

Medellín, Colombia

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA



Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía, GASURE
Facultad de Ingeniería



Trabajo de Investigación - Maestría

Presentada a la oficina de estudios de posgrado de la Universidad de Antioquia en cumplimiento parcial de los requisitos para el grado de:

MAGÍSTER EN INGENIERÍA

Especialidad: Ingeniería y Energética

Por:

ARLEY JOHANY CARDONA VARGAS
Ingeniero Mecánico

Tema:

ESTUDIO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DE LA VELOCIDAD DE DEFLAGRACIÓN TURBULENTO DEL METANO A CONDICIONES SUBATMOSFÉRICAS

Director de tesis:

ANDRÉS ADOLFO AMELL ARRIETA
Ingeniero Mecánico, Magíster

Diciembre de 2017

Evaluadores:

Luis Fernando Figueira da Silva
Yohan Manuel Marín Ospina

AGRADECIMIENTOS...

A mis padres Benjamín y Margarita, a mi hermano Santiago, por su acompañamiento, ejemplo y educación, gracias a ellos que han impulsado mi formación profesional.

A los profesores del grupo de investigación, Andrés Amell Arrieta, Francisco Cadavid Sierra (Q.E.P.D), e Iván Darío Bedoya por sus conocimientos y aportes a mi proceso de formación. Agradezco especialmente al profesor Andrés Amell Arrieta por ser parte de este trabajo como director y por brindarme la oportunidad desde hace unos años atrás pertenecer al grupo GASURE.

A todos los compañeros del grupo de investigación, por el conocimiento y jornadas de discusión que se generan alrededor de diferentes temas de estudio. En especial agradezco a Alex García, Fabián Cano, Camilo Echeverri, Carlos Arrieta, Alexander Yepes, Camilo Lezcano, Camilo Uribe, Yonatan Cadavid, Danilo Valencia y Jaime Zapata por su buena disposición y acompañamiento en todo momento.

A la Universidad de Antioquia por el aporte de recursos técnicos y humanos para el desarrollo de este proyecto a través del grupo GASURE y el programa de sostenibilidad 2016-2017 para grupos de investigación, y por su aporte para mi formación como Magíster a través del programa Estudiante Instructor.

A los evaluadores de la propuesta de investigación, el profesor Andrés Fuentes de la Universidad Técnica Federico Santa María de Valparaíso en Chile, y al profesor Luis Fernando Figueira da Silva de la Pontificia Universidad Católica de Rio en Rio de Janeiro, Brasil. A los evaluadores gracias, por las recomendaciones y aportes realizadas a la propuesta de investigación que contribuyeron para su posterior aprobación.

A los evaluadores del trabajo de investigación, el profesor Luis Fernando Figueira da Silva de la Pontificia Universidad Católica de Rio en Rio de Janeiro, Brasil y a Yohan Manuel Marín Ospina. Se agradece a ambos evaluadores por las correcciones y recomendaciones realizadas al trabajo de investigación.

RESUMEN

Estudio Teórico y Experimental de la Velocidad de Deflagración Turbulenta del Metano a Condiciones Subatmosféricas

(2017)

Arley Johany Cardona Vargas, Universidad de Antioquia

Director: Msc. Andrés Adolfo Amell Arrieta

Durante varios años se ha investigado la combustión turbulenta de combustibles gaseosos en el mundo. Sin embargo, estas investigaciones se centran en estudios a condiciones atmosféricas sobre el nivel del mar (1 atm - 1013 mbar) y condiciones de alta presión y temperatura, y no se encuentran resultados de investigaciones a presiones inferiores a la atmosférica. En el caso colombiano que es un país de alto relieve se presentan las condiciones idóneas para realizar este tipo de estudios, ya que la mayoría de las ciudades están ubicadas por encima del nivel del mar. En este proyecto se levantó una línea base de la velocidad de deflagración turbulenta para el metano a condiciones cercanas de nivel del mar (0.98 atm - 991 mbar) para establecer diferencias con respecto a condiciones de Medellín (0.85 atm - 849 mbar).

Este proyecto tiene por objeto profundizar en temas importantes en la combustión, como el estudio de la combustión en régimen turbulento y el manejo de técnicas ópticas y de procesamiento de imágenes para determinar morfologías de llama. Formar personal científico con capacidades específicas en este tema, contribuyendo al aumento de la capacidad científica del país, y formando personas cada vez más competentes para el beneficio de la investigación y el sector industrial.

La velocidad de deflagración turbulenta se calculó experimentalmente usando el método del quemador, donde se generan llamas de premezcla turbulenta en un quemador tipo Bunsen, para diferentes condiciones de dosado e intensidad de turbulencia. El caudal de los gases es medido mediante rotámetros debidamente calibrados para cada gas y suministrar la cantidad exacta. Mientras que la intensidad de turbulencia es medida con un anemómetro hilo caliente de temperatura constante. Las llamas turbulentas son estabilizadas usando llamas de difusión de hidrogeno en una ranura anular alrededor del puerto del quemador. Para calcular la velocidad de deflagración turbulenta es necesario determinar el ángulo promedio de 60 imágenes, estas imágenes son obtenidas usando la técnica Schlieren que posteriormente son procesadas mediante un código de computadora y así obtener el ángulo promedio de la llama.

Los experimentos y teoría muestran que la velocidad de deflagración turbulenta aumenta a medida que aumenta la presión, igual comportamiento es presentado para la intensidad de turbulencia, donde a lo largo del documento se explica a qué son debidos estos comportamientos. Estos cambios conducen a que la relación entre la velocidad de deflagración turbulenta y laminar incrementa con la presión y con incrementos de la relación intensidad de turbulencia y velocidad de deflagración laminar. La velocidad de deflagración laminar también fue estimada y calculada en este estudio, ya que ésta es un parámetro para posteriores análisis sobre la velocidad de deflagración turbulenta, sobre la velocidad de deflagración laminar se realizaron análisis de sensibilidad.

Palabras clave: Metano, Velocidad de deflagración turbulenta, Schlieren, Anemometría de hilo caliente, Presión subatmosférica.

ABSTRACT

Theoretical and Experimental Study of Turbulent Burning Velocity of Methane at Subatmospheric Conditions

(2017)

Arley Johany Cardona Vargas, Universidad de Antioquia

Advisory: Msc. Andrés Adolfo Amell Arrieta

Turbulent combustion of fossil fuels has been widely researched, and has been focused on sea level atmospheric conditions (1 atm - 1013 mbar) and high gauge pressure and temperature. However, these researches are not available in places at sub atmospheric conditions such as some Latin American cities. Colombia is a country with a complex geography, most people live in cities located over 1000 meters above sea level. Therefore, Colombia is an ideal country for turbulent sub atmospheric pressure conditions studies. This project aims to build a turbulent combustion velocity database with two levels: sea level altitude approximately (0.98 atm - 991 mbar) and 1550 m altitude (0.85 atm - 849 mbar).

This project aims to strengthen the turbulent combustion knowledge in Colombia, applying optical technics and computational image processing, allowing the development of more efficient and reliable controllers for combustion machinery.

The turbulent burning velocity of methane was calculated experimentally by the burner method, generating turbulent premixed flames in a Bunsen nozzle type burner, for different equivalence ratios and turbulence intensities. The amount of volumetric gas flowrate was measured using rotameters that were specifically calibrated for each component gas. The turbulence intensity was measured using a constant temperature hot-wire anemometer. A hydrogen diffusion pilot flame slit with a thickness of 0.5 mm around the nozzle outlet was served to stabilize the turbulent flames. The images of the turbulent flames were captured using the Schlieren technique. The mean angle of 60 turbulent flames images was calculated using a computer code.

The experiments and theory show that the turbulent burning velocity and turbulence intensity increase with high pressures. In the following sections of the present work, this behavior is discussed. The ratio of turbulent to laminar burning velocity is seen to increase by pressures and the ratio of turbulence intensity to laminar burning velocity. The laminar burning velocity was estimated and calculated in this work as useful data for further studies in turbulent burning velocity. A sensibility analysis was conducted for the laminar burning velocity.

Keywords: Methane, Turbulent burning velocity, Schlieren, Hot wire anemometry, Sub atmospheric pressure.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	2
RESUMEN.....	3
ABSTRACT.....	4
LISTA DE FIGURAS.....	7
LISTA DE TABLAS.....	9
LISTA DE VARIABLES.....	10
CAPÍTULO I.....	12
1 Introducción.....	12
1.1 Justificación.....	12
1.2 Objetivos.....	14
1.2.1 Objetivo general.....	14
1.2.2 Objetivos específicos.....	14
CAPÍTULO II.....	15
2 Marco teórico.....	15
2.1 Flujos turbulentos.....	16
2.2 Generación de turbulencia.....	18
2.3 Características de las llamas turbulentas.....	18
2.3.1 Disipación de turbulencia en energía.....	19
2.3.2 Longitud de escalas en flujos turbulentos.....	19
2.3.3 Números adimensionales.....	20
2.4 Regímenes de combustión.....	23
2.5 Modelos teóricos para determinar la velocidad de deflagración turbulenta.....	24
CAPÍTULO III.....	26
3 Estado del arte.....	26
3.1 Métodos para determinar el perfil de llama turbulento.....	26
3.2 Efecto de la presión sobre la velocidad de deflagración turbulenta.....	29
3.3 Efecto de la presión sobre la velocidad de deflagración laminar.....	32
CAPÍTULO IV.....	36
4 Metodología.....	36
4.1 Diseño de experimentos.....	36
4.1.1 Tamaño de la muestra.....	37
4.1.2 Propagación de error.....	38
4.2 Metodología experimental.....	38
4.2.1 Combustible.....	38
4.2.2 Quemador de ensayos.....	39
4.2.3 Selección placas perforadas.....	40
4.2.4 Sitios de ensayo.....	41

4.2.5	Montaje experimental.....	42
4.2.6	Adquisición de datos y procesamiento de imágenes	46
4.2.7	Procedimiento experimental.....	47
4.3	Metodología numérica.....	48
4.3.1	Temperatura de llama adiabática.....	49
4.3.2	Velocidad de deflagración laminar.....	49
4.4	Incertidumbre	49
4.5	Análisis de resultados.....	50
CAPÍTULO V		51
5	Resultados y análisis de resultados	51
5.1	Propiedades de transporte.....	51
5.2	Temperatura de llama adiabática.....	51
5.3	Velocidad de deflagración laminar	52
5.3.1	Análisis de sensibilidad.....	54
5.3.2	Efecto de la presión sobre la velocidad de deflagración laminar	59
5.4	Espesor de llama.....	61
5.4.1	Espesor de llama difusivo	61
5.4.2	Espesor de llama térmico	62
5.5	Intensidad de turbulencia	63
5.6	Diagrama de Borghi	65
5.7	Velocidad de deflagración turbulenta.....	67
5.8	Correlaciones teóricas para determinar la velocidad de deflagración turbulenta.....	73
5.9	Correlación propuesta para la velocidad de deflagración turbulenta	75
CAPÍTULO VI.....		78
6	Conclusiones	78
CAPÍTULO VII		80
7	Bibliografía	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1. Velocidad como una función del tiempo para un punto fijo en un flujo turbulento [12].	17
Figura 2-2. Esquema general de una placa perforada.	18
Figura 2-3. Transferencia de energía turbulenta. Concepto clásico [23].	19
Figura 2-4. Espectro de la energía turbulenta, izquierda a derecha [24].	20
Figura 2-5. Diagrama de los regímenes de combustión propuesto por Borghi [12].	24
Figura 3-1. Cono promedio de la llama y contorno de la variable de progreso [5].	27
Figura 3-2. Efecto de la presión y la intensidad de turbulencia en la forma del cono promedio de la llama (a) $P = 0.1$ MPa, $U = 2$ m/s, $u' = 0.1$ m/s, $d = 1$ mm; (b) $P = 3$ MPa, $U = 2.4$ m/s, $u' = 0.5$ m/s, $d = 3$ mm [6].	27
Figura 3-3. Procedimiento para el procesamiento de imágenes realizado por Rockwell y Rangwala [36].	28
Figura 3-4. Procedimiento para el procesamiento de imágenes realizado por Wang y otros [37].	28
Figura 3-5. Relación entre la velocidad de deflagración turbulenta y la intensidad de turbulencia normalizada en función de la velocidad de deflagración laminar para varias presiones atmosféricas para llamas de metano/aire [6].	31
Figura 3-6. Resultados experimentales de la velocidad de deflagración turbulenta para metano, etileno y propano. [7].	32
Figura 3-7. Relación entre la velocidad de deflagración laminar y la presión ambiente [46].	33
Figura 4-1. Diagrama del proceso y esquema del diseño de experimentos.	37
Figura 4-2. Quemador Bunsen de premezcla turbulenta.	40
Figura 4-3. Placas perforadas para variar la intensidad de turbulencia, medidas en mm.	41
Figura 4-4. Medición de la turbulencia con el sensor hilo caliente.	41
Figura 4-5. Sistema de suministro de gases para la premezcla turbulenta metano-aire. 1. Cilindro de gas hidrógeno, 2. Regulador de presión, 3. Válvula de bola, 4. Rotámetro, 5. Válvula de aguja, 6. Cilindro de gas metano, 7. Condensador, 8. Filtro de partículas.	42
Figura 4-6. Montaje experimental para determinar la intensidad de turbulencia. 1. Base del quemador, 2. Cabeza del quemador, 3. Sonda hilo caliente (1D), 4. Porta probeta, 5. Módulo miniCTA, 6. Tarjeta de adquisición de datos, 7. Computador para el análisis de los datos.	43
Figura 4-7. Factor de autocorrelación para un punto de operación de la placa 1.	44
Figura 4-8. Diagrama del montaje experimental para la técnica Schlieren. 1. Fuente de luz, 2. Lente biconvexo, 3. Pin hole, 4. Lente plano convexo, 5. Quemador de premezcla turbulento, 6. Lente plano convexo, 7. Ranura ajustable, 8. Cámara CCD, 9. Computador.	45
Figura 4-9. Montaje experimental para la técnica Schlieren.	45
Figura 4-10. Procesamiento de imágenes de llamas de premezcla turbulenta, a). Imagen Schlieren, b). Selección del contorno del frente de llama, c). Contorno del frente de llama, d). Superposición de 60 frentes de llama, e). Variable de progreso, f). Ángulo promedio del frente de llama.	46
Figura 4-11. Comparación de la velocidad de deflagración turbulenta calculada versus el número de imágenes usadas.	47
Figura 4-12. Perfil del contorno del quemador y método del ángulo.	48
Figura 5-1. Temperatura de llama adiabática del metano a $P=0.85$ atm y $P=0.98$ atm.	52
Figura 5-2. Temperatura de llama adiabática del metano a $P=0.85$ atm y $P=0.98$ atm.	52
Figura 5-3. Velocidad de deflagración laminar del metano a condiciones atmosféricas de nivel del mar y a condiciones atmosféricas de la ciudad de Medellín.	53
Figura 5-4. Análisis de sensibilidad de los parámetros cinéticos para la velocidad de deflagración laminar, $\phi = 1.0$.	54
Figura 5-5. Análisis de sensibilidad de los parámetros cinéticos para la velocidad de deflagración laminar, $\phi = 0.8$.	55
Figura 5-6. Tasa de producción total de HO_2 a). $\phi = 1.0$ b). $\phi = 0.8$.	56

Figura 5-7. Fracción molar de CH_3 y tasa de consumo de CH_3 para las reacciones R52 ($\text{H} + \text{CH}_3 (+\text{M}) = \text{CH}_4 (+\text{M})$), R158 ($2\text{CH}_3 (+\text{M}) = \text{C}_2\text{H}_6 (+\text{M})$), y R10 ($\text{O} + \text{CH}_3 = \text{H} + \text{CH}_2\text{O}$) para $\phi = 1.0$. a). 0.85 atm. b). 0.98 atm. 58

Figura 5-8. Fracción molar de CH_3 y tasa de consumo de CH_3 para las reacciones R52 ($\text{H} + \text{CH}_3 (+\text{M}) = \text{CH}_4 (+\text{M})$), R158 ($2\text{CH}_3 (+\text{M}) = \text{C}_2\text{H}_6 (+\text{M})$), y R10 ($\text{O} + \text{CH}_3 = \text{H} + \text{CH}_2\text{O}$) para $\phi = 0.8$. a). 0.85 atm. b). 0.98 atm. 59

Figura 5-9. Velocidad de deflagración laminar del metano en función de la presión para diferentes dosados. 60

Figura 5-10. Espesor del frente de llama difusivo del metano a condiciones atmosféricas de nivel del mar y a condiciones atmosféricas de la ciudad de Medellín. 62

Figura 5-11. Espesor del frente de llama térmico del metano a condiciones atmosféricas de nivel del mar y a condiciones atmosféricas de la ciudad de Medellín. 63

Figura 5-12. Intensidad de turbulencia de las placas perforadas $P = 0.85$ atm, a) Intensidad de turbulencia relativa, b) Intensidad de turbulencia absoluta. SP = Sin placa, P1 = Placa 1, P2 = Placa 2, P3 = Placa 3. 64

Figura 5-13. Intensidad de turbulencia de las placas perforadas $P = 0.98$ atm, a) Intensidad de turbulencia relativa, b) Intensidad de turbulencia absoluta. SP = Sin placa, P1 = Placa 1, P2 = Placa 2, P3 = Placa 3. 65

Figura 5-14. Ubicación de los puntos de ensayo en el diagrama de Borghi. 67

Figura 5-15. Relación de la velocidad de deflagración turbulenta y la velocidad de deflagración laminar en función de relación entre la intensidad de turbulencia sobre la velocidad de deflagración laminar. 68

Figura 5-16. Velocidad de deflagración turbulenta versus intensidad de turbulencia. 68

Figura 5-17. Escala de Kolmogorov versus intensidad de turbulencia. 70

Figura 5-18. Relación entre la presión ambiente y las escalas de turbulencia ($U = 2.0$ m/s, $d = 2.0$ mm) [46]. 71

Figura 5-19. Relación entre la presión ambiente y la intensidad de turbulencia ($U = 2.0$ m/s, $d = 2.0$ mm) [46]. 71

Figura 5-20. Correlaciones teóricas y datos experimentales del presente trabajo para la velocidad de deflagración turbulenta a 0.98 atm y 297 K. a) $\phi = 1.0$, b) $\phi = 0.8$ 74

Figura 5-21. Correlaciones teóricas y datos experimentales del presente trabajo para la velocidad de deflagración turbulenta a 0.85 atm y 297 K. a) $\phi = 1.0$, b) $\phi = 0.8$ 75

Figura 5-22. Correlación de la velocidad de deflagración turbulenta S_T/S_L y u'/S_L para mezcla CH_4/aire a 0.98 atm y 297 K. 76

Figura 5-23. Correlación de la velocidad de deflagración turbulenta S_T/S_L y u'/S_L para mezcla CH_4/aire a 0.85 atm y 297 K. 76

Figura 5-24. Correlación de la velocidad de deflagración turbulenta S_T/S_L y u'/S_L para mezcla CH_4/aire a 0.85 atm y 297 K, respecto a 0.98 atm y 297 K. 77

LISTA DE TABLAS

Tabla 2-1. Ecuaciones para la velocidad de deflagración turbulenta.	25
Tabla 3-1. Correlaciones de diferentes bases de datos para la velocidad de deflagración turbulenta.....	30
Tabla 3-2. Constantes utilizadas en el modelo de la Ecuación 51 [14].	34
Tabla 3-3. Valores para la constante β_1 en el modelo de Ubbelohde y Koelliker [54].	34
Tabla 3-4. Valores para la constante β_2 en el modelo de Agnew y Graiff [54].....	35
Tabla 4-1. Estado de la composición del metano.	38
Tabla 4-2. Propiedades de combustión del metano.	39
Tabla 4-3. Parámetros geométricos de las placas perforadas seleccionadas.	40
Tabla 4-4. Ubicación geográfica de los sitios de ensayo.	41
Tabla 4-5. Continuaciones.....	49
Tabla 5-1. Propiedades de transporte de la pmezcla metano/aire*.	51
Tabla 5-2. Valores para las constantes a y b.	60
Tabla 5-3. Propiedades de las mezclas en el presente estudio.	66
Tabla 5-4. Velocidad de deflagración turbulenta e intensidad de turbulencia para las condiciones de estudio.	70

LISTA DE VARIABLES

S_T	Velocidad de deflagración turbulenta	m/s
S_L	Velocidad de deflagración laminar	m/s
ϕ	Dosado	-
u' o u'_{rms}	Intensidad de turbulencia absoluta	m/s
$u'(\%)$	Intensidad de turbulencia relativa	%
$u'(t)$	Fluctuación de la velocidad	m/s
P	Presión de la premezcla	MPa
P_0	Presión de referencia = 0.1 MPa	MPa
n	Orden de una reacción global	-
S_D	Velocidad de desplazamiento local	m/s
\bar{S}_D	Velocidad de desplazamiento global	m/s
S_C	Velocidad de consumo local	m/s
\bar{S}_C	Velocidad de consumo global	m/s
\dot{m}	Tasa de flujo reactivo	Kg/s
ρ_u	Densidad de la premezcla sin quemar	Kg/m ³
ρ_b	Densidad de la premezcla quemada	Kg/m ³
\bar{A}	Área de la llama promediada en el tiempo	m ²
Re	Número de Reynolds	-
V	Velocidad de flujo	m/s
d	Diámetro	m
C	Constante Ecuación 5	-
n	Constante Ecuación 5	-
δ o δ_L	Espesor de Zeldovich o espesor difusivo de llama	mm
v_u	Velocidad de los gases sin quemar	m/s
v_b	Velocidad de los gases quemados	m/s
λ	Conductividad térmica	W/mK
c_p	Calor específico de la mezcla a presión constante	KJ/Kmol.K
$c_{p,i}$	Calor específico de la especie i	KJ/Kmol.K
h_i	Entalpia de la especie i	KJ/Kg
D_{th}	Difusividad térmica	m ² /s
δ_L^0	Espesor térmico	mm
R_u	Constante universal de los gases	kPa. m ³ Kmol. K
\bar{p}	Valor medio de cualquier propiedad del flujo	-
Δt	Intervalo de tiempo para la medición de la propiedad	s
$p(t)$	Valor instantáneo de la propiedad	-
$p'(t)$	Fluctuación de la propiedad	-
σ	Porcentaje de área bloqueada	%
$A_{Bloqueada}$	Área bloqueada de la placa turburizadora	m ²
A_{Total}	Área total de flujo	m ²
L	Ancho característico del flujo o macroescala	m
l_o	Longitud de escala integral	mm
l_λ	Microescala de Taylor	mm
l_K	Microescala de Kolmogorov	mm
ν	Viscosidad cinemática	m ² /s
μ	Viscosidad dinámica	Kg m. s
ε	Disipación de la energía	m ² /s ³
Re_o	Número de Reynolds integral	-
Da	Número de Damköhler	-

Ka	Número de Karlovitz	-
Sc	Número de Schmidt, Ecuación 24	-
Le	Número de Lewis	-
Pr	Numero de Prandtl	-
D	Difusividad molecular	m ² /s
A _L	Área del frente de llama laminar	m ²
A _T	Área de la sección transversal de una llama arrugada	m ²
c(x, y)	Variable de progreso	-
⟨c⟩	Variable de progreso promedio	-
α	Constante de la Ecuación 45	-
β	Constante de la Ecuación 45	-
α _T	Constante de la Ecuación 51	-
α _P	Constante de la Ecuación 51	-
β ₁	Constante de la Ecuación 52	-
β ₂	Constante de la Ecuación 53	-
b	Constante de la Ecuación 65	-
a	Constante de la Ecuación 65	$\frac{\text{cm}}{\text{s} \cdot (\text{bar})^b}$
Sr	Número de Strouhal	-
C ₁	Constante de la Ecuación 70	-
C ₂	Constante de la Ecuación 70	-
slpm	Litros estándar por minuto	-
U	Velocidad promedio de la premezcla	m/s
Q _f	Caudal en sitio de combustible en la premezcla	m ³ /s
Q _a	Caudal en sitio de aire en la premezcla	m ³ /s
A _b	Área del puerto del quemador	m ²
α	Ángulo del frente de llama	°
σ ₁	Tasa de crecimiento	s ⁻¹

CAPÍTULO I

1 INTRODUCCIÓN

De una manera breve en este capítulo se explica la importancia de realizar este tipo de estudio en el contexto colombiano, dando una orientación al lector de que se quiere obtener, además de presentar los objetivos propuestos para alcanzar su ejecución y aplicación.

1.1 Justificación

La velocidad de deflagración laminar es un parámetro de caracterización de una llama de premezcla laminar, ya que suministra información físico química de la mezcla combustible que permite el estudio y prevención de fenómenos indeseables como la extinción, el desprendimiento de llama y la retro llama [1–3], sin embargo pocos equipos de combustión operan bajo este régimen, y por el contrario muchos equipos de combustión como calderas, motores, turbinas a gas y entre otros operan bajo el régimen de combustión turbulenta, por lo que es pertinente la profundización y estudio de este tema.

A nivel mundial se han realizado diferentes estudios sobre la combustión en régimen turbulento del metano a condiciones atmosféricas de nivel del mar y a condiciones elevadas de presión y temperatura [4–7], sin embargo para condiciones subatmosféricas, se tienen pocas o nulas referencias y estudios, esto se debe principalmente a que en el mundo la mayoría de centros de investigación tienen sus instalaciones a nivel del mar y también a que gran parte de las aplicaciones energéticas en los sectores industriales y residenciales en muchos países se realizan a estas condiciones atmosféricas.

En Latino América muchas ciudades importantes están localizadas a grandes altitudes, La Paz (3719 m.s.n.m.), Ciudad de México (2240 m.s.n.m.), Quito (2850 m.s.n.m.) [8] y en el caso colombiano se encuentran ciudades como Santa Fe de Bogotá (2600 m.s.n.m.) y Medellín (1550 m.s.n.m.) [8], lo que genera laboratorios naturales para experimentación a baja presión, es decir, a presiones menores de 1 atm, lo que en la literatura se conoce como condición subatmosférica. Es importante conocer como las propiedades de combustión varían en estas condiciones, en este caso el estudio de la velocidad de deflagración turbulenta, ya que equipos de combustión como calderas, motores de combustión interna, turbinas, operan bajo el régimen de combustión turbulenta y son utilizados en la industria y el transporte en Colombia.

La velocidad de deflagración turbulenta es uno de los parámetros fundamentales para caracterizar una llama de premezcla turbulenta, debido al efecto de la presión sobre: la sensibilidad de las reacciones químicas elementales, los fenómenos difusivos (difusividad térmica y difusividad molecular), del número de Reynolds en la escala integral, el espesor del frente de llama laminar y la velocidad de deflagración laminar, y también al efecto combinado de estos factores, se espera entonces que con respecto al comportamiento de la velocidad de deflagración turbulenta a condiciones atmosféricas (1 atm - 1013 mbar), está presente variaciones importantes a condiciones subatmosféricas (0.85 atm - 849 mbar). Esta consideración plantea la hipótesis de trabajo de este proyecto. Esta hipótesis se evidencia del siguiente análisis:

Muchas correlaciones entre la velocidad de deflagración laminar y la velocidad de deflagración turbulenta han sido estudiadas en términos generales por diferentes autores [9–11], también estudios se han centrado en el estudio de llamas de premezcla de metano y aire, llegando a correlaciones para la velocidad de deflagración turbulenta $S_T = f(S_L, u', P)$ en función de la velocidad de deflagración laminar, la intensidad de turbulencia y la presión.

Kobayashi y otros [5] plantean la siguiente correlación, encontrada experimentalmente para un rango de presiones desde presión atmosférica hasta una presión de 9.87 atm y temperatura de la mezcla de 300 K y 573 K fue medida:

$$\frac{S_T}{S_L} = 5,04 \left[\left(\frac{P}{P_0} \right) \left(\frac{u'}{S_L} \right) \right]^{0,38} \quad \text{Ecuación 1}$$

En dónde S_T es la velocidad de deflagración turbulenta, S_L es la velocidad de deflagración laminar, u' es la intensidad de turbulencia, P es la presión de la premezcla (rango de 0.99 atm a 9.87 atm), y P_0 es la presión de referencia (0.99 atm).

De la ecuación anterior se observa el efecto directo de la presión de la premezcla sobre la velocidad de deflagración turbulenta, se espera que cuando la presión aumente la velocidad de deflagración turbulenta aumente.

Como se observa en la Ecuación 1, la velocidad de deflagración laminar es un parámetro que tiene influencia directa sobre la velocidad de deflagración turbulenta, por lo que esta es un punto importante de partida para realizar análisis de la velocidad de deflagración turbulenta.

De los análisis realizados por Turns [12], donde se determina una expresión analítica para la velocidad de deflagración laminar en función de la presión, se tiene:

$$S_L \propto P^{(n-2)/2} \quad \text{Ecuación 2}$$

En dónde S_L es la velocidad de deflagración laminar, P es la presión de la premezcla, y n es el orden de la reacción global.

Y en este caso para una reacción global para el metano con orden igual a 1, y apoyados en la Ecuación 2, a manera general se puede concluir que a medida que aumenta la presión la velocidad de deflagración laminar disminuye.

$$S_L \propto P^{-0,5} \quad \text{Ecuación 3}$$

En estudios realizados por el grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía (GASURE) de la Universidad de Antioquia sobre la velocidad de deflagración laminar para las mezclas gas natural/gas de síntesis experimental y numéricamente a diferentes alturas sobre el nivel del mar, se concluye que a medida que aumenta la presión disminuye la velocidad de deflagración laminar [13].

Otro factor importante a considerar en este experimento, es que cuando se generan cambios de presión atmosférica, ocurren cambios en el campo de velocidad de la premezcla, pudiendo ocurrir variaciones importantes en el orden de magnitud de la intensidad de turbulencia de la premezcla, con lo cual puede afectarse la velocidad de deflagración turbulenta. Esta hipótesis debe ser analizada con más detalle y se espera que en el transcurso del trabajo se pueda concluir algo al respecto.

Colombia es un país que tiene deficiencias en estudio y apropiación de conocimientos en ciertos temas relacionados con la combustión del gas y al realizar este proyecto se busca avanzar en temas como combustión en régimen turbulento y en el manejo de técnicas ópticas y de

procesamiento de imágenes para determinar morfologías de llama, formando personal científico con capacidades específicas en este tema, contribuyendo con el aumento de la capacidad científica del país.

En el contexto anteriormente descrito en condiciones subatmosféricas correspondiente a un sitio con presión atmosférica de 0.85 atm correspondiente a 1550 metros sobre el nivel del mar, en este proyecto se pretende determinar teórica y experimentalmente la velocidad de deflagración turbulenta para el gas natural en el rango de mezcla estequiometría y pobre, adicionalmente se tendrán en cuenta las condiciones de inestabilidades intrínsecas y extrínsecas, como también condiciones críticas de extinción por excesiva turbulencia, que no permitan la medición experimental.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Estudiar teórica y experimentalmente la velocidad de deflagración turbulenta a condiciones subatmosféricas correspondientes a un sitio a 1500 metros sobre el nivel del mar, para compararla con la obtenida en condiciones atmosféricas, para una premezcla pobre y estequiométrica de metano.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analizar teóricamente la velocidad de deflagración turbulenta del metano a condiciones subatmosféricas correspondientes a un sitio a 1550 metros sobre el nivel del mar y condiciones atmosféricas, para mezcla estequiométrica y pobre.
- Desarrollar una metodología experimental para determinar la velocidad de deflagración turbulenta de una premezcla de metano.
- Determinar experimentalmente la velocidad de deflagración turbulenta del metano a condiciones subatmosféricas correspondientes a un sitio a 1550 metros sobre el nivel del mar y condiciones atmosféricas, para mezcla estequiométrica y pobre.

CAPÍTULO II

2 MARCO TEÓRICO

La combustión es un proceso químico en el cual mediante la reacción química de oxidación se libera energía almacenada en el combustible en forma de calor y luz en algunos casos, sin embargo, este fenómeno se ve afectado por muchas condiciones y dependiendo de estas condiciones las características y fenómenos presentes en la combustión. En este caso cuando consideramos la combustión en régimen turbulento, fenómenos como la oxidación, transferencia de calor y características del flujo turbulento, se desarrollan de forma muy distintas.

Para explicar cómo se desarrolla la combustión turbulenta es necesario introducir una serie de conceptos fundamentales que faciliten el entendimiento y comprensión para posteriormente analizar los resultados obtenidos en el trabajo. Además de esto esta definición de conceptos proporciona al lector elementos fundamentales para la lectura y entendimiento de los diferentes capítulos desarrollados en el trabajo.

Durante este desarrollo de conceptos fundamentales básicamente se busca dar una mirada general a lo que es la combustión turbulenta, empezando por definir que es la velocidad de deflagración turbulenta, para esto es necesario dar una introducción a lo que es una llama de premezcla y como se caracteriza en régimen laminar, luego se introducen conceptos básicos de turbulencia relacionando la fluctuación de propiedades en un campo de flujo turbulento, para luego proporcionar características de las llamas de premezcla turbulentas y condiciones características en este régimen, proporcionando modelos y métodos para desarrollar la velocidad de deflagración turbulenta.

La velocidad de deflagración turbulenta es muy diferente de la velocidad de deflagración laminar, esta última depende solo de propiedades térmicas y químicas de la premezcla. Por el contrario, la velocidad de deflagración turbulenta tiene una velocidad de propagación que depende de las características del flujo como de las propiedades de la premezcla. Sin embargo, una definición universalmente aceptada para la velocidad de deflagración turbulenta no está disponible. En la literatura se encuentran dos definiciones principales, que son la velocidad de desplazamiento y la velocidad de consumo. La velocidad de desplazamiento puede ser dividida en cantidades locales y globales, S_D y \bar{S}_D , e igualmente para la velocidad de consumo S_C y \bar{S}_C . La velocidad de desplazamiento local S_D es la velocidad relativa entre el contorno de la llama y la velocidad del gas en alguna distancia definida delante de la llama. La velocidad de consumo global puede ser definida como la velocidad en que la premezcla sin quemar entra a la zona de llama en dirección normal. A partir de esto la superficie de la llama es asumida como una cantidad promediada en el tiempo, ya que el frente de llama instantáneo fluctúa con la turbulencia. Puesto que es difícil medir la velocidad de la premezcla sin quemar cerca de la llama turbulenta, la velocidad de la llama es determinada a partir de la medición de la tasa de flujo reactivo [12]. Así, la velocidad de consumo puede ser definida como:

$$\bar{S}_C = \frac{\dot{m}}{\bar{A}\rho_u} \quad \text{Ecuación 4}$$

En dónde \dot{m} es la tasa de flujo reactivo, ρ_u es la densidad de la mezcla sin quemar, y \bar{A} es el área de la llama promediada en el tiempo [12].

En este trabajo de investigación, la definición de velocidad de deflagración turbulenta (S_T) está basada en la velocidad de consumo global \bar{S}_C .

Los modelos para la propagación de llamas turbulentas se han desarrollado desde muchos años atrás. Los trabajos más referenciados son los realizados por Damköhler y Shchelkin que proveen los primeros modelos para estimar la velocidad de deflagración turbulenta [14–16], y a pesar de numerosas investigaciones, un modelo universal para describir la propagación de una llama turbulenta está lejos de convertirse en una realidad. Ya que es bastante complejo en una llama de premezcla turbulenta lograr el acople entre flujos reactivos y la turbulencia, termodinámica y cinética química.

Los estudios realizados por Damköhler muestran que la velocidad de deflagración turbulenta incrementa con el incremento del número de Reynolds (Re). Después identificó dos regiones donde la velocidad de deflagración turbulenta es afectada por diferentes escalas de turbulencia. Esas regiones son identificadas como regímenes de combustión.

En muchos sistemas de combustión se presenta combustión en régimen turbulento, por ejemplo, en motores, calderas y hornos, la turbulencia genera efectos como mayor intensidad de mezclado entre el combustible y el comburente con lo cual se acelera la tasa de liberación de calor respecto a llamas de premezcla laminar [12]. La turbulencia tiene efectos sobre el perfil de la llama, ya que el perfil ordenado que se presenta en las llamas de premezcla laminar se distorsiona afectándose la estructura y estabilidad de la llama.

En cualquier llama de premezcla turbulenta uno de los parámetros más importantes es la velocidad de deflagración turbulenta, la velocidad de deflagración turbulenta se define al igual que en una llama laminar como la rapidez con que se transmite la combustión de la zona inquemada hacia la zona quemada.

El efecto de la turbulencia sobre una llama puede ser definido para varios regímenes en función de las escalas de longitud, velocidad y tiempo químico. Se han propuesto dos regímenes de interacción para la mejora de la velocidad de deflagración en régimen turbulento [9]:

1. Aumento en el transporte de calor y masa por la turbulencia de pequeñas escalas.
2. Aumento en el área superficial debido a las arrugas de la llama por grandes eddies turbulentos.

La velocidad de deflagración turbulenta depende básicamente de la relación combustible-aire (dosado), presión, temperatura, intensidad de turbulencia y de la velocidad de deflagración si la premezcla fuera laminar. De forma general la velocidad de deflagración turbulenta se puede expresar en la forma que tiene la Ecuación 5 [17]:

$$\frac{S_T}{S_L} = 1 + C \left(\frac{u'}{S_L} \right)^n \quad \text{Ecuación 5}$$

En dónde S_T es la velocidad de deflagración turbulenta, S_L es la velocidad de deflagración laminar definida a las condiciones de presión, temperatura y dosado a la que se encuentra la premezcla turbulenta, u' es la intensidad de turbulencia, y C y n son constantes.

2.1 Flujos turbulentos

Los flujos turbulentos resultan cuando las inestabilidades en el flujo no son suficientemente atenuadas por la acción de las fuerzas viscosas y la velocidad del fluido en cada punto del flujo experimenta fluctuaciones aleatorias [12]. En flujos turbulentos los procesos de transporte de cantidad de movimiento, calor y masa son realizados por el movimiento de eddies turbulentos [9]. Los flujos turbulentos se caracterizan por la inestabilidad aleatoria de varias propiedades de

flujo, como se muestra en la Figura 2-1. Para caracterizar un campo de flujo turbulento se suelen definir propiedades medias y cantidades fluctuantes.

La media de una propiedad se define tomando un intervalo de tiempo de la propiedad sobre un intervalo de tiempo lo suficientemente grande, como se muestra en la Ecuación 6:

$$\bar{p} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt \quad \text{Ecuación 6}$$

En dónde \bar{p} es el valor medio de cualquier propiedad del flujo (velocidad, temperatura, presión, etc), Δt es el intervalo de tiempo para la medición de la propiedad, y $p(t)$ es el valor instantáneo de la propiedad.

La fluctuación de una propiedad se define como la diferencia entre el valor instantáneo de la propiedad y el valor medio, como se observa en la Ecuación 7:

$$p'(t) = p(t) - \bar{p} \quad \text{Ecuación 7}$$

En dónde $p'(t)$ es la fluctuación de la propiedad, $p(t)$ es el valor instantáneo de la propiedad, y \bar{p} es el valor medio de cualquier propiedad del flujo (velocidad, temperatura, presión, etc).

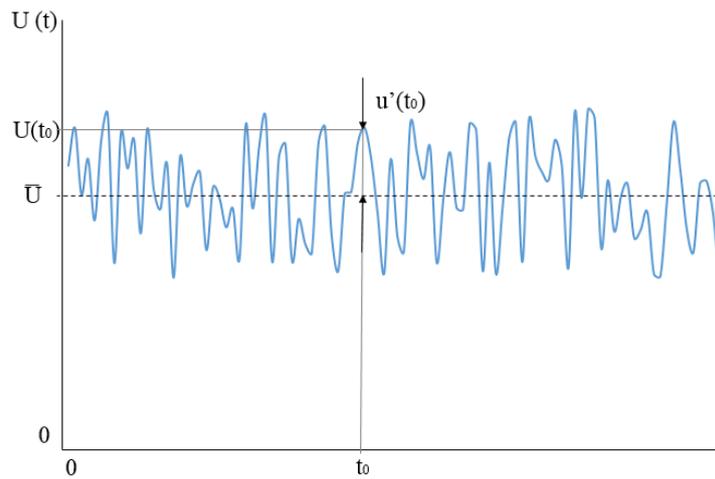


Figura 2-1. Velocidad como una función del tiempo para un punto fijo en un flujo turbulento [12].

La resistencia a la turbulencia se caracteriza generalmente por la intensidad de turbulencia relativa u' , que es la relación entre la raíz cuadrada media de las fluctuaciones $u'(t)$ y el valor medio \bar{u} , la expresión para determinar la intensidad de turbulencia está dada por la Ecuación 8.

$$u' = \frac{\sqrt{\overline{u'(t)^2}}}{\bar{u}} \quad \text{Ecuación 8}$$

Valores típicos para la intensidad de turbulencia u' van desde 0 (en flujos laminares) a decenas porcentuales en flujos turbulentos. Sin embargo, la intensidad de turbulencia no es un parámetro suficiente para describir la combustión turbulenta. Un tema importante es como la energía turbulenta es distribuida sobre las diferentes longitudes de escala presentes en un campo de flujo y que llevan la energía suficiente para interactuar con el frente de llama como se observa en la Figura 2-4.

2.2 Generación de turbulencia

Una de formas más comunes de generación de turbulencia para este tipo de estudio es la instalación de dispositivos de obstrucción de flujo antes de la zona de reacción. De acuerdo a la revisión realizada en el estado del arte se encontró que las placas perforadas es una de las alternativas de mejor adaptación, bajo costo y buen funcionamiento [5, 18].

Las placas perforadas se han usado inicialmente para la medición de caudal, estableciendo relaciones entre el caudal que fluye a través de la placa y la caída de presión que se produce, y debido a esto se generan diferentes estudios para caracterizar como esta relación es afectada por parámetros geométricos y condiciones de operación [19]. En la Figura 2-2 se presenta el esquema general de una placa perforada utilizada para bloquear una parte del área de flujo a través de la cual puede fluir un fluido al interior de un ducto. Esta obstrucción generada por las placas genera que las corrientes de flujo previamente ordenadas, se desordenen y tomen un régimen turbulento aguas abajo de la placa. Y por eso esta opción de placas perforadas toma una importante aplicación, para simular condiciones reales a escala de laboratorio de turbulencia, con un bajo costo y relativa facilidad de adaptación al sistema. La generación de turbulencia producida mediante la instalación de placas perforadas es el resultado de la caída de presión y transmitida en energía en forma de turbulencia [20].

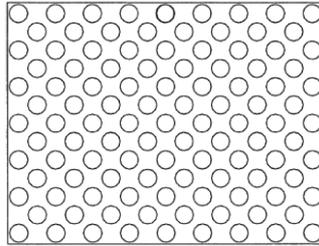


Figura 2-2. Esquema general de una placa perforada.

En general para caracterizar una placa perforada se utiliza el parámetro σ , el cual relaciona el área sólida de la placa con el área total de flujo de fluido, y se determina como el porcentaje de área bloqueada tal como muestra la Ecuación 9.

$$\sigma = \frac{A_{\text{Bloqueada}}}{A_{\text{Total}}} \quad \text{Ecuación 9}$$

En diferentes estudios [21, 22] experimentalmente se ha demostrado que la turbulencia generada a través de un flujo al pasar por una placa perforada es casi isotrópica (La forma más simple de turbulencia es la turbulencia isotrópica, ya que se requiere el menor número de parámetros para su descripción), generada por la interacción de chorros detrás de la obstrucción, de manera que aguas debajo de la placa generadora de turbulencia, el flujo medio se vuelve uniforme y la turbulencia es homogénea y aproximadamente isotrópica, y además en estos estudios se asume que la turbulencia es homogénea en el plano perpendicular al flujo medio.

2.3 Características de las llamas turbulentas

Los flujos turbulentos, si son reactivos o no, están usualmente caracterizados por la longitud y tiempos de escala, la fluctuación de la intensidad de turbulencia, de la difusividad térmica y molecular, y de números adimensionales. Esta información podría ser usada con propósitos de escalar y comparar.

2.3.1 Disipación de turbulencia en energía

En flujos turbulentos la energía desde el flujo medio es transferida a través de los remolinos grandes a las estructuras finas donde la energía mecánica es disipada en calor. Este proceso se describe de forma gráfica en la Figura 2-3.

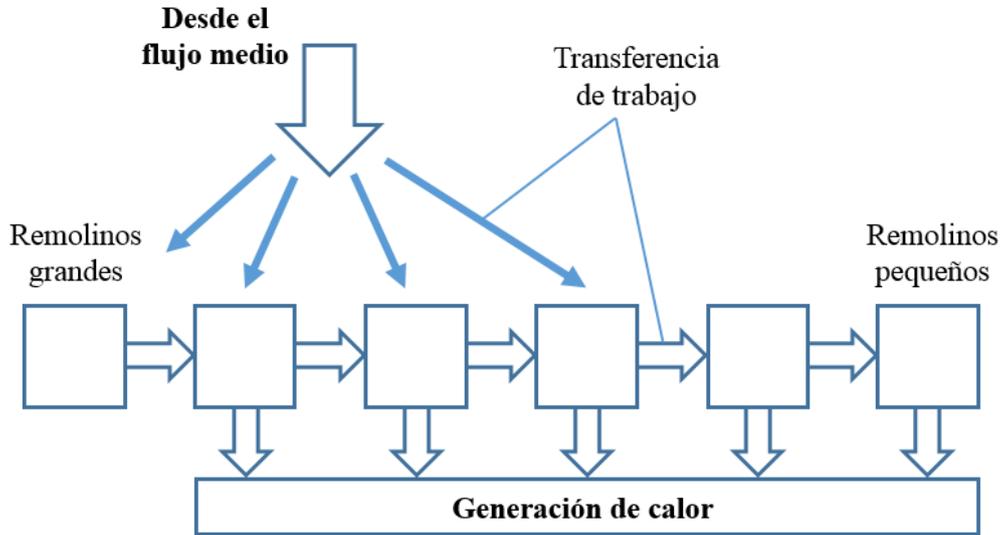


Figura 2-3. Transferencia de energía turbulenta. Concepto clásico [23].

En general, los altos números de Reynolds de flujos turbulentos consistirán en un espectro de remolinos de diferentes tamaños. La energía mecánica es principalmente transferida entre estructuras de remolinos vecinos como se indica en la Figura 2-3. Por la misma razón la principal producción de energía cinética turbulenta será realizada por la interacción entre los grandes remolinos y el flujo medio. La disipación de la energía cinética en calor, que es debida al trabajo hecho por las fuerzas moleculares sobre los remolinos de turbulencia, principalmente toma lugar en los remolinos más pequeños.

2.3.2 Longitud de escalas en flujos turbulentos

La energía turbulenta se distribuye en diferentes escalas de longitud que llevan suficiente energía para interactuar con el frente de llama, como se observa en la Figura 2-4. Las fluctuaciones turbulentas se asocian a diferentes escalas que van desde la escala más grande, la escala integral l_0 , a una de las más pequeñas, la escala de longitud de Kolmogorov l_K .

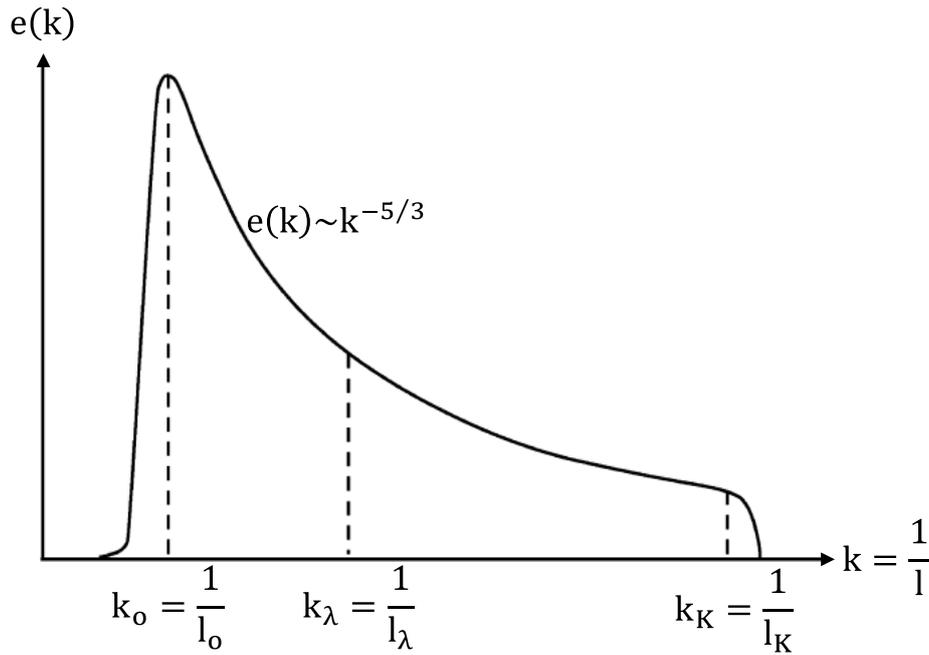


Figura 2-4. Espectro de la energía turbulenta, izquierda a derecha [24].

En turbulencia de forma general se definen las siguientes cuatro escalas, en orden decreciente de tamaño, estas escalas son:

L Ancho característico del flujo o macroescala

l_0 Escala integral

Conocida también como macroescala, es el tamaño más grande de los eddies en el flujo que es del orden del tamaño del puerto del quemador o el tamaño del ducto donde se da la turbulencia. Los eddies de este tamaño también contienen la mayor cantidad de la energía cinética.

l_λ Microescala de Taylor

Es la escala intermedia que es igual a la distancia en que un gran eddie por convección se convierte en un eddie de Kolmogorov durante su tiempo de rotación, t_n . Eddies de este tamaño reciben energía desde los eddies de la longitud integral y es disipada por los eddies de Kolmogorov. Estos son también un tamaño característico de los eddies que son más activos.

l_K Microescala de Kolmogorov

Es el tamaño más pequeño de los eddies a través del flujo donde la disipación de la energía cinética de la energía interna del fluido se lleva a cabo.

2.3.3 Números adimensionales

En un flujo la longitud de escala integral es en general cercana al tamaño característico de la corriente, se tiene así que la longitud de escala integral de un flujo por un ducto es del orden del tamaño del diámetro del ducto. Como se dijo anteriormente la energía turbulenta se distribuye en diferentes escalas de longitud, por lo que es necesario introducir el número de Reynolds $Re(r)$ para cada escala de turbulencia:

$$Re(r) = \frac{u'(r)r}{\nu} \quad \text{Ecuación 10}$$

En dónde, $u'(r)$ es la velocidad característica del movimiento del tamaño r , ν es la viscosidad cinemática del flujo.

Cuando r corresponde a la escala integral l_o , el número de Reynolds correspondiente es el número de Reynolds integral [25]:

$$Re_o = Re(l_o) = \frac{u' l_o}{\nu} \quad \text{Ecuación 11}$$

Dado que el número de Reynolds representa la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas, las escalas más grandes del flujo turbulento son controladas por la inercia y no se ven afectadas por la disipación viscosa.

La disipación de la energía se da de las escalas más grandes a las escalas más pequeñas y está dada por la disipación de la energía cinética k . Esa disipación ε se estima como la relación de la energía cinética, dividida por la escala de tiempo:

$$\varepsilon = \frac{u'^2(r)}{r/u'(r)} = \frac{u'^3(r)}{r} \quad \text{Ecuación 12}$$

A lo largo de la escala, el número de Reynolds $Re(r)$ desciende de Re_o a valores cercanos a la unidad, donde las fuerzas inerciales y viscosas son balanceadas. Este límite determina la escala más pequeña de un flujo turbulento, la escala de Kolmogorov, controlada por la viscosidad y por la tasa de disipación ε de la energía cinética k [25].

$$l_K = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{1/4} \quad \text{Ecuación 13}$$

$$Re_K = Re(l_K) = \frac{u' l_K}{\nu} = \frac{\varepsilon^{1/3} l_K^{4/3}}{\nu} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$\frac{l_o}{l_K} = \frac{u'^3/\varepsilon}{(\nu^3/\varepsilon)^{1/4}} = Re_o^{3/4} \quad \text{Ecuación 15}$$

Número de Damköhler

Este es un parámetro adimensional importante en combustión y es bastante utilizado para la comprensión de llamas de premezcla turbulenta, representa la relación del tiempo de flujo característico o tiempo de mezclado a un tiempo químico característico:

$$Da = \frac{\text{Tiempo de flujo característico}}{\text{Tiempo químico característico}} = \frac{\tau_{\text{flujo}}}{\tau_{\text{químico}}} \quad \text{Ecuación 16}$$

Tiempo de flujo característico

$$\tau_{\text{flujo}} = \frac{r}{u'(r)} = \frac{r^{2/3}}{\varepsilon^{1/3}} \quad \text{Ecuación 17}$$

Tiempo químico característico

$$\tau_{\text{químico}} = \frac{\delta}{S_L} \quad \text{Ecuación 18}$$

La evaluación de este número depende de la situación de estudio, en el caso de llamas de premezcla, el tiempo de flujo característico es el tiempo de vida de los grandes eddies en el flujo (τ_{flujo}) y tiempos químicos basados en la llamas laminares ($\tau_{\text{químico}}$).

Cuando se tienen números de $Da \gg 1$ se define un régimen de química rápida, debido a que las tasas de reacción química son mucho más rápidas que las tasas de mezclado del flujo, mientras que para $Da \ll 1$ las tasas de reacción son mucho más lentas que las tasas de mezclado del flujo. El número de Damköhler se puede definir para los grandes eddies y corresponde a la relación de la escala de tiempo característico a la escala química [25].

$$Da = Da(l_o) = \frac{\tau_t}{\tau_c} = \frac{\tau_{\text{flujo}}(l_o)}{\tau_c} = \frac{l_o/u'(l_o)}{\delta/s_L} \quad \text{Ecuación 19}$$

El número de Karlovitz, Ka , corresponde a los pequeños eddies (Escala de Kolmogorov) y es la relación de la escala de tiempo químico al tiempo de Kolmogorov:

$$Ka = \frac{1}{Da(l_K)} = \frac{\tau_c}{\tau_K} = \frac{u'(l_K)/l_K}{s_L/\delta} \quad \text{Ecuación 20}$$

$$Ka = \left(\frac{l_o}{\delta}\right)^{-1/2} \left(\frac{u'}{s_L}\right)^{3/2} = \left(\frac{\delta}{l_K}\right)^2 = \frac{\sqrt{\varepsilon/\nu}}{s_L/\delta} \quad \text{Ecuación 21}$$

El número de Reynolds turbulento basado en la escala integral, puede ser expresado

$$Re_o = \frac{u'l_o}{\nu} = \left(\frac{u'}{s_L}\right) \left(\frac{l_o}{\delta}\right) \quad \text{Ecuación 22}$$

Reorganizando la Ecuación 19, Ecuación 20, Ecuación 21, y la Ecuación 22 se tiene,

$$Re_o = Da^2 Ka^2 \quad \text{Ecuación 23}$$

De lo anterior se pueden desprender los siguientes análisis, cuando $Ka < 1$

- $u' < s_l$: la velocidad de los movimientos turbulentos son demasiado bajos para arrugar el frente de llama para lograr interacciones de la llama. Este régimen se define como: **Wrinkled laminar flame regime.**
- $u' > s_l$: los movimientos de la velocidad turbulenta se hacen más grandes que la velocidad de la llama. Los movimientos turbulentos son capaces de arrugar el frente de llama, hasta interacciones que conducen a la formación de bolsas, de los gases sin quemar y quemados. Este régimen se define como: **Thin flame regime with pockets o Corrugated flamelet regime.**

Otros números adimensionales que relacionan viscosidades (Difusión de momento) y difusividades son el número de Schmidt (Sc), el número de Lewis (Le), y el número de Prandtl (Pr), y están dados por las siguientes ecuaciones:

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad \text{Ecuación 24}$$

$$Pr = \frac{\nu}{D_{th}} \quad \text{Ecuación 25}$$

$$Le = \frac{Sc}{Pr} = \frac{D_{th}}{D} \quad \text{Ecuación 26}$$

En dónde D es la difusividad molecular (o másica), y D_{th} es la difusividad térmica. En cuanto al Le que compara la difusividad térmica con la difusividad molecular, y básicamente indica que tan fácil o no se pueden presentar inestabilidades difusionales en el frente de llama [9, 25]. El número de Le se aumenta por el estiramiento de la llama e induce cambios de temperatura en el frente de llama [26].

2.4 Regímenes de combustión

Las llamas de premezcla turbulenta son modeladas usualmente en diferentes regímenes de combustión descritos por el grado de influencia de las diferentes longitudes de escala turbulentas en el frente de llama. Estos regímenes son típicamente presentados en forma de diagramas de regímenes de combustión. Estos diagramas usualmente son llamados diagramas de Borghi y se presentan en términos de los siguientes grupos adimensionales: (1) la relación de la longitud de escala integral a el espesor de llama laminar y la relación de la intensidad de turbulencia a la velocidad de deflagración laminar; (2) número de Reynolds turbulento y el número de Damköhler. El primer conjunto es utilizado por Borghi y Peters [27–29], mientras que el segundo conjunto es usado por Bray y Williams [28, 30, 31]. Sin embargo, ambas representaciones son actualmente equivalentes [31].

El arrugamiento del frente de llama en llamas turbulentas genera que dependiendo de la intensidad de esos arrugamientos se definan varios regímenes para estas llamas. Hay varios, y a veces contradictorios, representaciones de los regímenes de combustión para las llamas de premezcla turbulenta en la literatura. En el diagrama de Borghi [27] se presentan 4 regímenes que serán descritos a continuación. Estos son **Wrinkled flamelets regime**, **Corrugated flamelets regime**, **Thickened-wrinkled flames regime** y **Distributed reaction zones regime**, ver Figura 2-5. Estos regímenes son definidos de acuerdo a los siguientes parámetros:

Wrinkled flamelets	$\delta_L \leq l_K$	$u'/S_L < 1$	$Re > 1$	$Ka < 1$	$Da \gg 1$
Corrugated flamelets	$\delta_L \leq l_K$	$u'/S_L > 1$	$Re > 1$	$Ka < 1$	$Da \gg 1$
Thickened-wrinkled flame	$\delta_L > l_K$	$u'/S_L > 1$	$Re > 1$	$Ka > 1$	$Da > 1$
Distributed reaction zones	$\delta_L > l_0$	$u'/S_L > 1$	$Re > 1$	$Ka > 1$	$Da < 1$

Donde δ_L es el espesor de llama laminar, l_K es la longitud de escala de Kolmogorov, l_0 es la longitud de escala integral, u' es la intensidad de turbulencia, Ka es el número de Karlovitz y Da es el número de Damköhler. Con el conocimiento de cómo el frente de llama se comporta en diferentes regímenes, los modeladores de combustión usan las propiedades del régimen para desarrollar modelos para la velocidad de deflagración turbulenta.

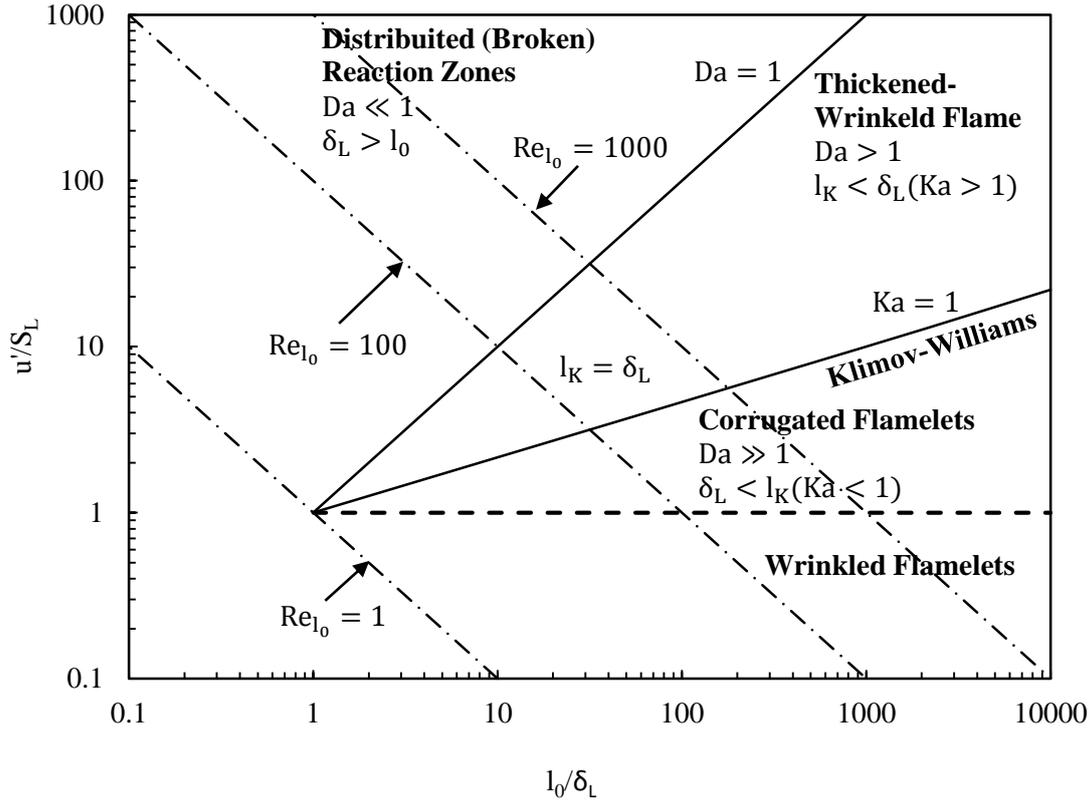


Figura 2-5. Diagrama de los regímenes de combustión propuesto por Borghi [12].

2.5 Modelos teóricos para determinar la velocidad de deflagración turbulenta

Damköhler fue uno de los primeros en proponer teoría sobre llamas turbulentas. Cabe señalar que si bien la velocidad de deflagración laminar S_L es una propiedad fisicoquímica y química de una premezcla sin quemar, la velocidad de deflagración turbulenta S_T es una tasa de consumo de masa por unidad de superficie dividida por la densidad de la premezcla sin quemar. Por lo tanto S_T depende de las propiedades del campo turbulento en que esta existe.

Damköhler y Schelkin [9, 11] derivan los primeros modelos de la velocidad de deflagración turbulenta. Ambos investigadores igualan el flujo másico, \dot{m} , a través del área de la sección transversal de una llama arrugada, A_T , al flujo de masa a través del área de una llama laminar de una premezcla sin quemar, A_L . Este modelo se basa en el aumento del área superficial debido a las arrugas de la llama por grandes remolinos turbulentos [9].

$$\dot{m} = \rho_u A_T S_T = \rho_u A_L S_L \quad \text{Ecuación 27}$$

$$\frac{S_T}{S_L} = \frac{A_L}{A_T} \quad \text{Ecuación 28}$$

Damköhler propuso que la relación entre el área de la llama laminar y el área de la sección transversal de la llama arrugada puede ser aproximada a:

$$\frac{A_L}{A_T} = \frac{S_L + u'_{rms}}{S_L} = 1 + \frac{u'_{rms}}{S_L} \quad \text{Ecuación 29}$$

Y sustituyendo este resultado en la Ecuación 28, el resultado es:

$$\frac{S_T}{S_L} = 1 + \frac{u'_{rms}}{S_L} \quad \text{Ecuación 30}$$

Otras correlaciones presentadas por diferentes autores de la velocidad de deflagración turbulenta en función de la velocidad de deflagración laminar y la intensidad de turbulencia se muestran a continuación:

Tabla 2-1. Ecuaciones para la velocidad de deflagración turbulenta.

Autor	Ecuación	Referencia	Número de ecuación
Damköhler	$\frac{S_T}{S_L} = 1 + \frac{u'_{rms}}{S_L}$	[11]	Ecuación 31
Schelkin	$\frac{S_T}{S_L} = \sqrt{1 + \left(\frac{2u'_{rms}}{S_L}\right)^2}$	[11]	Ecuación 32
Karlovitz	$\frac{S_T}{S_L} = 1 + \sqrt{\frac{2u'_{rms}}{S_L}}$	[11]	Ecuación 33
Otros autores	$\frac{S_T}{S_L} = 1 + C \left(\frac{u'}{S_L}\right)^n$	[10]	Ecuación 34
Kobayashi	$\frac{S_T}{S_L} = 5,04 \left[\left(\frac{P}{P_0}\right) \left(\frac{u'}{S_L}\right) \right]^{0,38}$	[5]	Ecuación 35

En donde S_T es la velocidad de deflagración turbulenta, S_L es la velocidad de deflagración laminar, u' , u'_{rms} es la intensidad de turbulencia, y C y n son constantes.

Estudios realizados por Shy [32] muestran el procedimiento para determinar las constantes del modelo utilizado en la Ecuación 34, el procedimiento consta principalmente en determinar la velocidad de deflagración turbulenta para varias intensidades de turbulencia, a su vez se varia el dosado, posteriormente los datos son linealizados usando una función logarítmica para luego a cada curva realizarle un ajuste, estableciendo que la constante C es igual a 1, y para cada condición de dosado e intensidad se establece el valor de la constante n.

CAPÍTULO III

3 ESTADO DEL ARTE

En el presente capítulo se trata de dar un recorrido a estudios relacionados con la combustión turbulenta y la velocidad de deflagración turbulenta a nivel mundial, contextualizando el fenómeno desarrollado y su importancia, mostrando la pertinencia de este trabajo y dando una idea general del alcance de este.

A nivel internacional se presentan numerosos estudios relacionados con la velocidad de deflagración turbulenta del metano [4–7] y otros combustibles [33–35], donde se desarrollan los fenómenos presentes como lo es el acople de los procesos fluido dinámicos en régimen turbulento con procesos cinéticos y químicos presentes en la combustión turbulenta. Estos estudios a nivel mundial están caracterizados principalmente por ser estudios realizados a condiciones atmosféricas de nivel del mar y condiciones elevadas de presión, sin embargo, a condiciones de presión por debajo de 1 atm los estudios son muy pocos para esta condición de combustión turbulenta.

Por lo mencionado anteriormente este capítulo va a estar caracterizado principalmente por explicar los efectos de la presión sobre diferentes propiedades, parámetros de combustión y propiedades de la turbulencia, que al final de todo intervienen en el proceso y afectan el resultado sobre la velocidad de deflagración turbulenta, dando elementos adicionales para el posterior análisis de resultados y explicación de los mismos, para finalmente concluir sobre los aspectos más relevantes de este trabajo. También se presentarán trabajos de algunos autores sobre el método para el procesamiento de imágenes y la obtención de la velocidad de deflagración turbulenta.

3.1 Métodos para determinar el perfil de llama turbulento

Antes de exponer los trabajos realizados por diferentes autores a diferentes condiciones de presión, primero se quiere presentar los métodos para determinar la velocidad de deflagración turbulenta por el método del ángulo, ya que dependiendo del método de análisis de imágenes se tienen ciertas diferencias. Cabe aclarar que durante la revisión del estado del arte se encontraron tres formas principalmente, las cuales serán descritas a continuación. Estos métodos corresponden a las desarrolladas por Kobayashi y otros [5], Rockwell y Rangwala [36], y Wang y otros [37].

En el estudio realizado por Kobayashi y otros [5] para realizar el análisis de imágenes es necesario definir la variable de progreso, c . La variable de progreso c se define cuando la temperatura local es usada como lo describe la Ecuación 36:

$$c(x, y) = \frac{T(x, y) - T_u}{T_b - T_u} \quad \text{Ecuación 36}$$

En donde T es la temperatura, y los subíndices u y b representan los lados no quemados y quemados respectivamente y corresponden a $c = 0$ en el lado no quemado de la llama y $c = 1$ en el lado quemado, x , y son las coordenadas en dos dimensiones de las imágenes. Como se observa en la Figura 3-1, la variable de progreso va en aumento desde la zona no quemada desde aproximadamente 0 a aproximadamente 1 en la zona quemada de la llama. Para un número N de imágenes la variable de progreso se define con la Ecuación 37.

$$\langle c \rangle = \sum_{n=1}^N \frac{c_n(x,y)}{N}$$

Ecuación 37

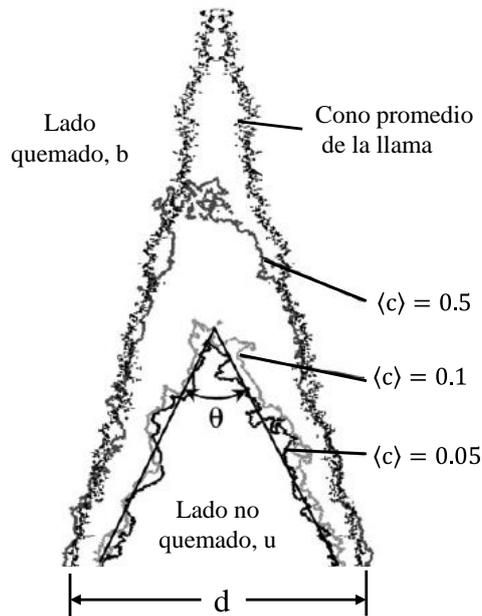


Figura 3-1. Cono promedio de la llama y contorno de la variable de progreso [5].

Estrictamente hablando, la variable de progreso c varía gradualmente en la dirección normal del frente de llama local. Sin embargo, si el espesor de la llama se puede considerar muy delgado en comparación con la escala global de la llama, se puede suponer que el espesor de llama es tan delgado que c es una función escalonada, y se dice que $c = 0$ en el lado no quemado de la llama y $c = 1$ en el lado quemado.

En la Figura 3-2 se observa el triángulo promedio trazado en los experimentos de Kobayashi [5].

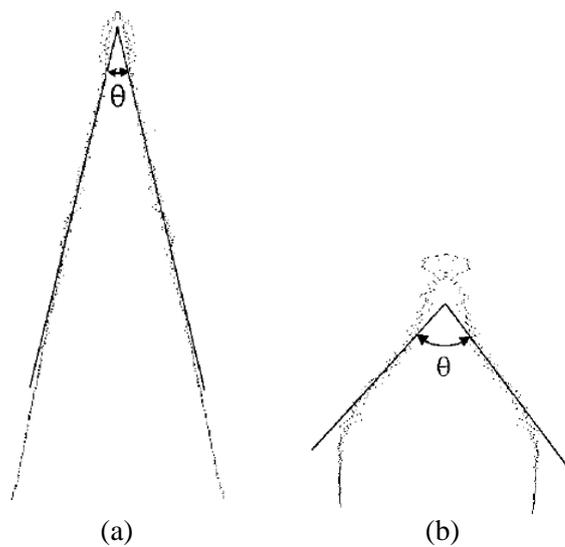


Figura 3-2. Efecto de la presión y la intensidad de turbulencia en la forma del cono promedio de la llama (a) $P = 0.1$ MPa, $U = 2$ m/s, $u' = 0.1$ m/s, $d = 1$ mm; (b) $P = 3$ MPa, $U = 2.4$ m/s, $u' = 0.5$ m/s, $d = 3$ mm [6].

Rockwell y Rangwala [36] desarrollan un procedimiento el cual corresponde a la descripción mostrada en la Figura 3-3 (a) Llama de premezcla turbulenta para el metano a unas condiciones determinadas. (b) Mediante Matlab se recorta la imagen y se determina el perfil de la llama y se incrementa la intensidad de la imagen. (c) Luego se convierte la ubicación de la llama de pixeles a unidades de longitud. (d) Este procedimiento se realiza para un determinado número de imágenes y se combinan los perfiles de las llamas obtenidas. (e) Luego de combinar las imágenes se promedian para obtener un solo perfil. (f) Para la imagen promedio se determinan los puntos inferiores que corresponden con la boquilla del quemador y sobre el punto medio de esta línea se traza una línea vertical que corte con el promedio de la llama, para así determinar el ángulo de la llama, cabe aclarar que este procedimiento se realiza de manera manual.

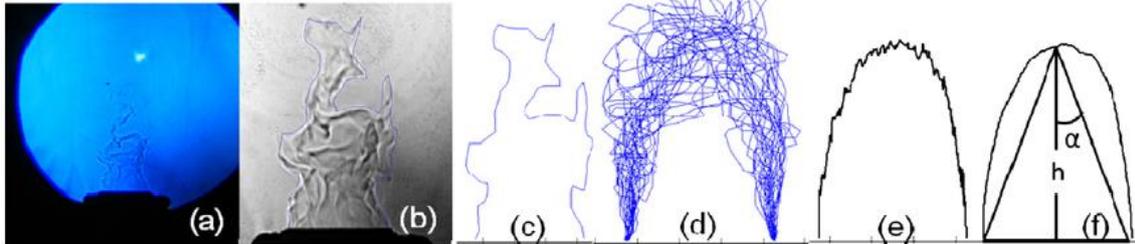


Figura 3-3. Procedimiento para el procesamiento de imágenes realizado por Rockwell y Rangwala [36].

El procesamiento de imágenes realizado por Wang y otros [37] es similar al de Kobayashi y otros [5], en la Figura 3-4 se observa este procedimiento. En la Figura 3-4a se presenta la imagen capturada por medio de la técnica OH PLIF, luego esta imagen es binarizada como la Figura 3-4c basada en una imagen de referencia como la de la Figura 3-4b. Luego de tener las imágenes binarizadas se extrae el contorno de las llamas como se muestra en la Figura 3-4d y la Figura 3-4e. Además en la Figura 3-4f se observa el espesor, δ_T , que indica la región espacial donde las capas de reacción son localizadas, y se define como el espesor entre $\langle c \rangle = 0.1$ y $\langle c \rangle = 0.9$ a la salida del eje central del quemador.

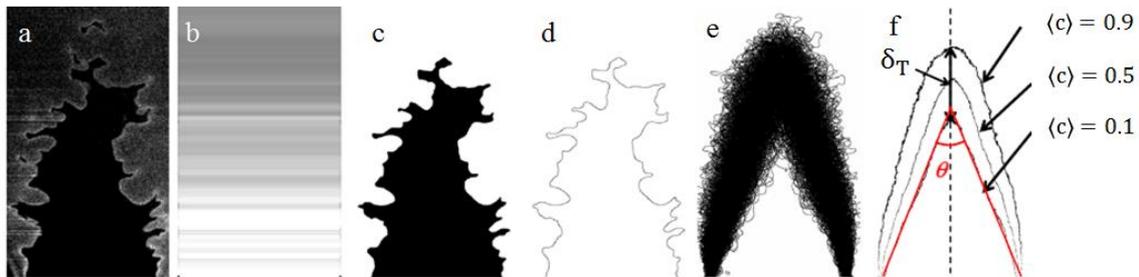


Figura 3-4. Procedimiento para el procesamiento de imágenes realizado por Wang y otros [37].

En algunos trabajos se ha discutido el uso de diferentes valores para la variable de progreso [5, 33, 37], utilizando valores de 0.05, 0.1, y 0.5. Sin embargo, en estudios más recientes como el de Wang y otros [33] se utiliza un valor de la variable de progreso de $c = 0.1$, siendo éste el valor correspondiente al lado de los gases sin quemar, $c = 0.5$ la localización del frente de llama promedio, y $c = 0.9$ corresponde al lado de los gases quemados; de acuerdo a esta referencia en este estudio se determinó el perfil de la llama para un valor de la variable de progreso de $c = 0.1$.

3.2 Efecto de la presión sobre la velocidad de deflagración turbulenta

Luego de exponer los métodos utilizados para determinar el perfil de llama turbulento, se quieren exponer dos trabajos realizados a condiciones subatmosféricas, dentro de los cuales se encuentran muy pocas referencias. Dentro de estos trabajos se encuentra el realizado por Goldenberg y Pelevin [34] donde estudian la influencia de la presión en la propagación de llamas en flujos turbulentos, este estudio fue realizado para la gasolina y metano en régimen laminar, y para la gasolina en régimen turbulento, el número de Reynolds fue variado desde 4000 hasta 20000, e intensidades de turbulencia relativa de 4% a 5%. La presión en este experimento fue variada desde 1 atm hasta 0.13 atm. En general en los resultados de este trabajo se encuentra que a medida que disminuye la presión aumenta la velocidad de deflagración turbulenta. Para un Reynolds de 4000 y una concentración de gasolina en aire de 2.4 %, se tienen los siguientes valores, para una presión de 1 atm una velocidad de deflagración turbulenta de 55.5 cm/s y para una presión de 0.13 atm una velocidad de deflagración turbulenta de 95.3 cm/s, que corresponde a un aumento en porcentaje de 71% aproximadamente. Con los resultados experimentales estos autores plantearon una correlación que aproxima de muy buena manera los resultados obtenidos, esta correlación es presentada en la Ecuación 38.

$$S_T = S_{T,0} / \left(\frac{P}{P_0} \right)^{0.25} \quad \text{Ecuación 38}$$

En dónde $S_{T,0}$ y P_0 son respectivamente la velocidad y la presión a condiciones normales.

Khramtsov [35] realizó estudios sobre el efecto de la presión en los parámetros de turbulencia y la velocidad de deflagración turbulenta, los experimentos fueron llevados a presiones de 0.6, 0.3, y 0.1 atm, este estudio fue realizado para la combustión del propano, y el autor básicamente plantea la relación de la Ecuación 39 entre la velocidad de deflagración turbulenta y la presión, para una intensidad de turbulencia variante, mientras que la relación de la Ecuación 40 es en función de una intensidad de turbulencia constante.

$$S_T \sim P^{0.4} \quad \text{Ecuación 39}$$

$$S_T \sim P^{0.12} \quad \text{Ecuación 40}$$

Y de acuerdo a estos resultados experimentales obtenidos por Khramtsov, la velocidad de deflagración turbulenta aumenta con la presión. Entre los resultados expuestos por Goldenberg y Pelevin [34] y Khramtsov [35] se encuentra una contradicción ya que los primeros autores plantean que a medida que disminuye la presión la velocidad de deflagración turbulenta aumenta, y el segundo autor plantea que la velocidad de deflagración turbulenta es directamente proporcional a la presión, la causa de esta discrepancia en los resultados puede ser atribuida a que ambos trabajos fueron realizados en la década de los 50 y se desconoce la precisión de las metodologías utilizadas, también se desconoce el rango de intensidades utilizadas por los autores, como la geometría del quemador utilizado para los experimentos.

A continuación, se presentan algunos trabajos sobre la velocidad de deflagración turbulenta y el efecto de la presión sobre la velocidad de deflagración turbulenta.

Taamallah y otros [38] realizaron estudios sobre la velocidad de deflagración turbulenta, básicamente en su estudio ellos presentan la siguiente opinión, mientras que la velocidad de deflagración laminar está bien definida como propiedad de un combustible que depende únicamente de las propiedades químicas y de transporte de la mezcla, la velocidad de

deflagración turbulenta depende de las características del flujo, principalmente de la intensidad de turbulencia.

También en su estudio resaltan la importancia de la presión sobre la velocidad de deflagración turbulenta y se valida la teoría de que a medida que se aumenta la presión se aumenta la velocidad de deflagración turbulenta. También es importante resaltar que a medida que se aumenta la intensidad de turbulencia la velocidad de deflagración turbulenta se aumenta, sin embargo, este comportamiento no es lineal.

Continuando con el análisis de Taamallah y otros [38] en su artículo presentan algunas correlaciones para entender y cuantificar la velocidad de deflagración turbulenta, en función de parámetros característicos de la turbulencia, estas correlaciones son presentadas en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1. Correlaciones de diferentes bases de datos para la velocidad de deflagración turbulenta.

Base de datos	Correlación	Intensidad de turbulencia, u'	Referencia	Número de ecuación
Moscow	$S_T = u'Da^{0.27}$	0.5 – 7 m/s	[38]	Ecuación 41
Leeds	$S_T = u'(KaLe)^{-0.3}$	-	[38]	Ecuación 42
Gülдер	$S_T = S_{L,0} + 0.62u'Da^{0.25}Pr^{-0.25}$	0.6 – 0.7 m/s	[38]	Ecuación 43
Kido	$S_T = u'Da^{0.44}$	0.5 – 3.5 m/s	[38]	Ecuación 44

En donde, Da es el número de Damköhler, Pr es el número de Prandtl, Ka es el número de Karlovitz, Le es el número de Lewis, y u' es la fluctuación de la velocidad turbulenta.

De acuerdo a las correlaciones establecidas en la Tabla 3-1 por diferentes autores, Lipatnikov y Chomiak [39] analizan que hay similitudes entre las diferentes correlaciones y llegan a la conclusión de que hay una fuerte dependencia entre la intensidad de turbulencia y la velocidad de deflagración turbulenta, expresadas de la siguiente forma:

$$S_T \propto u'^{\alpha} S_{L,0}^{\beta} \tag{Ecuación 45}$$

En donde, $\alpha \approx 0.5$ y $\beta \approx 0.5 - 0.6$, esta ecuación cuantifica la influencia de la turbulencia y de la velocidad de deflagración laminar en la velocidad de deflagración turbulenta, sin embargo la composición química del combustible puede influir en los resultados de la velocidad de deflagración turbulenta. Este efecto se observa en la relación propuesta por Leeds [38] donde el número de Lewis evalúa la incidencia de los fenómenos difusivos.

Varios experimentos en la combustión de premezcla turbulenta se realizan a altas presiones, manteniendo constantes parámetros como la longitud de la escala integral, las velocidades medias de los flujos y las componentes fluctuantes. El efecto de la presión tiene un efecto sobre las propiedades físico térmicas de la mezcla aire y combustible. Dentro de estos estudios resaltan los estudios realizados por Abdel-Gayed [40–44], Ballal y Lefevre [45], Kobayashi [5–7, 46–48], Shy [10, 49], Smallwood [50, 51], Peters [17, 26, 28], entre otros.

Kobayashi [7] dentro de sus trabajos ha realizado estudios sobre la velocidad de deflagración turbulenta en un quemador tipo Bunsen con un diámetro de boquillas de 20 mm, el cual consta principalmente en la entrada de una premezcla de combustible-aire por la parte inferior, para la generación de turbulencia utilizan placas perforadas de diferentes diámetros, para estabilizar las llamas de premezcla turbulentas se generan llamas piloto de H_2 en el puerto del quemador, además de refrigerar el puerto del quemador. Para las diferentes condiciones de ensayo, donde se varía la intensidad de turbulencia, la presión ambiente y el dosado, se generaron llamas que fueron capturadas y posprocesadas mediante las técnicas de fotografía Schlieren y tomografía

laser. El procesamiento de imágenes consiste en determinar el perfil promedio de la llama, de un conjunto de imágenes registrada para cada condición de operación, luego de determinar el perfil promedio se calcula el ángulo de la llama.

Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 3-5 y Figura 3-6, donde se reporta un incremento para la relación entre la velocidad de deflagración turbulenta y la velocidad de deflagración laminar como un incremento de la presión, y a partir de estos resultados se obtienen correlaciones empíricas para mezclas metano/aire y etileno/aire dada por la Ecuación 46 y para una mezcla de propano/aire dada por la Ecuación 47.

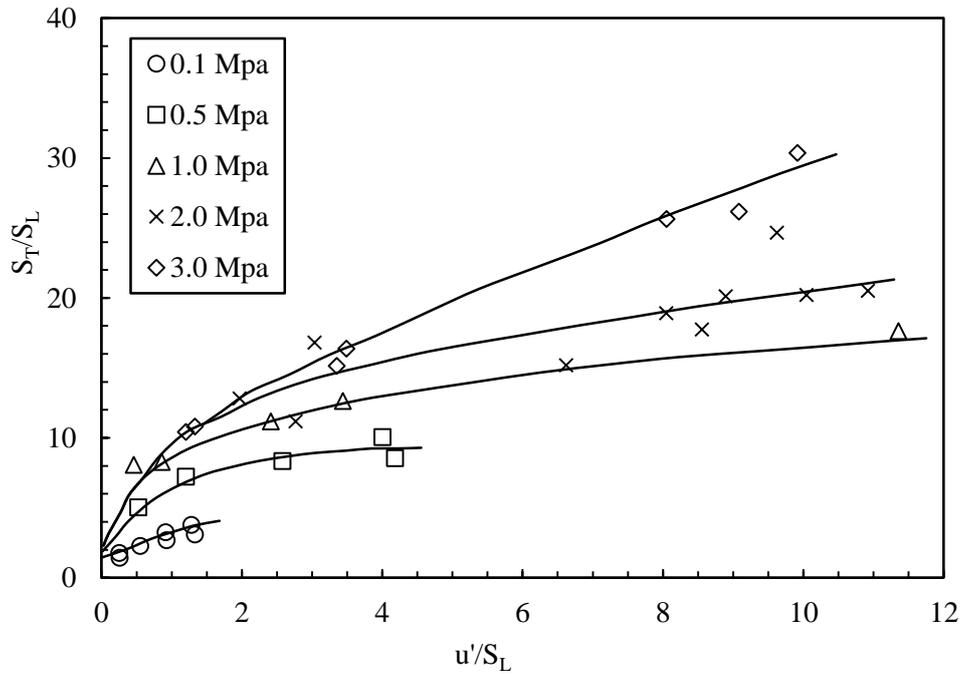


Figura 3-5. Relación entre la velocidad de deflagración turbulenta y la intensidad de turbulencia normalizada en función de la velocidad de deflagración laminar para varias presiones atmosféricas para llamas de metano/aire [6].

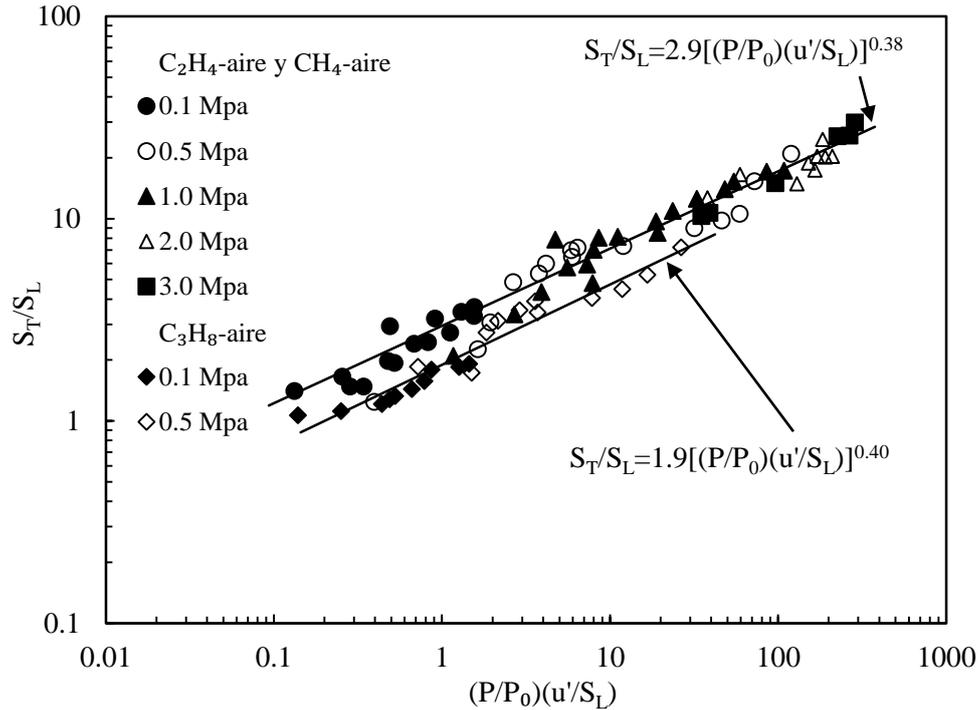


Figura 3-6. Resultados experimentales de la velocidad de deflagración turbulenta para metano, etileno y propano. [7].

$$\frac{S_T}{S_L} = 2.9 \left[\left(\frac{P}{P_0} \right) \left(\frac{u'}{S_L} \right) \right]^{0.38} \quad \text{Ecuación 46}$$

$$\frac{S_T}{S_L} = 1.9 \left[\left(\frac{P}{P_0} \right) \left(\frac{u'}{S_L} \right) \right]^{0.40} \quad \text{Ecuación 47}$$

En dónde S_T es la velocidad de deflagración turbulenta, S_L es la velocidad de deflagración laminar, P es la presión de operación, P_0 es la presión atmosférica y u' es la intensidad de turbulencia.

3.3 Efecto de la presión sobre la velocidad de deflagración laminar

En esta sección también se abordará el efecto de la presión sobre la velocidad de deflagración laminar y sobre otros parámetros de turbulencia. La velocidad de deflagración laminar es un parámetro que tiene influencia directa sobre la velocidad de deflagración turbulenta, por lo que ésta es un punto importante de partida para realizar análisis de la velocidad de deflagración turbulenta.

Una expresión analítica para la velocidad de deflagración laminar en función de la presión es la que se presenta a continuación [12]:

$$S_L \propto P^{(n-2)/2} \quad \text{Ecuación 48}$$

En dónde S_L es la velocidad de deflagración laminar, P es la presión de la premezcla, y n es el orden de la reacción global.

Para una reacción global para el metano con orden igual a 1, y apoyados en la ecuación anterior, a manera general se puede concluir que a medida que aumenta la presión la velocidad de deflagración laminar disminuye como se observa en la Ecuación 49:

$$S_L \propto P^{-0.5} \quad \text{Ecuación 49}$$

Como se ha demostrado en las ecuaciones anteriores la presión tiene un efecto inverso sobre la velocidad de deflagración laminar, esto se puede observar en la Figura 3-7, donde se presentan resultados experimentales para mezclas metano-aire de Kobayashi y otros [46], Andrews y Bradley [52], y Mauss y Paters [53], la Figura 3-7 presenta la relación entre la velocidad de deflagración laminar S_L y la presión P , medida usando el método del quemador para dosado de $\phi = 0.9$, $\phi = 1.0$, y $\phi = 1.1$. En este estudio se observa que la velocidad de deflagración laminar decrece con incrementos de presión, y el exponente que mejor se ajusta a todos los datos para la presión es -0.5 . Una relación aproximada para estos datos en función de la presión es la presentada en la Ecuación 50.

$$S_L = 0.34 \left(\frac{P}{P_0} \right)^{-0.5} \quad \text{Ecuación 50}$$

En dónde S_L es la velocidad de deflagración laminar, P es la presión de la premezcla, y P_0 es la presión atmosférica de referencia en MPa.

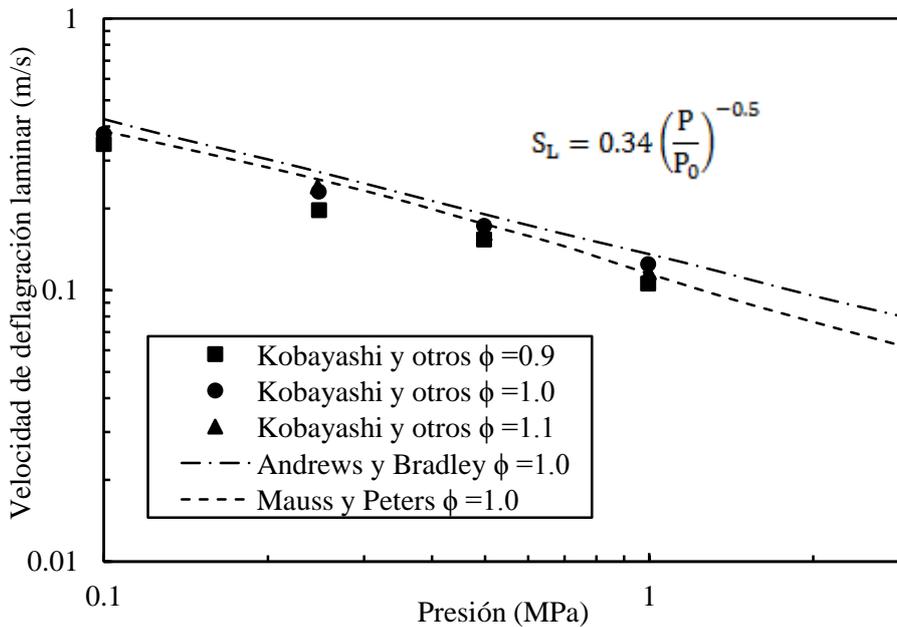


Figura 3-7. Relación entre la velocidad de deflagración laminar y la presión ambiente [46].

El grupo GASURE realizó estudios sobre la velocidad de deflagración laminar para las mezclas gas natural/gas de síntesis experimental y numéricamente a diferentes alturas sobre el nivel del mar, y se concluye que a medida que aumenta la presión disminuye la velocidad de deflagración laminar [13].

Resultados experimentales para llamas de metano-aire describen el comportamiento de la velocidad de deflagración laminar en función de la temperatura y presión, y dosado mediante la

velocidad de deflagración laminar de referencia $S_L(P^0, T_1^0)$, como se muestra en la Ecuación 51 [14]:

$$S_L(P, T_1) = S_L(P^0, T_1^0) \left(\frac{P}{P^0}\right)^{\alpha P} \left(\frac{T_1}{T_1^0}\right)^{\alpha T} \quad \text{Ecuación 51}$$

Tabla 3-2. Constantes utilizadas en el modelo de la Ecuación 51 [14].

Combustible	$S_L(P^0, T_1^0)$ (m/s)	αT	αP
Metano ($\phi = 0.8$)	0.259	2.105	-0.504
Metano ($\phi = 1$)	0.360	1.612	-0.374
Metano ($\phi = 1.2$)	0.314	2.000	-0.438
Propano ($\phi = 0.8$ a 1.5)	$0.34 - 1.38(\phi - 1.08)^2$	$2.18 - 0.8(\phi - 1)$	$-0.16 - 0.22(\phi - 1)$

Ubbelohde y koelliker [54] plantean la siguiente correlación para la velocidad de deflagración laminar en función de la presión para llamas de premezcla de metano y aire, y en la Tabla 3-3 se presentan los datos para la constante β_1 :

$$S_L = S_{L0} \left(\frac{P}{P_0}\right)^{\beta_1} \quad \text{Ecuación 52}$$

En dónde S_L es la velocidad de deflagración laminar, S_{L0} es la velocidad de deflagración laminar de referencia, P es la presión de la premezcla, P_0 es la presión de referencia y β_1 es una constante adimensional del modelo.

Tabla 3-3. Valores para la constante β_1 en el modelo de Ubbelohde y Koelliker [54].

Temperatura (K)	Presión (atm)	ϕ	$\beta_1(\phi = 1)$
323-473	1-8	0.6-1.4	-0.270
	8-70		-0.430
300	5-90	1	-0.500
298	<0.6	1	-0.120
	>4		-0.510
298	<0.6	1	-0.145
	0.6-3		-0.265
	3-10		-0.510

Mientras que Agnew y Graiff [54] plantean la siguiente correlación para la velocidad de deflagración laminar en función de la presión para llamas de premezcla de metano y aire, y en la Tabla 3-4 se presentan los datos para la constante β_2 :

$$S_L = S_{L0} \left[1 + \beta_2 \log\left(\frac{P}{P_0}\right)\right] \quad \text{Ecuación 53}$$

En dónde S_L es la velocidad de deflagración laminar, S_{L0} es la velocidad de deflagración laminar de referencia, P es la presión de la premezcla, P_0 es la presión de referencia y β_2 es una constante adimensional del modelo.

Tabla 3-4. Valores para la constante β_2 en el modelo de Agnew y Graiff [54].

Temperatura (K)	Presión (atm)	ϕ	$\beta_2(\phi = 1)$
300	0.5-20	1	-0.206
300-600	0.5-4	0.8-1.2	-0.195
291-500	0.5-30	0.8-1.3	-0.420
300-520	2-6	0.85-1.3	-0.202
298	1-10	0.7-1.4	-0.280

Por otra parte se ha demostrado que la presión tiene un efecto negativo sobre el espesor del frente de llama laminar como se observa en la Ecuación 54, este comportamiento es derivado a partir del comportamiento de la velocidad de deflagración laminar con la presión:

$$\delta_L \propto P^{-0.5} \quad \text{Ecuación 54}$$

El número de Reynolds (ver Ecuación 55) definido en la macroescala depende de la velocidad de flujo (V), el diámetro de la sección transversal (d), y de la viscosidad cinemática (ν), en la Ecuación 55 la única variable que depende de la presión es la viscosidad cinemática (definida como la relación entre la viscosidad dinámica y la densidad, $\nu = \mu/\rho$), el comportamiento de la viscosidad cinemática con la presión es inverso, y como en la Ecuación 55 esta viscosidad cinemática está en el denominador, cuando se analiza el número de Reynolds este comportamiento inverso en la viscosidad se vuelve directamente proporcional a la presión como se observa en la Ecuación 56:

$$Re = \frac{Vd}{\nu} \quad \text{Ecuación 55}$$

$$Re \propto P \quad \text{Ecuación 56}$$

CAPÍTULO IV

4 METODOLOGÍA

En este capítulo se describe detalladamente el procedimiento experimental seguido para obtener los resultados de la velocidad de deflagración turbulenta, que serán tratados y analizados en el próximo capítulo. Primero se presenta el diseño experimental, explicando los experimentos realizados determinados por el número de réplicas para cada ensayo y por qué la realización de cada uno de estos.

Posteriormente se describe el combustible usado, incluyendo algunas de las principales propiedades de combustión. También se describe el quemador de ensayos donde se realizaron las mediciones. Se explica también como se lleva a cabo el suministro de combustible y aire, necesarios para formar la premezcla de metano-aire a las condiciones deseadas, otro aspecto tratado es el sistema de adquisición de imágenes y su procesamiento para posteriormente determinar el ángulo promedio de la llama, además de explicar los mecanismos de generación de turbulencia y el montaje desarrollado para su medición.

Luego se describe de forma detallada el montaje experimental, explicando cada uno de sus componentes considerando también la descripción de cada uno de los sitios de ensayo para el desarrollo del presente estudio.

4.1 Diseño de experimentos

Para llevar a cabo el experimento se dispondrá de un diseño de dos factores. El esquema del proceso se muestra en la Figura 4-1. En él se muestran las variables de entrada, controlables, no controlables, la unidad experimental y las variables respuesta. En este diseño se tiene como variable de entrada los gases a estudiar, en este caso se suministrará metano (CH_4) mediante un cilindro a alta presión suministrado por un proveedor y el aire se suministra mediante un compresor, de tal modo que se pueda establecer las condiciones de dosado requerido para la premezcla. La presión se considera en dos factores, 0.85 atm correspondiente a la ciudad de Medellín y 0.98 atm correspondientes a condiciones atmosféricas cercanas a nivel del mar. Las variables de salida del experimento son la velocidad de deflagración turbulenta para ambas condiciones de presión, y la intensidad de turbulencia.

- **Variables de entrada**

Presión atmosférica: La presión atmosférica es una variable controlada, para esta se tendrán dos niveles, el primero corresponde a la presión atmosférica de la ciudad de Medellín (0.85 atm), y el segundo nivel correspondiente a condiciones cercanas a nivel del mar (0.98 atm).

Dosado relativo: Se controlará el caudal del metano y aire ([=] slpm) de manera que se tengan régimen de combustión pobre y estequiométrico, mediante rotámetros calibrados marca ABB, la precisión de este instrumento de medida es de 1 slpm. Se realizarán mediciones para dosados pobres y estequiométricos, esto basado en que muchos de los equipos de combustión operan bajo el régimen pobre o cercano a combustión estequiométrica, por esta razón no se realizaron mediciones de la velocidad de deflagración turbulenta para dosados ricos.

- **Factores controlables**

Caudal de los gases: Para obtener la premezcla deseada se suministra gas metano de un cilindro certificado por un proveedor y aire suministrado mediante un compresor, las cantidades requeridas de cada gas se determinan en un banco de rotámetros para obtener el dosado requerido.

Geometría del quemador: En este caso la geometría del quemador será constante, ya que los experimentos en la ciudad de Medellín y a condiciones cercanas de nivel del mar se realizarán con el mismo quemador de ensayos.

Geometría de los turburizadores: La geometría y ubicación en el quemador de las placas generadoras de turbulencia será una constante en el experimento ya que los experimentos en la ciudad de Medellín y en la condición cercana a nivel del mar se realizarán con las mismas placas, y la misma ubicación en el quemador.

Velocidad media: La velocidad media a la salida del puerto del quemador de la premezcla sin quemar para cada condición se mantuvo constante para las condiciones de estudio, correspondientes a sitios con presión atmosférica de 0.85 atm y 0.98 atm, esta velocidad se mantuvo constante controlando el caudal de aire y caudal de gas descargado en el puerto del quemador, considerando las condiciones atmosféricas de cada sitio de ensayo.

- **Factores no controlables**

Temperatura ambiente: La temperatura ambiente es una variable no controlada en el experimento, sin embargo, se hace un registro de esta ya que influye en la variable respuesta del experimento, y en caso de que se presenten variaciones marcadas realizar un análisis respecto a esta variable, para la ciudad de Medellín se tienen variaciones de temperatura en el transcurso del día de 20 a 25 °C, y para la condición cercana a nivel del mar de 21 a 24 °C.

Humedad relativa: La humedad relativa es una variable no controlada en el experimento, sin embargo, se hace un registro de esta ya que influye en la variable respuesta del experimento, y en caso de que se presenten variaciones marcadas realizar un análisis respecto a esta variable, la variación esperada de la humedad relativa en el transcurso del día en la ciudad de Medellín es de 55% a 65%. Mientras que en el municipio de Caucasia esta tiene una variación entre 75%-80%.

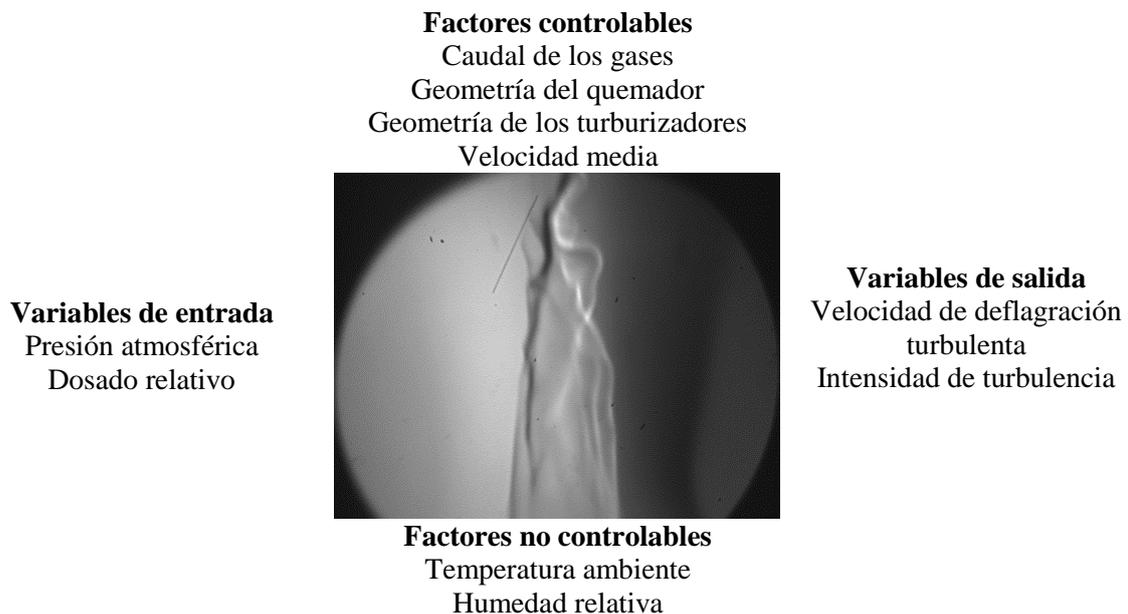


Figura 4-1. Diagrama del proceso y esquema del diseño de experimentos.

Posteriormente se calcularán el número de réplicas necesarias para caracterizar el experimento y se realizara una aleatorización del experimento.

4.1.1 Tamaño de la muestra

El cálculo del número de réplicas del diseño experimental se realizó mediante la metodología desarrollada en el libro Montgomery [55] para un diseño factorial de dos factores (diferencia de medias), de acuerdo a esto el número de réplicas recomendado es 5. Aunque mediante el cálculo

realizado anteriormente se recomienda un número de réplicas de 5, en la literatura [2, 56, 57] para este mismo tipo de experimentos se recomiendan realizar 3 repeticiones para cada prueba, por lo que para este experimento se realizaran tres replicas por pruebas.

4.1.2 Propagación de error

Después de obtenidos los datos experimentalmente de la velocidad de deflagración turbulenta es necesario realizar un análisis sobre estos y determinar los errores durante la experimentación. Los errores siempre están presentes en cualquier experimento independiente de que tan cuidadoso sea el experimentador, generalmente el error en la medición puede ser definido como la diferencia entre el valor medido y el verdadero valor de una magnitud física, sin embargo, nunca es posible determinar el verdadero valor de una magnitud física. Para cuantificar el grado de error, este se puede expresar en términos de un nivel de incertidumbre. Una forma de disminuir los errores es mediante la calibración de los instrumentos de medida antes de cualquier medición. Otros errores presentes en la medición se deben a diseños incorrectos, fabricación o falta de mantenimiento de los equipos. Al realizar una medición se pueden tener errores fijos debidos a errores fijos en el instrumento de medición, o errores aleatorios debido a la precisión de los instrumentos, estos errores se deben a fluctuaciones aleatorias en los instrumentos debido a ruidos mecánicos, eléctricos o electrónicos. La incertidumbre en los datos puede ser determinando mediante la repetición de los datos [58].

4.2 Metodología experimental

En esta etapa se pretende realizar las mediciones experimentales de la velocidad de deflagración turbulenta para el metano, se realizarán mediciones a condiciones cercanas de nivel del mar (0.98 atm), y mediciones en la ciudad de Medellín (0.85 atm), en el laboratorio de combustión del grupo GASURE ubicado en la Universidad de Antioquia, que corresponde a condiciones subatmosféricas.

Para determinar la velocidad de deflagración turbulenta se generarán llamas de premezcla turbulentas, a partir de la mezcla requerida de cada componente (Metano y aire) para cada dosado a estudiar, se determina la intensidad de turbulencia, además de capturar el frente de llama para cada condición y establecer el ángulo promedio, y por último se determina la velocidad promedio de la premezcla a la salida del puerto del quemador, calculo que se presenta con mayor detalle en la sección 4.2.7 (Ecuación 63).

4.2.1 Combustible

El gas metano e hidrógeno utilizado en las pruebas experimentales fue suministrado por una comercializadora de gases de la ciudad de Medellín, la composición química de los gases certificados se observa en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1. Estado de la composición del metano.

Gas	Pureza (%)	Contenido de Impurezas				
CH ₄	99.99	N ₂ < 30 ppm	O ₂ < 5 ppm	CO + CO ₂ < 10 ppm	C ₂ H ₆ < 30 ppm	H ₂ O < 10 ppm
H ₂	99.999	O ₂ < 3 ppm	H ₂ O < 3 ppm		THC* < 1 ppm	

*THC (Total Hydrocarbon Content)

Algunas de las principales propiedades de combustión del metano se encuentran en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2. Propiedades de combustión del metano.

Propiedad	Metano (CH ₄)
Volumen estequiométrico de aire*, $V_a \left(\frac{m^3_{(st)aire}}{m^3_{(st)gas}} \right)$	9.52
Volumen de humos húmedos*, $V_f \left(\frac{m^3_{(st)humos-hum}}{m^3_{(st)gas}} \right)$	10.52
Volumen de humos secos*, $V_f \left(\frac{m^3_{(st)humos-secos}}{m^3_{(st)gas}} \right)$	8.52
Volumen de dióxido de carbono*, $V_{CO_2} \left(\frac{m^3_{(st)CO_2}}{m^3_{(st)gas}} \right)$	1.00
Volumen de agua*, $V_{H_2O} \left(\frac{m^3_{(st)H_2O}}{m^3_{(st)gas}} \right)$	2.00
Peso molecular*, $PM \left(\frac{Kg}{Kmol} \right)$	16.043
Densidad relativa*	0.5538
Calor específico*, $C_p \left(\frac{KJ}{KgK} \right)$	2.2537
Viscosidad*, $\mu \left(\frac{Kg}{ms} \right)$ @ 849 mbar, 295 K	1.13194E-05
Viscosidad*, $\mu \left(\frac{Kg}{ms} \right)$ @ 991 mbar, 295 K	1.13194E-05
Poder calorífico inferior*, $PCI \left(\frac{kWh}{m^3_{(st)}}, \frac{MJ}{m^3_{(st)}} \right)$	9.42 – 33.93
Poder calorífico superior*, $PCS \left(\frac{kWh}{m^3_{(st)}}, \frac{MJ}{m^3_{(st)}} \right)$	10.49 – 37.75
Índice de Wobbe superior*, $Wo \left(\frac{kWh}{m^3_{(st)}}, \frac{MJ}{m^3_{(st)}} \right)$	14.09 – 50.71
Temperatura de rocío*, (K)	332.16
Límite inferior de inflamabilidad*	2.90
Límite superior de inflamabilidad*	15.00
Temperatura de llama adiabática a condiciones estequiométricas (K)**, @ 0.85 atm, 295 K	2218.77
Velocidad de deflagración laminar a condiciones estequiométricas**, $S_L \left(\frac{cm}{s} \right)$ @ 0.85 atm, 295 K	38.67
Temperatura de llama adiabática a condiciones estequiométricas (K)**, @ 0.98 atm, 295 K	2222.69
Velocidad de deflagración laminar a condiciones estequiométricas**, $S_L \left(\frac{cm}{s} \right)$ @ 0.98 atm, 295 K	36.47

*Cálculos propios.

**Cálculos realizados en el software Chemkin Pro [59].

4.2.2 Quemador de ensayos

Mediante un quemador tipo Bunsen de premezcla se generan llamas turbulentas con cierta intensidad de turbulencia y para el factor de equivalencia que se desea estudiar, el quemador se muestra en la Figura 4-2. El quemador consta principalmente de una entrada inferior de la premezcla metano y aire, en la parte media superior del quemador se tiene ubicada la placa para generación de turbulencia, luego se cuenta con un circuito de refrigeración para mantener la temperatura de entrada de la premezcla constante y no sobreestimar la velocidad de deflagración turbulenta y evitar fenómenos de retrollama, para controlar la temperatura de la premezcla esta medida antes del quemador con un termopar, este circuito de refrigeración está aislado por medio de retenedores para asegurar que no se presenten infiltraciones de agua, y por último se tiene el mecanismo estabilizador de la llama turbulenta, que consta de un anillo circular de 0.5 mm alrededor de la descarga, donde se genera una llama no premezclada de hidrógeno. La velocidad media del flujo a la salida del puerto del quemador fue controlada entre 3 y 7 m/s para evitar fenómenos de retrollama y desprendimiento. El diámetro interior del puerto del quemador

(D.I) es de 10 mm y las placas generadoras de turbulencia se encuentran ubicadas 42 mm aguas abajo de la salida del puerto del quemador.

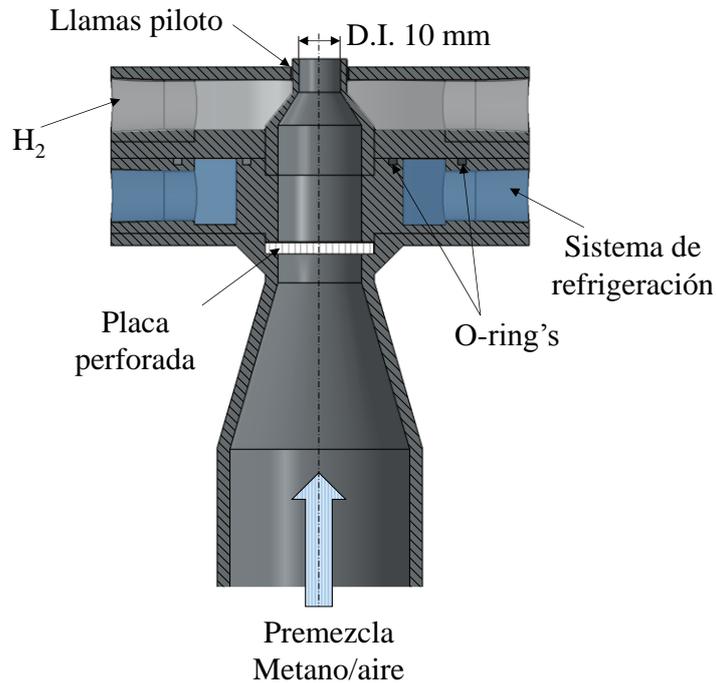


Figura 4-2. Quemador Bunsen de mezcla turbulenta.

4.2.3 Selección placas perforadas

Como se observa en la Ecuación 5 la velocidad de deflagración turbulenta es directamente proporcional a la intensidad de turbulencia u' , sin embargo si este parámetro se aumenta indefinidamente la llama se puede extinguir. La intensidad de turbulencia se modifica mediante placas perforadas con diferentes configuraciones y diámetros de perforaciones, mientras que para su medición se seguirá la metodología presentada en la sección 4.2.5. Las placas perforadas fueron escogidas en referencia a estudios presentados en el estado del arte [5, 7, 60], para este trabajo se escogieron tres placas perforadas distintas construidas de material plástico.

En este trabajo se mide la velocidad de deflagración turbulenta con tres intensidades de turbulencia distintas, en la Tabla 4-3 y Figura 4-3 se muestran los parámetros geométricos de las placas perforadas con un diámetro de 20 mm que corresponde al área libre de flujo, la placa 1 tiene 12 perforaciones cada una de 5/64 pulg (1.9843 mm) de diámetro que corresponde a un área bloqueada de 88.2%, la placa 2 tiene 12 perforaciones cada una de 3/32 pulg (2.3812 mm) de diámetro que corresponde a un área bloqueada de 83%, y la placa 3 tiene 12 perforaciones cada una de 7/64 pulg (2.7781 mm) de diámetro que corresponde a un área bloqueada de 76.8%. Para medir la intensidad de turbulencia se utilizara un hilo caliente (Marca DANTEC DYNAMICS) el cual se observa en la Figura 4-4.

Tabla 4-3. Parámetros geométricos de las placas perforadas seleccionadas.

Parámetro	Placa 1	Placa 2	Placa 3
# Agujeros	12	12	12
Diámetro agujero (Pulgadas)	5/64	3/32	7/64
σ (%)	88.2	83	76.8

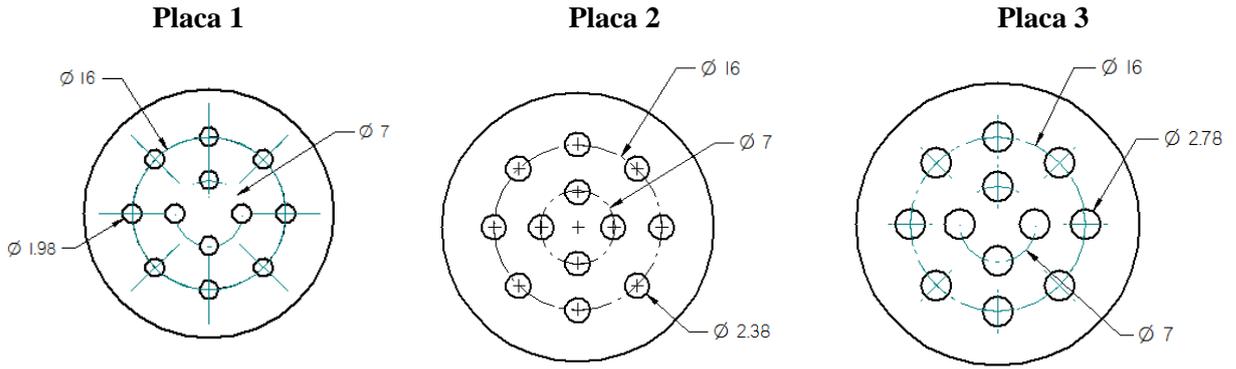


Figura 4-3. Placas perforadas para variar la intensidad de turbulencia, medidas en mm.

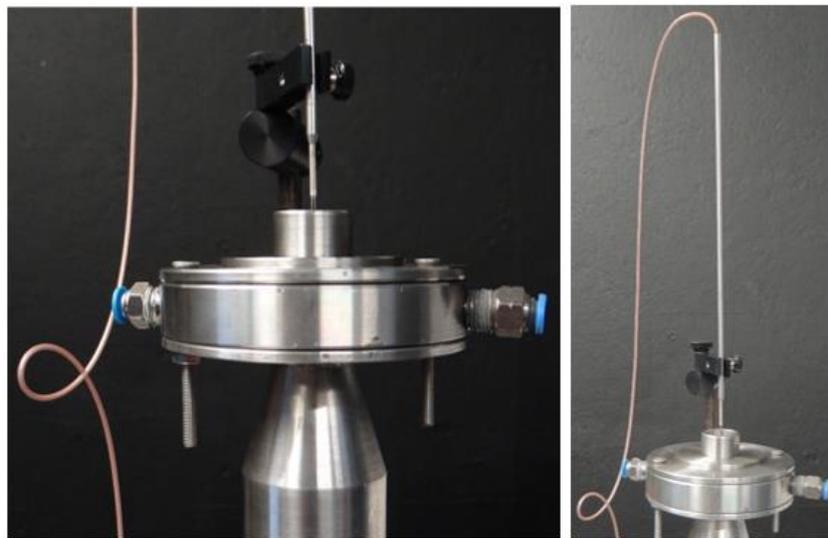


Figura 4-4. Medición de la turbulencia con el sensor hilo caliente.

Este procedimiento se seguirá para determinar la velocidad de deflagración turbulenta para varias intensidades de turbulencia y para diferentes dosados con el fin de evaluar condiciones de mezcla pobre y estequiométrica.

4.2.4 Sitios de ensayo

En este trabajo se realizaron mediciones experimentales de la velocidad de deflagración turbulenta para el metano en dos ubicaciones geográficas diferentes, las cuales se presentan en la Tabla 4-4:

Tabla 4-4. Ubicación geográfica de los sitios de ensayo.

Ubicación	Altura (m.s.n.m)	Presión (mbar-atm)	Temperatura promedio (K)	Humedad relativa (%)
Medellín	1550	849 – 0.85	22-24	55-65
Baja altitud	210	991 – 0.98	22-25	70-80

Mediciones en la ciudad de Medellín ubicada a una altura de 1550 m.s.n.m (metros sobre el nivel del mar) donde se registra una presión atmosférica de aproximadamente 0.85 atm correspondiente a una condición de presión subatmosférica, estas mediciones se llevan a cabo en el laboratorio de combustión del grupo GASURE ubicado en la Universidad de Antioquia.

Las mediciones experimentales correspondientes a la segunda ubicación geográfica se llevan a cabo en el municipio de Caucaasia a una altura de 210 m.s.n.m correspondiente a una presión atmosférica de 0.98 atm aproximadamente y considerada cercana a la presión atmosférica de nivel del mar.

4.2.5 Montaje experimental

El montaje experimental consta principalmente del suministro de gases para la premezcla de metano-aire (ver Figura 4-5) que posteriormente van dirigidos al quemador, además del sistema de medición de la turbulencia (ver Figura 4-6). La Figura 4-8 muestra el diagrama del montaje experimental de la técnica Schlieren.

El sistema de suministro de gas que se muestra en la Figura 4-5 consta principalmente de un cilindro de metano suministrado por una empresa distribuidora de gas ubicada en la ciudad de Medellín, luego se encuentra ubicado un regulador de gas marca Praxair para regular la presión a un rango máximo de 3000 Psi (207 bar), luego se ubica una válvula de bola para dar seguridad al sistema de distribución, posterior a la válvula de bola se encuentra ubicado un rotámetro calibrado para la medición del caudal de gas, este rotámetro es marca ABB y proporciona la medición del caudal en litros estándar por minuto (slpm) con una precisión de 0.05 slpm para el metano y 0.4 slpm para el aire, el caudal es regulado mediante una válvula de aguja marca Swagelok. Para el suministro de aire se cuenta con un compresor de aire, donde posteriormente el aire pasa por un condensador y filtro de partículas para lograr un aire limpio en el proceso de combustión.

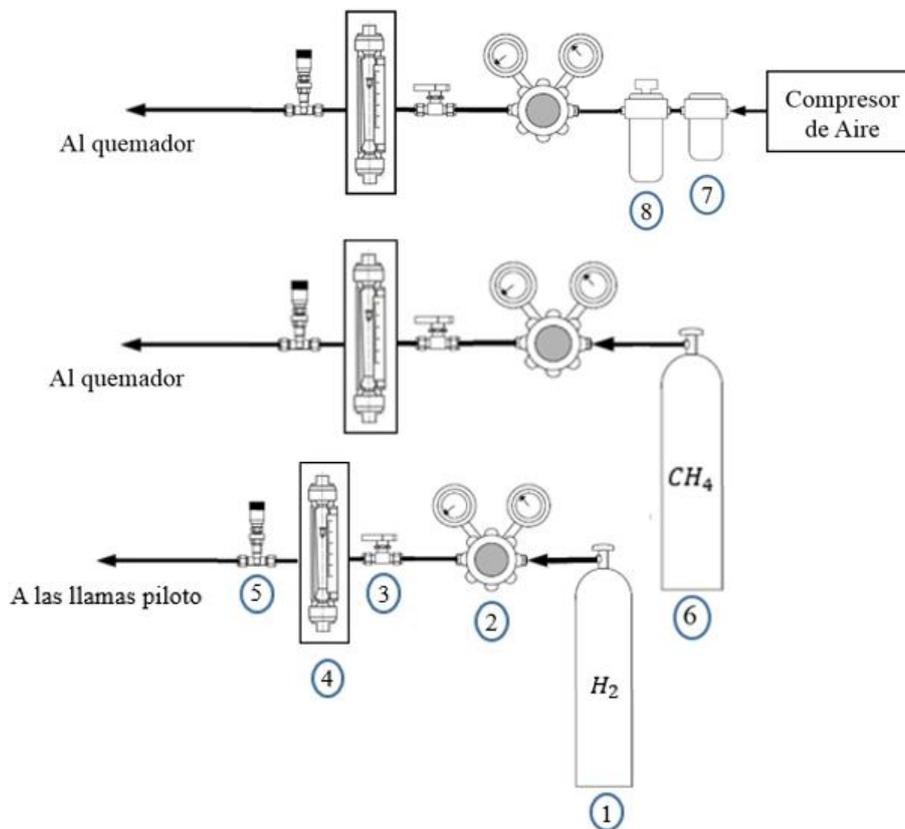


Figura 4-5. Sistema de suministro de gases para la premezcla turbulenta metano-aire. 1. Cilindro de gas hidrógeno, 2. Regulador de presión, 3. Válvula de bola, 4. Rotámetro, 5. Válvula de aguja, 6. Cilindro de gas metano, 7. Condensador, 8. Filtro de partículas.

El montaje experimental para determinar la intensidad de turbulencia se muestra en la Figura 4-6, la medición de la turbulencia se realiza en frío (sin combustión), y se supone que la

intensidad permanece constante cuando se presenta la combustión, en consecuencia no se tiene en cuenta los efectos de la combustión sobre la turbulencia al acelerarse el campo de flujo al pasar por la llama, esta técnica esta validada mediante resultados reportados por otros autores [5–7, 46]. El sistema completo consta de la base y el quemador de ensayos, luego se ubica una sonda unidimensional del tipo 55P11 para el anemómetro de hilo caliente, esta sonda unidimensional se encuentra ubica en un porta probetas tipo 55H21, luego se ubica el módulo miniCTA 54T42, la tarjeta de adquisición de datos National Instrument (Hi-speed USB Carrier, NI USB9162), y por último se dispone de un computador marca Dell exclusivo para el experimento, donde están instalados los programas y se realiza la configuración del sistema de adquisición de datos. Donde posteriormente se tratan los datos y se obtiene la intensidad de turbulencia u' . Para cada condición, mezcla, dosado e intensidad de turbulencia, 2400000 fueron registrados a una frecuencia de 40 KHz. De los datos tomados para cada condición se calculó la velocidad media del flujo y la intensidad de turbulencia u' .

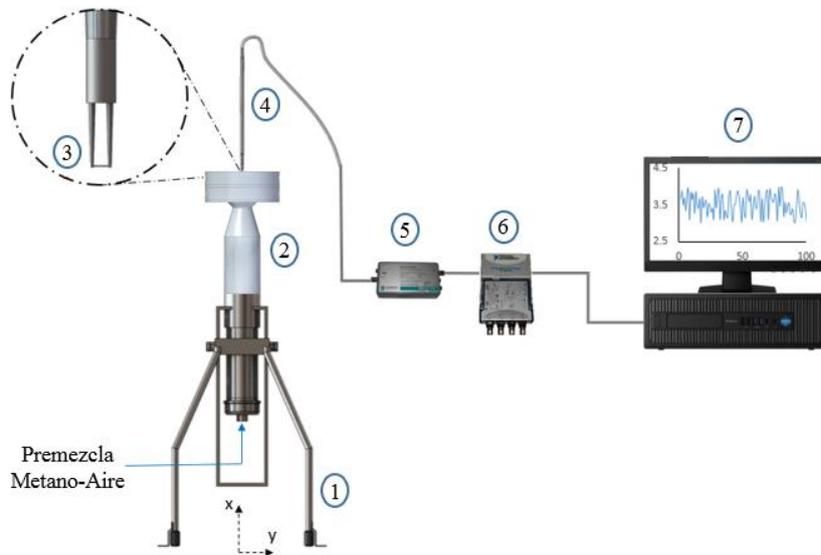


Figura 4-6. Montaje experimental para determinar la intensidad de turbulencia. 1. Base del quemador, 2. Cabeza del quemador, 3. Sonda hilo caliente (1D), 4. Porta probeta, 5. Módulo miniCTA, 6. Tarjeta de adquisición de datos, 7. Computador para el análisis de los datos.

La escala integral puede ser medida integrando el factor de autocorrelacion para la fluctuación de la velocidad obtenida en función de la distancia entre dos puntos, como se describe en la Ecuación 57 [61].

$$\rho(\tau) = \frac{\overline{u(t)u(t + \tau)}}{u^2(t)} \quad \text{Ecuación 57}$$

Para muestras discretas la anterior Ecuación 57 es modificada a:

$$\rho(m\Delta t) = \frac{\frac{1}{N - m} \sum_{i=1}^{N-m} (u_i u_{i+m})}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i^2} \quad \text{Ecuación 58}$$

Donde m varía desde 0 a $N - 1$. Integrando desde cero a infinito se obtiene la escala de tiempo integral,

$$\tau = \int_0^{\infty} \rho(\tau) d\tau \quad \text{Ecuación 59}$$

Para muestras discretas la Ecuación 59 es modificada a:

$$\tau = \left(\sum_{i=1}^{N-1} \rho(i\Delta t) \right) \Delta t \quad \text{Ecuación 60}$$

La longitud de escala integral puede ser obtenida por la multiplicación de la velocidad promedio con el tiempo de escala integral:

$$l_0 = \bar{U}\tau \quad \text{Ecuación 61}$$

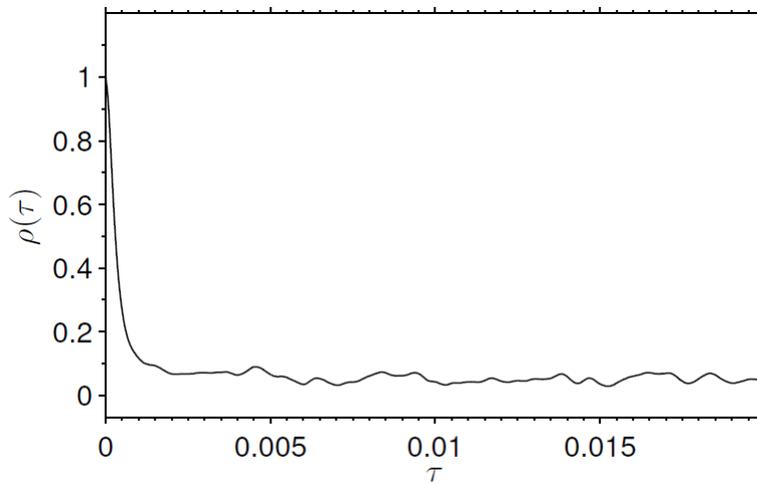


Figura 4-7. Factor de autocorrelacion para un punto de operación de la placa 1.

Después de determinar la longitud de escala integral l_0 , conociendo el número de Reynolds en la escala integral (ver Ecuación 11), y usando la Ecuación 15 para despejar la longitud de escala de Kolmogorov l_K , se tiene la Ecuación 62:

$$l_K = \frac{l_0}{Re_0^{3/4}} \quad \text{Ecuación 62}$$

En la Figura 4-8 se observa el diagrama del montaje experimental para obtener las imágenes mediante la técnica Schlieren de sombras, el sistema consta de una lámpara de xenón de alta intensidad como fuente de luz. Un lente biconvexo (diámetro: 50.8 mm, longitud de foco: 38.1 mm) y un “pin hole” son usados para enfocar la luz que posteriormente es dirigida a la zona de prueba utilizando un lente plano-convexo (diámetro: 50.8 mm, longitud de foco: 250 mm). Otro lente plano-convexo es usado para enfocar los rayos que se desvían y los que no. Una ranura ajustable bloquea los rayos desviados mientras que los rayos no desviados son capturados con una cámara CCD de alta resolución (Basler scA1400-30 gm, 1392 x 1040 pixeles, 30 fps). Las imágenes de alta resolución se obtienen usando un lente de cámara (Canon, diámetro: 49 mm, longitud de foco: 50 mm, f/1.8) y se transmiten a un ordenador para ser monitoreadas y finalmente capturadas, posteriormente a la captura de las imágenes se realiza un post procesamiento de estas mediante Matlab y así aplicar el método del quemador y determinar la velocidad de deflagración turbulenta.

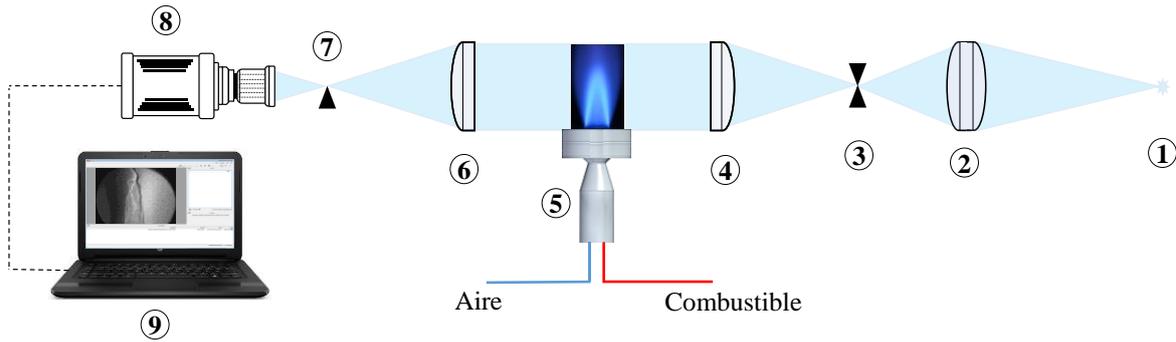


Figura 4-8. Diagrama del montaje experimental para la técnica Schlieren. 1. Fuente de luz, 2. Lente biconvexo, 3. Pin hole, 4. Lente plano convexo, 5. Quemador de premezcla turbulenta, 6. Lente plano convexo, 7. Ranura ajustable, 8. Cámara CCD, 9. Computador.

El principio de medición de la técnica Schlieren se basa en la desviación de un haz de luz colimado a través de los gradientes del índice de la reflexión en un medio transparente. Su aplicación es importante en donde las desviaciones de la luz están destinadas para ser visualizados, por ejemplo, en gradientes de refracción debido a cambios de densidad por la discontinuidad en un fluido. Esta clásica técnica óptica no intrusiva fue establecida por August Toepler en 1864 [62, 63]. La técnica Schlieren se aplica en fenómenos de transferencia de calor y masa como convección, procesos de mezclados de gases y líquidos, fenómenos de propagación de llamas, o en la investigación de flujos sónicos (o supersónicos), donde los gradientes de densidad del gas son lo suficientemente fuertes para una suficiente desviación de la luz.

En la Figura 4-9 se presenta el montaje experimental utilizado para la obtención de las llamas de premezcla turbulenta, como los elementos necesarios para la visualización de las llamas con la técnica Schlieren y su ubicación para la correcta visualización.

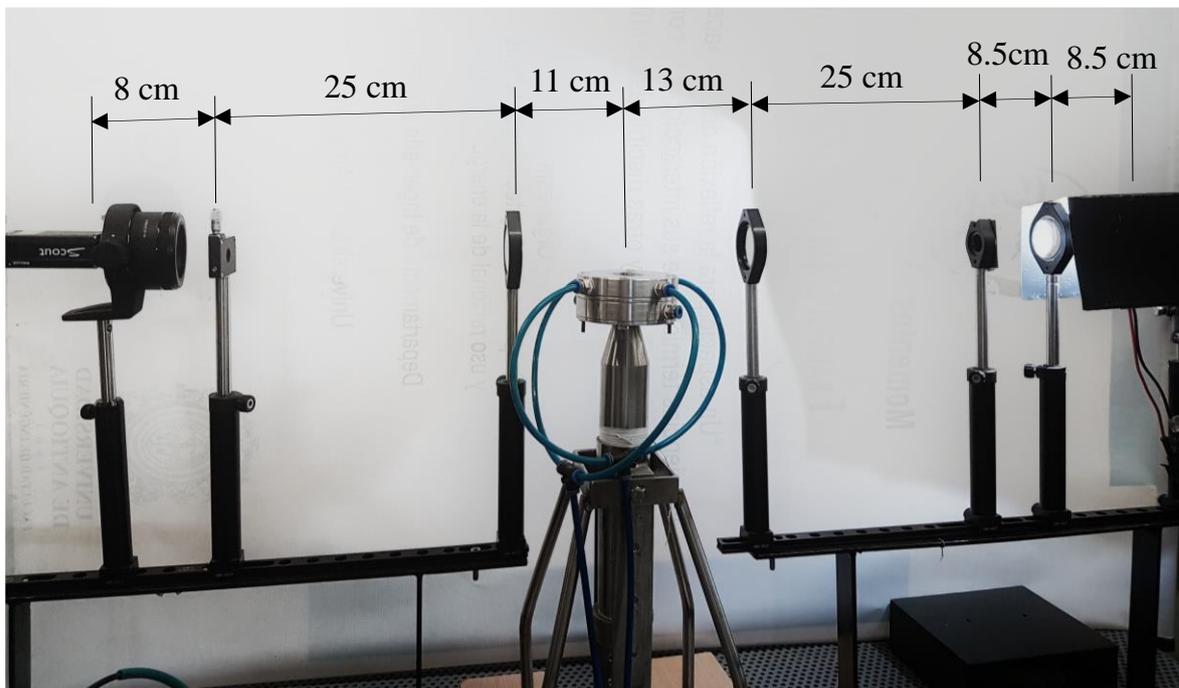


Figura 4-9. Montaje experimental para la técnica Schlieren.

4.2.6 Adquisición de datos y procesamiento de imágenes

La adquisición de datos se logra luego de establecer el factor de equivalencia y la intensidad de turbulencia deseados, en esta etapa para cada condición de la llama de premezcla turbulenta se capturan 60 imágenes, mediante la técnica Schlieren, las cuales se procesan y se determina el ángulo promedio de la llama.

Luego de capturar las 60 imágenes mediante una subrutina desarrollada en el software Matlab® se obtiene el perfil para cada una de las llamas y luego obtener el perfil promedio de estas, para posteriormente determinar el ángulo promedio de la llama.

En la Figura 4-10 se presenta el método de análisis para la obtención del ángulo promedio de las llamas de premezcla turbulenta. (a) Llama de premezcla turbulenta a las condiciones establecidas de dosado e intensidad de turbulencia. (b) Mediante el software Matlab se recorta la imagen y se determina el perfil de la llama, mediante la selección del perfil, esta selección se realizó de forma manual siguiendo la metodología de Rockwell y Rangwala [36, 60]. La incertidumbre asociada con la selección del perfil de llama manualmente no se cuantifica en el actual trabajo. (c) Luego se convierte la ubicación de la llama de píxeles a unidades de longitud. (d) Este procedimiento se realiza para 60 imágenes y se combinan los perfiles de las llamas obtenidas. (e) Para la imagen promedio se determinan los puntos interiores (premezcla sin quemar) que corresponden a un valor para la variable de progreso $c = 0$ y los puntos exteriores (gases quemados) que corresponden a un valor para la variable de progreso $c = 1$. (f) Luego de combinar las imágenes se promedian para obtener un solo perfil y determinar el ángulo α promedio de las 60 imágenes, este ángulo promedio se determina usando un valor para la variable de progreso de $c = 0.10$ según valores referenciados en la literatura [5, 64], la obtención de este ángulo siempre fue posible para todas las condiciones del experimento, y el error en la medida del ángulo está asociado a la tolerancia de la variable de progreso que corresponde a más o menos 10%.

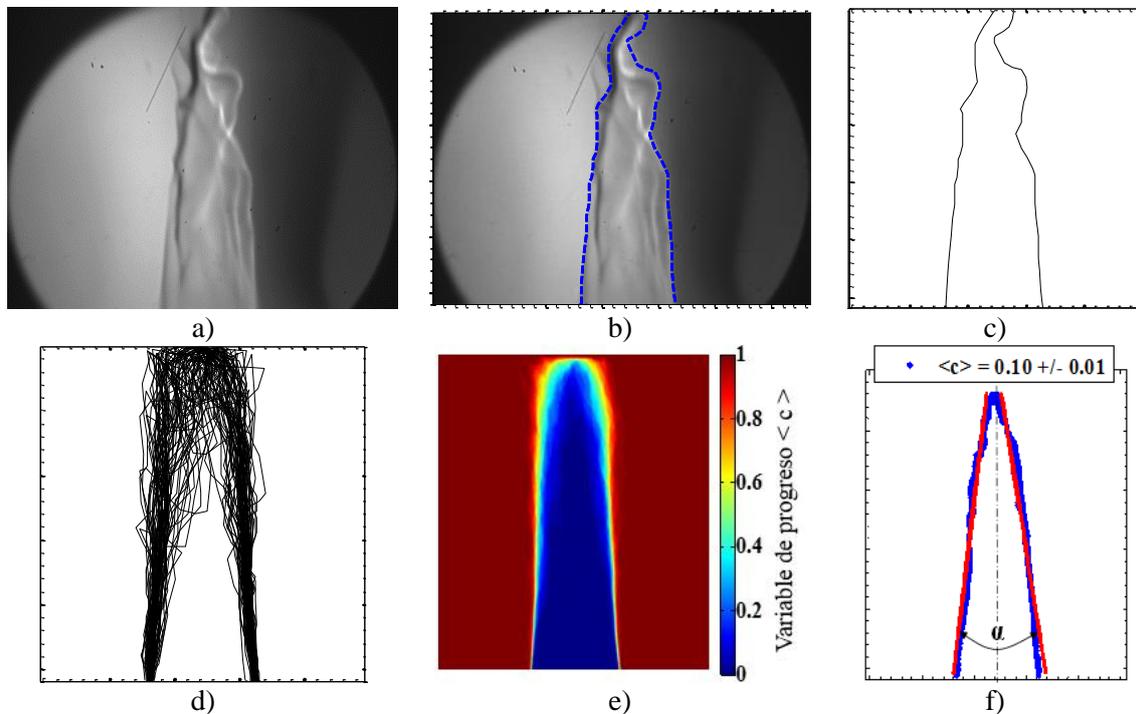


Figura 4-10. Procesamiento de imágenes de llamas de premezcla turbulenta, a). Imagen Schlieren, b). Selección del contorno del frente de llama, c). Contorno del frente de llama, d). Superposición de 60 frentes de llama, e). Variable de progreso, f). Ángulo promedio del frente de llama.

Para determinar el número de imágenes requeridas para calcular la velocidad de deflagración turbulenta, se realizó un estudio paramétrico como se muestra en la Figura 4-11 comparando la velocidad de deflagración turbulenta en función del número de imágenes usadas para el cálculo. En el cálculo de la velocidad de deflagración turbulenta se alcanza un comportamiento asintótico entre 40 y 50 imágenes, sin embargo, añadiendo un factor de seguridad al cálculo el procesamiento de imágenes se realizó con 60 imágenes para determinar la velocidad de deflagración turbulenta.

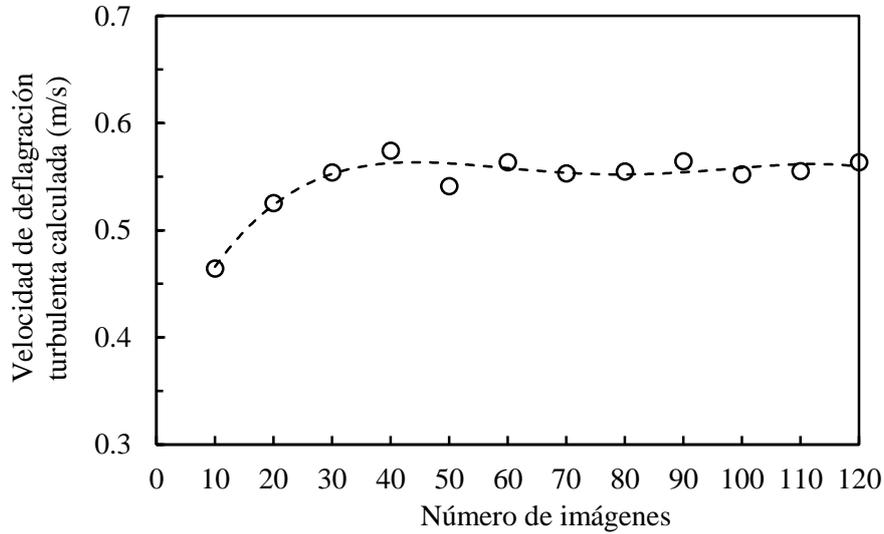


Figura 4-11. Comparación de la velocidad de deflagración turbulenta calculada versus el número de imágenes usadas.

4.2.7 Procedimiento experimental

Para realizar las pruebas experimentales se generan llamas de premezcla turbulenta en un quemador Bunsen para el metano, para diferentes intensidades de turbulencia y el factor de equivalencia deseado, mediante el uso de rotámetros calibrados específicamente para cada gas se garantiza la composición y el factor de equivalencia de la premezcla metano-aire, además se generan llamas piloto para el sostenimiento de la llama. El puerto del quemador se mantiene refrigerado de tal modo que la premezcla no se precaliente y evitar fenómenos de retollama, también para atenuar el efecto de la temperatura de la premezcla sobre la velocidad de deflagración turbulenta. Para determinar la velocidad de deflagración turbulenta se utiliza el método del ángulo como se observa en la Figura 4-12, que consiste en determinar el ángulo promedio de las llamas y la velocidad promedio de la premezcla metano-aire a la salida del puerto del quemador.

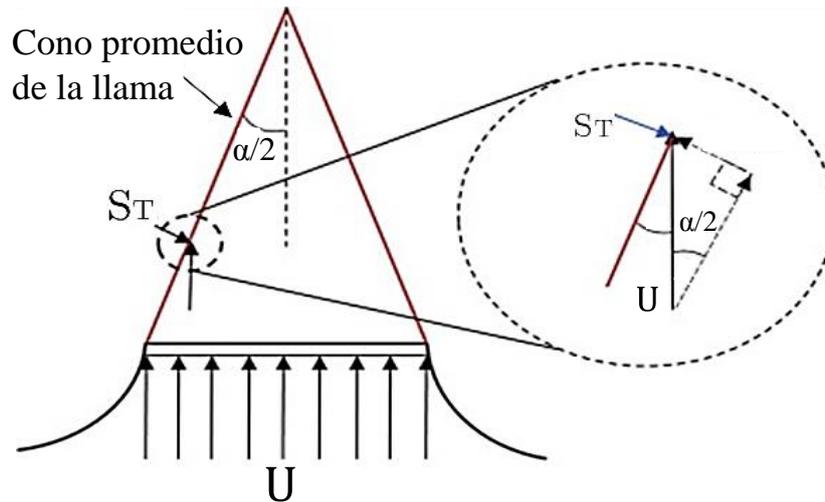


Figura 4-12. Perfil del contorno del quemador y método del ángulo.

Una vez determinado el ángulo promedio de la llama de premezcla turbulenta se determina la velocidad promedio U de la premezcla metano-aire a la salida del puerto del quemador, para esto se utiliza la Ecuación 63:

$$U = \frac{Q_f + Q_a}{A_b} \quad \text{Ecuación 63}$$

En dónde U es la velocidad promedio de la premezcla en el puerto del quemador, Q_f es el caudal en sitio (calculado a las condiciones de presión y temperatura del sitio de ensayo) de combustible en la premezcla a las condiciones de presión y temperatura, Q_a es el caudal en sitio (calculado a las condiciones de presión y temperatura del sitio de ensayo) de aire en la premezcla a las condiciones de presión y temperatura, y A_b es el área del puerto del quemador.

Cuando se determina correctamente el ángulo de la llama y la velocidad promedio de la premezcla a la salida del quemador, la velocidad de deflagración turbulenta S_T queda determinada por la Ecuación 64 como:

$$S_T = U \operatorname{sen} \left(\frac{\alpha}{2} \right) \quad \text{Ecuación 64}$$

Donde S_T es la velocidad de deflagración turbulenta, U es la velocidad promedio de la premezcla en el puerto del quemador, y α es el ángulo del frente de llama de la premezcla.

4.3 Metodología numérica

Durante el presente trabajo se utilizaron cálculos numéricos para determinar la velocidad de deflagración laminar y la temperatura de llama adiabática, los demás parámetros y números adimensionales presentados en este trabajo se calcularon utilizando correlaciones y ecuaciones definidas para cada variable. A continuación se explica la metodología y parámetros numéricos seguidos para el cálculo de la temperatura de llama adiabática y velocidad de deflagración laminar.

4.3.1 Temperatura de llama adiabática

Para el cálculo numérico de la temperatura de llama adiabática se utilizó la subrutina Equil del software Chemkin Pro, esta rutina permite determinar el estado químico de una mezcla bajo condiciones de equilibrio, empleando el método “*Element-potential*” incorporado en el software Stanjan y empleado por Equil, tomado de [65].

El método “*Element-potential*” se basa en minimizar la energía libre de Gibb’s, considerando los gases como gases ideales, y la solución en equilibrio a una presión y temperatura dadas es la distribución de moles de cada especie minimizada la función de Gibb’s del sistema sujeta a restricciones atómicas, tomado de [65].

4.3.2 Velocidad de deflagración laminar

La subrutina Premix del software Chemkin Pro utilizada para el cálculo de la velocidad de deflagración laminar, requiere de una suposición inicial por parte del usuario de los perfiles de especies (reactivos, productos, especies intermedias) y de temperatura que servirá como punto de partida para comenzar a solucionar el problema. De la correcta suposición de estos perfiles depende que el programa llegue a una solución final, además de que sea de una manera rápida. Dentro del cálculo se incorpora el efecto termo difusivo, el cálculo de transporte multicomponente para las propiedades de transporte de las especies del mecanismo.

El número máximo de puntos o nodos que debe tener la malla en la solución final debe ser de alrededor de 1000 para que la temperatura de los productos concuerde con la temperatura de llama adiabática. El valor de 1200 se pone en caso de que los valores de GRAD y CURV entrados sea tan bajo que la solución requiera de más de 1200 puntos para satisfacer los valores de GRAD y CURV entrados. Sin embargo, como se sabe que una solución con 1000 puntos es lo suficientemente precisa, el programa parará la simulación a 1200 puntos y mostrará la solución correspondiente a dicho número de puntos, a pesar de que la malla no satisfaga los valores de GRAD y CURV.

La magnitud de la malla inicial se define en un punto de inicio correspondiente a 0 cm y tiene un punto final de 1 cm, sin embargo para refinar la malla y dar una correcta predicción esta malla debe ser refinada, este procedimiento se realiza ampliando el dominio de la malla hasta llegar a un dominio desde -2.0 cm a 10.0 cm y se definen el GRAD y el CURV para obtener un número mayor de nodos en la solución. Para la ampliación del dominio se emplean continuaciones donde se refina paulatinamente la malla, en este estudio se realizaron 3 continuaciones, las cuales corresponden a las presentadas en la Tabla 4-5.

Tabla 4-5. Continuaciones.

Parámetro	Continuación		
	1	2	3
Starting Axial Point	-0.5	-2	-2
Ending Axial Point	5	8	10
Adaptive Grid Control Based On Solution Gradient (GRAD)	0.8	0.7	0.009
Adaptive Grid Control Based On Solution Curvature (CURV)	0.8	0.7	0.018

4.4 Incertidumbre

Cada componente individual agrega una incertidumbre a los datos del presente estudio. La medición del caudal de los flujos tiene una incertidumbre de 1% (0.05 slpm para el metano y 0.4 slpm para el aire), la medición de la intensidad de turbulencia tiene una incertidumbre asociada a las fluctuaciones de velocidad en la salida del puerto del quemador, sin embargo esta se

minimiza debido a la alta frecuencia de muestreo por ende se tiene un largo tiempo de muestreo y un gran número de datos. Las imágenes obtenidas con la técnica Schlieren se tomaron a una velocidad de 30 fps (fotos por segundo), y durante la captura de las imágenes están pueden moverse durante el tiempo de exposición. Mediante el software Matlab se recorta la imagen y se determina el perfil de la llama, mediante la selección del perfil, esta selección se realizó de forma manual y la incertidumbre asociada con la selección del perfil de llama manualmente no se cuantifica en el actual trabajo. Como la incertidumbre del experimento no se pudo medir cuantitativamente, las barras de error se calculan como la desviación estándar de la velocidad de deflagración turbulenta calculada. Esto proporciona una región de confianza del 95% en el resultado calculado.

4.5 Análisis de resultados

En esta etapa final se procede con el análisis de resultados, realizando comparaciones entre los resultados teóricos y experimentales estableciendo las principales diferencias y comparaciones de la velocidad de deflagración turbulenta. Al finalizar esta etapa se estará en capacidad de realizar el informe final del proyecto, mostrando básicamente el marco teórico y estado del arte, metodología desarrollada, resultados y discusión, acompañado también de conclusiones y recomendaciones necesarias para futuros trabajos.

Los análisis teóricos y de resultados experimentales se centran básicamente en los siguientes aspectos:

- Análisis teóricos de las variables que se afectan por la presión y que tienen incidencia sobre el comportamiento de la velocidad de deflagración turbulenta.
- Los resultados serán presentados mediante gráficos donde se muestren comportamientos de la velocidad de deflagración turbulenta S_T en función del dosado, para dosados pobres y estequiométricos para diferentes intensidades de turbulencia.
- Realizar un análisis gráfico del comportamiento de la velocidad de deflagración turbulenta en función de la intensidad de turbulencia para determinar una correlación teórica.
- Se analizarán las condiciones experimentales en la que se puedan presentar inestabilidades intrínsecas de la premezcla, inestabilidades extrínsecas de la premezcla, extinción por excesiva turbulencia, que no permitan obtener resultados experimentales de la velocidad de deflagración turbulenta.
- Realizar un análisis y respuesta del error para la velocidad de deflagración turbulenta para las condiciones estudiadas.

CAPÍTULO V

5 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la sección anterior se describió la metodología experimental para obtener los resultados que se presentan en este capítulo. Los resultados experimentales obtenidos son la base para el posterior análisis de estos y dan soporte al estudio realizado sobre la velocidad de deflagración turbulenta del metano a condiciones subatmosféricas.

Los resultados serán tratados y comparados en función de la presión atmosférica establecida en cada sitio de ensayo, proporcionando así los argumentos necesarios para desarrollar las conclusiones de este trabajo. Los experimentos y cálculos fueron llevados a cabo para presiones de 0.85 atm y 0.98 atm.

5.1 Propiedades de transporte

Para el cálculo de algunas propiedades de combustión es necesario determinar propiedades de transporte, como la viscosidad, la conductividad térmica, la difusividad molecular, difusividad térmica, número de Lewis, las cuales en la Tabla 5-1 están resumidas, tanto para las condiciones atmosféricas correspondientes a la ciudad de Medellín como para las condiciones atmosféricas de nivel del mar, y para un dosado de 1.0 y 0.8.

Tabla 5-1. Propiedades de transporte de la premezcla metano/aire*.

Parámetro	Dosado, ϕ	Condición subatmosférica 0.85 atm	Condición nivel del mar 0.98 atm
Viscosidad, $\mu \left(\frac{\text{Kg}}{\text{ms}}\right) \times 10^5$	1.0	1.7784	1.7922
	0.8	1.7895	1.8034
Calor específico, $C_p \left(\frac{\text{KJ}}{\text{kgK}}\right)$	1.0	1.0808	1.0814
	0.8	1.0673	1.0679
Conductividad térmica, $\lambda \left(\frac{\text{W}}{\text{mK}}\right)$	1.0	0.025089	0.025255
	0.8	0.025023	0.025317
Difusividad molecular, $D_{\text{CH}_4,\text{Aire}} \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right) \times 10^5$	1.0	2.718	2.332
	0.8	2.696	2.314
Difusividad térmica, $D_{\text{th}} \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right) \times 10^5$	1.0	2.421	2.079
	0.8	2.438	2.093
Número de Lewis, $Le_{\text{CH}_4,\text{Aire}}$	1.0	0.8908	0.8913
	0.8	0.9044	0.9049

* Cálculos propios.

De acuerdo a los valores presentados de las propiedades en la anterior tabla, se observa que la variación de estas propiedades respecto a la presión es mínima para la mayoría, sin embargo, para la difusividad molecular y térmica se tienen variaciones considerables por efecto presión.

5.2 Temperatura de llama adiabática

A continuación, se presentan los resultados numéricos realizados en la subrutina Equil del software Chemkin PRO de la temperatura de llama adiabática del metano a condiciones atmosféricas de la ciudad de Medellín y condiciones atmosféricas equivalentes al nivel del mar.

En la Figura 5-1 y Figura 5-3 se presenta la temperatura de llama adiabática para presiones atmosféricas de 0.85 atm y 0.98 atm, aunque las temperaturas de llama adiabática son muy

parecidas en todo el rango de dosados que corresponden desde $\phi = 0.7$ hasta $\phi = 1.3$, se tiene que para la presión de 0.85 atm en general los valores de temperatura de llama adiabática son menores que para la presión de 0.98 atm. Es así como para un dosado de $\phi = 1.0$ se tienen los siguientes resultados, para una presión de 0.85 atm la temperatura es 2218.774 K mientras que para la presión de 0.98 atm la temperatura es 2222.689 K, que corresponde a un incremento de 0.2% aproximadamente de la temperatura de llama adiabática correspondiente a la presión de 0.98 atm respecto a la presión de 0.85 atm.

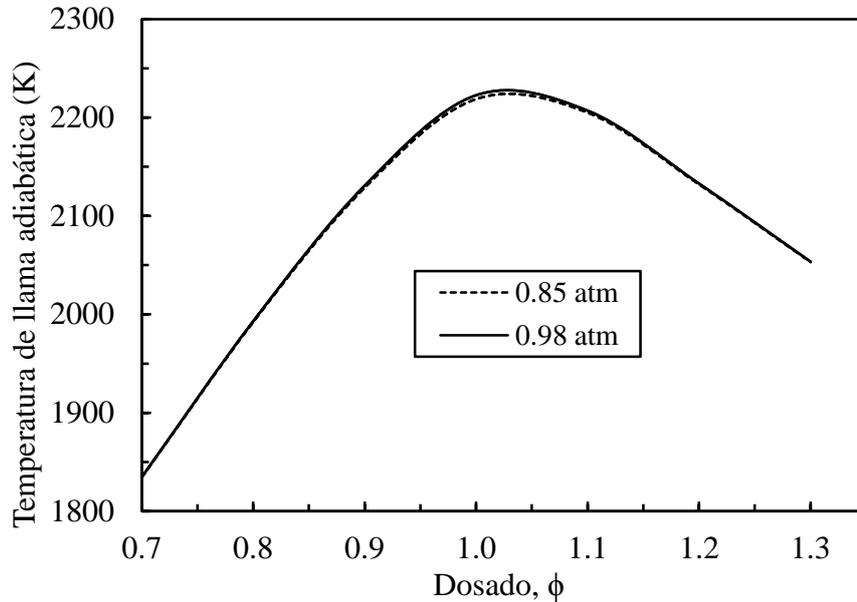


Figura 5-1. Temperatura de llama adiabática del metano a P=0.85 atm y P=0.98 atm.

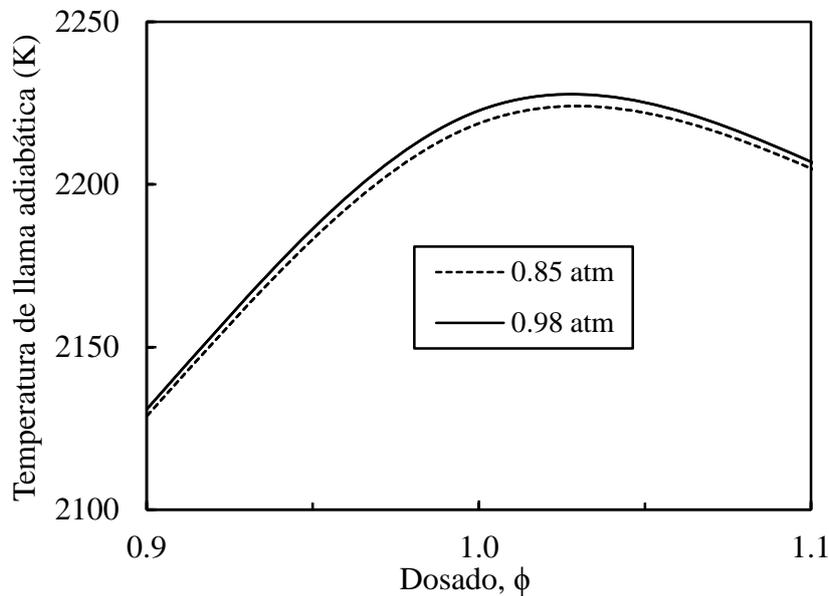


Figura 5-2. Temperatura de llama adiabática del metano a P=0.85 atm y P=0.98 atm.

5.3 Velocidad de deflagración laminar

La velocidad de deflagración laminar se determinó numérica y experimentalmente para las condiciones atmosféricas correspondientes a la ciudad de Medellín (0.85 atm, 295 K) y para las

condiciones correspondientes a nivel del mar (0.98 atm, 295 K). Para las condiciones de nivel del mar y un dosado $\phi = 0.8$ no fue posible establecer un valor para la velocidad de deflagración laminar debido a que se presentaba el fenómeno de desprendimiento imposibilitando tener una llama estable, por lo cual se optó por utilizar un valor reportado por Vagelopoulos y Egolfopoulos [66]. Estos valores de velocidad de deflagración laminar serán utilizados posteriormente en otros análisis y cálculos.

En la Figura 5-3 se presenta la velocidad de deflagración laminar versus el dosado para presiones atmosféricas de 0.85 atm y 0.98 atm, en general se observa un buen ajuste entre los resultados experimentales y numéricos en todo el rango de dosados que corresponden desde $\phi = 0.7$ hasta $\phi = 1.3$.

Los resultados numéricos fueron realizados en la subrutina Premix del Chemkin Pro [59] utilizando para las simulaciones el mecanismo GRI-Mech 3.0 [67] mecanismo de reacción detallado con 325 reacciones y 53 especies, el cual ha sido verificado y optimizado ampliamente para la representación de llamas e ignición del gas natural. Los resultados experimentales fueron obtenidos utilizando el método del quemador, que consiste básicamente en determinar el ángulo de la llama mediante técnicas ópticas y posteriormente calcular la velocidad de deflagración laminar, el quemador utilizado es un quemador de contorno curvado el cual anula el efecto de stretch sobre la llama [8, 68–70].

En la Figura 5-3 se observa que los resultados tanto numérico y experimentales para una presión de 0.98 atm siempre son menores que para una presión de 0.85 atm. El mecanismo, para una presión de 0.98 atm se ve un ajuste muy bueno entre los resultados experimentales y numéricos, en general para la presión de 0.85 atm se cuenta con un buen ajuste, con una diferencia máxima de 10 % entre los valores numéricos y experimentales, este valor máximo corresponde al dosado de $\phi = 1.2$. Para un dosado de $\phi = 1.0$ se tienen los siguientes resultados, para una presión de 0.85 atm la velocidad de deflagración laminar es 40.04 cm/s mientras que para la presión de 0.98 atm la velocidad de deflagración laminar es 36.53 cm/s, que corresponde a una disminución de 9% aproximadamente de la velocidad de deflagración laminar correspondiente a la presión de 0.98 atm respecto a la presión de 0.85 atm.

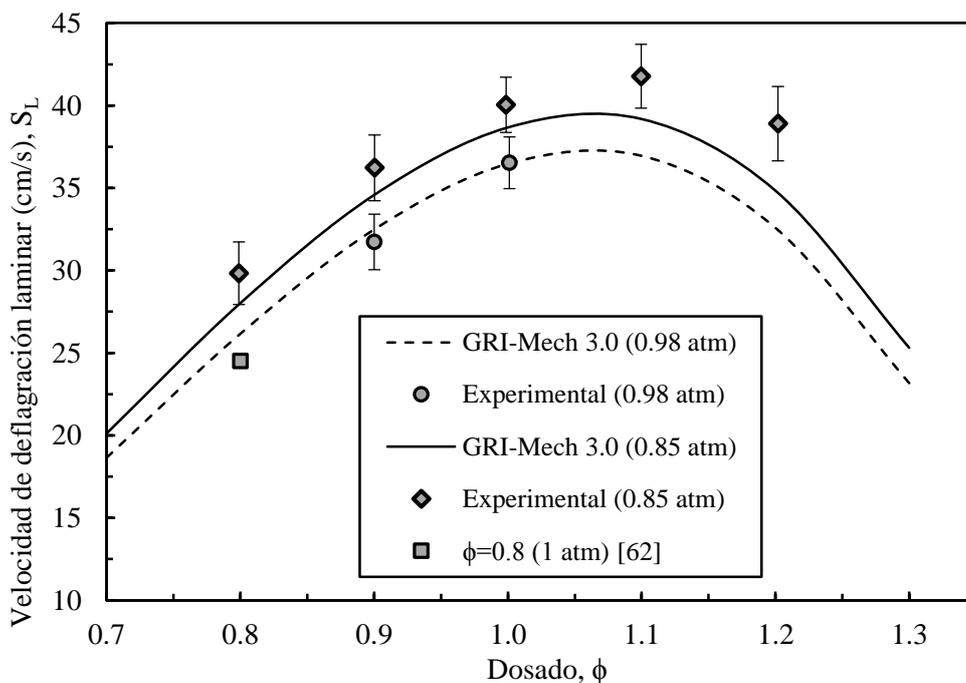


Figura 5-3. Velocidad de deflagración laminar del metano a condiciones atmosféricas de nivel del mar y a condiciones atmosféricas de la ciudad de Medellín.

5.3.1 Análisis de sensibilidad

Un análisis de sensibilidad de las reacciones más importantes sobre la velocidad de deflagración laminar fue llevado a cabo para establecer que especies y reacciones generan la disminución de la velocidad de deflagración laminar con los incrementos de presión, es importante realizar este análisis, ya que como se ha dicho a lo largo del documento la velocidad de deflagración laminar tiene una alta influencia sobre la estimación de la velocidad de deflagración turbulenta, siendo un parámetro importante y punto de partida para realizar análisis entorno a la velocidad de deflagración turbulenta.

En este análisis de sensibilidad se tomaron las 15 reacciones más influyentes para presión atmosférica correspondiente a 0.98 atm y 0.85 atm. La Figura 5-4 y Figura 5-5 muestra los resultados para el metano a condiciones de 0.85 atm y 0.98 atm. El análisis de sensibilidad a explicar el comportamiento de la formación de especies químicas intermedias, que es un factor importante en la sensibilidad de la velocidad de deflagración laminar.

De acuerdo a los resultados del análisis de sensibilidad de los parámetros cinéticos, las reacciones de recombinación (R35, R43, R45, R52, R53, R55, R98, R158) tienen el mayor efecto negativo sobre la velocidad de deflagración laminar. Y las reacciones que envuelven el radical HO₂ tienen un efecto negativo también (R35: H+O₂+H₂O=HO₂+H₂O y R45: H+HO₂=O₂+H₂). La reacción de ramificación H + O₂ = O + OH (R38) tiene el valor positivo más grande de sensibilidad y fue más alto para la presión correspondiente a 991 mbar y un valor un poco menor para la presión de 0.85 atm. Análisis similares son reportados por Dong y otros [71] para la combustión del metano. Por otro lado, la reacción de recombinación H + CH₃ (+M) = CH₄ (+M) (R52) afecta negativamente la reactividad del metano para ambas condiciones de presión.

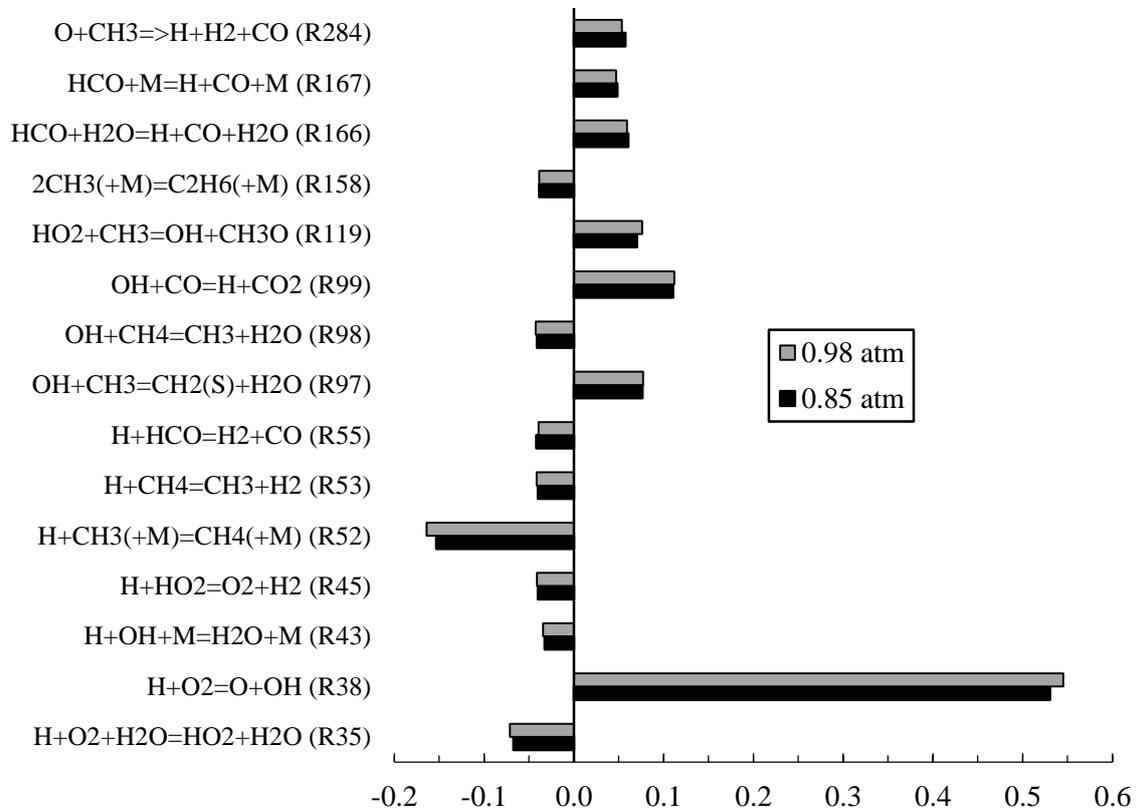


Figura 5-4. Análisis de sensibilidad de los parámetros cinéticos para la velocidad de deflagración laminar, $\phi = 1.0$.

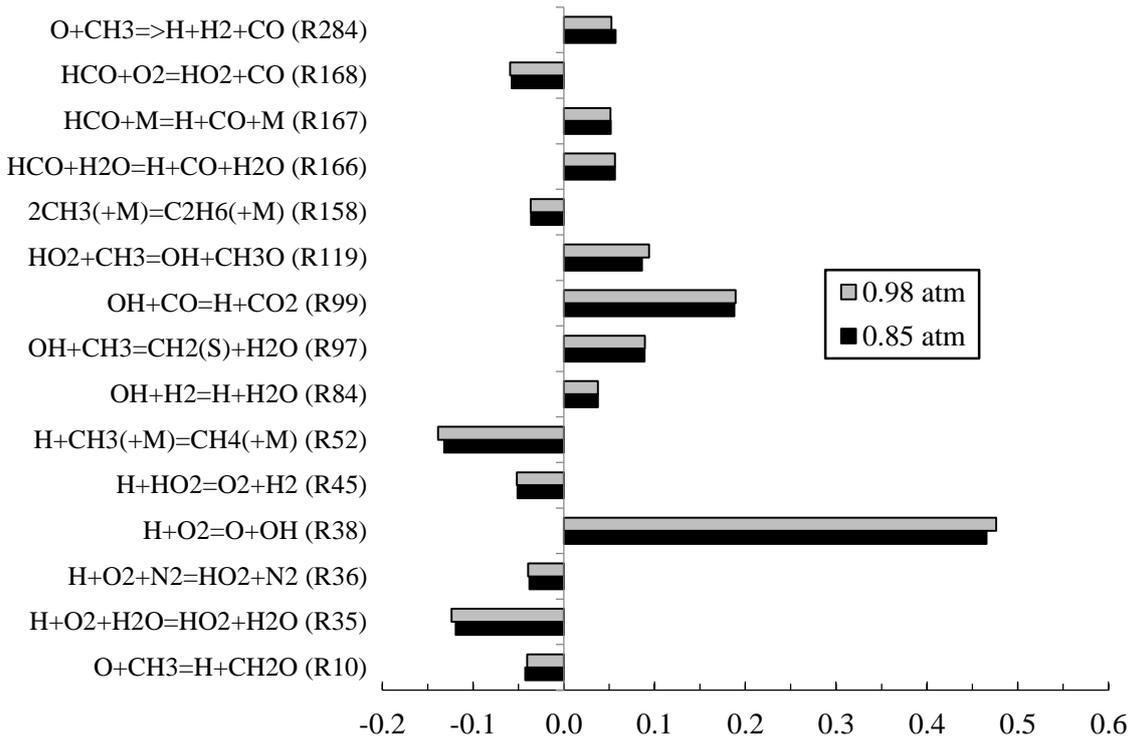
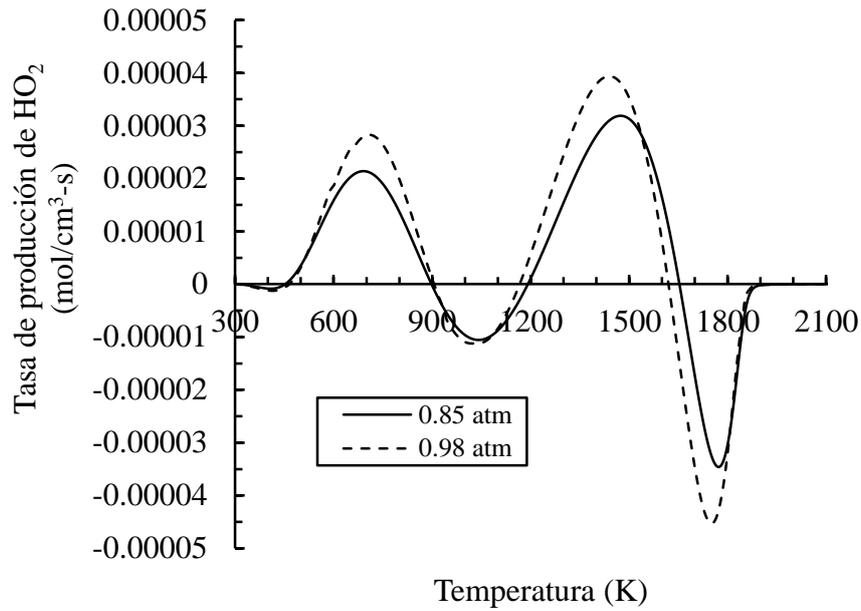


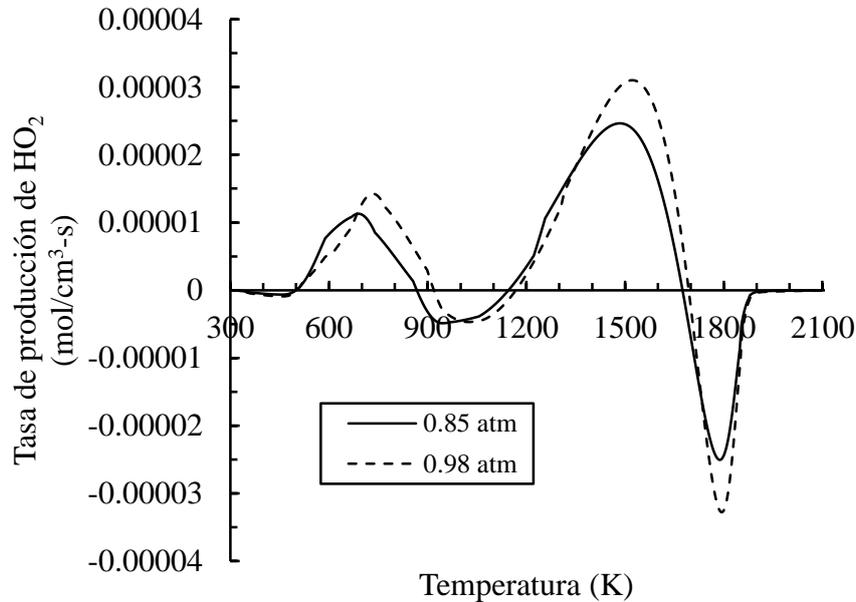
Figura 5-5. Análisis de sensibilidad de los parámetros cinéticos para la velocidad de deflagración laminar, $\phi = 0.8$.

De acuerdo al análisis de sensibilidad el decrecimiento de la velocidad de deflagración laminar con los incrementos de presión, está asociada con el incremento de la producción del radical HO₂. La fracción molar del radical fue mayor cuando la presión es 0.98 atm. Se observó un comportamiento similar para las condiciones pobres y estequiométricas. El radical HO₂ es un vehículo muy inactivo en comparación con otros radicales, haciendo que disminuya la velocidad de reacción total.

La fracción más elevada del radical HO₂ con mayor presión puede asociarse con las reacciones R35 (H + O₂ + H₂O = HO₂ + H₂O) y R45 (H+HO₂=O₂+H₂) para un dosado de 1.0, y las reacciones R35 (H+O₂+H₂O=HO₂+H₂O), R36 (H+O₂+N₂=HO₂+N₂), R45 (H+HO₂=O₂+H₂), R168 (HCO+O₂=HO₂+CO) para un dosado de 0.8, en particular la primera, que se mejora con el aumento de la presión y toma un papel más dominante en el proceso de reacción [25]. Se calculó la velocidad de producción del radical HO₂ de reacción total (Figura 5-6). Como puede verse, la producción de HO₂ fue más alta a presión atmosférica, y las reacciones R35 y R45 tuvieron una gran influencia en este aumento, confirmando lo anterior.



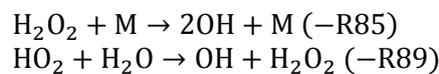
a)



b)

Figura 5-6. Tasa de producción total de HO₂ a). $\phi = 1.0$ b). $\phi = 0.8$.

Consecuentemente, más radicales H son consumidos por ambas reacciones a una menor presión, reduciendo la disponibilidad de este radical. Esto afecta directamente a la velocidad de reacción de la reacción R38 ($H + O_2 = O + OH$), que tiene el efecto más positivo sobre la velocidad de combustión laminar según el análisis de sensibilidad. De esta manera, el efecto neto es una reducción de la velocidad de deflagración laminar debido a la menor disponibilidad de radicales H para producir OH a través de la reacción R38. En su lugar, la generación de OH se lleva a cabo por las siguientes reacciones:

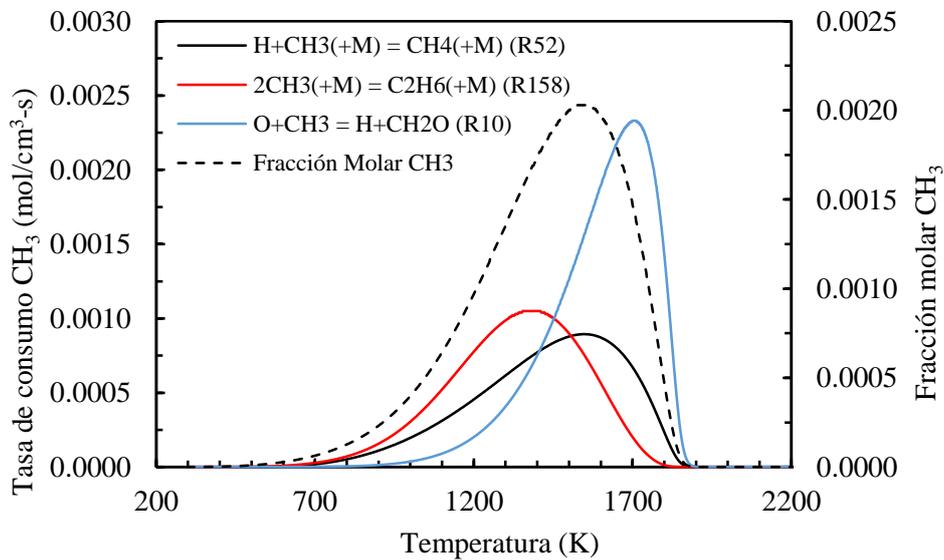


La disminución en la velocidad de deflagración laminar con el aumento de presión se debe a la mayor producción de especies HO₂ en condiciones atmosféricas de nivel del mar, la cual

aumenta el consumo de radicales H. Esto cambia la trayectoria de reacción de producción de radicales OH, conduciendo a un proceso de reacción neta más lento.

Además, de acuerdo al estudio realizado por Goswami y otros [54], la especie CH_3 tiene un efecto significativo sobre la velocidad de deflagración laminar. La Figura 5-7 y Figura 5-8 representa los flujos en función de la presión de las siguientes reacciones R52 ($\text{H} + \text{CH}_3 (+\text{M}) = \text{CH}_4 (+\text{M})$), R158 ($2\text{CH}_3 (+\text{M}) = \text{C}_2\text{H}_6 (+\text{M})$), y R10 ($\text{O} + \text{CH}_3 = \text{H} + \text{CH}_2\text{O}$), y en un eje secundario se traza el perfil de la especie CH_3 . Las reacciones R52, R158, y R10 dominan el consumo del CH_3 que es un importante radical en la oxidación del metano, este análisis se realiza para un dosado de 0.8 y 1.0, y presiones atmosféricas de 0.85 atm y 0.98 atm, y en general se tienen las siguientes conclusiones:

- La reacción R10 que conduce al mayor consumo de CH_3 para $\phi = 1.0$ para las presiones de 0.85 atm y 0.98 atm tiene una disminución considerable de consumo para un $\phi = 0.8$.
- La tasa de reacción de la R158 disminuye en el mismo orden de la R52 desde que menos radicales CH_3 son producidos en mezcla pobre.
- La evolución de la R10 permanece cualitativamente igual para las dos condiciones de presión, sin embargo la tasa de consumo del radical CH_3 a través de la reacción R158 y la R52 para un $\phi = 0.8$ hasta $\phi = 1.0$ y una misma condición de presión disminuye considerablemente.
- La fracción molar de CH_3 aumenta levemente para una condición de 0.85 atm respecto a 0.98 atm para $\phi = 1.0$ y este mismo comportamiento se sigue para $\phi = 0.8$.
- Cuando se compara para una misma presión y para un dosado de $\phi = 1.0$ y $\phi = 0.8$ la fracción molar del radical CH_3 es aproximadamente 1.5 veces para un $\phi = 1.0$ respecto a $\phi = 0.8$ para ambas condiciones de presión.



a)

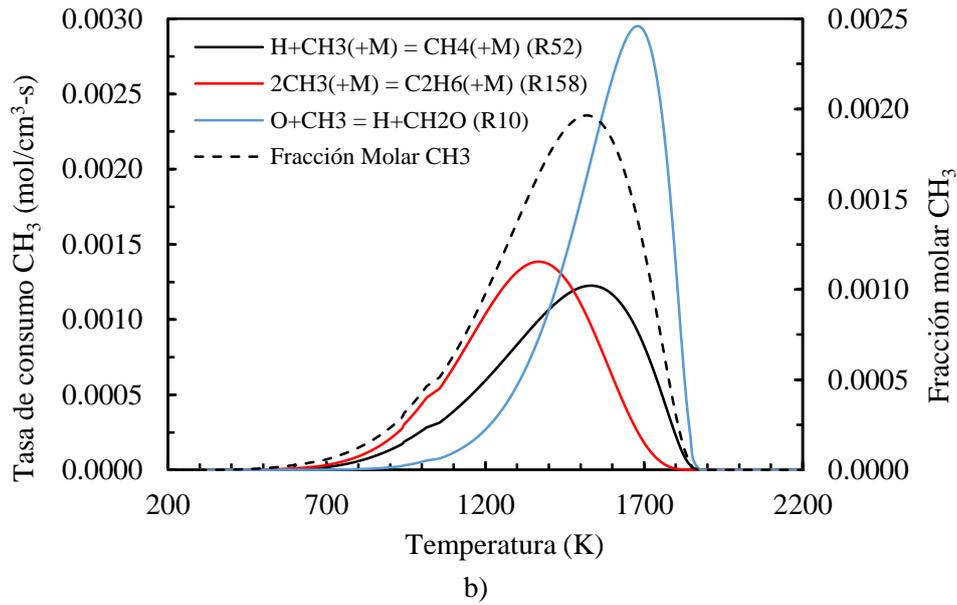
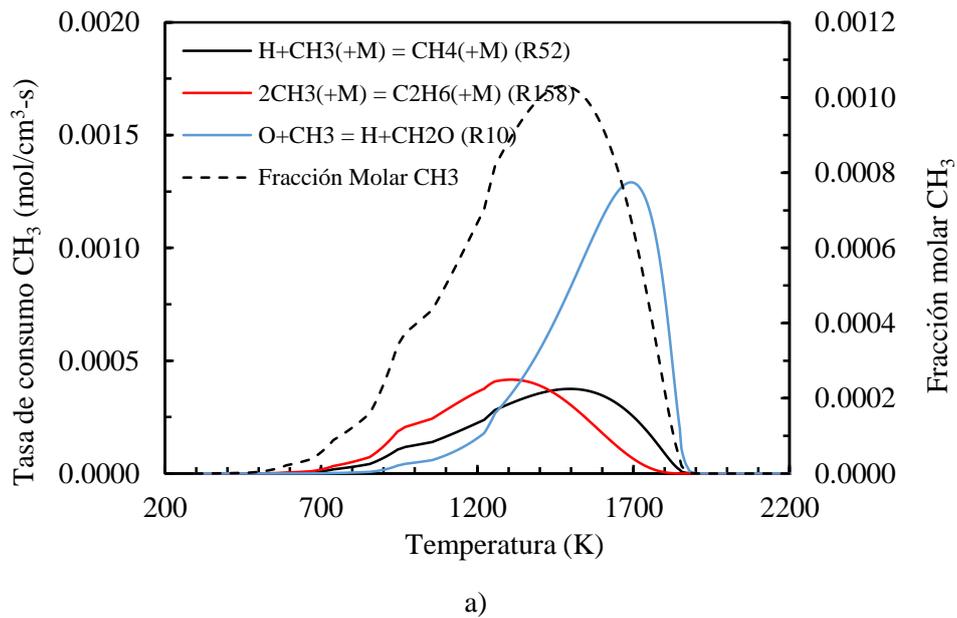


Figura 5-7. Fracción molar de CH_3 y tasa de consumo de CH_3 para las reacciones R52 ($\text{H} + \text{CH}_3 (+\text{M}) = \text{CH}_4 (+\text{M})$), R158 ($2\text{CH}_3 (+\text{M}) = \text{C}_2\text{H}_6 (+\text{M})$), y R10 ($\text{O} + \text{CH}_3 = \text{H} + \text{CH}_2\text{O}$) para $\phi = 1.0$. a). 0.85 atm. b). 0.98 atm.



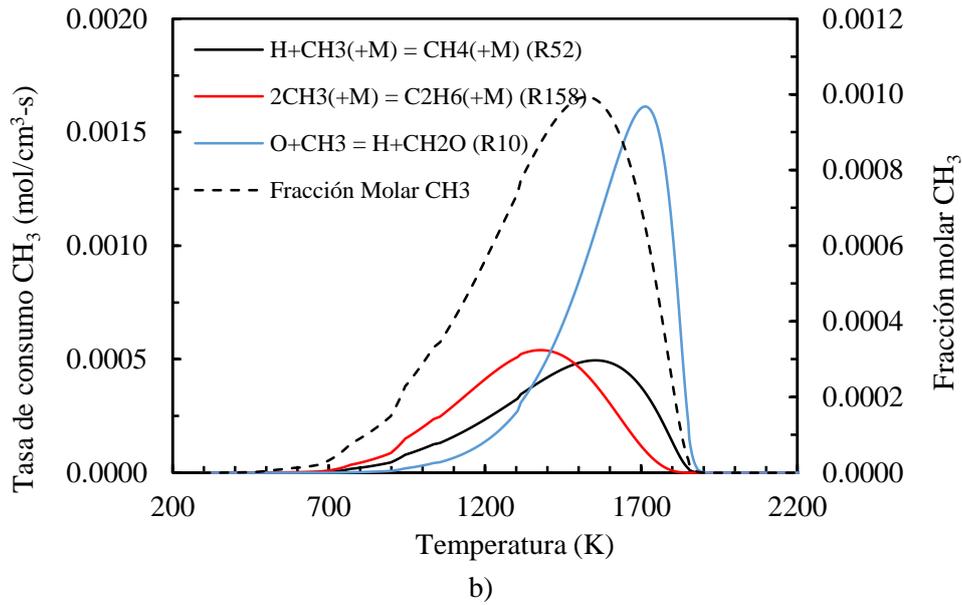


Figura 5-8. Fracción molar de CH_3 y tasa de consumo de CH_3 para las reacciones R52 ($\text{H} + \text{CH}_3 (+\text{M}) = \text{CH}_4 (+\text{M})$), R158 ($2\text{CH}_3 (+\text{M}) = \text{C}_2\text{H}_6 (+\text{M})$), y R10 ($\text{O} + \text{CH}_3 = \text{H} + \text{CH}_2\text{O}$) para $\phi = 0.8$. a). 0.85 atm. b). 0.98 atm.

5.3.2 Efecto de la presión sobre la velocidad de deflagración laminar

Se realizó un análisis para diferentes presiones correspondientes a alturas sobre el nivel del mar de 0 m.s.n.m a 3000 m.s.n.m equivalentes a un rango de presión de 1 atm a 0.71 atm respectivamente, para la velocidad de deflagración laminar del metano para un rango de dosados entre 0.8 a 1.2 con el mecanismo detallado GRI-Mech 3.0 [72], donde se obtuvieron los siguientes resultados:

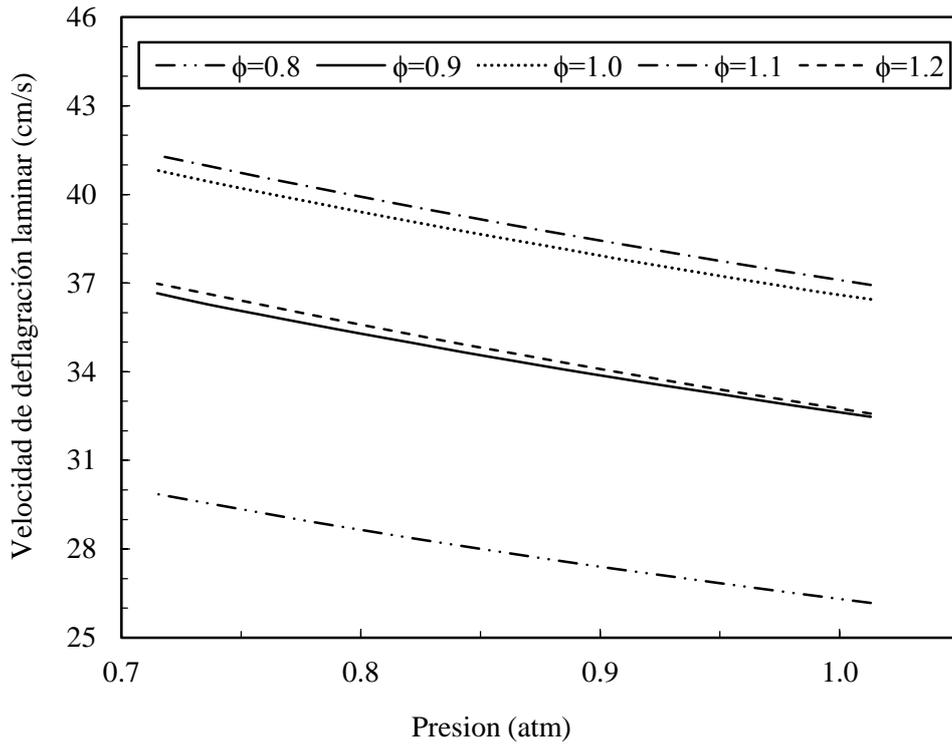


Figura 5-9. Velocidad de deflagración laminar del metano en función de la presión para diferentes dosados.

Para cada curva se realizó una aproximación exponencial con valores mayores para el valor de aproximación (R^2) de 0.9995, y se obtuvo una relación como la que se muestra en la Ecuación 65:

$$S_L = aP^b \quad \text{Ecuación 65}$$

En dónde a y b son constantes, y P es la presión, los valores de las constantes se presentan en la Tabla 5-2:

Tabla 5-2. Valores para las constantes a y b.

Dosado	a*	b
0.8	26.221	-0.378
0.9	32.538	-0.346
1	36.517	-0.325
1.1	37.008	-0.323
1.2	32.668	-0.365

*Unidades de a = $\left[\frac{\text{cm}}{\text{s}(\text{atm})^b} \right]$, b = [adimensional]

De acuerdo a estos resultados se reafirma lo anteriormente dicho, al aumentar la presión la velocidad de deflagración laminar disminuye.

5.4 Espesor de llama

En la Figura 5-10 y Figura 5-11 se presenta el espesor de llama difusivo y térmico respectivamente, en función del dosado y para presiones atmosféricas de 0.85 atm y 0.98 atm.

En general se observa que para presiones mayores el espesor de llama es menor. Esta conclusión es válida para el espesor de llama térmico δ_T (ver Figura 5-11) el cual es menor con el aumento de la presión cualquiera que sea el valor del dosado, alcanzando una disminución máxima de aproximadamente 16% para un dosado de 1. Sin embargo para el espesor difusivo δ_L se pueden identificar cuatro regiones importantes (ver Figura 5-10), dos en las que es menor y dos en las que es mayor para 0.98 atm en comparación con 0.85 atm. Por otro lado la disminución máxima de δ_L se observa igualmente en el dosado de 1 y es únicamente de 4%.

En general se ha demostrado que el espesor de llama está relacionado con las inestabilidades hidrodinámicas las cuales disminuyen para las llamas más gruesas [25, 73, 74]. Las inestabilidades hidrodinámicas están siempre presentes en las llamas de premezcla porque ellas están directamente relacionadas a los cambios de densidad en los frentes de llama, que localmente genera cambios en la velocidad de flujo y el área. Como lo describe Geoff Searby [75] el efecto de la expansión del gas a través de una llama curvada hace que el flujo converja en lugares donde el frente es cóncavo al gas no quemado y diverge donde el frente de llama es convexo. La conservación de la masa implica que el flujo ascendente se acelera (desacelera) en lugares donde el frente de llama se retrasa (o adelanta) de la posición media. Debido a que se asume que la velocidad de deflagración laminar S_L es constante, y la situación es incondicionalmente inestable y las arrugas crecerán en el tiempo.

La tasa de crecimiento σ_1 (dimensiones s^{-1}) está dada por la Ecuación 66 como:

$$\sigma_1 \propto kS_L f\left(\frac{\rho_0}{\rho_u}\right) \quad \text{Ecuación 66}$$

Una expresión exacta es dada por Landau [75] y esta se muestra en la Ecuación 67:

$$\sigma_1 = kS_L \frac{E}{E+1} \left(\sqrt{\frac{E^2 + E - 1}{E}} - 1 \right) \quad \text{Ecuación 67}$$

En dónde S_L es la velocidad de deflagración laminar de la mezcla y λ es la longitud de onda (o número de onda $k = 2\pi/\lambda$). El radio térmico de expansión, $E = T_b/T_u$ (en dónde T_b es la temperatura de llama adiabática y T_u es la temperatura de la premezcla sin quemar) es el parámetro más sensible al incremento de estas inestabilidades. El espesor del frente de llama es también un parámetro importante en el análisis de las estabildades de llama, ya que indica qué tan propenso es el crecimiento de las inestabilidades en la llama.

5.4.1 Espesor de llama difusivo

En este trabajo, el espesor del frente de llama difusivo fue calculado haciendo uso de algunas propiedades de combustión y de transporte de la premezcla metano y aire, para este caso este espesor está definido por la Ecuación 68.

$$\delta_L = \frac{\lambda}{c_p \rho_u S_L} \quad \text{Ecuación 68}$$

En dónde λ es la conductividad térmica de la premezcla, c_p es el calor específico de la premezcla a presión constante, ρ_u es la densidad de la premezcla sin quemar, y S_L es la velocidad de deflagración laminar.

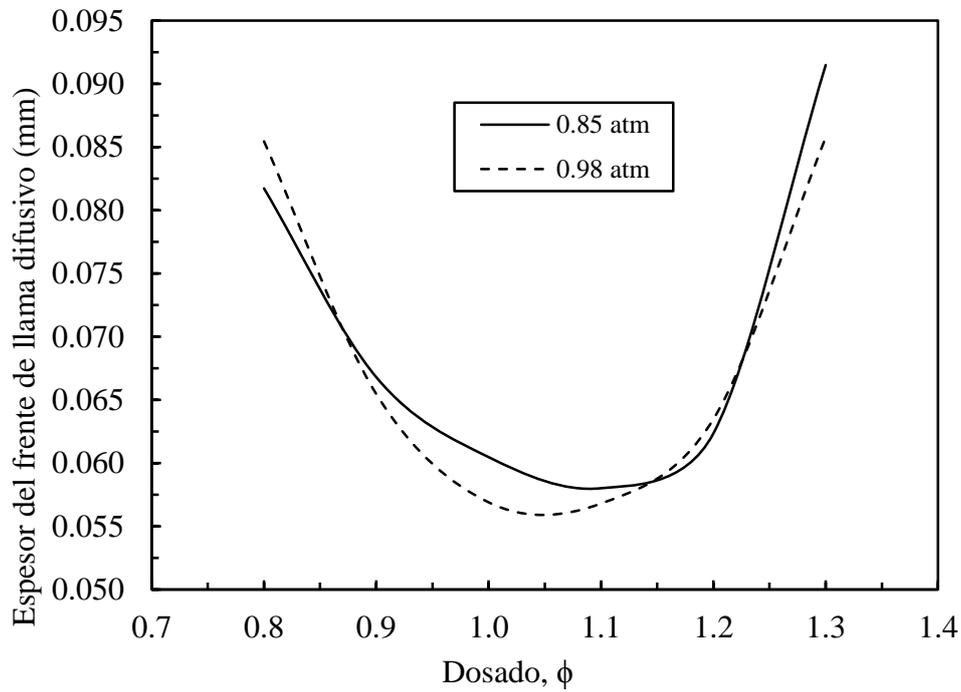


Figura 5-10. Espesor del frente de llama difusivo del metano a condiciones atmosféricas de nivel del mar y a condiciones atmosféricas de la ciudad de Medellín.

5.4.2 Espesor de llama térmico

El espesor del frente de llama térmico fue calculado usando la solución final del perfil de temperatura del cálculo numérico de la velocidad de deflagración laminar (S_L) utilizando la Ecuación 69 [2].

$$\delta_T = \frac{(T_b - T_u)}{(dT/dx)_{\max}} \quad \text{Ecuación 69}$$

En dónde δ_T es el espesor del frente de llama térmico, T_b es la temperatura de llama adiabática, T_u es la temperatura de la premezcla sin quemar y $(dT/dx)_{\max}$ es el máximo gradiente de temperatura del perfil de temperatura calculado numéricamente.

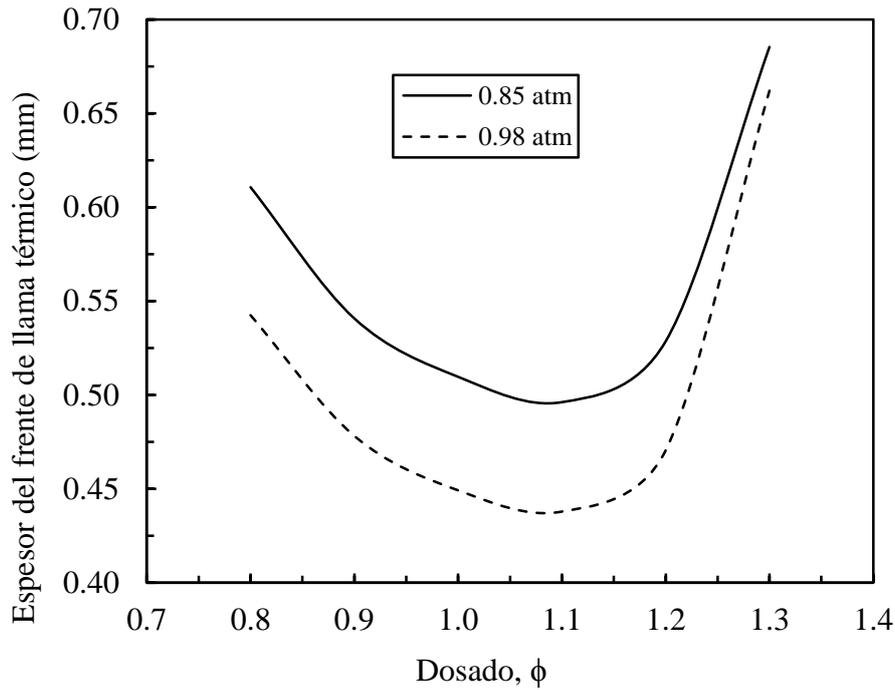


Figura 5-11. Espesor del frente de llama térmico del metano a condiciones atmosféricas de nivel del mar y a condiciones atmosféricas de la ciudad de Medellín.

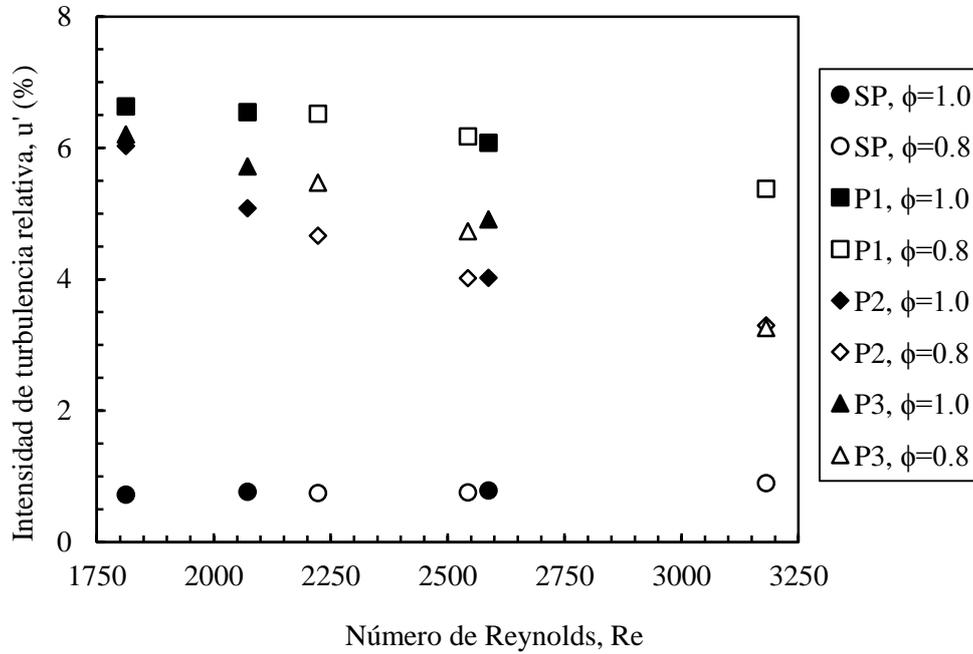
5.5 Intensidad de turbulencia

Como se ha mencionado anteriormente la intensidad de turbulencia u' es un parámetro fundamental en la determinación de la velocidad de deflagración turbulenta, por lo que es necesario determinar los órdenes de magnitud presentados en las diferentes placas perforadas, para un posterior análisis. Para las tres placas se hicieron mediciones a potencias térmicas de 1, 0.8 y 0.7 kW y dosados de 1.0 y 0.8. La medición de la turbulencia fue realizada para el flujo de aire frío (flujo no reactivo) como se reporta en trabajos realizados por Kobayashi [5, 37], Tamadonfar [76], and Rockwell [36], usando un anemómetro de hilo caliente de temperatura constante (miniCTA 54T42 Dantec Dynamics). Los parámetros de turbulencia fueron medidos en el centro de la salida del puerto del quemador. De acuerdo a lo reportado en la literatura [5, 37], es razonable asumir que el valor total de la intensidad de turbulencia que fue medida cerca a la salida del puerto del quemador para la condición de flujo no reactivo es una apropiada opción para la caracterización de este parámetro para las condiciones de flujo reactivo.

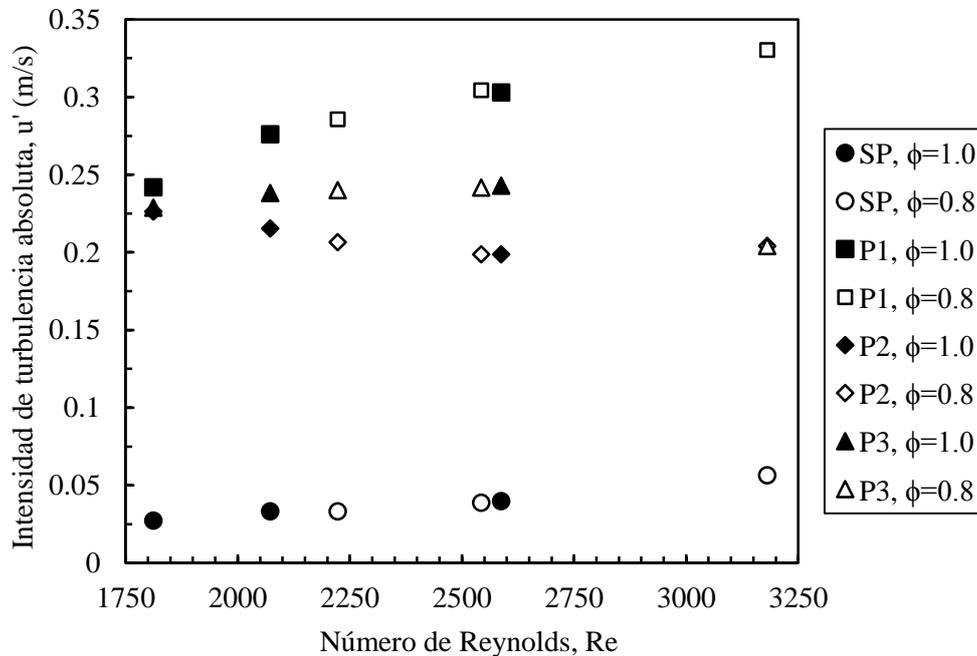
En la Figura 5-12 y Figura 5-13 se presenta la intensidad de turbulencia relativa (que se define como la relación entre la intensidad de turbulencia absoluta y la velocidad media del flujo) y la intensidad de turbulencia absoluta en función del número de Reynolds para las diferentes placas, condiciones de dosado y presión del experimento. Para todas las condiciones la intensidad de turbulencia se aumenta cuando se compara un dosado de 0.8 respecto al dosado de 1.0, esto debido a que se presenta mayor cantidad de flujo de aire, y por ende una velocidad mayor a la salida del puerto del quemador.

En la Figura 5-12b, se observa que la intensidad de turbulencia absoluta aumenta cuando el número de Reynolds aumenta para la placa 1 (P1) y la condición sin placa (SP), mientras que tiene una tendencia constante para la placa 3 (P3), y para la placa (P2) se observa una pequeña disminución de la intensidad de turbulencia absoluta cuando se aumenta el número de Reynolds.

En la Figura 5-13b, de forma general se observa que la intensidad de la turbulencia absoluta aumenta cuando se aumenta el número de Reynolds, y cuando se comparan las dos condiciones de presión, se observa que la intensidad de la turbulencia absoluta disminuye cuando se aumenta la presión, estos resultados son acordes a lo encontrado por Kobayashi [5] en su trabajo como se observa en la Figura 5-19.



a)



b)

Figura 5-12. Intensidad de turbulencia de las placas perforadas $P = 0.85$ atm, a) Intensidad de turbulencia relativa, b) Intensidad de turbulencia absoluta. SP = Sin placa, P1 = Placa 1, P2 = Placa 2, P3 = Placa 3.

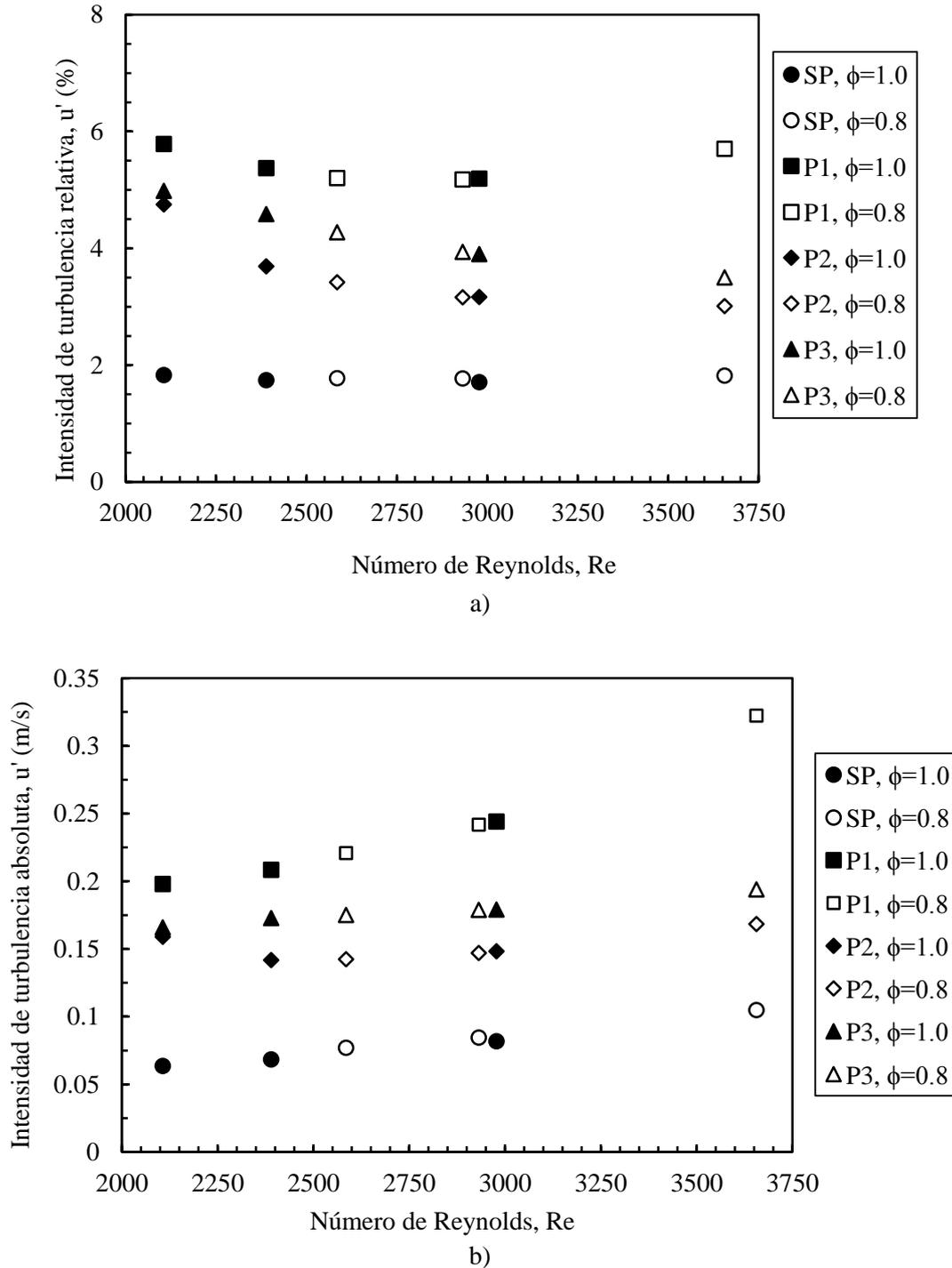


Figura 5-13. Intensidad de turbulencia de las placas perforadas $P = 0.98 \text{ atm}$, a) Intensidad de turbulencia relativa, b) Intensidad de turbulencia absoluta. SP = Sin placa, P1 = Placa 1, P2 = Placa 2, P3 = Placa 3.

5.6 Diagrama de Borghi

Para ubicar en el diagrama de Borghi los diferentes puntos de experimentación, se calcularon algunos parámetros, los cuales están descritos a lo largo del documento, estos son la longitud de escala integral (ver Ecuación 61), la longitud en la escala de Kolmogorov (ver Ecuación 62), el número de Damköhler (ver Ecuación 19) y el número de Karlovitz (ver Ecuación 20). En esta

sección se presentará una síntesis de estos parámetros. La velocidad de deflagración laminar fue determinada experimentalmente, lo mismo que la intensidad de turbulencia, la cual se observa en la Tabla 5-3 como otros parámetros necesarios para ubicar los puntos en el diagrama de Borghi, junto con algunos resultados obtenidos por Kobayashi [5] y Wang [37].

Tabla 5-3. Propiedades de las mezclas en el presente estudio.

ϕ	Re	S_L (cm/s)	δ_L (mm)	u'/S_L	l_0 (mm)	l_K (mm)	Da	Ka
0.85 atm								
1	2587.34	40.04	0.06047	0.756	2.212	0.1505	48.367	0.1241
	2072.28			0.689	2.464	0.1657	59.126	0.1023
	1812.13			0.604	2.546	0.1844	69.702	0.0826
	2587.34			0.496	3.103	0.2247	103.466	0.0556
	2072.28			0.538	1.922	0.1875	59.075	0.0799
	1812.13			0.565	1.918	0.1806	56.127	0.0861
	2587.34			0.606	1.829	0.1693	49.871	0.0980
	2072.28			0.594	2.071	0.1773	57.621	0.0894
	1812.13			0.571	1.872	0.1782	54.225	0.0885
0.8	3180.77	29.83	0.08174	1.107	2.023	0.1377	22.356	0.2683
	2543.15			1.020	2.489	0.1541	29.843	0.2141
	2222.97			0.958	2.292	0.1584	29.284	0.2028
	3180.77			0.684	6.772	0.2672	121.139	0.0712
	2543.15			0.666	2.281	0.2076	41.879	0.1180
	2222.97			0.692	2.368	0.2037	41.869	0.1226
	3180.77			0.684	2.527	0.2089	45.224	0.1165
	2543.15			0.810	1.923	0.1719	29.054	0.1722
	2222.97			0.805	2.566	0.1856	39.013	0.1476
0.98 atm								
1	2977.53	36.53	0.05752	0.67	2.501	0.1639	65.061	0.0946
	2389.27			0.57	2.054	0.1756	62.584	0.0823
	2106.24			0.54	1.793	0.1764	57.486	0.0816
	2977.53			0.41	1.574	0.2121	67.367	0.0565
	2389.27			0.39	1.466	0.2155	65.671	0.0547
	2106.24			0.44	1.586	0.2017	63.335	0.0624
	2977.53			0.49	1.537	0.1830	54.484	0.0758
	2389.27			0.47	1.635	0.1909	60.045	0.0697
	2106.24			0.45	1.656	0.1975	63.387	0.0651
0.8	3656.29	24.5	0.08637	1.32	2.606	0.1342	22.938	0.3149
	2931.58			0.99	2.135	0.1584	25.039	0.2262
	2585.11			0.90	2.208	0.1710	28.371	0.1940
	3656.29			0.69	1.574	0.1925	26.506	0.1531
	2931.58			0.60	1.552	0.2124	29.937	0.1258
	2585.11			0.58	1.534	0.2169	30.551	0.1206
	3656.29			0.79	1.493	0.1710	21.846	0.1941
	2931.58			0.73	1.771	0.1895	28.067	0.1581
	2585.11			0.71	1.606	0.1879	26.017	0.1607

De acuerdo a los resultados presentados en la Tabla 5-3, se procede a ubicar los puntos de operación en el diagrama de Borghi, como se muestra en la Figura 5-14. Es bien sabido que las características de las llamas turbulentas premezcladas dependen en gran medida de los regímenes, y los regímenes están definidos por el espesor de la llama laminar, la intensidad de turbulencia, la velocidad de deflagración laminar, la escala integral y la microescala de Kolmogorov. La Figura 5-14 muestra las llamas turbulentas premezcladas, situadas en el diagrama de Borghi modificado por Peters [17]. Se puede ver que todas las llamas del presente trabajo están situadas en el régimen de llama Flamelet. En este régimen se tienen números de $Da \gg 1$ y se define un régimen de química rápida, debido a que las tasas de reacción química son mucho más rápidas que las tasas de mezclado del flujo.

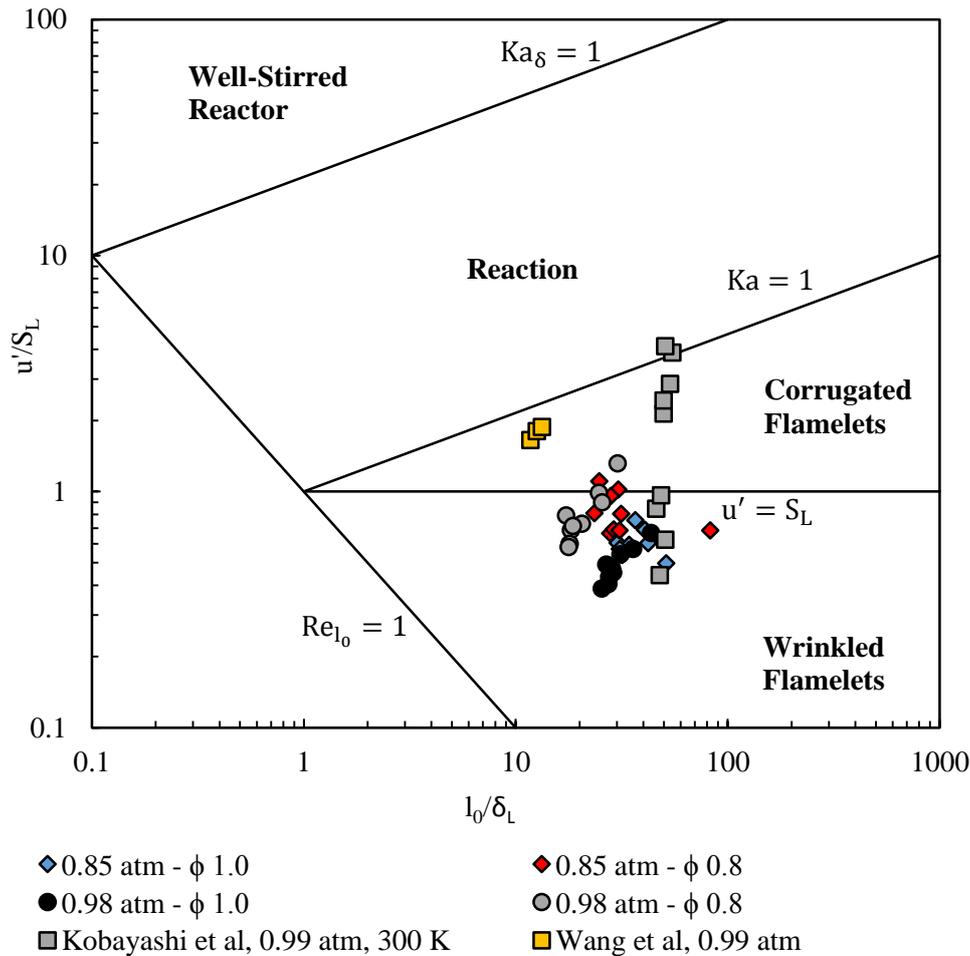


Figura 5-14. Ubicación de los puntos de ensayo en el diagrama de Borghi.

5.7 Velocidad de deflagración turbulenta

De acuerdo al procedimiento explicado en la metodología experimental (ver sección 4.2) los resultados obtenidos en el presente estudio se muestran la Figura 5-15 como la relación entre la velocidad de deflagración turbulenta y la velocidad de deflagración laminar en función de la relación entre la intensidad de turbulencia y la velocidad de deflagración laminar, y para efectos comparativos se presentan los resultados experimentales de otros autores, entre estos las siguientes referencias Kobayashi [6], Rockwell [36], Wang [37], y Zhang [64]. Como se observa los resultados experimentales están dentro de rangos acordes a los reportados en la literatura, y se observan pequeñas diferencias, posiblemente debidas al método utilizado en el procesamiento de imágenes y condiciones propias del experimento.

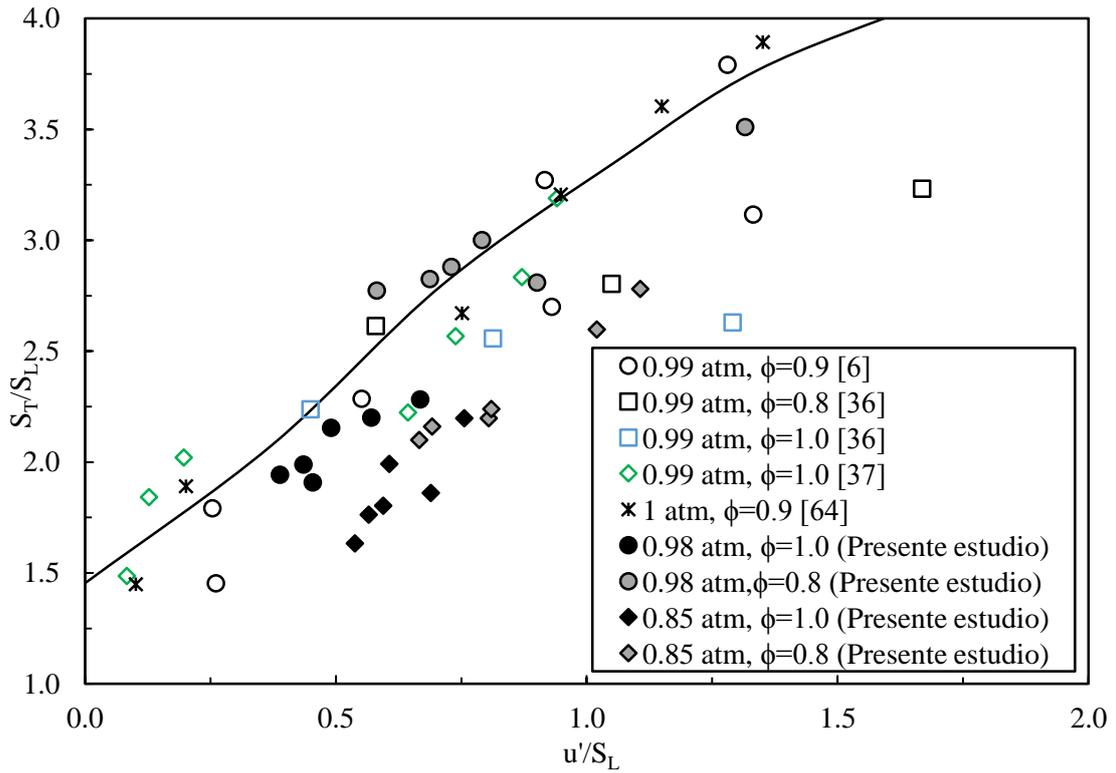


Figura 5-15. Relación de la velocidad de deflagración turbulenta y la velocidad de deflagración laminar en función de relación entre la intensidad de turbulencia sobre la velocidad de deflagración laminar.

En la Figura 5-16 se presenta la velocidad de deflagración turbulenta versus la intensidad de turbulencia compradas con resultados experimentales de Kobayashi [6] y Rockwell [36], como se observa en la figura los resultados experimentales a una presión de 0.85 atm son en general menores que para la presión de 0.98 atm.

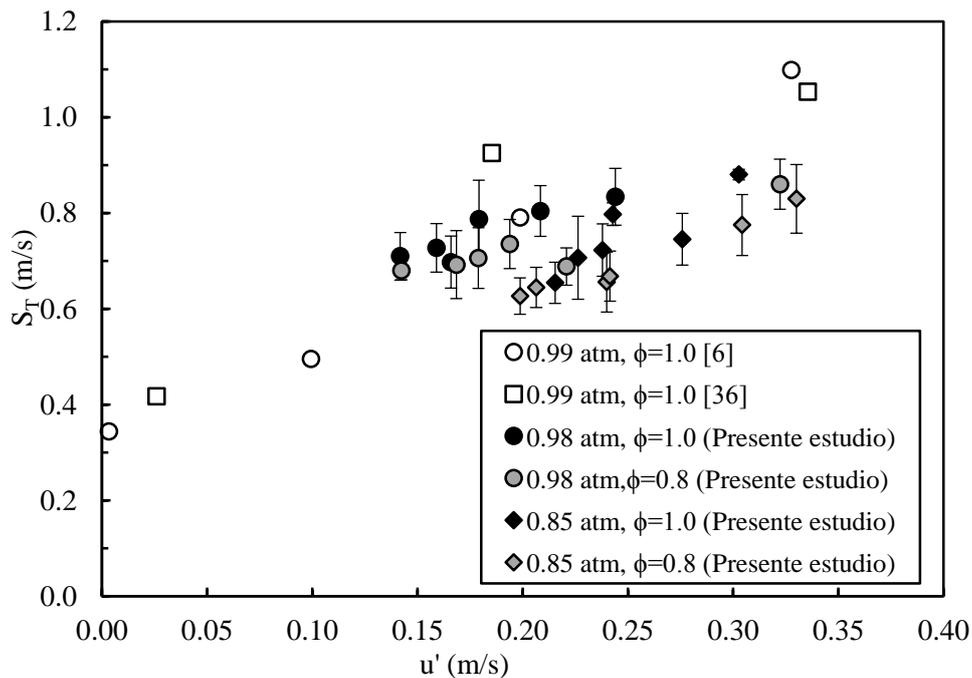


Figura 5-16. Velocidad de deflagración turbulenta versus intensidad de turbulencia.

Prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin la autorización del autor

En la Tabla 5-4 se tiene la velocidad de deflagración turbulenta y la intensidad de turbulencia para las condiciones de estudio del presente trabajo, en la Figura 5-16 se dijo anteriormente que para una presión de 0.85 atm la velocidad de deflagración turbulenta es menor que para una presión de 0.98 atm de forma general.

A manera de ilustración se comparan diferentes puntos para un valor constante de dosado a diferente presión, y para valores de igual presión y diferente dosado:

Para $\phi = 1.0$ y diferente presión se observa:

- Para una intensidad de turbulencia de 0.24 m/s aproximadamente, se tiene un porcentaje de reducción de 5% (Comparación 1, recuadro rojo de la Tabla 5-4) en la velocidad de deflagración turbulenta de las condiciones de 0.85 atm (condiciones subatmosféricas correspondientes a la ciudad de Medellín) respecto a las condiciones de 0.98 atm (condiciones aproximadas de nivel del mar).

Para $\phi = 0.8$ y diferente presión se observa:

- Para una intensidad de turbulencia de 0.19 m/s aproximadamente, se tiene un porcentaje de reducción de 15% (Comparación 2, recuadro azul de la Tabla 5-4) en la velocidad de deflagración turbulenta de las condiciones de 0.85 atm respecto a las condiciones de 0.98 atm.
- Para una intensidad de turbulencia de 0.32 – 0.33 m/s, se tiene un porcentaje de reducción de 4% (Comparación 3, recuadro verde de la Tabla 5-4) en la velocidad de deflagración turbulenta de las condiciones de 0.85 atm respecto a las condiciones de 0.98 atm.

Para $P = 0.98$ atm y diferente dosado se observa:

- Para una intensidad de turbulencia de 0.14 m/s aproximadamente, se tiene un porcentaje de reducción de 4% (Comparación 4, recuadro amarillo de la Tabla 5-4) en la velocidad de deflagración turbulenta de las condiciones de $\phi = 0.8$ respecto a las condiciones de $\phi = 1.0$.
- Para una intensidad de turbulencia de 0.17 m/s aproximadamente, se tiene un porcentaje de reducción de 10% (Comparación 5, recuadro gris de la Tabla 5-4) en la velocidad de deflagración turbulenta de las condiciones de $\phi = 0.8$ respecto a las condiciones de $\phi = 1.0$.

Para $P = 0.85$ atm y diferente dosado se observa:

- Para una intensidad de turbulencia de 0.24 m/s aproximadamente, se tiene un porcentaje de reducción de 9% (Comparación 6, recuadro morado de la Tabla 5-4) en la velocidad de deflagración turbulenta de las condiciones de $\phi = 0.8$ respecto a las condiciones de $\phi = 1.0$.
- Para una intensidad de turbulencia de 0.242 m/s aproximadamente, se tiene un porcentaje de reducción de 16% (Comparación 7, recuadro rojo de la Tabla 5-4) en la velocidad de deflagración turbulenta de las condiciones de $\phi = 0.8$ respecto a las condiciones de $\phi = 1.0$.

Tabla 5-4. Velocidad de deflagración turbulenta e intensidad de turbulencia para las condiciones de estudio.

0.98 atm, $\phi = 1.0$				0.98 atm, $\phi = 0.8$			
u' (m/s)	u'/S_L	S_T (m/s)	S_T/S_L	u' (m/s)	u'/S_L	S_T (m/s)	S_T/S_L
0.1418	0.3882	0.7098	1.9431	0.1424	0.5814	0.6798	2.7747
0.1590	0.4353	0.7270	1.9901	0.1685	0.6876	0.6922	2.8253
0.1659	0.4542	0.6974	1.9091	0.1790	0.7305	0.7058	2.8808
0.1792	0.4905	0.7874	2.1555	0.1939	0.7915	0.7354	3.0014
0.2085	0.5707	0.8041	2.2012	0.2208	0.9012	0.6883	2.8094
0.2441	0.6682	0.8339	2.2828	0.3223	1.3157	0.8601	3.5106
0.85 atm, $\phi = 1.0$				0.85 atm, $\phi = 0.8$			
u' (m/s)	u'/S_L	S_T (m/s)	S_T/S_L	u' (m/s)	u'/S_L	S_T (m/s)	S_T/S_L
0.2154	0.5380	0.6543	1.6341	0.1987	0.6663	0.6264	2.0999
0.2263	0.5652	0.7064	1.7643	0.2064	0.6920	0.6446	2.1608
0.2380	0.5945	0.7224	1.8043	0.2400	0.8046	0.6557	2.1982
0.2428	0.6065	0.7975	1.9918	0.2415	0.8097	0.6681	2.2397
0.2759	0.6891	0.7451	1.8609	0.3044	1.0204	0.7749	2.5978
0.3028	0.7563	0.8802	2.1983	0.3302	1.1068	0.8296	2.7809

En la Figura 5-17 se presenta la escala de Kolmogorov en función de la intensidad de turbulencia, y se observa que a medida que aumenta la presión la escala de Kolmogorov disminuye, igual comportamiento es reportado en el trabajo realizado por Wang [33]. La longitud de Kolmogorov disminuye con aumentos de la intensidad de turbulencia, además, l_K , disminuye rápidamente cuando la intensidad de turbulencia es baja y la tendencia se debilita a mayor intensidad de turbulencia. Esto evidencia que los flujos turbulentos cambian aparentemente con la intensidad de turbulencia bajo una condición de turbulencia débil.

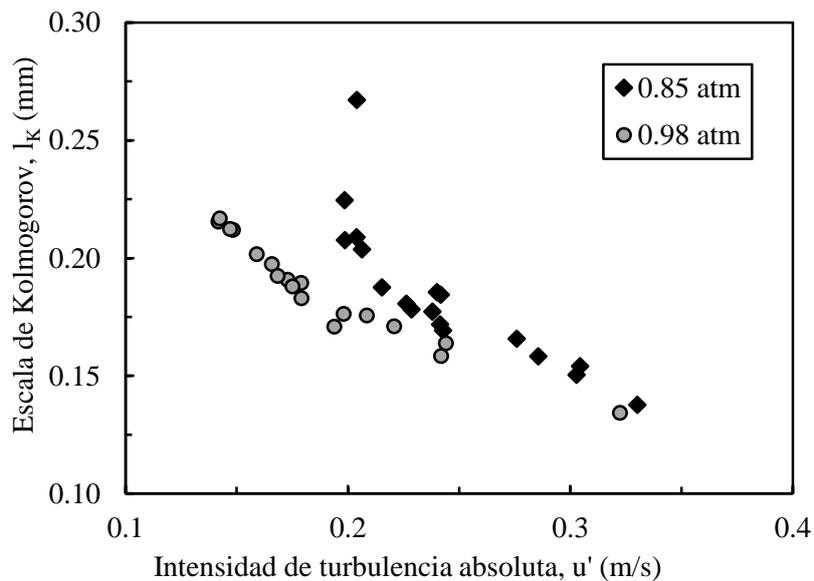


Figura 5-17. Escala de Kolmogorov versus intensidad de turbulencia.

A continuación, se analizan los efectos de la presión sobre las escalas de tiempo y de longitud, la intensidad de turbulencia, y su efecto final sobre la velocidad de deflagración turbulenta. En la Figura 5-18 presenta el comportamiento de las diferentes escalas de turbulencia con el

aumento de la presión ambiente. Las mediciones del flujo turbulento fueron realizadas en el centro del puerto del quemador, y se determinaron la longitud integral l_0 , la microescala de Taylor l_λ , y la escala de Kolmogorov l_K . Las mediciones fueron realizadas bajo las mismas condiciones las cuales corresponden a una velocidad media de flujo de $U = 2 \text{ m/s}$ y un diámetro de perforación de la placa de $d = 2 \text{ mm}$. Como se observa las escalas de turbulencia de Taylor y Kolmogorov decrecen con el aumento de la presión, sin embargo, la escala integral disminuye, pero tiende a ser constante a lo largo del rango de presiones.

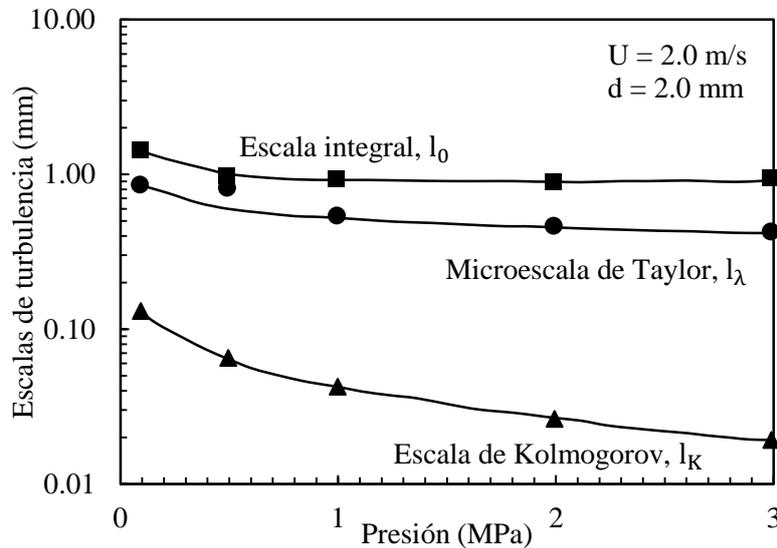


Figura 5-18. Relación entre la presión ambiente y las escalas de turbulencia ($U = 2.0 \text{ m/s}$, $d = 2.0 \text{ mm}$) [46].

La Figura 5-19 muestra la relación entre la intensidad de turbulencia y la presión, por las condiciones del experimento de Kobayashi y otros [46], en general se observa que la intensidad de turbulencia tiene un punto mínimo para una presión de 1 MPa (9.87 atm), este valor es aproximadamente 10 veces la presión atmosférica correspondiente a nivel del mar, mientras que el valor máximo de la intensidad de turbulencia corresponde a un valor de presión de 0.1 MPa que es aproximadamente 1 atm, la presión en un sitio ubicado a nivel del mar. En general de acuerdo a estos resultados se puede concluir que a medida que se aumenta la presión la intensidad de turbulencia disminuye en el intervalo de 1 MPa (9.87 atm) a 10 MPa (98.69 atm).

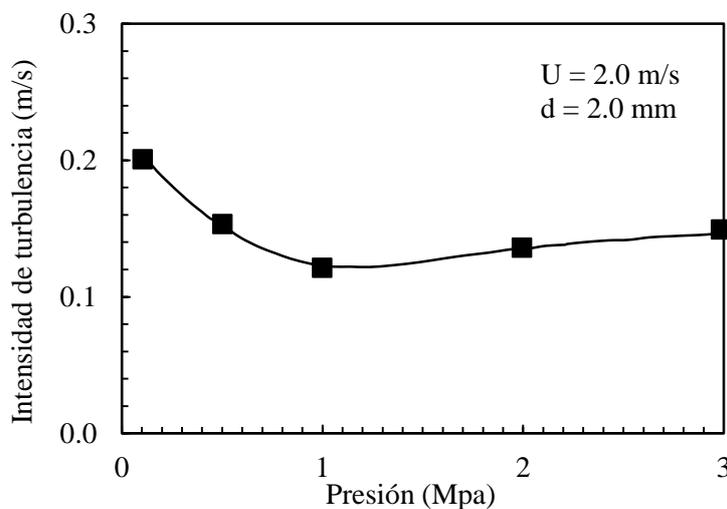


Figura 5-19. Relación entre la presión ambiente y la intensidad de turbulencia ($U = 2.0 \text{ m/s}$, $d = 2.0 \text{ mm}$) [46].

El efecto de la presión sobre las escalas de turbulencia y de la intensidad de turbulencia, puede ser explicado a partir del comportamiento de la viscosidad cinemática con la presión. Ya que la viscosidad cinemática ν , $\nu = \mu/\rho$, decrece con los incrementos de presión, debido a que los cambios de la viscosidad dinámica μ con la presión son muy pequeños, se tiene que la viscosidad cinemática es inversamente proporcional a la densidad ρ y así a la presión, y la viscosidad cinemática es uno de los factores que mayor incidencia tiene sobre estas características de turbulencia.

Para entender la dependencia de la presión en las escalas de turbulencia generada por las placas perforadas, es necesario considerar la analogía con el desprendimiento de los vórtices desde obstáculos. Se sabe que las frecuencias de desprendimiento atrás de obstáculos del vórtice de Von Karman son una función del número Reynolds Re ($Re = UD/\nu$ donde U es la velocidad de flujo y D es la longitud característica de los obstáculos). Con el uso del número adimensional de Strouhal Sr que describe el mecanismo de oscilación de flujos ($Sr = ND/U$ donde N es la frecuencia de desprendimiento de vórtices o frecuencia de oscilación), la relación para un obstáculo en un cilindro circular se presenta en la Ecuación 70.

$$Sr = C_1 \left(1 - \frac{C_2}{Re} \right) \quad \text{Ecuación 70}$$

En dónde C_1 y C_2 son constantes e iguales a 0.198 y 19.7 respectivamente. En la Ecuación 70 se observa claramente que cuando el número de Reynolds incrementa el número de Strouhal aumenta. Debido a que el número de Reynolds es proporcional a la presión, la frecuencia de desprendimiento de los vórtices detrás de la placa perforada aumenta y se acerca a un valor constante con incrementos de la presión. La escala integral se calcula mediante la constante de correlación de tiempo de Euler bajo la hipótesis de Taylor, de modo que la escala integral disminuye con el aumento de las frecuencias de desprendimiento de vórtices, es decir, con el aumento de la presión, tal comportamiento se observa en la Figura 5-18. Como es conocido los números de Reynolds en cada escala están relacionados [77], tal como se observa en la Ecuación 71.

$$Re_K^4 \sim Re_\lambda^2 \sim Re_o \quad \text{Ecuación 71}$$

En dónde se tiene $Re_o = u'l_o/\nu$, $Re_\lambda = u'l_\lambda/\nu$, y $Re_K = u'l_K/\nu$. Y se observa que l_λ y l_K son más pequeños con los incrementos de presión, además de que la variación de la escala integral con la presión juega un papel importante para la determinación de las otras escalas de turbulencia. Con esta misma hipótesis se puede demostrar que la intensidad de turbulencia es directamente proporcional a la viscosidad cinemática ν , para esto se iguala el número de Reynolds en la escala integral Re_o con el número de Reynolds en la Microescala de Taylor Re_λ , de donde se obtiene la Ecuación 72, como se puede ver en esta ecuación la intensidad de turbulencia u' es proporcional a la viscosidad cinemática, y esta la razón por la cual la intensidad de turbulencia disminuye con los incrementos de presión en un rango de 0.1 a 1 MPa como se evidencia en la Figura 5-19. Mientras que a presiones mayores de 1 MPa hay un pequeño incremento en la intensidad de turbulencia, este comportamiento se explica debido a que en el experimento llevado a cabo por Kobayashi [46], la placa que genera la turbulencia está ubicada 40 mm aguas debajo de la boquilla, y esta distancia permite que la desintegración de la turbulencia y el desarrollo del flujo turbulento, donde para un flujo turbulento la tasa de disipación de energía es proporcional a la viscosidad cinemática como lo muestra la Ecuación 73, y esto hace que las tasas de turbulencia caigan más lento con las altas presiones respecto a presiones atmosféricas. Además, los caudales con mayor número de Reynolds en tubos circulares producen intensidades de turbulencia mayores y estos factores causan un ligero

incremento en la intensidad de turbulencia con incrementos de presión en la región correspondiente a presiones superiores a 1 MPa.

$$u' = \frac{v l_0}{l_\lambda^2} \quad \text{Ecuación 72}$$

$$\varepsilon = \frac{15 v u'^2}{l_\lambda^2} \quad \text{Ecuación 73}$$

5.8 Correlaciones teóricas para determinar la velocidad de deflagración turbulenta

Para realizar comparaciones de los resultados experimentales obtenidos en el presente trabajo, se grafican diferentes correlaciones teóricas propuestas por algunos autores. Estas correlaciones corresponden a: Damköhler (Ecuación 31), Schelkin (Ecuación 32), Karlovitz (Ecuación 33), Otros autores (Ecuación 34, utilizando valores para la constante $C = 1.6$ y $n = 0.3$, igual que el trabajo de doctorado desarrollado por Rockwell [78]), Moscow (Ecuación 41), Leeds (Ecuación 42), Gülder (Ecuación 43), y Kido (Ecuación 44).

Estas comparaciones son realizadas para las dos condiciones de presión estudiadas correspondientes a 0.98 atm y 0.85 atm, y también para los dos dosados estudiados correspondientes a 0.8 y 1.0. Como se observa en la Figura 5-20 y Figura 5-21, ninguna correlación se ajusta a todo el conjunto de datos experimentales.

A manera de ilustración se comparan diferentes puntos para un valor de dosado y un valor de presión:

Para $\phi = 1.0$ y $P = 0.98$ atm (Figura 5-20a):

Para esta condición se observa que la correlación teórica que mejor se ajusta a los resultados experimentales del presente estudio, es la correlación de Karlovitz (Ecuación 33) y la correlación de Gülder (Ecuación 43), y para las demás correlaciones se presenta sobreestimación o subestimación de los resultados.

Para $\phi = 0.8$ y $P = 0.98$ atm (Figura 5-20b):

La correlación de Kido (Ecuación 44) presenta una buena predicción de los datos experimentales en un rango de intensidad de turbulencia de 0.15 a 0.20 m/s, sin embargo para los demás valores de intensidad de turbulencia la correlación sobre estima los resultados, y las demás correlaciones no presentan un buen ajuste.

Para $\phi = 1.0$ y $P = 0.85$ atm (Figura 5-21a):

En esta condición se tiene que la correlación de Moscow (Ecuación 41) representa de buena forma la mayoría de los datos experimentales, presentando pequeñas variaciones en su predicción, para las demás correlaciones algunas sobreestiman y otras subestiman los resultados.

Para $\phi = 0.8$ y $P = 0.85$ atm (Figura 5-21b):

La correlación de Gülder (Ecuación 43) presenta un buen ajuste en esta condición específica en el rango de intensidad de turbulencia de 0.20 a 0.33 m/s.

Como se observa en estos análisis ninguna correlación predice correctamente todo el conjunto de datos en las condiciones experimentales del presente estudio, estas diferencias entre los resultados teóricos y experimentales pueden ser debido a condiciones específicas en los modelos teóricos como por ejemplo, no son válidos para cualquier condición de presión, no son aplicable a cualquier rango de intensidad de turbulencia y de número de Reynolds.

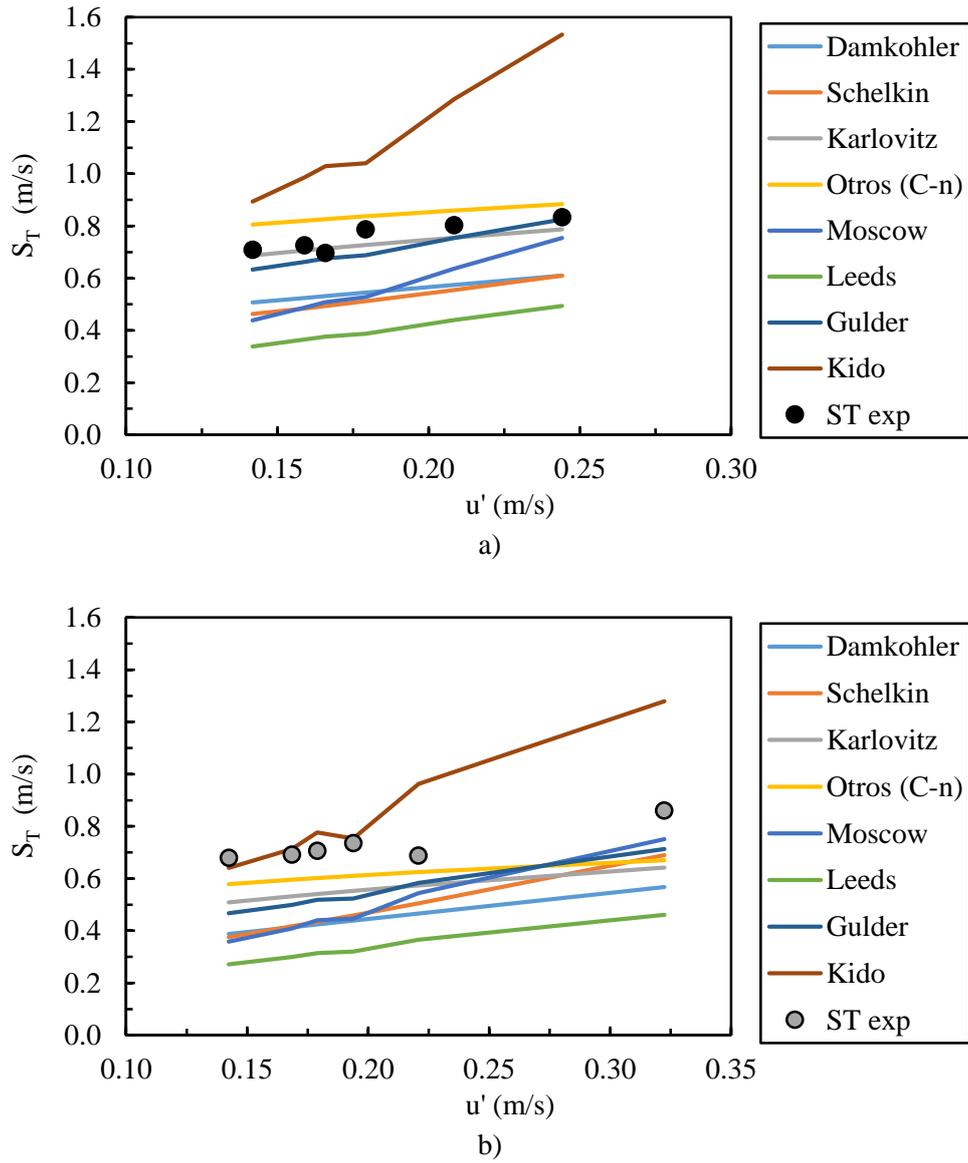


Figura 5-20. Correlaciones teóricas y datos experimentales del presente trabajo para la velocidad de deflagración turbulenta a 0.98 atm y 297 K. a) $\phi = 1.0$, b) $\phi = 0.8$.

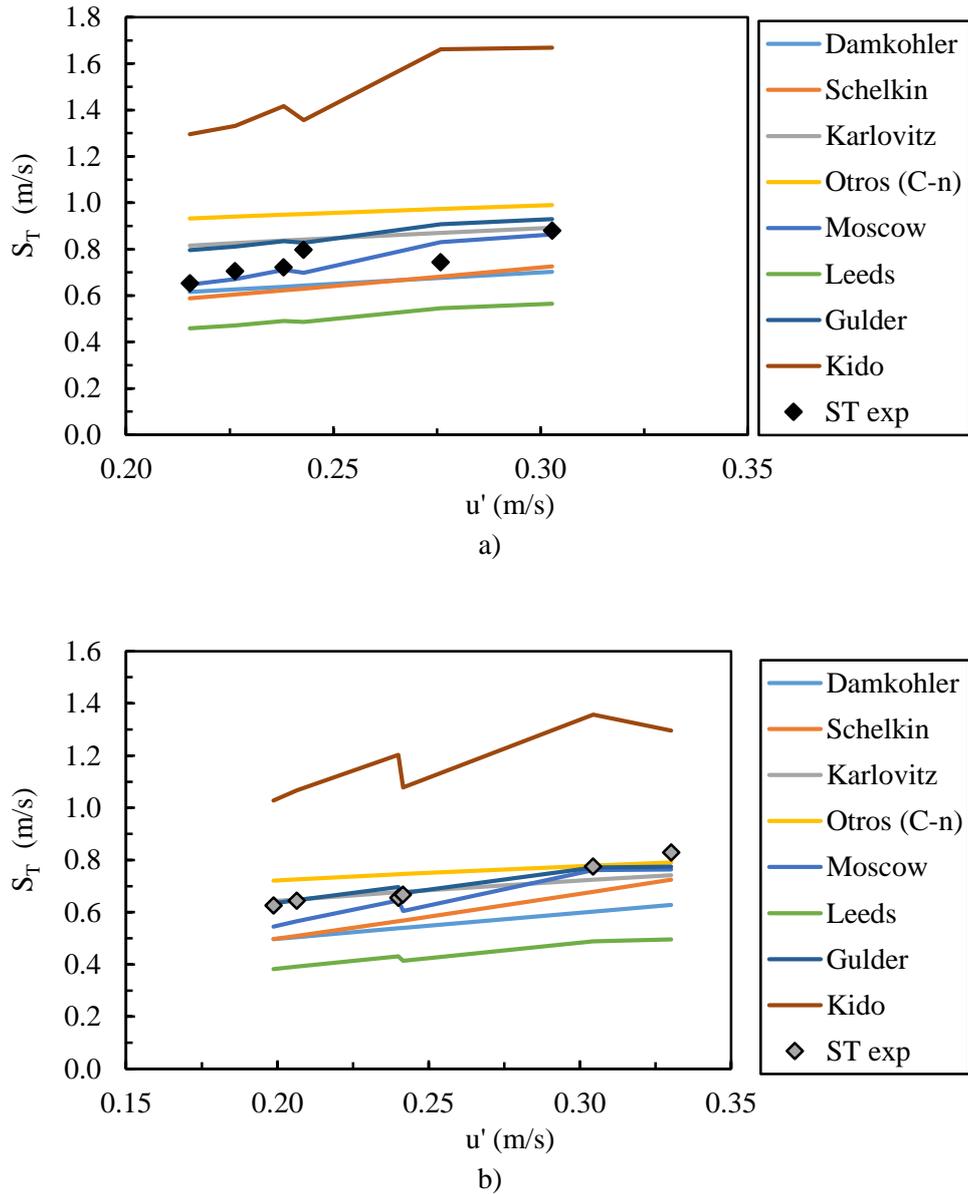


Figura 5-21. Correlaciones teóricas y datos experimentales del presente trabajo para la velocidad de deflagración turbulenta a 0.85 atm y 297 K. a) $\phi = 1.0$, b) $\phi = 0.8$.

5.9 Correlación propuesta para la velocidad de deflagración turbulenta

La relación de S_T/S_L y u'/S_L es usada en previos estudios de combustión turbulenta [5, 79] para efectos comparativos. u'/S_L indica información acerca del flujo turbulento y la llama laminar, por otro lado, S_T/S_L indica información acerca de la llama turbulenta y la llama laminar. La Figura 5-22 muestra la variación de S_T/S_L con u'/S_L . Como se observa en la figura S_T/S_L aumenta directamente con incrementos de u'/S_L . En estudios anteriores se han propuesto algunas correlaciones de forma general tal que S_T/S_L sea una función potencia de la intensidad de turbulencia u'/S_L [47, 80]. Esta función tiene la forma de la Ecuación 74.

$$\frac{S_T}{S_L} \propto \left[\frac{u'}{S_L} \right]^n \tag{Ecuación 74}$$

En este estudio, una correlación similar se plantea para el metano a dos condiciones de presión y dosado. Como se muestra a continuación. La Figura 5-22 presenta la correlación para una condición de presión de 0.98 atm y dosados de 0.8 y 1.0. Mientras que la Figura 5-23 es una correlación para una presión de 0.85 atm y dosados de 0.8 y 1.0.

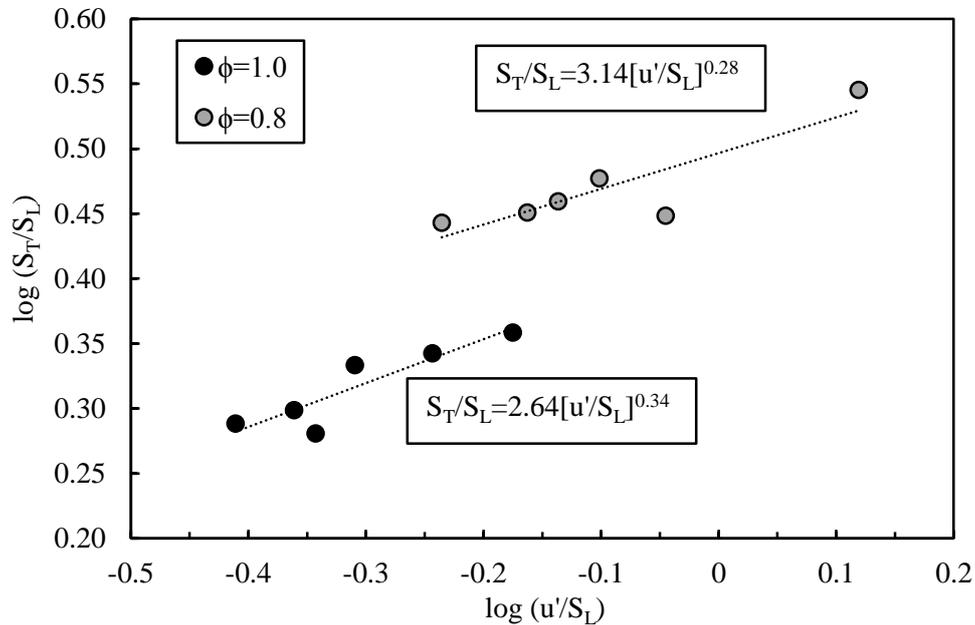


Figura 5-22. Correlación de la velocidad de deflagración turbulenta S_T/S_L y u'/S_L para mezcla CH_4 /aire a 0.98 atm y 297 K.

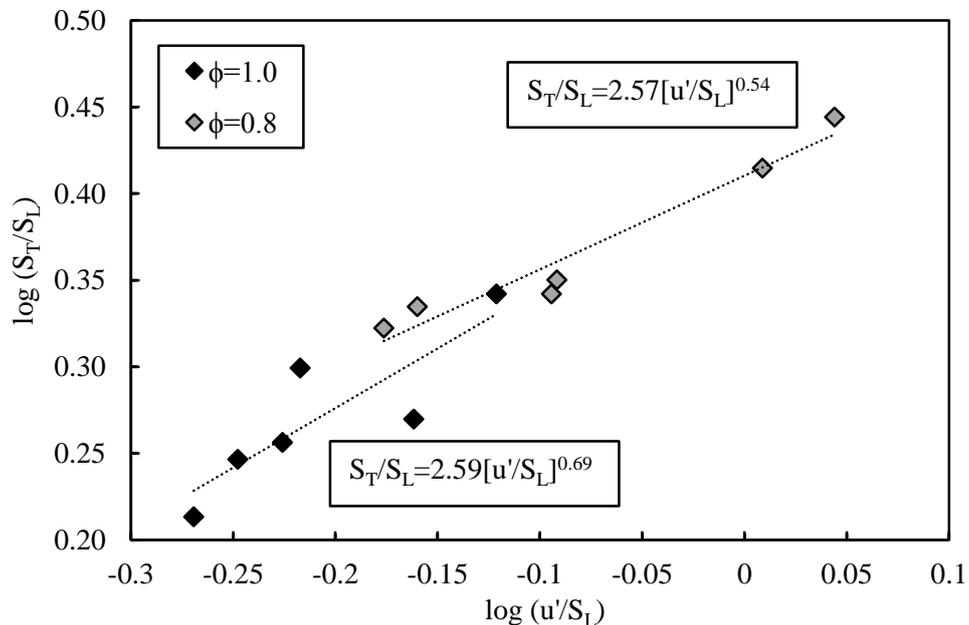


Figura 5-23. Correlación de la velocidad de deflagración turbulenta S_T/S_L y u'/S_L para mezcla CH_4 /aire a 0.85 atm y 297 K.

Las relaciones de S_T/S_L , P/P_0 , y u'/S_L son usados en combustión turbulenta [5, 79] para efectos comparativos de resultados experimentales y numéricos, por lo que en este estudio se propone una tercera correlación que incluya el efecto de la presión, además de los efectos del flujo turbulento, y la llama laminar, esta correlación tiene la forma de la Ecuación 75, donde P es la

presión en atmosferas, P_0 es la presión de referencia que corresponde a 1 atm, y C_1 , C_2 , y C_3 son constantes del modelo propuesto.

$$\frac{S_T}{S_L} = C_1 \left(\frac{P}{P_0}\right)^{C_2} \left(\frac{u'}{S_L}\right)^{C_3} \quad \text{Ecuación 75}$$

Aplicando el algoritmo, GRG nonlinear (Generalized reduced gradient) desarrollado por Lasdon [81], para la solución de métodos no lineales, se ajustan los datos experimentales para obtener las constantes del modelo, obteniendo los siguientes resultados, $C_1 = 3.18$, $C_2 = 1.48$, y $C_3 = 0.53$, para obtener así la Ecuación 76, para los puntos experimentales se tiene un error máximo en la aproximación de 10%, presentándose un solo dato atípico con un error de 16%.

$$\frac{S_T}{S_L} = 3.18 \left(\frac{P}{P_0}\right)^{1.48} \left(\frac{u'}{S_L}\right)^{0.53} \quad \text{Ecuación 76}$$

En la Figura 5-24, se presenta los datos experimentales para las dos condiciones de presión estudiadas ($P = 0.85$ atm y $P = 0.98$ atm), y además se presentan las curvas de los cálculos numéricos para presiones de $P = 0.98$ atm, $P = 0.85$ atm, y $P = 0.74$ atm esta última corresponde a la presión atmosférica en la ciudad de Bogotá, la gráfica para la presión de $P = 0.74$ atm es solo una estimación teórica y cabe aclarar que es necesario realizar mediciones experimentales en esta condición de presión para validar el modelo, esto se puede realizar en un trabajo futuro.

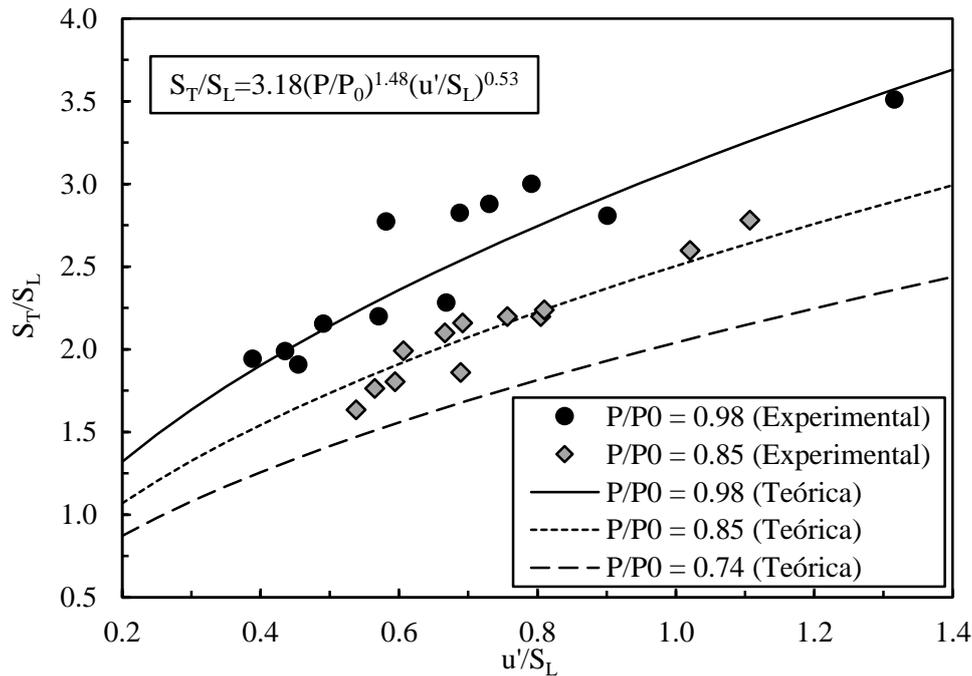


Figura 5-24. Correlación de la velocidad de deflagración turbulenta S_T/S_L y u'/S_L para mezcla CH_4 /aire a 0.85 atm y 297 K, 0.98 atm y 297 K, respecto a 1 atm.

CAPÍTULO VI

6 CONCLUSIONES

En este trabajo se evalúa el efecto teórico y experimental de la presión sobre la velocidad de deflagración turbulenta, en este caso se considera un nivel de presión subatmosférica, correspondiente a una presión de 0.85 atm (849 mbar) en la ciudad de Medellín y un nivel de presión cercana a la presión de nivel del mar de 0.98 atm (991 mbar). Para la generación de la turbulencia se utilizaron placas perforadas con diferentes geometrías y para su medición se utilizó la técnica de anemometría de hilo caliente, para determinar la velocidad de deflagración turbulenta se utilizó la técnica Schlieren y el método del ángulo, posteriormente se realizó un análisis de imágenes para obtener el ángulo de las llamas y así calcular la velocidad de deflagración turbulenta. De acuerdo a los objetivos se desarrolló una metodología y montaje experimental para determinar la velocidad de deflagración turbulenta.

Las pruebas experimentales fueron llevadas a cabo bajo diferentes condiciones de presión, una correspondiente a presión subatmosférica y otra correspondiente a una presión de referencia, en este caso una condición próxima a nivel del mar. El dosado se varió de un dosado estequiométrico a un dosado pobre. Para todas las condiciones experimentales se determinó la intensidad de turbulencia y números adimensionales necesarios para caracterizar este tipo de llamas en régimen turbulento.

A partir de los resultados teóricos y experimentales sobre la velocidad de deflagración turbulenta, y todos los factores que inciden sobre la velocidad de deflagración turbulenta, se pueden plantear las siguientes conclusiones:

1. Los efectos de la presión sobre la velocidad de deflagración turbulenta muestran una tendencia en este trabajo, ya que para los resultados obtenidos a una presión de 0.85 atm se obtienen resultados menores para la velocidad de deflagración turbulenta respecto a los resultados obtenidos a 0.98 atm, se encuentra una disminución de hasta 16% de la velocidad de deflagración turbulenta a 0.85 atm respecto a la condición cercana de nivel del mar de 0.98 atm, para unas mismas condiciones de intensidad de turbulencia, velocidad de descarga en el puerto del quemador, y temperatura ambiente.
2. Una correlación de forma general es planteada entre S_T/S_L y u'/S_L propuesta a partir de los datos experimentales obtenidas en las dos condiciones de dosado y presión, esta correlación tiene la forma $S_T/S_L \propto \alpha [u'/S_L]^n$, para la presión de 0.98 atm las constantes de la correlación son $\alpha = 2.64$, $n = 0.34$ y $\alpha = 3.14$, $n = 0.28$ para $\phi = 1.0$ y $\phi = 0.8$ respectivamente, y para la presión de 0.85 atm las constantes de la correlación son $\alpha = 2.59$, $n = 0.69$ y $\alpha = 2.57$, $n = 0.54$ para $\phi = 1.0$ y $\phi = 0.8$ respectivamente.
3. Durante la ejecución de este trabajo se desarrolló una metodología experimental para determinar la velocidad de deflagración turbulenta a diferentes condiciones de presión, dosado e intensidad de turbulencia, esta metodología experimental se validó mediante la comparación con resultados experimentales reportados por otros autores, y en general se tiene que para este tipo de montaje experimental no es posible controlar la intensidad de turbulencia ya que esta se afecta por la presión.
4. El aumento de presión juega un papel muy importante en la velocidad de deflagración turbulenta y las propiedades de turbulencia, y como se evidenció durante el documento, se demostró que el espesor de llama y la velocidad de deflagración laminar disminuyen con el aumento de la presión, la viscosidad cinemática disminuye debido al incremento

de la presión, esto genera que la presión sea una variable importante a la hora de determinar las características de turbulencia y las escalas de turbulencia.

5. Las características de las llamas turbulentas premezcladas dependen en gran medida de los regímenes, y los regímenes están definidos por el espesor de la llama laminar, la intensidad de turbulencia, la velocidad de deflagración laminar, la escala integral y la microescala de Kolmogorov, así como por números adimensionales como el número de Damköhler y el número de Karlovitz. Las llamas del presente trabajo están situadas en el régimen de llama Flamelet. En este régimen se tienen números de $Da \gg 1$ y se define un régimen de química rápida, debido a que las tasas de reacción química son mucho más rápidas que las tasas de mezclado del flujo.
6. En los rangos de presión, dosado e intensidades de turbulencia estudiados no se presentaron inestabilidades hidrodinámicas en el frente de llama relacionadas a los cambios de densidad que se presentan entre la premezcla sin quemar y la premezcla quemada.
7. Se compararon los resultados experimentales obtenidos con diferentes correlaciones teóricas planteadas por varios autores, sin embargo, no se encuentra una correlación teórica que reproduzca todo el conjunto de datos, en algunos intervalos se presenta buena predicción, debido a esto, en este trabajo se proponen algunas correlaciones para los experimentos desarrollados.

Comentarios finales

1. Con el estudio realizado se aprecian comportamientos que dan pie a proponer planteamientos futuros que ayuden a ampliar y profundizar temas relacionados a los rangos de estabilidad de las llamas en régimen turbulento con diferentes cambios de presión.
2. En estudios realizados por Peters [28] el autor propone que la velocidad de deflagración turbulenta puede aumentar bruscamente con aumentos de u'/S_L si se aumenta la relación de la longitud de escala integral (relación entre la escala de longitud integral al espesor de Zeldovich). Experimentalmente este efecto sería interesante observarlo, sin embargo por la configuración del montaje experimental actual es difícil tener variaciones grandes de la longitud de escala integral, ya que esta longitud está limitada por las placas generadoras de turbulencia, el tamaño del puerto del quemador, y también de los caudales del experimento.
3. Estudios posteriores pueden evaluar rangos de presión más amplios a condiciones subatmosféricas, diferentes rangos de intensidad de turbulencia, y también rangos de dosado más amplios.
4. Para futuros estudios el desarrollo de técnicas láser, OH-PLIF puede ser implementada para la visualización de llamas de premezcla turbulentas y determinar la velocidad de deflagración turbulenta, a fin de realizar comparaciones y validaciones de condiciones experimentales de la técnica Schlieren.

CAPÍTULO VII

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Serrano, C. et al. Laminar burning behaviour of biomass gasification-derived producer gas, *Int. J. Hydrogen Energy*, 33 (2) (2008), pp. 851–862.
- [2] Burbano, H. J. et al. Laminar burning velocities and flame stability analysis of H₂/CO/air mixtures with dilution of N₂ and CO₂, *Int. J. Hydrogen Energy*, 36 (4) (2011), pp. 3232–3242.
- [3] Hernandez, J. J. et al. Prediction of the Autoignition Delay Time of Producer Gas from Biomass Gasification, *Energy & Fuels*, 20 (2) (2005), pp. 532–539.
- [4] Bradley, D. et al. Turbulent burning velocity, burned gas distribution, and associated flame surface definition, *Combust. Flame*, 133 (2003), pp. 415–430.
- [5] Kobayashi, H. et al. Burning velocity correlation of methane/air turbulent premixed flames at high pressure and high temperature, *Proc. Combust. Inst.*, 30 I (1) (2005), pp. 827–834.
- [6] Kobayashi, H. et al. Burning velocity of turbulent premixed flames in a high-pressure environment, *Symp. Combust.*, 26 (1996), pp. 389–396.
- [7] Kobayashi, H. Experimental study of high-pressure turbulent premixed flames, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 26 (2002), pp. 375–387.
- [8] Burbano, H. J. et al. Laminar burning velocities and flame stability analysis of syngas mixtures at sub-atmospheric pressures, *Int. J. Hydrogen Energy*, 36 (4) (2011), pp. 3243–3252.
- [9] McAllister, S. et al. *Fundamentals of Combustion Processes*, (2011). New York: Springer, 2011.
- [10] SHY, S. S. et al. An experimental correlation of turbulent burning velocities for premixed turbulent methane-air combustion, 456 (2000) (2000), pp. 1997–2019.
- [11] Burgess, D. *Structure and propagation of turbulent bunsen flames*, (1962). Washington: Office United States Government Printing, 1962.
- [12] Turns, S. R. *An Introduction to Combustion Concepts and Applications*, (2000). Singapore: Mc graw Hill Higher Education, 2000.
- [13] Amell Arrieta, A. et al. Estudio Teórico y Experimental de la Velocidad de Deflagración Laminar de Mezclas Gas Natural Gas de Síntesis. Facultad de Ingeniería-Grupo GASURE, (2013). p. 95, 2013.
- [14] Veynante, D. and Vervisch, L. Turbulent combustion modeling, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 28 (2002), pp. 193–266.
- [15] Epaminondas, M. and Echehki, T. Turbulent Combustion Modeling, 95 (2011), pp. 193–220.
- [16] Lipatnikov, A. N. and Chomiak, J. Molecular transport effects on turbulent flame propagation and structure, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 31 (1) (2005), pp. 1–73.
- [17] Peters, N. *Turbulent Combustion*, (2000). Cambridge: Published by the press syndicate of the University of Cambridge, 2000.
- [18] Coppola, G. and Gomez, a. Experimental investigation on a turbulence generation

- system with high-blockage plates, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 33 (7) (2009), pp. 1037–1048.
- [19] Kolodzie, P. A. and Van Winkle, M. Discharge coefficients through perforated plates, *AIChE J.*, 3 (3) (1957), pp. 305–312.
- [20] Laws, E. M. and Livesey, J. L. Flow Through Screens, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 10 (1) (1978), pp. 247–266.
- [21] Liu, R. et al. On the generation of turbulence with a perforated plate, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 28 (4) (2004), pp. 307–316.
- [22] Liu, R. et al. Constant Reynolds number turbulence downstream of an orificed perforated plate, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 31 (8) (2007), pp. 897–908.
- [23] Magnussen, B. F. On the structure of turbulence and a generalized eddy dissipation concept for chemical reaction in turbulent flow, *19th Americal Institute of Aeronautics and Astronautics Aerospace Science Meeting*, (1981). pp. 1–6, 1981.
- [24] Warnatz, J. et al. Combustion: Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, 4th ed. (2006). Springer, 2006.
- [25] Law, C. K. Combustion physics, (2006). 2006. .
- [26] Peters, N. Laminar flamelet concepts in turbulent combustion, *Symp. Combust.*, 21 (1) (1988), pp. 1231–1250.
- [27] Borghi, R. On the structure and morphology of turbulent premixed flames. In *Recent Advances in the Aerospace Science*, Plenum Pre. (1985). New York, 1985.
- [28] Peters, N. The turbulent burning velocity for large-scale and small-scale turbulence, *J. Fluid Mech.*, 384 (1999), pp. 107–132.
- [29] Düsing, M. et al. Towards a classification of models for the numerical simulation of premixed combustion based on a generalized regime diagram, *Combust. Theory Model.*, 10 (1) (2006), pp. 105–132.
- [30] Borghi, R. Turbulent combustion modelling, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 14 (4) (1988), pp. 245–292.
- [31] Poinot, T. et al. Quenching processes and premixed turbulent combustion diagrams, *J. Fluid Mech.*, 228 (1991), p. 561.
- [32] S. S. SHY, W. J. L. A. J. C. W. An experimental correlation of turbulent burning velocities for premixed turbulent methane-air combustion, *Proc. Math. Phys. Eng. Sci.*, 456 (2000) (2000), pp. 1997–2019.
- [33] Wang, J. et al. Correlation of turbulent burning velocity for syngas/air mixtures at high pressure up to 1.0MPa, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 50 (2013), pp. 90–96.
- [34] Goldenberg, S. . and Pelevin, V. S. Influence of pressure on rate of flame propagation in turbulent flow, *Symp. Combust.*, 7 (1) (1958), pp. 590–594.
- [35] Khramtsov, V. A. Investigation of pressure effect on the parameters of turbulence and on turbulent burning, *Symp. Combust.*, 7 (1) (1958), pp. 609–614.
- [36] Rockwell, S. R. and Rangwala, A. S. Influence of coal dust on premixed turbulent methane-air flames, *Combust. Flame*, 160 (3) (2013), pp. 635–640.
- [37] Wang, J. et al. Burning velocity and statistical flame front structure of turbulent premixed flames at high pressure up to 1.0 MPa, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 68 (2015), pp. 196–204.
- [38] Taamallah, S. et al. Fuel flexibility, stability and emissions in premixed hydrogen-rich gas turbine combustion: Technology, fundamentals, and numerical simulations, *Appl.*

- Energy*, 154 (2015), pp. 1020–1047.
- [39] Lipatnikov, A. N. and Chomiak, J. Turbulent Flame speed and thickness: phenomenology, evaluation, and application in multi-dimensional simulations, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 28 (2002), pp. 1–74.
- [40] Abdel-Gayed, R. . et al. Turbulent Burning Velocities : A General Correlation in Terms of Straining Rates, (1987), pp. 389–413.
- [41] Abdel-Gayed, R. G. and Bradley, D. Criteria for turbulent propagation limits of premixed flames, *Combust. Flame*, 62 (1) (1985), pp. 61–68.
- [42] Abdel-Gayed, R. G. and Bradley, D. Dependence of turbulent burning velocity on turbulent reynolds number and ratio of flaminar burning velocity to R.M.S. turbulent velocity, *Symp. Combust.*, 16 (1) (1977), pp. 1725–1735.
- [43] Abdel-Gayed, R. G. et al. Turbulent Burning Velocities and Flame Straining in Explosions, *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, 391 (1801) (1984), pp. 393–414.
- [44] Abdel-Gayed, R. G. et al. Turbulent flame propagation in premixed gases: Theory and experiment, *Symp. Combust.*, 17 (1) (1979), pp. 245–254.
- [45] Ballal and Lefevre. The structure and propagation of turbulent flames, 348 (1653) (1974), pp. 285–298.
- [46] Kobayashi, H. et al. Turbulence measurements and observations of turbulent premixed flames at elevated pressures up to 3.0 MPa, *Combust. Flame*, 108 (1–2) (1997), pp. 104–117.
- [47] Kobayashi, H. et al. Experimental study on general correlation of turbulent burning velocity at high pressure, *Symp. Combust.*, 27 (1) (1998), pp. 941–948.
- [48] Kobayashi, H. et al. Relationship between the smallest scale of flame wrinkles and turbulence characteristics of high-pressure, high-temperature turbulent premixed flames, *Proc. Combust. Inst.*, 29 (2002), pp. 1793–1800.
- [49] Shy, S. S. et al. Turbulent burning velocities of premixed CH₄/diluent/air flames in intense isotropic turbulence with consideration of radiation losses, *Combust. Flame*, 143 (2005), pp. 106–118.
- [50] Smallwood, G. Characterization of flame front surfaces in turbulent premixed methane/Air combustion, *Combust. Flame*, 101 (94) (1995), pp. 461–470.
- [51] Gülder, Ö. L. et al. Flame front surface characteristics in turbulent premixed propane/air combustion, *Combust. Flame*, 120 (4) (2000), pp. 407–416.
- [52] Andrews, G. E. and Bradley, D. The burning velocity of methane-air mixtures, *Combust. Flame*, 19 (2) (1972), pp. 275–288.
- [53] Mauss, F., and Peters, N., in *Reduced Kinetic Mechanisms for Applications in Combustion Systems* (N. Peters and B. Rogg, Eds.), Springer-Verlag, New York, 1993, p. 72.
- [54] Goswami, M. et al. The effect of elevated pressures on the laminar burning velocity of methane + air mixtures, *Combust. Flame*, 160 (9) (2013), pp. 1627–1635.
- [55] Montgomery, D. C. *Diseño y análisis de Experimentos*, (2004). 2004.
- [56] Cardona, C. A. and Amell, A. A. Laminar burning velocity and interchangeability analysis of biogas/C₃H₈/H₂ with normal and oxygen-enriched air, *Int. J. Hydrogen Energy*, 38 (19) (2013), pp. 7994–8001.
- [57] Amell, A. A. et al. Numerical and experimental study on laminar burning velocity of

- syngas produced from biomass gasification in sub-atmospheric pressures, *Int. J. Hydrogen Energy*, 39 (16) (2014), pp. 8797–8802.
- [58] Mishra, D. P. *Experimental Combustion An Introduction*, (214AD). CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business, 214AD.
- [59] CHEMKIM-PRO Release, Reaction Design 15083. San Diego. .
- [60] Rockwell, S. *Influence of Coal Dust on Premixed Turbulent Methane-Air Flames*, Worcester Polytechnic Institute, 2012.
- [61] Tyagi, H. et al. Measurement of wake properties of a sphere in freestream turbulence, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 30 (6) (2006), pp. 587–604.
- [62] Krehl, P. and Engemann, S. August Toepler - The first who visualized shock waves, *Shock Waves*, 5 (1–2) (1995), pp. 1–18.
- [63] Mayinger, F. and Feldmann, O. *Optical Measurements, Techniques and Applications*, 2nd ed. (2001). 2001.
- [64] Zhang, M. et al. Flame front structure and burning velocity of turbulent premixed CH₄/H₂/air flames, *Int. J. Hydrogen Energy*, 38 (26) (2013), pp. 11421–11428.
- [65] Yepes Tumay, H. A. *Estudio numérico y experimental de mezclas de Gas Natural y Gas de Síntesis en régimen de combustión sin llama*, Universidad de Antioquia, 2015.
- [66] Vagelopoulos, C. M. and Egolfopoulos, F. N. Direct experimental determination of laminar flame speeds, *Symp. Combust.*, 27 (1) (1998), pp. 513–519.
- [67] Smith, G. P. et al. Gri-Mech 3.0. http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/.
- [68] Cardona Vargas, A. et al. Combustion characteristics of several typical shale gas mixtures, *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, 33 (2016), pp. 296–304.
- [69] Londoño, L. F. et al. Determinación de la velocidad de deflagración laminar empleando el método del cono y la emisión espontánea de CH en llamas metano-aire , *V Simp. Int. BIOFÁBRICAS. I Congr. Int. FLUJOS React.*, (2011).
- [70] Pareja, J. et al. Measurements of the laminar burning velocity of hydrogen-air premixed flames, *Int. J. Hydrogen Energy*, 35 (4) (2010), pp. 1812–1818.
- [71] Dong, Y. et al. Measurement of laminar flame speeds through digital particle image velocimetry: Mixtures of methane and ethane with hydrogen, oxygen, nitrogen, and helium, *Proc. Combust. Inst.*, 29 (2) (2002), pp. 1419–1426.
- [72] Kee, R. J. et al. CHEMKIN Collection, Release 3.6.
- [73] Law, C. K. and Kwon, O. C. Effects of hydrocarbon substitution on atmospheric hydrogen-air flame propagation, *Int. J. Hydrogen Energy*, 29 (2004), pp. 867–879.
- [74] Law, C. K. et al. Cellular instabilities of expanding hydrogen/propane spherical flames at elevated pressures: theory and experiment, *Proc. Combust. Inst.*, 30 (1) (2005), pp. 159–167.
- [75] Jarosinski, J. and Veyssiere, B. *Combustion Phenomena*, (2009). 2009.
- [76] Tamadonfar, P. and Gülder, Ö. L. Effects of mixture composition and turbulence intensity on flame front structure and burning velocities of premixed turbulent hydrocarbon/air Bunsen flames, *Combust. Flame*, 162 (12) (2015), pp. 4417–4441.
- [77] Libby, P. A. and Williams, F. A. *Turbulent Reacting Flows*, (1980). Springer Berlin Heidelberg, 1980.
- [78] Rockwell, S. *Influence of Coal Dust on Premixed Turbulent Methane-Air Flames*, 2012.

- [79] Gülder, Ö. L. Turbulent premixed flame propagation models for different combustion regimes, *Symp. Combust.*, 23 (1) (1991), pp. 743–750.
- [80] Kobayashi, H. and Kawazoe, H. Flame instability effects on the smallest wrinkling scale and burning velocity of high-pressure turbulent premixed flames, *Proc. Combust. Inst.*, 28 (1) (2000), pp. 375–382.
- [81] Lasdon, L. S. et al. Design and Testing of a Generalized Reduced Gradient Code for Nonlinear Programming, *ACM Trans. Math. Softw.*, 4 (1) (1978), pp. 34–50.