región más amplia de química lenta. La destrucción de las moléculas del combustible y la creación de varias especies intermedias ocurren en la región de química rápida. Ésta región es denominada por reacciones bimoleculares. A presión atmosférica, la zona de reacción rápida es realmente delgada, típicamente menor a un milímetro. Debido a que esta zona es delgada, los gradientes de temperatura y los gradientes de concentración de especies son largos. Estos gradientes provienen de fuerzas conductoras que llevan a la llama a que se auto sostenga: la difusión del calor y especies radicales de la zona de reacción a la zona de precalentamiento. En la zona de reacción secundaria, la química es denominada por una recombinación radical de tres cuerpos de reacciones, las cuales son más lentos que las reacciones bimoleculares típicas, y el quemado final de $CO+OH+CO_2+H$. Esta zona secundaria de reacción puede extenderse en varios milímetros en una llama de una atmósfera [3].

1.2.1. PROPAGACIÓN DE LLAMA

Diferentes velocidades pueden asociarse con la propagación de la llama. Estas velocidades son muy importantes porque tiene un efecto marcado en la cantidad

de calor la cual puede ser liberada durante un proceso de combustión. La siguiente figura muestra el frente de una llama en un tubo horizontal [4].

Figura 2. Propagación De La Llama



PyrexTube:

Tubo Pyrex

Flamefront:

Frente de la llama

Burned Gases:

Gases quemados

Unburned mixture:

Mezcla no quemada

Fuente: [4]

El frente de la llama; puede ser simétrico o no simétrico siendo este punto el lugar donde se separan los gases quemados y la mezcla fresca. Varias velocidades pueden ser definidas como las siguientes: Velocidad del gas V_g , es la velocidad de la mezcla fresca relativamente a un observador organizado (esta velocidad a veces es llamada velocidad de mezcla); Velocidad de la llama V_f (también llamada velocidad espacial) es la velocidad del frente de la llama o relativa a un observador organizado, finalmente, la velocidad de quemado V_b (también llamada velocidad de transformación) es la velocidad de gases quemados relativa a los gases no quemados [4].

Se dice que la velocidad de la llama es igual al vector suma de la velocidad del gas y la velocidad de quemado. En otras palabras

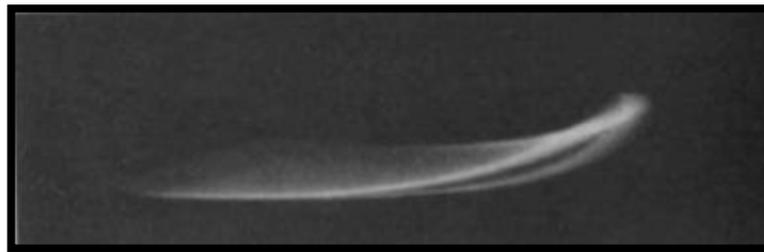
$$V_f = V_g + V_b \quad (2)$$

Deben ser usados dos sistemas diferentes de coordenadas. En uno se puede asumir que el observador está afuera del tubo y observa mientras la llama pasa. En el otro se asume que el observador viaja con la llama [4].

Relativo a un observador arreglado encontramos de la ecuación anterior que la velocidad de la llama es igual a la velocidad de quemado, porque consideramos que la mezcla fresca es estacionaria hasta que llega el frente de la llama. De otro modo si nuestro observador viaja con el frente de la llama, la velocidad relativa de la llama será cero y de acuerdo con la ecuación en la velocidad de quemado será igual numéricamente a la velocidad del gas, pero en la dirección opuesta [4].

Considere un frente de la llama perpendicular al eje del tubo. Debido a la combustión la temperatura del gas aumenta y en base a esto el volumen de la mezcla aumenta. Este tiene el efecto de empujar el gas quemado hacia atrás y el gas no quemado hacia adelante. Debido a la gran fricción con la pared la llama procede más rápido en el centro y se forma un frente parabólico de una llama. Sin embargo, las experiencias de los efectos de flotabilidad de la llama y debido a esto es frecuentemente asimétrico como se muestra en la siguiente figura, la cual es una fotografía tomada en tubo 7/8 in [4].

Figura 3. Fotografía de propagación de llama de una mezcla pobre propano-aire en el tubo.



Fuente: [4]

La mezcla aire-propano de la llama viaja de izquierda a derecha, esto incrementa el área del frente de la llama y se quema una mayor cantidad de gas. Las

turbulencias y remolinos también empujan a que la llama viaje. Los experimentos indican que el viaje de la llama es más rápida en tubos largos que en tubos cortos. Entre más rápido la llama, mas alto será el rango de aumento de presión de la mezcla. Experimentos indican que en un proceso de combustión controlada, la combustión es justamente completa en las regiones donde ya ha pasado el frente de llama [4].

1.2.2. LLAMAS DE DIFUSIÓN

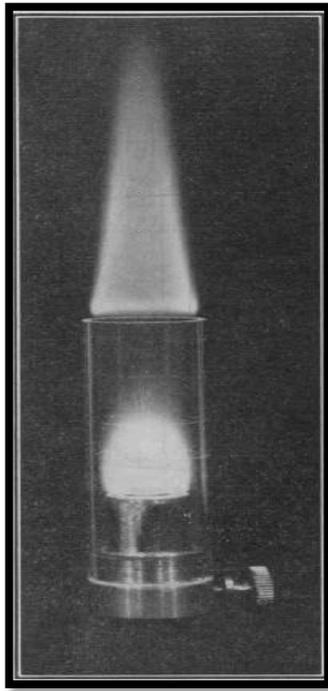
Las llamas estacionarias pueden ser pre-mezcladas o difundidas. En general las llamas pre-mezcladas han recibido considerablemente más atención que las llamas de difusión, probablemente la llama de difusión más conocida es la llama de una vela. Una llama de difusión comienza normalmente en el borde de un quemador, sin embargo es posible levantar una llama, en el caso anterior la llama es suspendida a cierta distancia del borde del quemador causando la entrada de aire y la reorganización de una llama pre-mezclada. [4].

1.2.3. LLAMAS PREMEZCLADAS

La llama premezclada con la cual la ingeniería esta mas familiarizada es la llama Bunsen. En un quemador Bunsen, el combustible gaseoso surge de un orificio dentro del quemador en el cual entra aire primario, y la mezcla quema en la punta del tubo quemador donde también recibe aire secundario el cual más adelante asiste al proceso de combustión [4].

Observando la llama de un quemador Bunsen se puede notar dos conos, uno interior y otro exterior, los cuales pueden ser separados convenientemente por el uso de separadores Smithsell como muestra a continuación.

Figura 4. Llama premezcla aire-propano en un quemador Bunsen



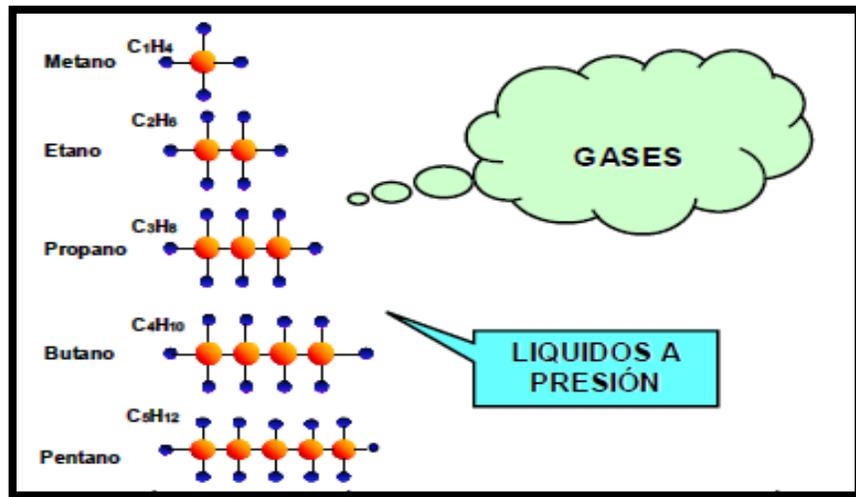
Fuente [4]

El cono interior corresponde al frente de la llama para la combustión del combustible y el aire primario y es la llama premezclada verdadera. El cono exterior es formado por la combustión de la mezcla existente y el aire secundario, y es actualmente una llama de difusión. Una llama premezclada puede ser laminar o turbulenta, dependiendo del número de Reynolds del flujo en el tubo. La zona en el cual la combustión primaria ocurre en una llama turbulenta es a veces llamada cepillado de la llama. Alargando el tubo quemador conduce a obtener llamas laminares. La turbulencia en las llamas pueden ser mejor observadas. En el uso de la fotografía Schlieren [4].

1.3. COMBUSTIBLE

Gas licuado del petróleo (GLP) es una mezcla de hidrocarburos extraídos del procesamiento del gas natural o del petróleo, gaseosos en condiciones atmosféricas, que se licuan fácilmente por enfriamiento o compresión, Constituidos principalmente por propano y butanos (figura 6). Comúnmente se llama gas propano [5].

Figura 5. Principales componentes del GLP



Fuente: [5]

El GLP es un recurso no renovable debido a que es un elemento de la naturaleza que la industria, con su tecnología, es capaz de transformar pero no de reponer. Su vida está ligada principalmente a la del petróleo crudo y secundariamente a los depósitos de gas natural con contenidos de propano y butano.

Dado que el GLP comúnmente se almacena en espacios externos y en recipientes metálicos, está sujeto a las condiciones del medio ambiente, en especial a la temperatura. Por ser muy sensible a la temperatura, sus variaciones son muy notorias y se reflejan en el aumento de la presión del vapor y en la variación de su volumen, dado que como fluido está sujeto a la expansión cuando se calienta y a la contracción cuando se enfría [5].

Para la obtención del GLP, tenemos que alrededor del 80% del gas que se produce hoy a nivel mundial se obtiene de las refinerías como subproducto del procesamiento del crudo, mientras el otro 20% viene asociado y es separado en las plantas donde se procesa el gas natural. En Colombia, aproximadamente el 5% del GLP que se comercializa se obtiene del procesamiento del gas natural, mientras que el 95% restante se obtiene en refinería [5].

Obtención del GLP mediante el proceso de “secado” del gas natural: El Gas Natural se encuentra “húmedo” o mezclado con otros hidrocarburos en fase líquida o gaseosa en depósitos o en los pozos de petróleo. Una vez extraído se separan los diferentes gases y líquidos, en una planta construida para tal propósito. El gas natural se despacha por gasoducto hacia los puntos de consumo y el GLP y demás productos se almacenan para su posterior comercialización [5].

1.3.1. Características del GLP:

- Puede encontrarse en estado líquido y gaseoso. A condiciones atmosféricas normales está en fase gaseosa, pero al comprimirlo pasa a estado líquido, es decir se licua.
- No tiene color: Hay oportunidades, en especial cuando se presenta una fuga de líquido, en que se observa como una nube blanca.
- No tiene olor: Cuando Se dice “huele a gas” en realidad se habla de la percepción olfativa de sustancias con fuerte olor que se adicionan al GLP.
- El GLP pueden almacenarse y transportarse como líquido bajo presión y vaporiza fácilmente a temperaturas bajas.
- Como todo fluido, pero especialmente en fase vapor, se expande cuando se le aplica calor y poca presión y se contrae a menor temperatura o mayor presión. Todo aumento en la temperatura se refleja en incremento de la presión del vapor.

- Por sí mismo no es venenoso ni tóxico, pero si se libera en espacios confinados, puede presentar riesgos por inhalación, ya que el GLP desplaza el oxígeno.
- No es corrosivo.
- Al vaporizar 1 litro de GLP en fase líquida se obtienen aproximadamente 270 litros de GLP en fase de vapor.
- Cuando se mezcla con la cantidad apropiada de aire, puede haber combustión sostenida.

En la industria del gas en general hay diferentes tipos o mezclas de GLP, las cuales se emplean en función del uso que se les vaya a dar. Las principales mezclas son [5]:

- Mezclas Propano Butano (Mezclas P-B): Son mezclas en proporciones variables de propano y butano, regidas por normas técnicas y que son las que se ofrecen al mercado Colombiano. Su principal limitante es el máximo contenido de Pentanos y mayores del 2%. En muchos países se han emitido normas específicas, de acuerdo con necesidades, que fijan de una manera más precisa límites y exigen un máximo contenido de butanos y de olefinas.
- Propano comercial: es una mezcla de propano, propileno y otros compuestos minoritarios (etano, butano, etc.). El contenido máximo permitido de butanos o más pesados es del 2.5%
- HD5 o Propano para uso especial: Un tipo de GLP compuesto principalmente por propano con un máximo de 5% de propileno y un contenido máximo permitido de butanos o más pesados del 2.5%
- Butano comercial: es una mezcla compuesta principalmente de butanos y con un máximo del 2% de Pentanos y mayores.

El GLP a una determinada temperatura entre la fase líquida y la fase de vapor alcanza una presión, llamada presión de vapor.

Entre el butano y el propano, componentes principales del GLP, para las mismas condiciones de temperatura, el Propano es el que presenta mayor presión de vapor (Tabla 1) [5].

Tabla 1. Comparación de la presión de vapor del propano y butano puros

TEMPERATURA		PRESIÓN APROXIMADA (PSIG)	
°F	°C	PROPANO	BUTANO
-40	-40,0	3,6	
-30	-34,4	8,0	
-20	-28,8	13,5	
-10	-23,3	20,0	
0	-17,7	28,0	
10	-12,2	37,0	
20	-6,6	47,0	
30	-1,1	58,0	
40	4,4	72,0	3,0
50	10,0	86,0	6,9
60	15,5	102,0	12,0
70	21,1	127,0	17,0
80	26,6	140,0	23,0
90	32,2	165,0	29,0
100	37,7	196,0	36,0
110	43,3	220,0	45,0

Fuente: SAENA de Colombia S.A

Densidad relativa del GLP, En la mayoría de los países, las condiciones estándar de Presión y Temperatura para la medición de la Densidad Relativa del GLP, aire y agua, se han tomado así: Temperatura 25 °C y Presión 101325 Pa.

La densidad relativa del GLP varía de acuerdo a la composición que presente. Dado que los principales componentes del GLP son Propano y Butano, se indican sus densidades relativas en forma separada [5].

- La densidad relativa del propano líquido, a condiciones estándar, es de 0.507. Esto significa que el peso del propano es aproximadamente la mitad del peso del agua (más ligero que el agua). Si lo comparamos con el aire, la densidad relativa del propano, en fase vapor, en condiciones estándar, es de 1.832, lo que indica que el propano gaseoso es aproximadamente una y media vez más pesado que el aire [5].

1.4. COMBURENTE

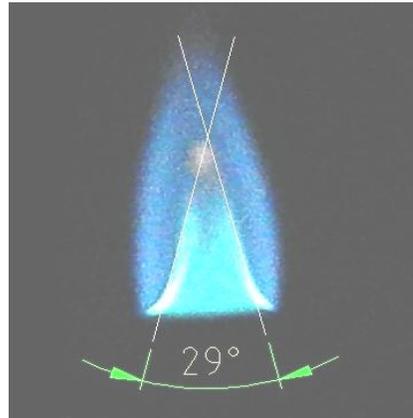
El comburente es cualquier sustancia que en ciertas condiciones de temperatura y presión puede combinarse con un combustible, provocando la combustión, para este proceso experimental el comburente es el oxígeno el cual se encuentra normalmente en el aire con una concentración porcentual en volumen aproximado del 21%. Todos los comburentes tienen en su composición oxígeno disponible, ya sea en forma de oxígeno molecular, como se ha dicho, o bien como oxígeno que ceden al momento de la combustión [6].

Para que se produzca la combustión es necesaria la presencia de una proporción mínima de oxígeno, que por regla general va de un 15% hasta en casos extremos de un 5% [6].

1.5. MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LLAMA POR EL MÉTODO DEL ÁNGULO DEL CONO

Al disponer de la llama laminar en la boquilla del quemador Bunsen, se procede a realizar un estudio fotográfico con el fin de observar el ángulo que se origina en el interior de la llama; la fotografía es llevada al software AutoCAD con el fin de medir el ángulo, como se muestra en la figura:

Figura 6. Medición del ángulo de llama en AutoCAD



Fuente: [Autor]

Dicho ángulo está definido por magnitudes relativas de la velocidad de llama Vu y la velocidad de la mezcla inflamable saliendo por la boquilla del quemador Vm ; de este modo la velocidad de propagación de llama se obtiene por medio de la siguientes expresiones [7]:

$$Vm = Q/A \quad (3)$$

$$Vu = Vm \times \text{Sen} \left(\frac{\alpha}{2} \right) \quad (4)$$

Dónde:

Vm : Velocidad de la mezcla inflamable saliendo de la boquilla del Bunsen.

Q : Caudal total de la premezcla aire-propano.

A : Área de la boquilla del quemador Bunsen.

Vu : Velocidad de propagación de llama.

α : Angulo del cono de llama en radianes.

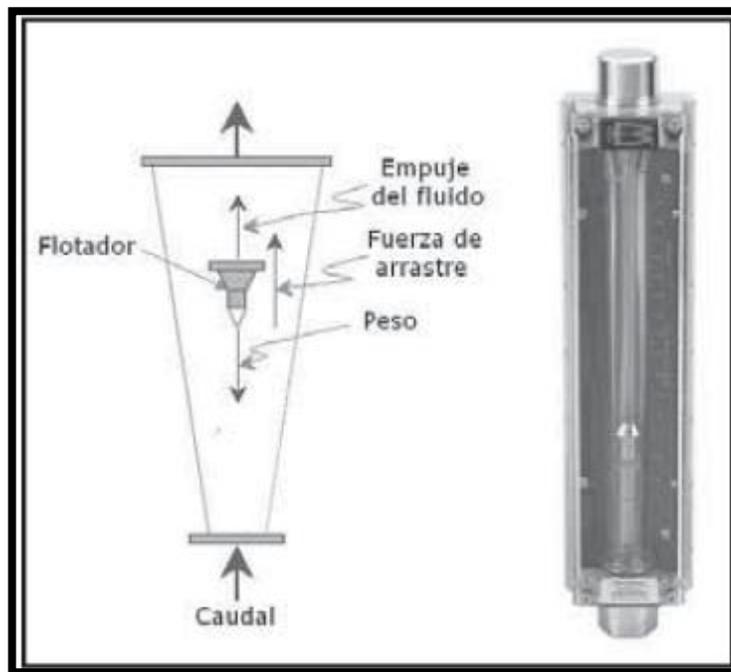
2. MONTAJE EXPERIMENTAL

Durante este capítulo se describen las características del montaje, los instrumentos de medición utilizados (Rotámetros), los elementos necesarios para la puesta a punto de la maqueta, además de los ajustes necesarios para garantizar el resultado de las mediciones experimentales. También se especifican las dificultades que se presentaron durante el montaje, la búsqueda de posibles soluciones, y las soluciones halladas para el correcto desarrollo de la maqueta.

2.1. MEDIDORES DE AREA VARIABLE (ROTÁMETROS)

Los elementos de área variable se caracterizan por el cambio de área que se produce entre el elemento primario en movimiento y el cuerpo del medidor. Pueden asimilarse a una placa orificio cuyo diámetro interior fuera variable dependiendo del caudal y de la fuerza de arrastre producida por el fluido [8].

Figura 7. Rotámetro



Fuente: [9]

El principio de funcionamiento de los rotámetros se basa en el equilibrio de fuerzas que actúan sobre el flotador. En efecto, la corriente fluida que se dirige de abajo hacia arriba a través del tubo cónico del rotámetro, provoca la elevación del flotador hasta una altura en que el área anular comprendido entre las paredes del tubo y el cuerpo del flotador, adquiere una dimensión tal que las fuerzas que actúan sobre el mismo se equilibran, y el flotador se mantiene estable a una altura que corresponde a un determinado valor de caudal circulante [9].

2.2. ROTÁMETROS UTILIZADOS

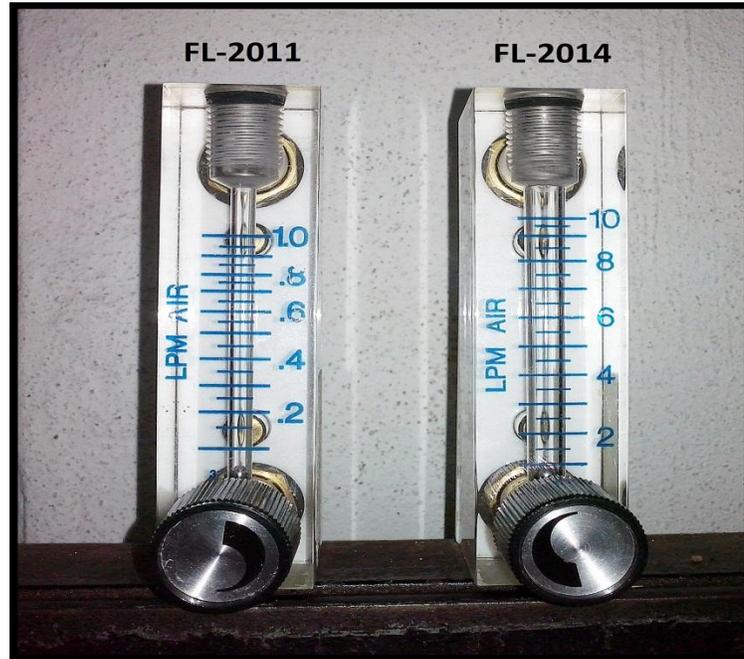
Para el desarrollo experimental del proyecto se usan rotámetros que tengan la sensibilidad adecuada para medir los pequeños flujos de aire y propano. Los elementos de medición son facilitados por el Laboratorio de Ensayos Neumáticos de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira. Las características de los rotámetros se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2. Características de los rotámetros

Empresa fabricante	Referencia FL-2011	Referencia FL-2014
	Para flujo de combustible	Para flujo de comburente
Omega Engineering	Escala de medicion	Escala de medicion
	De 0,1 a 1 LPM	De 1 a 10 LPM

Fuente: [Omega Engineering]

Figura 8. Rotámetros utilizados



Fuente: [Autor]

Figura 9. Vista frontal y lateral de los rotámetros utilizados



Fuente: [Autor]

2.3. FACTOR DE CORRECCIÓN

La medición de caudal se realiza a una presión y temperatura que en general no corresponden a las consideradas estándar (101325 KPa, 25 °C) y siendo los gases compresibles se hace necesario aplicar una corrección para expresar el mismo en condiciones estándar [9].

2.3.1. FACTOR DE CORRECCIÓN PARA EL FLUJO DE PROPANO (C_3H_8)

En la medición del caudal de combustible, se emplea la siguiente ecuación para hacer la corrección del flujo de gas por el tipo de combustible, medición de propano [10].

$$Q_{propano} = Q_{aire} * \sqrt{\frac{R_{propano}}{R_{aire}}} \quad (5)$$

Donde $Q_{propano}$ es el caudal equivalente de gas propano para el medidor de flujo que viene calibrado para aire, Q_{aire} es el caudal de aire estándar brindado por la escala del medidor de flujo, $R_{propano}$ es la constante de gas del propano y R_{aire} es la constante de gas del aire [10].

Adicionalmente se realiza una corrección por la presión y la temperatura del gas mediante la siguiente ecuación:

$$(Q_{propano})_s = Q_{propano} * \sqrt{\frac{P_1 * T_2 * \rho_{relativa\ GLP\ (1)}}{P_2 * T_1 * \rho_{relativa\ GLP\ (2)}}} \quad (6)$$

Donde $(Q_{propano})_s$ es el caudal de GLP corregido totalmente, $Q_{propano}$ es el caudal generado de la aplicación de la ecuación anterior, P_1 es la presión a condiciones estándar, T_2 es la temperatura actual, $\rho_{relativa\ GLP\ (1)}$ es la densidad relativa del propano a condiciones estándar, P_2 es la presión actual, T_1 es la temperatura a condiciones estándar y $\rho_{relativa\ GLP\ (2)}$ es la densidad relativa del propano en el nuevo medio [11].

2.3.2. FACTOR DE CORRECCIÓN PARA EL FLUJO DE AIRE:

El flujo de aire solo requiere corrección por temperatura y presión ya que los rotámetros están diseñados para medir este fluido principalmente, a continuación asociamos la ecuación:

$$(Q_{aire})_s = Q_{aire} * \sqrt{\frac{P_1 * T_2 * \rho_{relativa\ aire(1)}}{P_2 * T_1 * \rho_{relativa\ aire(2)}}} \quad (7)$$

Donde $(Q_{aire})_s$ es el caudal de aire corregido, Q_{aire} es el caudal que marca el rotámetro, P_1 es la presión a condiciones estándar, T_2 es la temperatura actual, $\rho_{relativa\ aire(1)}$ es la densidad relativa del aire a condiciones estándar, P_2 es la presión actual, T_1 es la temperatura a condiciones estándar y $\rho_{relativa\ aire(2)}$ es la densidad relativa del aire en el nuevo medio [11].

En la siguiente tabla se asocian los datos que se introducirán en las ecuaciones anteriores para establecer el caudal corregido de GLP:

Tabla 3. Datos de las variables para hacer correcciones del flujo del combustible y el comburente.

Variable	Valor	Unidad
Presión estándar P_1	101325	Pa
Presión actual P_2	85193	Pa
Temperatura estándar T_1	298,15	K
Temperatura actual T_2	295,15	K
R propano	189	J/(kg*K)
R aire	287	J/(kg*K)
Densidad relativa GLP (1)	1,547	-
Densidad relativa GLP (2)	1,312	-
Densidad relativa aire (1)	1	-
Densidad relativa aire (2)	0,85	-

Fuente: [Autor]

2.4. RELACION DE EQUIVALENCIA

En un sistema de combustión el análisis de la relación aire combustible es importante por las siguientes razones [12]:

- Su conocimiento permite definir el consumo de aire requerido por el sistema, lo cual en equipos de combustión de aire forzado permite especificar el ventilador y el circuito de aire.
- El control de la relación aire/combustible permite adecuar la potencia del sistema a los requerimientos de proceso. Además, en determinadas aplicaciones industriales su control garantiza la generación de una determinada atmósfera(oxidante, neutra y reductora)

Al comparar la relación aire/combustible real volumétrica másica con la relación aire/combustible estequiométrica, se obtiene una expresión adimensional que recibe diferentes nombres; factor de aireación o factor de equivalencia. Por relación estequiométrica de aire se entiende la cantidad de aire (en volumen o masa) que requiere un combustible para quemarse completamente y el oxígeno suministrado es usado totalmente. Esta relación es una propiedad de todo combustible y depende de su composición química [12].

Si la cantidad de combustible real es mayor que el estequiométrico se tiene un factor de equivalencia mayor que 1 ($\phi > 1$), se dice entonces que la mezcla es rica en aire. Si la cantidad de combustible real es menor que le estequiométrico, se tiene un factor de equivalencia menor que 1 ($\phi < 1$), se dice entonces que la mezcla es pobre de aire. Si la cantidad de combustible real es igual al estequiométrico, el factor de equivalencia es igual a uno ($\phi = 1$), por tanto se tiene una mezcla estequiométrica [12].

Para calcular el factor de equivalencia de cada premezcla, se parte de la siguiente ecuación [3]:

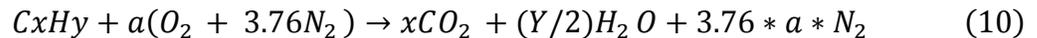
$$\phi = \frac{\left(\frac{A}{C}\right)_{Stoich}}{\left(\frac{A}{C}\right)_{Real}} \quad (8)$$

Donde $(A/C)_{stoich}$ es la relación aire/combustible estequiométrica de flujo másico, y $(A/C)_{real}$ es la relación aire/combustible en flujo másico que se presenta en cada una de las premezclas del experimento [3].

Para el cálculo de la relación aire-combustible estequiométrica se utiliza la siguiente expresión [3]:

$$\left(\frac{A}{C}\right)_{Stoich} = \frac{4.76 * (a)}{1} * \frac{MW_{aire}}{MW_{comb}} \quad (9)$$

Donde MW_{aire} es el peso molecular del aire y MW_{comb} es el peso molecular del propano; para hallar el valor de la variable (a) se realiza una serie de cálculos partiendo de la fórmula de combustión estequiométrica de los hidrocarburos que se muestra a continuación: [3].

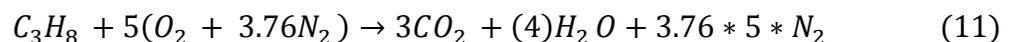


Dónde:

$$\text{Formula química Propano: } C_3H_8 \quad a = x + (y/4) ;$$

$$X = 3 ; y = 8 \quad a = 3 + (8/4) \rightarrow a = 5$$

Luego tenemos la ecuación estequiométrica de combustión para el propano [3]:



La composición química del aire contempla:

$$79\% \text{ de } N_2, 21\% \text{ de } O_2 \rightarrow (79/21) = 3.76$$

Se procede a hallar el peso molecular aire:

$$MW_{aire} = 0.79N_2 + 0.21(O_2) \quad (12)$$

$$MW_{aire} = (0.79 * (14 \frac{g}{mol}) * 2) + (0.21 * (16 \frac{g}{mol}) * 2)$$

$$MW_{aire} = \mathbf{28.84 \text{ g/mol}}$$

Posteriormente se calcula el peso molecular del GLP:

$$MW_{prop} = C_3H_8 = \left(3 * (12 \frac{g}{mol})\right) + \left(8 * (1 \frac{g}{mol})\right) \quad (13)$$

$$MW_{prop} = \mathbf{44 \text{ g/mol}}$$

Al obtener la totalidad de los valores se procede a reemplazar en la ecuación (9), para hallar la relación aire/combustible estequiométrica.

$$\left(\frac{A}{C}\right)_{Stoich} = \frac{4.76 * (5)}{1} * \frac{28.84 \frac{g}{mol}}{44 \frac{g}{mol}} \quad (9)$$

$$\left(\frac{A}{C}\right)_{Stoich} = \mathbf{15,59}$$

En busca de obtener el valor del factor de equivalencia, se requiere encontrar la relación aire/combustible de flujo másico para cada premezcla del experimento con la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{A}{C}\right)_{real} = \frac{Q_{aire}}{Q_{comb}} \quad (14)$$

Donde **Q_{aire}**, es el caudal volumétrico medido con el rotámetro FL-2014 con su respectiva conversión de caudal a masa y la corrección por temperatura y presión,

Q_{comb} es el caudal volumétrico medido con el rotámetro FL-2011 con su respectiva conversión de caudal a masa además de las correcciones por tipo de gas y por presión y temperatura.

En el momento en que se obtiene el valor de las relaciones aire/combustible tanto estequiométrica como real, se hace uso de la ecuación (9) obteniendo el factor de equivalencia para cada una de las premezclas del proceso experimental.

2.5. PROCESO EXPERIMENTAL DE MEDICIÓN

Para la realización de la toma de datos se debe encontrar el banco de prueba en un lugar completamente oscuro para garantizar buena calidad en las imágenes de las llamas a estudiar y sin entradas de aire que puedan alterar el desarrollo del proceso; los pasos del parámetro guía son:

- a. Definir la combinación de caudales de combustible y comburente a medir, garantizando que el rango genere una llama laminar.
- b. Accionar la chispa del mechero y posteriormente abrir la fuente de combustible hasta el caudal seleccionado en el punto anterior.
- c. Ajustar el caudal del comburente al punto establecido en el punto (a), al realizar lo indicado la llama empezara a tomar una forma tenue y se iniciara la combustión de premezcla.
- d. Al llegar a los caudales establecidos, se procede a tomar la fotografía con el fin de identificar el ángulo de la llama en la salida del quemador bunsen.
- e. Al realizar la fotografía, se apagan las fuentes de combustible y comburente.
- f. Se vuelve a realizar el proceso del punto (b) al punto (e), durante 10 veces con los caudales elegidos en el primer punto.
- g. Al finalizar esta etapa se llevan las imágenes al software AutoCAD y se mide el ángulo en cada una de las 10 fotografías.
- h. Por último se ingresan los datos de caudales del combustible, comburente y ángulos de llama, en las tablas previamente configuradas en el software Excel; para obtener los datos de velocidad de propagación de llama.

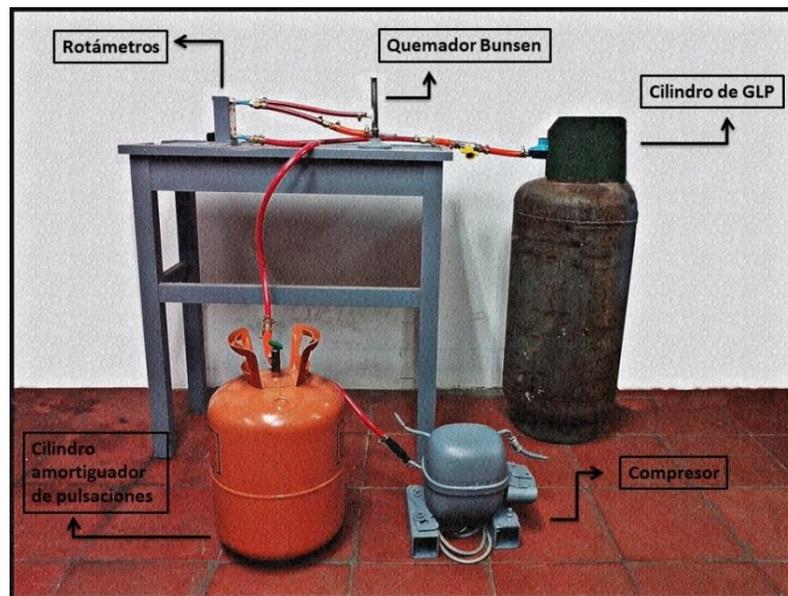
Al terminar, se inicia de nuevo el procedimiento variando el caudal del comburente y el combustible.

Figura 10. Vista frontal del banco de prueba puesto a punto



Fuente: [Autor]

Figura 11. Vista lateral del banco de prueba puesto a punto



Fuente: [Autor]

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al obtener el valor del ángulo mediante el análisis de las imágenes en AutoCAD se procede a realizar el cálculo la velocidad de propagación de llama para cada premezcla, de acuerdo con el procedimiento que se presenta a continuación.

Premezcla 1.

$$Q_{aire} = 2 \text{ LPM}$$

$$Q_{gas} = 0,15 \text{ LPM}$$

a. Caudal corregido para el gas:

Seguidamente es realizada la corrección del caudal para el gas considerando el tipo de combustible, las condiciones de presión y temperatura del medio donde se desarrolla el proceso experimental. Estas correcciones son realizadas según las ecuaciones (5) y (6) respectivamente.

- **Corrección por tipo de combustible:**

$$Q_{propano} = Q_{aire} * \sqrt{\frac{R_{propano}}{R_{aire}}} \quad (5)$$

$$Q_{propano} = (0,15 \text{ LPM}) * \sqrt{\frac{189 \frac{J}{kg * K}}{287 \frac{J}{kg * K}}}$$

$$Q_{propano} = 0,12 \text{ LPM}$$

- **Corrección por presión y temperatura:**

$$(Q_{propano})_s = Q_{propano} * \sqrt{\frac{P_1 * T_2 * \rho_{relativa \text{ GLP } (1)}}{P_2 * T_1 * \rho_{relativa \text{ GLP } (2)}}} \quad (6)$$

$$(Q_{propano})_s = 0,122 \text{ LPM} * \sqrt{\frac{101325 \text{ Pa} * 295,15 \text{ K} * 1,547}{85193 \text{ Pa} * 298,15 \text{ K} * 1,312}}$$

$$(Q_{propano})_s = 0,14 \text{ LPM}$$

b. Caudal corregido para el aire:

El flujo de aire solo requiere corrección por las condiciones de presión y temperatura del medio, para ello se aplica la siguiente ecuación.

$$(Q_{aire})_s = Q_{aire} * \sqrt{\frac{P_1 * T_2 * \rho_{relativa\ aire(1)}}{P_2 * T_1 * \rho_{relativa\ aire(2)}}} \quad (7)$$

$$(Q_{aire})_s = Q_{aire} * \sqrt{\frac{101325\ Pa * 295,15\ K * 1}{85193\ Pa * 298,15\ K * 0,850}}$$

$$(Q_{aire})_s = 2,35\ LPM$$

c. Caudal total de la premezcla:

Una vez corregidos los caudales de la premezcla, se realiza el cálculo del caudal total de premezcla.

$$Q_{total} = (Q_{propano})_s + (Q_{aire})_s$$

$$Q_{total} = 0,143\ LPM + 2,35\ LPM$$

$$Q_{total} = 2,45\ LPM$$

Es útil realizar la conversión de unidades para el posterior cálculo de la velocidad de llama, de LPM a $\frac{cm^3}{s}$

$$Q_{total} = 39,25 \frac{cm^3}{s}$$

d. Velocidad de la mezcla inflamable saliendo de la boquilla del Bunsen

Área de la boquilla del quemador bunsen, $A = 2,01\ cm^2$

$$Vm = \frac{Q_{total}}{Area} \quad (3)$$

$$Vm = \frac{39,24 \frac{cm^3}{s}}{2,01 cm^2}$$

$$Vm = 19,52 \frac{cm}{s}$$

e. Seno del ángulo medio

El ángulo promedio presente en las 10 fotografías tratadas en AutoCAD fue de 30.8°, este promedio es realizado con el objetivo de obtener el promedio de la velocidad de propagación de llama en la premezcla.

$$Angulo = 30.8 \text{ grados} * \frac{2\pi \text{ radianes}}{360 \text{ grados}}$$

$$Angulo = 0,53 \text{ radianes}$$

Posteriormente hallamos el valor del seno el ángulo medio:

$$Sen\left(\frac{\alpha}{2}\right) = Sen\left(\frac{0,53}{2}\right)$$

$$Sen\left(\frac{\alpha}{2}\right) = 0,26 \text{ radianes}$$

f. Velocidad de propagación de llama

En consecuencia de que el seno del ángulo medio está en función de la velocidad de propagación de llama, reemplazando en la ecuación (4) el ángulo promedio de las fotografías, se obtiene la velocidad promedio de la premezcla 1:

$$Vu = Vm \times Sen\left(\frac{\alpha}{2}\right) \tag{4}$$

$$Vu = 19,52 \frac{cm}{s} \times 0,26 \text{ radianes}$$

$$Vu = 5,18 \frac{cm}{s}$$

g. Factor de equivalencia

A partir de la ecuación (8):

$$\phi = \frac{\left(\frac{A}{C}\right)_{Stoich}}{\left(\frac{A}{C}\right)_{Real}} \quad (8)$$

Dónde:

$$\left(\frac{A}{C}\right)_{Stoich} = 15,99$$

Para la premezcla 1, con flujo volumétrico corregido igual a:

$$Q_{aire} = 2,35 \text{ LPM} ; Q_{comb} = 0,14 \text{ LPM}$$

De flujo volumétrico a flujo másico para el aire:

$$Q_{m_aire} = 2,35 \text{ LPM} * \frac{\rho_{aire}}{60000}$$

$$Q_{m_aire} = 2,35 \text{ LPM} * \frac{1,006 \text{ kg/m}^3}{60000}$$

$$Q_{m_aire} = 3,94 \text{ e}^{-5} \text{ kg/m}^3$$

De flujo volumétrico a flujo másico para el propano:

$$Q_{m_comb} = 0,14 \text{ LPM} * \frac{\rho_{propano}}{60000}$$

$$Q_{m_comb} = 0,14 \text{ LPM} * \frac{1,553 \text{ kg/m}^3}{60000}$$

$$Q_{m_comb} = 3,71 \text{ e}^{-6} \text{ kg/m}^3$$

Por lo tanto la relación aire/combustible real para la premezcla 1 es:

$$\left(\frac{A}{C}\right)_{Real} = \frac{3,95 e^{-5} \text{ kg/m}^3}{3,71 e^{-6} \text{ kg/m}^3}$$

$$\left(\frac{A}{C}\right)_{Real} = \mathbf{10,63}$$

De esta manera se puede proceder a calcular el factor de equivalencia para dicha premezcla:

$$\phi_{premezcla\ 1} = \frac{15,99}{10,63}$$

$$\phi_{premezcla\ 1} = \mathbf{1,47}$$

A continuación se expresan los resultados obtenidos a partir de las tablas prediseñadas del software Excel, para cada una de las premezclas del proceso experimental:

Tabla 4. Resultados premezcla 2

Premezcla 2	Qaire(real)	QGLP(real)
	LPM	LPM
Caudal medido por los rotámetros	2,00	0,10
Corr. Tipo combustible	----	0,08
Corr. Presión y Temp.	2,35	0,09

Qaire(s) (cm ³ /s)	QGLP(s) (cm ³ /s)	α promedio (grados)	Vm (cm/s)	Relación aire-GLP (real)
				Adimensional
39,24	0,0057	30,30	19,52	15,94
Qtotal (cm ³ /s)		senα/2	Vu (cm/s)	Factor de Equivalencia
39,25		0,26	5,10	0,98

Fuente: [Autor]

Tabla 5. Resultados premezcla 3

Premezcla 3	Qaire(real)	QGLP(real)
	LPM	LPM
Caudal medido por los rotámetros	2,50	0,15
Corr. Tipo combustible	----	0,12
Corr. Presion y Temp.	2,94	0,14

Qaire(stan) (cm ³ /s)	QGLP(stan) (cm ³ /s)	α promedio (grados)	Vp (cm/s)	Relación aire-GLP (real)
				Adimensional
49,04	0,0086	20,70	24,39	13,29
Qttotal (cm ³ /s)		sen α /2	V(cm/s)	Rel. Equivalencia
49,05		0,18	4,38	1,17

Fuente: [Autor]

Tabla 6. Resultados premezcla 4

Premezcla 4	Qaire(real)	QGLP(real)
	LPM	LPM
Caudal medido por los rotámetros	1,00	0,15
Corr. Tipo combustible	----	0,12
Corr. Presion y Temp.	1,18	0,14

Qaire(s) (cm ³ /s)	QGLP(s) (cm ³ /s)	α promedio (grados)	Vm (cm/s)	Relación aire-GLP (real)
				Adimensional
19,61	0,0086	19,70	9,76	5,32
Qttotal (cm ³ /s)		sen α /2	Vu (cm/s)	Factor de Equivalencia
19,63		0,17	1,67	2,93

Fuente: [Autor]

Tabla 7. Resultados premezcla 5

Premezcla 5	Qaire(real)	QGLP(real)
	LPM	LPM
Caudal medido por los rotámetros	1,00	0,10
Corr. Tipo combustible	----	0,08
Corr. Presion y Temp.	1,18	0,09

Qaire(s) (cm ³ /s)	QGLP(s) (cm ³ /s)	α promedio (grados)	Vm (cm/s)	Relación aire-GLP (real)
				Adimensional
19,61	0,0057	29,90	9,76	7,97
Qtotal (cm ³ /s)		sen α /2	Vu (cm/s)	Factor de Equivalencia
19,63		0,26	2,52	1,96

Fuente: [Autor]

Tabla 8. Resultados premezcla 6

Premezcla 6	Qaire(real)	QGLP(real)
	LPM	LPM
Caudal medido por los rotámetros	1,50	0,15
Corr. Tipo combustible	----	0,12
Corr. Presion y Temp.	1,77	0,14

Qaire(s) (cm ³ /s)	QGLP(s) (cm ³ /s)	α promedio (grados)	Vm (cm/s)	Relación aire-GLP (real)
				Adimensional
29,43	0,0086	36,5	14,64	7,98
Qtotal (cm ³ /s)		sen α /2	Vu (cm/s)	Factor de Equivalencia
29,44		0,31	4,59	1,96

Fuente: [Autor]

Tabla 9. Resultados premezcla 7

Premezcla 7	Qaire(real)	QGLP(real)
	LPM	LPM
Caudal medido por los rotámetros	1,50	0,10
Corr. Tipo combustible	----	0,08
Corr. Presion y Temp.	1,77	0,09

Qaire(s) (cm ³ /s)	QGLP(s) (cm ³ /s)	α promedio (grados)	Vm (cm/s)	Relación aire-GLP (real)
				Adimensional
29,43	0,0057	36,1	14,64	11,96
Qttotal (cm ³ /s)		sen α /2	Vu (cm/s)	Factor de Equivalencia
29,44		0,31	4,53	1,30

Fuente: [Autor]

A continuación se calculara el intervalo de confianza del proceso experimental

Intervalo de confianza

En estadística, se llama a un par o varios pares de números entre los cuales se estima que estará cierto valor desconocido con una determinada probabilidad de acierto. Formalmente, estos números determinan un intervalo, que se calcula a partir de datos de una muestra, y el valor desconocido es un parámetro poblacional. La probabilidad de éxito en la estimación se representa con $1 - \alpha$ y se denomina nivel de confianza. En estas circunstancias, α es el llamado error aleatorio o nivel de significación, esto es, una medida de las posibilidades de fallar en la estimación mediante tal intervalo

El nivel de confianza y la amplitud del intervalo varían conjuntamente, de forma que un intervalo más amplio tendrá más probabilidad de acierto (mayor nivel de confianza), mientras que para un intervalo más pequeño, que ofrece una estimación más precisa, aumenta su probabilidad de error [14].

$$\bar{X} - z \frac{S}{\sqrt{n}}, \bar{X} + z \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (15)$$

Dónde:

\bar{X} Es la media aritmética, S es la desviación estándar poblacional, z es el valor de la tabla normal asociado al nivel de confianza que se desea y n es el tamaño de la muestra [14].

Para el cálculo del intervalo de confianza de las velocidades de propagación de llama promedio para cada premezcla, se estima un nivel de confianza del 95%, el tamaño de la muestra es $n = 7$.

Tabla 10. Datos de velocidades promedio de cada premezcla.

Premezcla	Vu (cm/s)
1	5,19
2	5,10
3	4,39
4	1,67
5	2,52
6	4,59
7	4,54

Fuente: [autor]

- **Calculo media aritmética**

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (16)$$

$$\bar{X} = \frac{(5,19 + 5,10 + 4,39 + 1,67 + 2,52 + 4,59 + 4,54)}{7}$$

$$\bar{X} = 4$$

- **Calculo desviación estándar**

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (17)$$

$$S = \sqrt{\frac{(5,19 - 4)^2 + (5,10 - 4)^2 + (4,39 - 4)^2 + (1,67 - 4)^2 + (2,52 - 4)^2 + (4,59 - 4)^2 + (4,54 - 4)^2}{6}}$$

$$S = 1,36$$

- **Calculo intervalo de confianza**

Se reemplazan los valores de desviación estándar (S), media aritmética \bar{X} y el tamaño de la muestra (n) en la ecuación (15).

$$\left[4 - 2,45 \frac{1,36}{\sqrt{7}}, 4 + 2,45 \frac{1,36}{\sqrt{7}} \right] \quad (15)$$

Donde el valor del punto crítico $t_{\alpha/2} = t_{0,025} = 2,45$, se lee en la tabla de distribución para T student con 6 grados de libertad que se encuentra en los anexos; por lo tanto el intervalo de confianza de las velocidades de propagación promedio está comprendido entre:

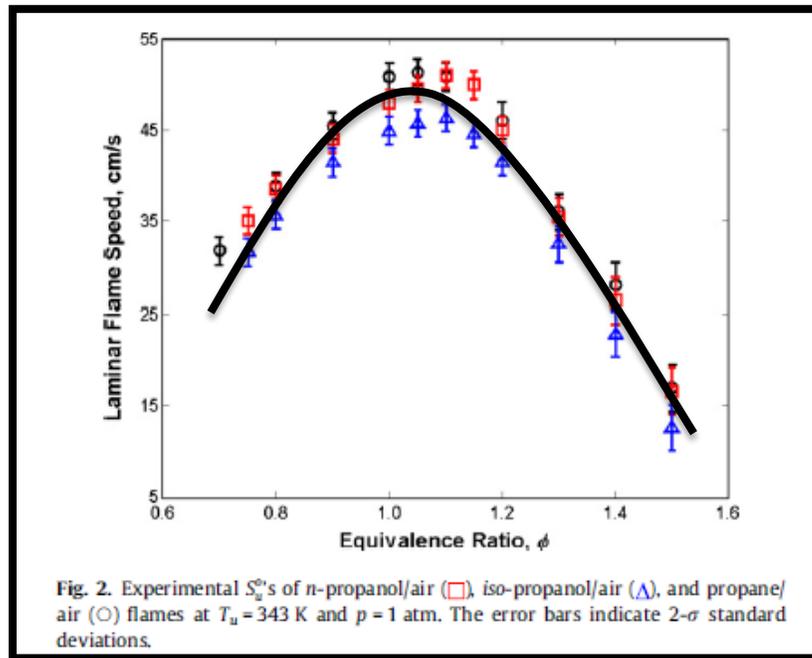
$$[2,99, 5,01]$$

Con una confianza del 95% se espera que la velocidad de propagación de llama promedio este entre el intervalo hallado.

3.1. ANÁLISIS DE DATOS

En este segmento se realiza un análisis detallado de los datos obtenidos en las premezclas aire/combustible y una comparación de los datos experimentales con los teóricos, la gráfica mostrada es el desarrollo del comportamiento de la velocidad de propagación de llama en función del factor de equivalencia.

Figura 12. Resultados teóricos



Fuente: [13]

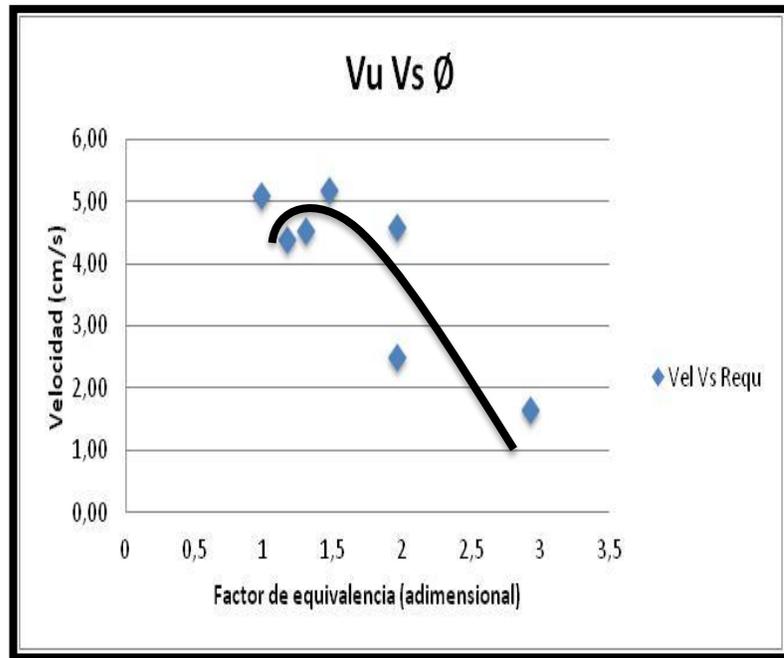
La curva de color negro, es una premezcla laminar de aire/propano a $T = 343$ K y $P = 1$ atm [13].

Se puede apreciar que la velocidad de propagación de llama obtiene su máximo valor cuando el factor de equivalencia es cercano a 1 ($\phi \cong 1$). Si la premezcla aire/propano es pobre o rica en aire, se presenta una disminución sustancial de la velocidad.

Los valores del factor de equivalencia a estas condiciones de temperatura y presión se encuentran en un rango entre (0,7 y 1,4); en cuanto los valores de velocidad se encuentran entre 15 y 52 cm/s a las condiciones especificadas.

La siguiente grafica enseña los resultados adquiridos en el proceso experimental.

Figura 13. Resultados experimentales



Fuente: [Autor]

La curva de color azul, es una premezcla laminar de aire/propano a $T = 295,15K$ y $P = 85193 Pa$.

Durante el proceso experimental se intentó obtener siempre una combustión completa por lo tanto solo existe un valor de combustión pobre y dicho valor ($\phi = 0,98$) es muy próximo a la combustión estequiométrica. Los otros valores de factor de equivalencia son combustiones ricas en aire, algunas muy próximos a ($\phi = 1$).

En comparación con la figura (12) de los resultados teóricos, la tendencia de las velocidades de propagación de llama en función del factor de equivalencia son muy similares, ambas tiene un comportamiento tipo campana de gauss. Los valores de velocidad de propagación de llama teóricos y experimentales no coinciden, ya que las condiciones ambientales en las que se desarrolló el proyecto son diferentes, y estos factores influyen directamente en los cálculos de velocidad

de propagación de llama, un claro ejemplo es la temperatura a la que se realizó la prueba teórica ($T = 343 K$), en consecuencia al aumentar la temperatura, aumenta la velocidad de los gases; otro factor por lo cual pueden discrepar las velocidades de propagación de llama, es el no conocer los caudales utilizados en las premezclas teóricas, además del diámetro de la boquilla del quemador bunsen utilizado.

Los factores de corrección utilizados en los caudales de los rotámetros, el acondicionamiento hermético realizado al cuarto de prueba donde se instaló el experimento, el uso de herramientas informáticas como Excel y AutoCAD en el tratamiento de los datos estadísticos y la medida del ángulo del cono de llama respectivamente, generan confiabilidad en los datos obtenidos, se corrobora con el valor desviación estándar ($S = 1,36$), el cual es pequeño.

En la gráfica de los datos experimentales se puede deducir que la velocidad es mayor cuando el valor del factor de equivalencia es próximo a 1, y las velocidades decrecen cuando el factor de equivalencia se aleja de este, al igual de cómo sucede en la gráfica de los datos teóricos.

La premezcla aire/combustible con mejor comportamiento fue la número 2 (tabla 3), ya que el factor de equivalencia fue de ($\phi = 0,98$) siendo este el más cercano a la combustión estequiométrica, a su vez genero una velocidad de propagación de llama de $Vu = 5,10 \text{ cm/s}$ y la llama en la salida del quemador bunsen marco un ángulo promedio de $30,3^\circ$.

4. CONCLUSIONES

- Se logró calcular la velocidad de propagación de llama para las premezclas de aire/combustible, efectuando la totalidad de las operaciones necesarias para satisfacer los objetivos planteados.
- La velocidad de propagación de llama varía en función del ángulo presente durante la combustión a la salida de la boquilla del quemador bunsen.
- Durante la puesta a punto de la maqueta para el desarrollo del proyecto, se cumplieron los parámetros necesarios para garantizar la obtención de resultados confiables.
- Las gráficas teóricas y experimentales de velocidad de propagación de llama contra factor de equivalencia fueron similares, aunque, si se contara con rotámetros de una mayor resolución se hubiese podido incrementar el número de premezclas de aire/combustible, generando una gráfica experimental con más datos.
- Este proyecto es una puerta de entrada hacia un amplio estudio de la combustión, que a gran escala se puede asociar con la propulsión de cohetes con fines bélicos o científicos, como la puesta en órbita de satélites.

5. RECOMENDACIONES

- Se recomienda que para próximas pruebas a realizar con la maqueta, se garantice un cuarto totalmente cerrado y oscuro, para adquirir datos confiables como los obtenidos en este proceso experimental.
- En busca de nuevos conocimientos se recomienda profundizar en el estudio de la velocidad de propagación de llama, partiendo de las características de la llama como su temperatura y longitud.
- Se recomienda que las próximas pruebas experimentales a realizar en la maqueta del proyecto, se lleven a cabo con otros tipos de combustibles para ampliar el campo de investigación.
- La realización de un número mayor de pruebas, en busca de una amplia adquisición de datos garantiza una mejor estimación del valor real.

6. BIBLIOGRAFIA

[1] Medición de la velocidad de propagación de llamas premezcladas de metano-aire y gas natural guajira-aire utilizando el método Del ángulo del cono. Colombia [Online]. Marzo de 2004. Disponible en internet:

<http://www.redalyc.org/pdf/496/49614103.pdf>

[2] DANILIN, Oscar L. Combustión. Universidad Tecnológica Nacional de la Plata. Argentina. 1999. Disponible en internet:

<http://www.frlp.utn.edu.ar/materias/integ2/combustion.pdf>

[3] TURNS, Stephen R. An Introduction to Combustión. Second Edition. New York. McGraw-Hill. 1996.

[4] JENNINGS, Campbell Ali. Flame Gas Dynamics. 1958.

[5] Generalidades del GLP. 2008 Disponible en internet:

<http://www.buenastareas.com/ensayos/Preguntas-y-Respuestas-Sobre-El-Gas/6656466.html>

[6] Comburente. Disponible en internet: <http://mecherodebunsen.blogspot.com/>.

[7] GLASSMAN, Irvin. Combustión. Second Edition. New Jersey. Academic Press, INC. 1987.

[8] CREUS SOLÉ, Antonio. Instrumentación industrial. Octava edición. México. Alfaomega. 2010.

[9] IBARROLA, Esteban L. Rotámetros fundamentos y calibración. Disponible en internet:

<http://www.efn.uncor.edu/departamentos/aero/Asignaturas/MecFluid/material/Teoria%20Rotametro.pdf>

[10] CARRANZA SÁNCHEZ, Yamid Alberto. VILLA PANESO, Andrés Felipe. Estudio sobre la influencia de la potencia calorífica del quemador y el tipo de recipiente en la eficiencia de cocción a nivel residencial. 2012. Disponible en internet:

<http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/1623>

[11] ODIN S.A. Caudalímetros de área variable (Rotámetros). 2002. Disponible en internet:

<http://petracontrol.com/images/pdf/rotametros.pdf>

[12] AMELL ARRIETA, Andrés A. Parámetros de un sistema de combustión a tener en cuenta en una conversión. Disponible en internet:

<http://es.scribd.com/doc/20117737/Parametros-de-un-Sistema-de-Combustion-A-Tener-en-Cuenta-en-una-Conversion>

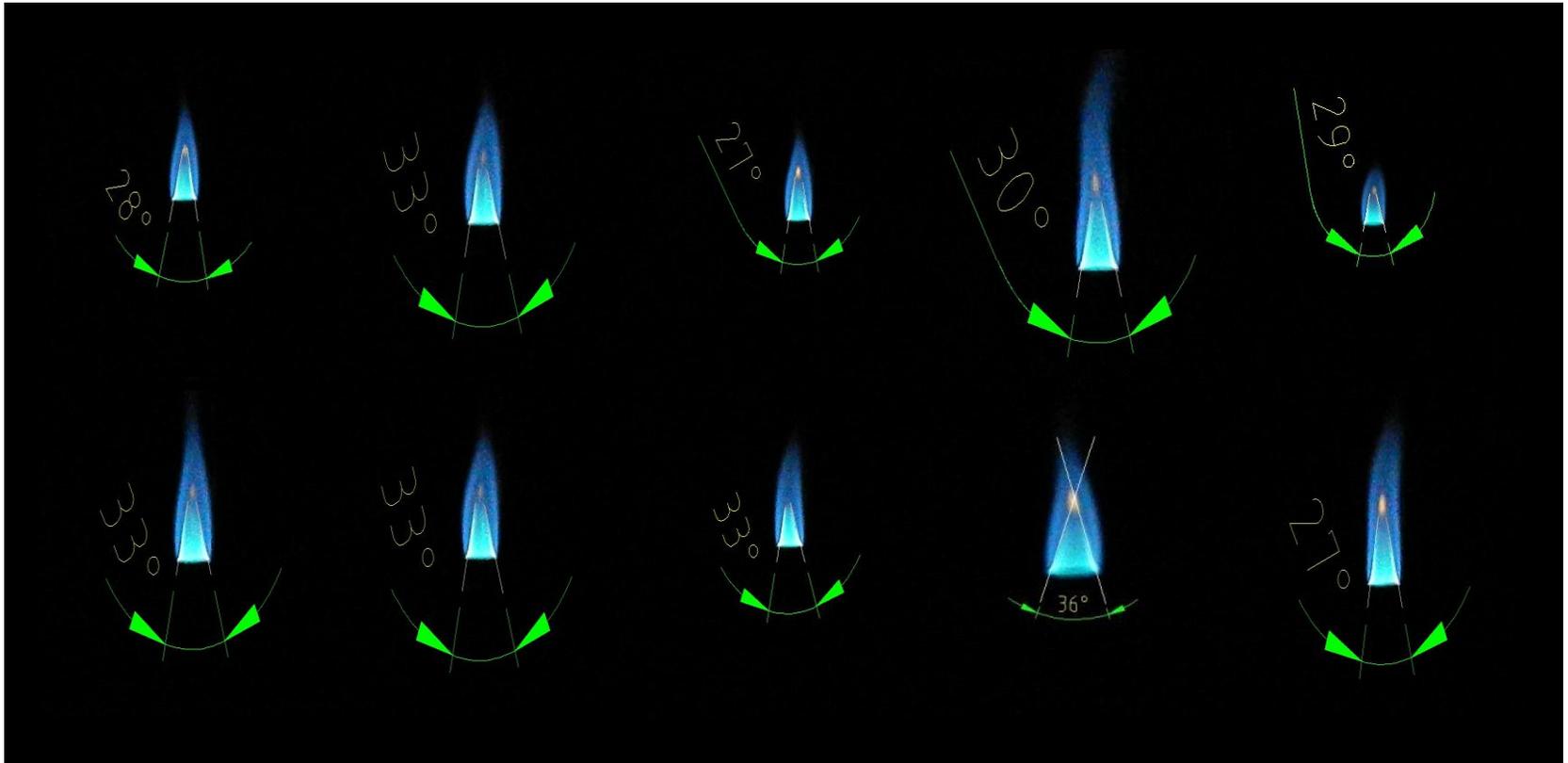
[13] VELOO, Peter S. EGOLFOPOULOS, Fokion N. Studies of n-propanol, iso-propanol, and propane flames. 2010. Disponible en la base de datos electrónica ScienceDirect.

[14] GUTIERREZ PULIDO, Humberto. DE LA VARA SALAZAR, Román. Análisis y diseño de experimentos. Segunda edición. México D, F. McGraw-Hill. 2008

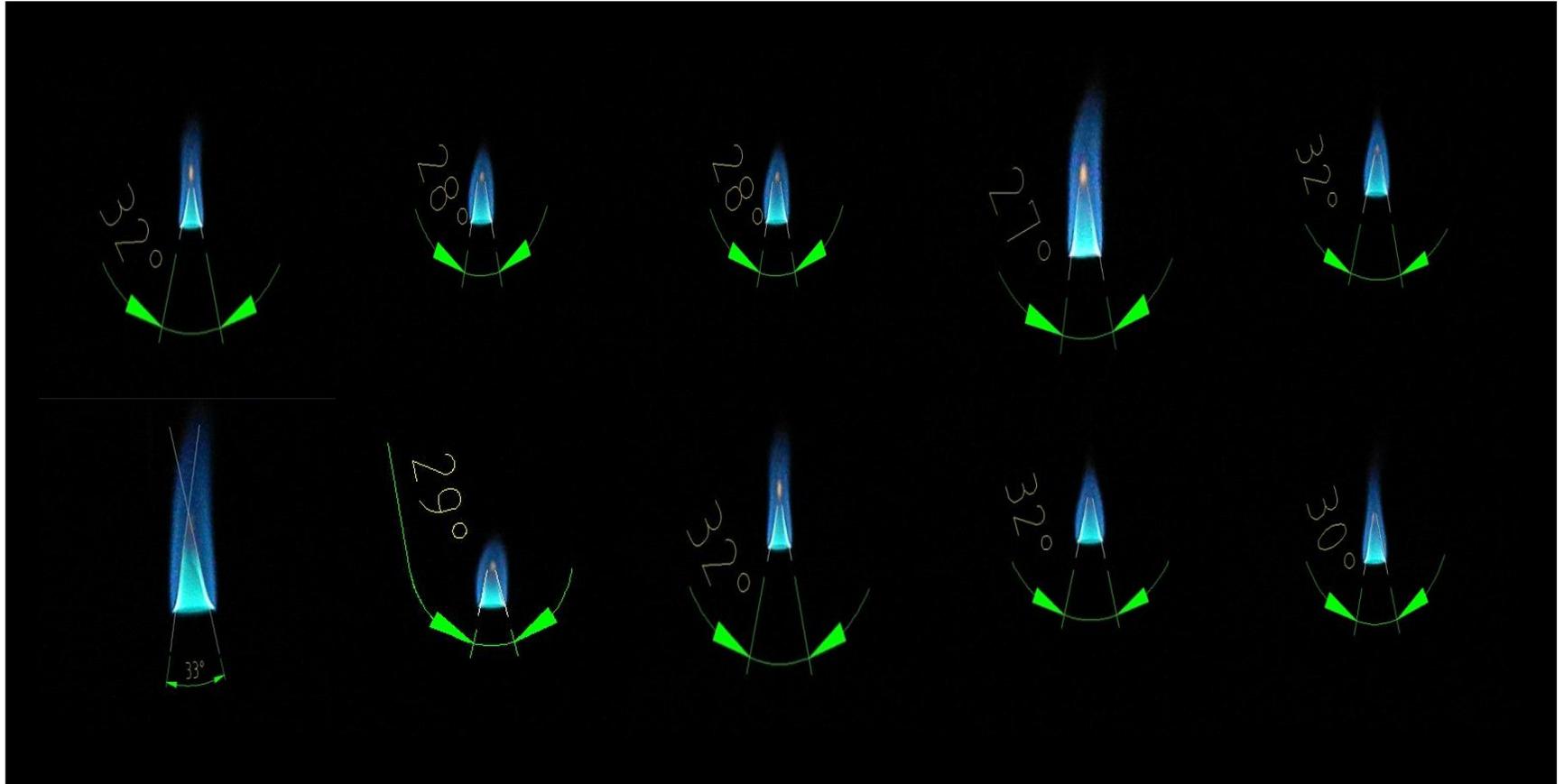
7. ANEXOS

ANEXO A. Fotografías Para Cada Premezcla de aire/combustible

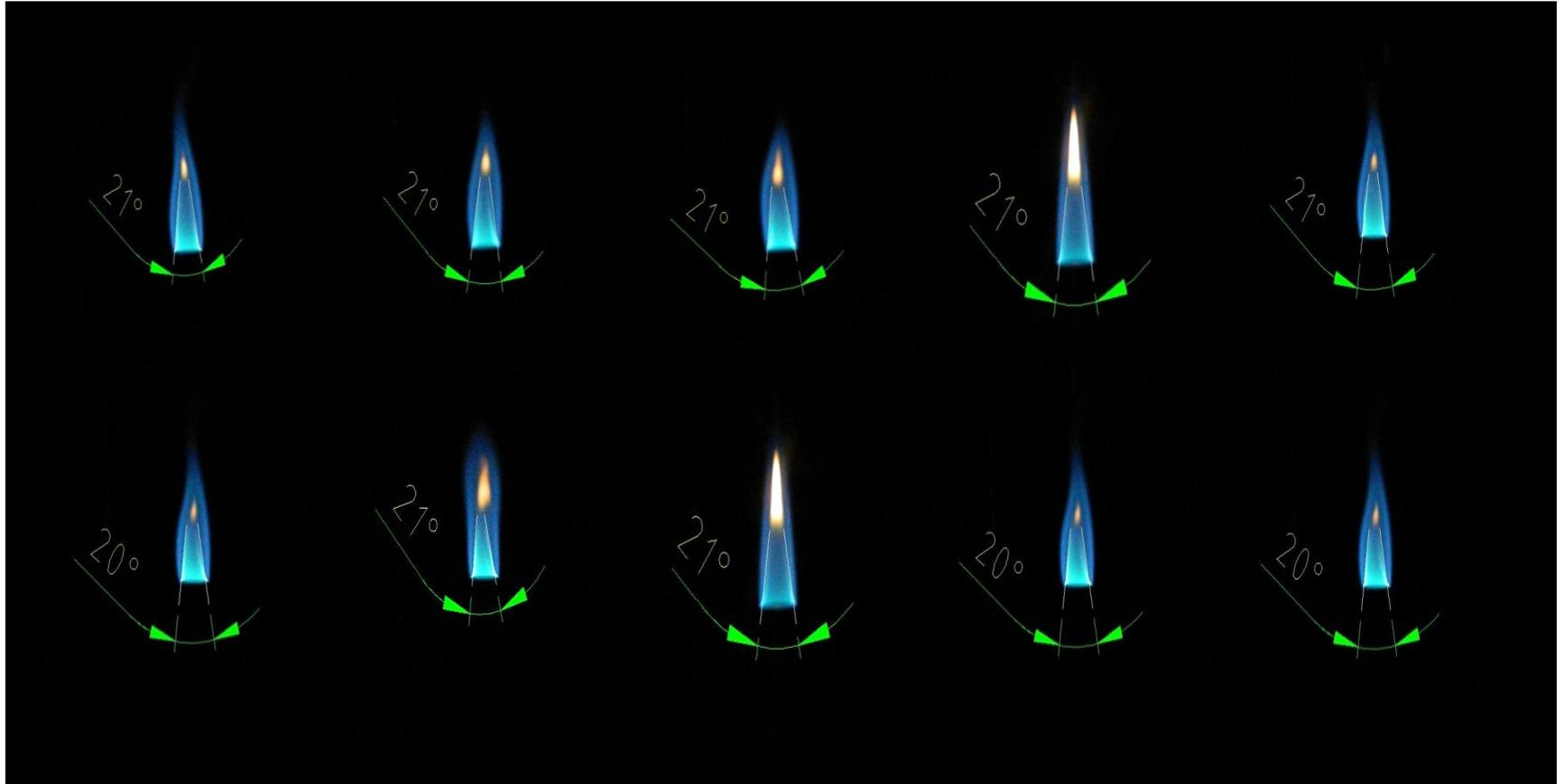
- Primera Premezcla



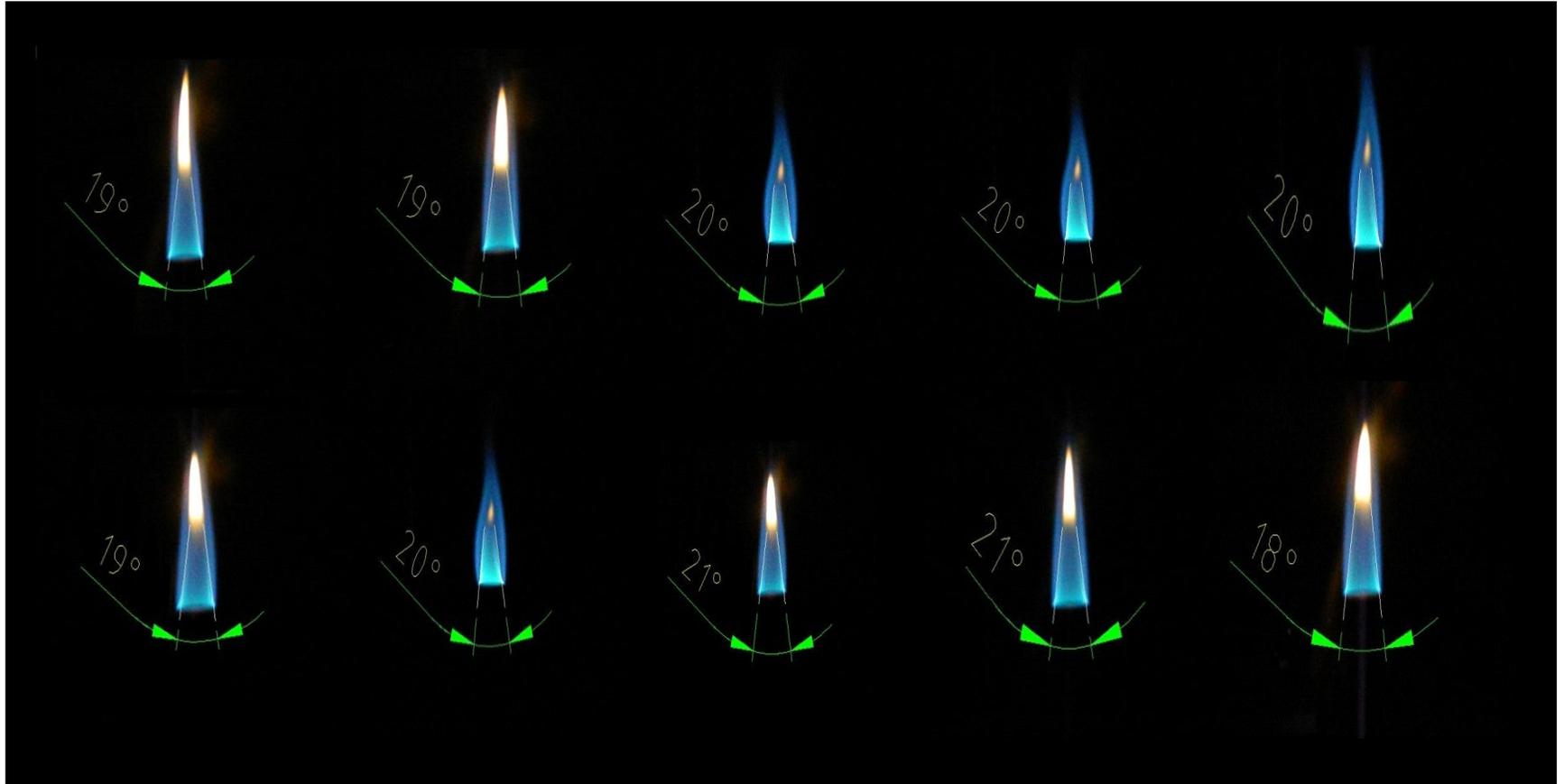
- Segunda Premezcla



- Tercera Premezcla



- Cuarta Premezcla



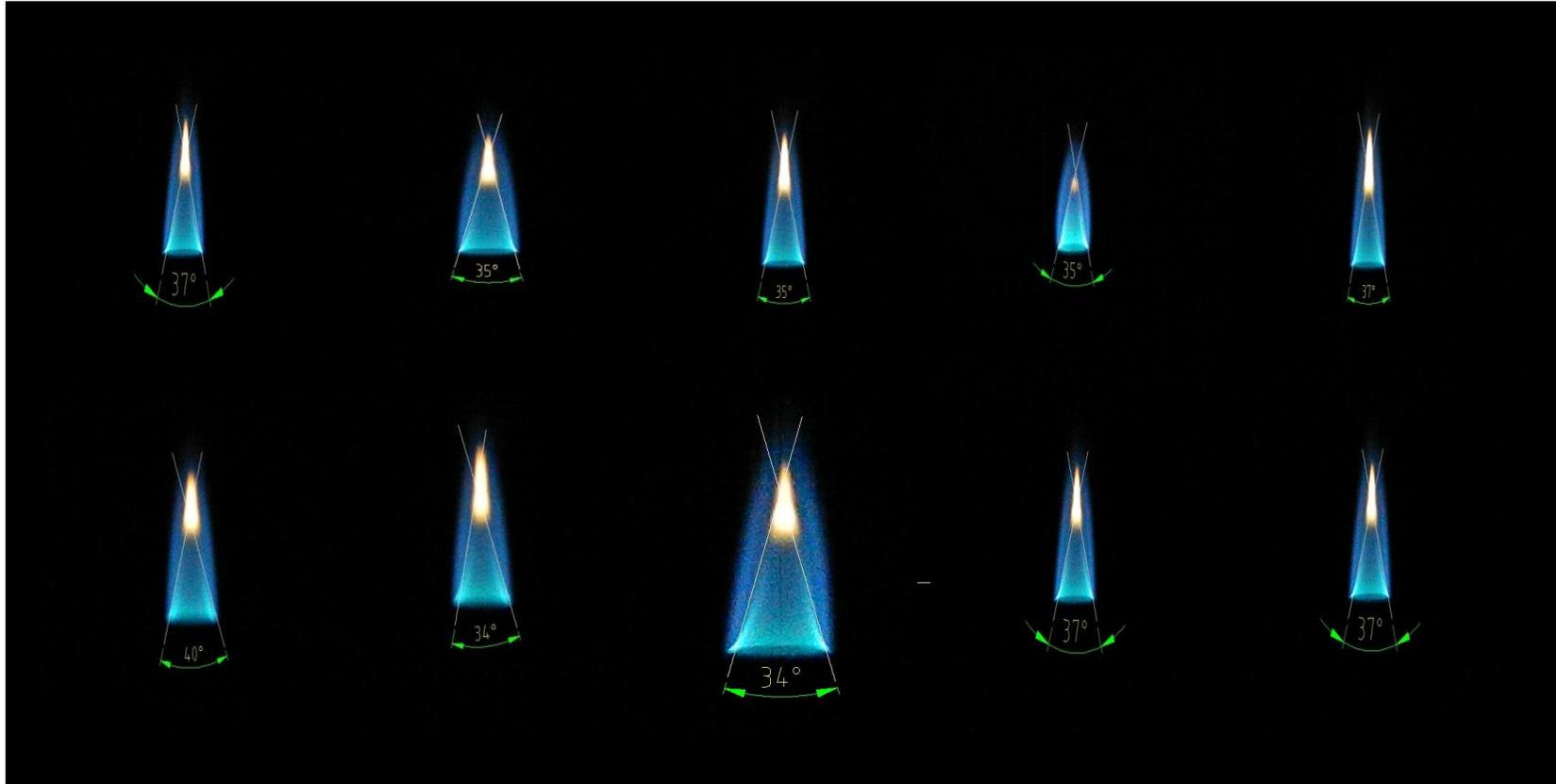
- Quinta Premezcla



- Sexta Premezcla



- Séptima Premezcla



ANEXO B. Tabla de los puntos críticos para la distribución para T de student.

Grados de libertad	0.25	0.1	0.05	0.025	0.01	0.005
1	1.0000	3.0777	6.3137	12.7062	31.8210	63.6559
2	0.8165	1.8856	2.9200	4.3027	6.9645	9.9250
3	0.7649	1.6377	2.3534	3.1824	4.5407	5.8408
4	0.7407	1.5332	2.1318	2.7765	3.7469	4.6041
5	0.7267	1.4759	2.0150	2.5706	3.3649	4.0321
6	0.7176	1.4398	1.9432	2.4469	3.1427	3.7074
7	0.7111	1.4149	1.8946	2.3646	2.9979	3.4995
8	0.7064	1.3968	1.8595	2.3060	2.8965	3.3554
9	0.7027	1.3830	1.8331	2.2622	2.8214	3.2498
10	0.6998	1.3722	1.8125	2.2281	2.7638	3.1693
11	0.6974	1.3634	1.7959	2.2010	2.7181	3.1058
12	0.6955	1.3562	1.7823	2.1788	2.6810	3.0545
13	0.6938	1.3502	1.7709	2.1604	2.6503	3.0123
14	0.6924	1.3450	1.7613	2.1448	2.6245	2.9768
15	0.6912	1.3406	1.7531	2.1315	2.6025	2.9467
16	0.6901	1.3368	1.7459	2.1199	2.5835	2.9208
17	0.6892	1.3334	1.7396	2.1098	2.5669	2.8982
18	0.6884	1.3304	1.7341	2.1009	2.5524	2.8784
19	0.6876	1.3277	1.7291	2.0930	2.5395	2.8609
20	0.6870	1.3253	1.7247	2.0860	2.5280	2.8453
21	0.6864	1.3232	1.7207	2.0796	2.5176	2.8314
22	0.6858	1.3212	1.7171	2.0739	2.5083	2.8188
23	0.6853	1.3195	1.7139	2.0687	2.4999	2.8073
24	0.6848	1.3178	1.7109	2.0639	2.4922	2.7970
25	0.6844	1.3163	1.7081	2.0595	2.4851	2.7874
26	0.6840	1.3150	1.7056	2.0555	2.4786	2.7787
27	0.6837	1.3137	1.7033	2.0518	2.4727	2.7707
28	0.6834	1.3125	1.7011	2.0484	2.4671	2.7633
29	0.6830	1.3114	1.6991	2.0452	2.4620	2.7564
30	0.6828	1.3104	1.6973	2.0423	2.4573	2.7500
31	0.6825	1.3095	1.6955	2.0395	2.4528	2.7440
32	0.6822	1.3086	1.6939	2.0369	2.4487	2.7385
33	0.6820	1.3077	1.6924	2.0345	2.4448	2.7333
34	0.6818	1.3070	1.6909	2.0322	2.4411	2.7284
35	0.6816	1.3062	1.6896	2.0301	2.4377	2.7238
36	0.6814	1.3055	1.6883	2.0281	2.4345	2.7195
37	0.6812	1.3049	1.6871	2.0262	2.4314	2.7154
38	0.6810	1.3042	1.6860	2.0244	2.4286	2.7116
39	0.6808	1.3036	1.6849	2.0227	2.4258	2.7079
40	0.6807	1.3031	1.6839	2.0211	2.4233	2.7045
41	0.6805	1.3025	1.6829	2.0195	2.4208	2.7012
42	0.6804	1.3020	1.6820	2.0181	2.4185	2.6981
43	0.6802	1.3016	1.6811	2.0167	2.4163	2.6951
44	0.6801	1.3011	1.6802	2.0154	2.4141	2.6923
45	0.6800	1.3007	1.6794	2.0141	2.4121	2.6896
46	0.6799	1.3002	1.6787	2.0129	2.4102	2.6870
47	0.6797	1.2998	1.6779	2.0117	2.4083	2.6846
48	0.6796	1.2994	1.6772	2.0106	2.4066	2.6822
49	0.6795	1.2991	1.6766	2.0096	2.4049	2.6800