



Institución Universitaria

Estudio teórico, numérico y experimental de la intercambiabilidad del gas natural en Antioquia

Edwin Yair Uribe Salazar

Instituto Tecnológico Metropolitano

Facultad de Ingeniería

Medellín, Colombia

2017

Estudio teórico, numérico y experimental de la intercambiabilidad del gas natural en Antioquia

Edwin Yair Uribe Salazar

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magíster en Gestión Energética Industrial

Director:

Magíster en Ingeniería Bernardo Argemiro Herrera Múnera

Codirector:

Doctor en Ingeniería Iván Darío Bedoya Caro

Línea de Investigación:

Eficiencia Energética

Grupo de Investigación:

Materiales Avanzados y Energía (MATyER)

Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía (GASURE)

Instituto Tecnológico Metropolitano

Facultad de Ingeniería

Medellín, Colombia

2017

“No hay rama de la matemática, por abstracta que sea, que no pueda aplicarse algún día a los fenómenos del mundo real”

Nikolai Ivanovich Lobachevski

Agradecimientos

A Dios por permitirme la existencia y darme la oportunidad de explorar las maravillas de la creación.

A mi esposa Ana Lucia Rivera por su amor inagotable y constante compañía que siempre me entrega en todo momento.

A mis padres Rafael y Nelly quienes amo profundamente por enseñarme el significado de la disciplina y la rigurosidad que se debe tener para alcanzar los objetivos propuestos.

A mis compañeros del curso de maestría por compartir conmigo todo su conocimiento técnico y permitirme aprender de sus experiencias profesionales.

A los profesores Bernardo Herrera e Iván Bedoya quienes me brindaron todo su apoyo, orientación y conocimiento durante la realización de este proyecto.

Al grupo GASURE, especialmente al ingeniero Arley Cardona por su excelente disposición, apoyo y acompañamiento en la etapa experimental del presente trabajo.

A Empresas Públicas de Medellín, especialmente a los ingenieros Diego Alejandro Jaramillo, Eduin Carvajal, Marco Rodríguez y Álvaro Montoya, por su incondicional apoyo y orientación técnica que me brindaron en cada una de las etapas de ejecución y validación de resultados.

Resumen

Debido a las diferentes fuentes de suministro de gas natural para Antioquia y la dinámica del mercado de combustibles para Colombia en cuanto a la importación de dicho energético y la preocupación permanente de la disponibilidad y la calidad del combustible gaseoso se hace necesario determinar los límites operativos de intercambiabilidad con gas natural proveniente de distintas fuentes, de tal manera que no se afecte las propiedades físicas de los equipos de combustión ya instalados y se garantice un flujo de combustible eficiente y seguro. Por tal motivo se estudiaron las mezclas de gas natural recibidos en Antioquia entre el periodo 2011 – 2015, obteniendo mezclas representativas de acuerdo a la clasificación de poder calorífico (PCS) alto, medio y bajo por medio de estadística descriptiva aplicada. Se calcularon las propiedades de combustión relacionadas con la intercambiabilidad de gases para llevarlas a una simulación numérica mediante el software CHEMKIN PRO utilizando el mecanismo GRIMECH 3.0. Se calculó la velocidad de deflagración laminar y luego se halló la misma propiedad para las mezclas representativas en la fase experimental utilizando la técnica Schlieren.

Se obtuvieron resultados que permitieron aplicar los índices de intercambiabilidad y validar experimentalmente los efectos fenomenológicos de combustión (Retrollama y Desprendimiento) encontrando que la intercambiabilidad entre dichos gases no excede el 5,5% respecto al gas base y no se hace necesario ajustar de manera física los diseños de los equipos de combustión que operan en la región de Antioquia.

Palabras clave: Intercambiabilidad del gas natural, Índice de Wobbe, Técnica Schlieren, Eficiencia de combustión.

Abstract

Because of different sources of supply of natural gas for Antioquia and dynamics of the fuel market for Colombia regarding the importation of such energy and constant concern of the availability and quality of gaseous fuel; It is necessary to determine the operating limits of interchangeability with gases of different sources, in such a way that the physical properties of the combustion equipment already installed do not be affected and a efficient and safe flow of fuel is assured. For this reason, mixtures of natural gas received in Antioquia between 2011 – 2015 were studied. Representative mixtures according to the classification of high, medium and low energy content were obtained by means of descriptive statistics applied. Combustion properties related with interchangeability were calculated and then they were used in a numerical simulation using the CHEMKIN PRO software with GRIMECH 3.0 mechanism. Laminar deflagration velocity was calculated numerically and these results were compared with those obtained in the experimental test for the same mixtures of natural gas by Schlieren.

Results allowed application of interchangeability indexes and experimental validation of the combustion instabilities (flashback and Blowout). It was found that the interchangeability between these gases does not exceed 5.5% over the base gas and is not necessary to adjust physically the designs of combustion equipment operating in the region of Antioquia.

Keywords: Interchangeability of natural gas, Wobbe index, Schlieren technics, combustion efficiency.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas	XVI
Lista de Símbolos y abreviaturas	XVII
Introducción	19
1. Marco Teórico	24
1.1 Gas natural	24
1.1.1 Gas natural en Colombia	25
1.2 Propiedades de combustión en los combustibles gaseosos	28
1.2.1 Volumen de aire estequiométrico (V_a)	28
1.2.2 Volumen de humos (V_f)	29
1.2.3 Poder calorífico (PCS)	29
1.2.4 Densidad	30
1.2.5 Temperatura de llama adiabática (T_{ad})	30
1.2.6 Límite de inflamabilidad	31
1.2.7 Energía mínima de ignición	31
1.2.8 Temperatura de Ignición	31
1.2.9 Velocidad de llama laminar	31
1.2.10 Estabilidad de llama	32
1.3 Llamas de premezcla	32
1.4 Inestabilidad de combustión	35
1.5 Intercambiabilidad de gases	35
1.5.1 Métodos tradicionales de intercambiabilidad	36
1.6 Velocidad de deflagración laminar	45
1.7 Altura de cono azul	46
1.8 Fenómeno de retrollama	47
1.9 Fenómeno de desprendimiento:	48
1.10 Fenómeno de puntas amarillas:	49
2. Metodología	51
2.1 Determinación de las mezclas representativas	51
2.1.1 Obtención de datos	51
2.1.2 Cálculo de propiedades físico químicas	54
2.1.3 Modelo estadístico	55
2.2 Cálculo numérico de la temperatura de llama adiabática y la velocidad de deflagración laminar	56
2.2.1 Temperatura de llama adiabática	58
2.2.2 Velocidad de deflagración laminar	58
2.3 Estudio experimental	60
2.3.1 Adquisición de las muestras físicas de gas natural	60
2.3.2 Calibración de rotámetros	61

2.3.3	Medición experimental de la velocidad de deflagración laminar con la técnica Schlieren.....	64
2.3.4	Observación de fenómenos de retrollama y desprendimiento.....	68
2.4	Observación de emisiones	69
2.5	Cálculo de los índices de intercambiabilidad	71
2.6	Cálculo de la eficiencia térmica y observación de llama en gasodomésticos ..	73
3.	Resultados	75
3.1	Mezclas representativas de gas natural	75
3.1.1	Variación de la composición del gas natural	75
3.1.2	Relacionado con la estadística aplicada	79
3.2	Simulación numérica CHEMKIN Pro ®.....	85
3.2.1	Relacionado con la temperatura de llama adiabática	85
3.2.2	Velocidad de deflagración laminar	86
3.2.3	Análisis de sensibilidad.....	89
3.3	Resultados experimentales	90
3.3.1	Relacionado con la velocidad de deflagración laminar.....	90
3.4	Gradientes críticos de velocidad.....	95
3.4.1	Relacionado con Retrollama	95
3.4.2	Relacionado con Desprendimiento	97
3.5	Volumen de humos y aire estequiométrico	100
3.6	Emisiones.....	101
3.7	Rendimiento térmico y observación de llama en un gasodomesticos de uso convencional.....	104
3.8	Intercambiabilidad de los gases naturales estudiados	105
4.	Conclusiones y recomendaciones	109
4.1	Conclusiones.....	109
4.2	Recomendaciones.....	111
A.	Anexo:	113
	Bibliografía	115

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Estructura de una llama de premezcla (Rubio-Gaviria, 2015)	34
Figura 1-2: Marco de referencia para intercambiabilidad según índices de AGA y Weaver (Ortiz J. M., 2014)	39
Figura 1-3: Método grafico de Duton para la determinación de la intercambiabilidad de gases, tomado y adaptado de (Bp & International Gas Union, 2010).....	42
Figura 1-4: Método grafico de Delbourg para la determinación de la intercambiabilidad de gases (Delbourg P & Lafon J, 1971).	43
Figura 1-5: Identificación del cono azul en una llama de premezcla (Rubio-Gaviria, 2015)	46
Figura 1-6: Retrollama contra la corriente del combustible (Dam et al., 2011)	48
Figura 1-7: Efecto Desprendimiento para flujos de llama premezclada, tomada y adaptada de (Wang et al., 2015).	49
Figura 2-1: Sistema de transporte de gas natural en Colombia. Tomado y adaptado de: http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno02/gasmarket/3.2.htm	53
Figura 2-2: Ubicación cromatógrafo nodo tasajera estación transferencia de custodia Transmetano – Empresas Públicas de Medellín E.S.P.....	60
Figura 2-3: Cilindros adaptados para compresión de gas natural	61
Figura 2-4: Calibración de las mezclas de gas natural	63
Figura 2-5: Grafica de ajuste para gas con poder calorífico (PCS) alto.....	63
Figura 2-6: Grafica de ajuste para gas con poder calorífico (PCS) bajo.....	64
Figura 2-7: Quemador de premezcla para flujos laminares (Rubio-Gaviria, 2015) ...	65
Figura 2-8: Frente de llama triangular en quemador de premezcla	66
Figura 2-9: Montaje Schlieren vista lateral	66
Figura 2-10: Montaje Schlieren vista frontal.....	67
Figura 2-11: Montaje experimental para la observación de los gradientes críticos.....	69
Figura 2-12: Analizador SICK MAIHAK s710	70
Figura 2-13: Campana concentradora de gases	71
Figura 3-1: Participación gas natural año 2011	76
Figura 3-2: Participación gas natural año 2012.....	76
Figura 3-3: Participación gas natural año 2013.....	77
Figura 3-4: Participación gas natural año 2014.....	77
Figura 3-5: Participación gas natural año 2015.....	78
Figura 3-6: Comportamiento del poder calorífico (PCS) del gas natural.....	79
Figura 3-7: Comportamiento del índice de Wobbe y el poder calorífico (PCS) bajo .	81

Figura 3-8:	Comportamiento del índice de Wobbe y el poder calorífico (PCS) medio	82
Figura 3-9:	Comportamiento del índice de Wobbe y el poder calorífico (PCS) alto...	83
Figura 3-10:	Simulación numérica temperatura de llama adiabática.....	86
Figura 3-11:	Velocidad de deflagración laminar.....	88
Figura 3-12:	Componentes químicos principales gas natural	88
Figura 3-13:	Análisis de sensibilidad para $\phi = 1$	90
Figura 3-14:	Velocidad de deflagración laminar gas natural poder calorífico (PCS) bajo	92
Figura 3-15:	Velocidad de deflagración laminar gas natural poder calorífico (PCS) medio	93
Figura 3-16:	Comparación velocidad de deflagración laminar gas natural con poder calorífico (PCS) bajo y medio.....	94
Figura 3-17:	Efecto Retrollama de una llama de premezcla de gas natural	96
Figura 3-18:	Gradientes críticos de velocidad para el efecto Retrollama	97
Figura 3-19:	Efecto Desprendimiento de una llama de premezcla de gas natural	98
Figura 3-20:	Gradiente critico de velocidad para el efecto Desprendimiento	99
Figura 3-21:	Resultados volumen de humos y aire estequiométrico.....	101
Figura 3-22:	Producción de dióxido de carbono en las mezclas de gas natural.....	102
Figura 3-23:	Producción monóxido de carbono	103
Figura 3-24:	Estructura de llama gas natural poder calorífico (PCS) bajo.....	105
Figura 3-25:	Estructura de llama gas natural poder calorífico (PCS) medio.....	105
Figura 3-26:	Contenido energético de las mezclas de gas natural estudiadas.....	106
Figura 3-27:	Región de operación del factor de supercompresibilidad para el gas con poder calorífico (PCS) Bajo y medio.	107

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Composición química utilizada para el diseño de equipos de combustión en Colombia (A. A. Amell, Cesar, & Bladimir, 2006).....	25
Tabla 1-2: Campos de gas natural por cuenca en Colombia (UPME, 2015)	26
Tabla 1-3: Composición química gas natural Cusiana y Guajira. (Nel, Hernández, Mario, & Bedoya, 2004)	28
Tabla 1-4: Índice de Weaver según el fenómeno de combustión	38
Tabla 2-1: Composiciones químicas altas y bajas con respecto al metano.	54
Tabla 2-2: Límites y clasificación de densidades	55
Tabla 2-3: Datos de entrada calculo velocidad de deflagración laminar	59
Tabla 2-4: Condiciones experimentales de laboratorio.....	68
Tabla 3-1: Composiciones químicas representativas de gas natural.....	84
Tabla 3-2: Composición base gas natural	85
Tabla 3-3: Composición química gas natural experimental	91
Tabla 3-4: Experimentos realizados para determinar la velocidad de deflagración laminar	91
Tabla 3-5: Experimentos realizados para Retrollama.....	95
Tabla 3-6: Experimentos realizados para Desprendimiento	98
Tabla 3-7: Variación de las propiedades de las mezclas representativas respecto a la mezcla base	101

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
A_i	Amplitud del intervalo modal	1	Ec (2-4)
a_i	Amplitud de la muestra	1	Ec (2-2)
D_1	Delta frecuencia absoluta premodal	1	Ec (2-4)
D_2	Delta frecuencia absoluta posmodal	1	Ec (2-4)
S	Desviación estándar	1	Ec (2-2)
F_{i-1}	Frecuencia acumulada	1	Ec (2-3)
x_i	Fracción de la cantidad de materia	1	$\frac{n_i}{n}$
w_i	Fracción en masa del componente i	1	$\frac{m_i}{m_o}$
\dot{V}_a	Flujo volumétrico de aire	V	Ec (2-5)
\dot{V}_f	Flujo volumétrico de combustible	V	Ec (2-6)
W	Índice de Wobbe	1	$\frac{MJ}{m^3}$
L_{i-1}	Límite inferior de la frecuencia absoluta	1	Ec (2-4)
L_i	Límite inferior modal	1	Ec (2-4)
m_f	Masa de humos secos	M	$\frac{kg_{humos\ secos}}{kg_{gas}}$
m_f'	Masa de humos húmedos	M	$\frac{kg_{humos\ humedos}}{kg_{gas}}$
Ma	Masa de aire estequiométrico	M	$\frac{kg_{aire}}{kg_{gas}}$
Me	Mediana	1	Ec (2-3)
n	Número de observaciones	1	Ec (2-1)
PCS	Poder calorífico (PCS) superior	$\frac{MJ}{m^3}$	$\sum X_i PCS_i$
$\frac{N}{2}$	Semisuma de la frecuencia absoluta	1	Ec (2-2)
T	Temperatura	K	DF
t	Tiempo	s	DF
V_a	Volumen de aire estequiométrico	V	$\frac{m_{st}^3\ aire}{m_{st}^3\ gas}$
V_f	Volumen de humos secos	V	$\frac{m_{st}^3\ humos\ secos}{m_{st}^3\ gas}$
V_f'	Volumen de humos húmedos	V	$\frac{m_{st}^3\ humos\ humedos}{m_{st}^3\ gas}$
$(V_a)_{est}$	Volumen estequiométrico de aire	V	Ec (2-7)
V	Volumen	m^3	$\int dr^3$
\vec{u}	Velocidad	$\frac{m}{s}$	$\frac{dr}{dt}, r \frac{dv}{dt}, \frac{dz}{dt}$

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
θ	Ángulo de inclinación	1	grados
ρ	Densidad	1	ρ
τ	Tiempo adimensional	1	Sin unidad
Φ_V	Flujo volumétrico	$\frac{m^3}{s}$	$\frac{\Delta V}{\Delta t}$
λ	Tasa de aireación	m_{aire}^3/m_{fuel}^3	$\frac{\dot{V}_a}{\dot{V}_f(V_a)_{est}}$
ϕ	Factor de equivalencia	m_{aire}^3/m_{fuel}^3	$\frac{\dot{V}_f(V_a)_{est}}{\dot{V}_a} = \frac{1}{\lambda}$

Subíndices

Subíndice	Término
i	Cantidad determinada
v	Volumen
est	Estequiométrico
exp	Experimental
0	Estado de referencia

Superíndices

Superíndice	Término
n	Exponente, potencia

Abreviaturas

Abreviatura	Término
MMMPCD	Miles de Millones de pies cúbicos diarios
MMPCD	Millones de pies cúbicos diarios
Mpcd	Miles de pies cúbicos diarios
GBTUD	Giga BTU día ($1,015 \cdot 10^9$ Mpcd)
GASURE	Grupo de ciencia y tecnología del gas y uso racional de la energía
TFIX	Optional user defined temperature profile
Vol	Volumen
lpms	Litros por minutos

Introducción

La demanda del gas natural ha venido creciendo de manera gradual en los sectores comercial, industrial y residencial, contribuyendo a la diversificación del sector energético y creando así nuevas economías tendientes a potencializar e incentivar cada vez más la utilización de un combustible gaseoso, eficiente y responsable con el medio ambiente (Ortiz J. M., 2014). Hoy los sectores productivos y de transporte dependen cada vez más del gas natural, lo que motiva a emprender planes de acción y de control respecto a la calidad del combustible gaseoso que nos entregan los productores, las características en cuanto a composición química y eficiencia se refiere y a la disponibilidad en el tiempo que se pueda tener del energético garantizando el suministro permanente sin afectar las propiedades físicas de los equipos de combustión (Group, 2005).

Dadas las ventajas medioambientales y operacionales imputables al gas natural, es que en el mundo entero su utilización ha ido aumentando año tras año. Es así como su participación en la canasta energética mundial, ha aumentado considerablemente con variaciones significativas desde el año 1975 con un 9% a 1999 con un 22% y ya casi en un 25% para el año 2014 (Deng et al., 2011).

De acuerdo con un informe de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), en el contexto internacional el gas natural presenta una alta demanda debido a sus bajos costos en comparación a otras fuentes energéticas; la producción no convencional de gas, entre 2010 y 2014, pasó del 15% al 20% de la producción total de gas, y se estima que llegue a representar el 29% de la producción mundial de gas en 2030 ("Prospectiva del Mercado de Gas natural," 2015).

El mercado de consumo de gas natural en el mundo se concentra en las regiones de Europa, Norteamérica y Asia Pacífico, ya que consumen 83.8% de la demanda global. Si bien, la demanda creció en todas las regiones durante la última década, el incremento fue notable en regiones como Europa y Asia Pacífico, cuyo crecimiento en volumen entre

1995 y 2005 fue de 18,625 millones de pies cúbicos diarios MMPCD y 18,315 MMPCD, respectivamente (“Prospectiva del Mercado de Gas natural,” 2015).

En el contexto mundial los mercados de energía están cada vez más preocupados con la producción del gas y en muchos casos se da por la alta dependencia de las importaciones de dicho combustible (Villada & Olaya, 2013). El gas natural abastece el 24.8% del consumo de energía del mundo, el consumo mundial de gas natural pasó de 261.6 MMMPCD a 367.9 MMMPCD entre 2003 y 2015. Si bien, la tasa de crecimiento anual del gas natural es ligeramente menor a la del carbón, se espera que sea una fuente importante en la generación de energía eléctrica y el sector industrial, debido a que es ambientalmente más atractivo, y su combustión es más eficiente que la del carbón (Ortiz J. M., 2014).

En Colombia los principales yacimientos de gas natural son Cusiana y Guajira. El gas natural de Guajira inició su explotación comercial en la década de los 70s, y en la década de los 90s se construyó el gasoducto Ballena – Barranca que hizo posible la utilización de este gas en el interior del país. En el yacimiento de Cusiana el gas ha sido reinyectado al pozo para facilitar la salida del crudo pesado, lo que ocasiona un alto contenido de CO₂. Para cumplir con la reglamentación de calidad del gas de Cusiana, es necesaria la instalación de una planta de procesamiento para reducir el contenido del CO₂ y así entregarlo al interior del país bajo condiciones aceptables de operatividad; sin embargo, entre los gases provenientes de Cusiana y Guajira existen diferencias representativas en su composición química que pueden ser determinantes al momento de evaluar la calidad de un artefacto a gas o la confiabilidad en la eficiencia de la combustión (A. A. Amell, 2007).

La oferta disponible de gas natural se encuentra identificada con los principales aportes en las cuencas de los Llanos Orientales y la Guajira, seguidos por el valle inferior del Magdalena, Catatumbo y el valle superior del Magdalena. La cuenca de los Llanos orientales tuvo una producción de 1300 GBTUD para el año 2014, con una proyección de 1000 GBTUD para el año 2023, mientras que para la cuenca de la Guajira se tuvo una producción de 600 GBTUD para el año 2014 con una proyección de 250 GBTUD para el año 2023, lo que significa un descenso en la disponibilidad de gas natural para la cuenca de la Guajira de un 58% (UPME, 2015).

Igualmente, la Asociación Colombiana de Gas Natural indica que la producción de los pozos de Cusiana y Cupiagua de la cuenca de los Llanos Orientales tuvo un descenso de 532 Mpcd a 429 Mpcd entre los años 2014 y 2015. Se estima que entre los años 2015 y 2023 se mantendrá una producción promedio de 448 Mpcd para los pozos de Ballena, Chuchupa y Riohacha de la cuenca de la Guajira (NATURGAS, 2016).

El pronóstico de producción entre los años 2014 y 2023 pasará de 501 Mpcd a 154 Mpcd respectivamente, lo que indica un descenso en la producción de gas natural del 69%.

Los episodios ocurridos en el año 2000 y el presentado por el fenómeno del niño en el año 2015, donde el mercado del gas natural experimentó un racionamiento por escasez de dicho combustible, ponen a Colombia en una posición vulnerable lo que exige la búsqueda de nuevas alternativas y sustitutos para dicho combustible. Las causas de dicho racionamiento fueron picos estacionales de la demanda en el sector de la energía por mejoras previstas en algunas plantas de tratamiento de gas natural, generación masiva de energía eléctrica para suplir necesidades y compromisos contractuales a partir de plantas térmicas, la capacidad real de la red y la limitación del transporte..

La intercambiabilidad de gases ha sido una preocupación en el contexto mundial desde los años 30s y 40s, cuando el gas natural reemplazó el uso de los gases manufacturados a partir del carbón y el petróleo. Hoy los quemadores modernos presentan una alta sensibilidad a la composición del gas y son menos tolerantes a las fluctuaciones de la composición luego de que el equipo sea calibrado para funcionar con una calidad de gas determinada. Por lo anterior se hace necesario conocer una mezcla de gas base de tal manera que pueda ser intercambiable en su composición química garantizando la eficiencia y calidad de los equipos de combustión (Flórez-orrego, 2011).

Para que dos gases sean intercambiables, se debe garantizar que la potencia de entrada al equipo de combustión no sufra variaciones significativas y que no se requiera de la realización de ajustes en el equipo (Hernandez J & Cortés J, 2003).

El índice de Wobbe (IW) es un parámetro que se utiliza muy a menudo para caracterizar la intercambiabilidad de un combustible, relacionando el poder calorífico (PCS) superior con la raíz cuadrada de la densidad relativa del combustible. Con esta relación se puede

comparar el contenido de energía de un combustible para una configuración geométrica del inyector del quemador y presión de suministro.

Aunque este no es el único factor para la determinación de mezclas intercambiables, si es el índice más aceptado en el contexto internacional para la medición de la disponibilidad energética. Sin embargo, se hace necesario el análisis comparativo de varias propiedades de combustión, que permitan determinar y caracterizar la ocurrencia de un conjunto de efectos fenomenológicos que inciden sobre condiciones operacionales de un equipo y la calidad de la combustión tales como la velocidad de deflagración laminar, retrocesos de llama y puntas amarillas.

La mayoría de las investigaciones sobre intercambiabilidad de gases están centralizadas en el estudio de la variabilidad de parámetros de funcionamiento como la potencia, la eficiencia térmica y las emisiones contaminantes (Jordan, Mcdonell, & Samuelsen, 2013). En un segundo lugar se encuentran las investigaciones que tratan de aportar conocimiento sobre la variabilidad de la velocidad de combustión y la estabilidad de la misma. En Colombia se han desarrollado pocos estudios que tengan un enfoque fenomenológico; algunos como los desarrollados por el grupo GASURE de la Universidad de Antioquia Colombia donde se realizó el análisis de la intercambiabilidad de mezclas GLP/ gas de síntesis (Rubio-Gaviria, 2015), análisis de los efectos del cambio de la composición química del gas natural sobre el comportamiento de turbinas a gas (A. A. Amell, Cesar, & Bladimir.), entre otros. Por lo anterior se decidió realizar la presente investigación, lo cual contiene un estudio teórico numérico y experimental de la intercambiabilidad del gas natural en el departamento de Antioquia, teniendo en cuenta que por su ubicación geográfica se facilita la obtención de datos para el investigador. En el objetivo general se planteó determinar la intercambiabilidad en equipos de combustión convencionales de los gases naturales que son suministrados para Antioquia en función de la variación de la composición. Los objetivos específicos fueron los siguientes:

- Determinar la composición química representativa del gas natural de Cusiana, gas natural Guajira y la mezcla de estos dos gases (Cusiana + Guajira) suministrados para

Antioquia a través de métodos estadísticos descriptivos y de inferencia paramétrica medibles.

- Determinar la intercambiabilidad del gas natural de Cusiana, gas natural Guajira y la mezcla de estos dos gases (Cusiana + Guajira) aplicando teoría de intercambiabilidad, pruebas experimentales y simulaciones de cinética química detallada.
- Determinar estrategias que hagan posible la intercambiabilidad del gas natural Guajira, gas natural Cusiana y la mezcla de estos dos gases (Cusiana + Guajira) mediante pruebas experimentales en un quemador de premezcla de aire inducido.

Para el desarrollo de los objetivos fue necesario apropiarse la fenomenología básica de la combustión, las técnicas estadísticas para determinar la composición promedio de los combustibles gaseosos, las características de las llamas de premezcla, la teoría de intercambiabilidad y la influencia de la velocidad de deflagración laminar en hidrocarburos. Todo esto es descrito desde el punto de vista teórico en el Capítulo 1.

Las técnicas utilizadas, las razones por las que se decidieron aplicar diferentes metodologías, la descripción de los modelos de simulación cinética y los montajes experimentales, se encuentran detallados en el capítulo 2, permitiendo así una mejor comprensión del desarrollo de los temas y la interpretación de los resultados.

En el capítulo 3 se encuentran discriminados los resultados obtenidos para el análisis estadístico de la composición de los gases estudiados, para la temperatura de llama adiabática y para la velocidad de deflagración laminar, tanto numéricos como experimentales desde el punto de vista de intercambiabilidad de gases. En dicho capítulo también se realiza la discusión y análisis de los resultados y finalmente las conclusiones y recomendaciones finales se describen en el capítulo 4.

La presente investigación es de interés general y se encuentra alineada con el Plan de Desarrollo Nacional 2014 – 2018 “Todos por un Nuevo País” sector energía y gas en los focos estratégicos un país más incluyente, en su línea de desarrollo minero energético para la equidad expansión y consolidación de gas combustible a través de proyectos aplicados por la UPME (Muñoz et al., 2014).

1. Marco Teórico

Los hidrocarburos como fuente de energía presentan una gran variabilidad en cuanto a su aprovechamiento energético, haciendo de gran importancia conocer las propiedades químicas, cinéticas, y de combustión que se puedan presentar a diferentes condiciones de operación de las diferentes tecnologías de uso con el fin de lograr determinar estrategias que permitan optimizar su uso y lograr mayores eficiencias.

A continuación, se describen las propiedades, fuentes de extracción y transporte del gas natural en Colombia. Igualmente se presentan algunas propiedades de combustión y los efectos fenomenológicos más importantes para el estudio de la intercambiabilidad de gases.

1.1 Gas natural

El gas natural es una mezcla de hidrocarburos livianos en estado gaseoso, que en su mayor parte está compuesta por metano y etano, y en menor proporción por propano, butanos, pentanos e hidrocarburos más pesados. Si el contenido de hidrocarburos de orden superior al metano es alto se denomina gas rico, de lo contrario se conoce como gas seco. Las principales impurezas que puede contener la mezcla son vapor de agua, gas carbónico, nitrógeno, sulfuro de hidrógeno y helio, entre otros (Brown et al., 2004).

El gas natural es un producto muy valioso, que se originó hace millones de años producto de la descomposición de las plantas y animales que fueron atrapados en el interior de la tierra. Es un combustible no renovable, produce menos CO_2 que otros combustibles como los derivados del petróleo, además es un combustible que se quema más rápida, limpia y eficazmente, tiene la característica de que puede ser utilizado en sistemas de generación eléctrica, producción de hidrógeno y en motores de combustión interna (Brown et al., 2004).

La Tabla 1-1: Composición química utilizada para el diseño de equipos de combustión en Colombia (A. A. Amell, Cesar, & Bladimir, 2006) define la composición química general del gas natural en Colombia, (Cardona & Amell, 2013).

Tabla 1-1: Composición química utilizada para el diseño de equipos de combustión en Colombia (A. A. Amell, Cesar, & Bladimir, 2006).

COMPUESTO	SIMBOLO	CANTIDAD %
Metano	CH ₄	81,86
Etano	C ₂ H ₆	11,61
Propano	C ₃ H ₈	1,92
I Butano	C ₄ H ₁₀	0,23
N Butano	C ₅ H ₁₀	0,22
Nitrógeno	N ₂	0,90
Dióxido de Carbono	CO ₂	3,18

El gas natural es una parte de la cadena de hidrocarburos, desde el metano hasta la parte más pesada del compuesto pueden clasificarse por técnicas como la cromatografía de gases, lo cual permite identificar hidrocarburos individuales puros, y así eliminar o controlar sus trazas de componentes particulares para cumplir con la normatividad o controles de calidad dependiendo de parámetros o niveles requeridos como densidad, poder calorífico (PCS) o impacto ambiental; normalmente la separación se hace a especies de bajo peso molecular. (Elizalde-González & Ruíz-Palma, 1999).

1.1.1 Gas natural en Colombia

En el año 1962 se inauguró oficialmente el primer gasoducto en Colombia y el segundo en Suramérica, llamado Cicuco – Barranquilla, el cual transportaba el gas natural del campo de exploración de Cicuco a la única industria conectada que fue la cementera del Caribe (Tellez & Vilela, 2014).

En el año 1973, se encontró el primer yacimiento en la zona de La Guajira con la exploración del campo Ballena con una reserva de 668 MMMPCD y unos meses después se encontró el campo de Chuchupa con una reserva de 2,819 MMMPCD. En el año 1989 se encontraron yacimientos en los llanos orientales en los campos de Apiay y Cupiaga, los cuales fueron tan fructíferos que permitieron la construcción de los gasoductos hacia Bogotá, Villavicencio y el centro del país con una compresora de gas natural (Tellez & Vilela, 2014). Igualmente permitió la construcción del gasoducto Sebastopol – Medellín, el cual surte la demanda de gas natural del departamento de Antioquia.

Tabla 1-2 se especifican los diferentes campos que son explotados en Colombia y que de acuerdo a los reportes de la UPME son los que se encuentran operativos al año 2015 y suplen la demanda energética del país en cuanto a gas natural se refiere (UPME, 2015).

Tabla 1-2: Campos de gas natural por cuenca en Colombia (UPME, 2015)

CUENCA	CAMPOS
Catatumbo	Tibú, Sardinata, Cerrito, Rio Zulia
Guajira	Ballena, Chuchupa, Riohacha
Llanos Orientales	Apiay, Balay, Kona, Acordionero, Floreña, Pauto Sur, Rancho Hermoso, Rancho Hermoso Mirador, Cusiana Norte, Cusiana, Cupiagua, Gibraltar, Cusiana, Santiago, Caño Garza, Cravo Sur, Tocara, Morichal, La Gloria, Corocora, Remache Norte, Remache Sur, Casona, Ramiriquí, Oropéndola, Vireo, Trinidad.
Putumayo	Moqueta, Costayaco, Guayuyaco, Juanambú
Valle Inferior del Magdalena	Arianna, Cañaflecha, Nelson, La Creciente, La Creciente-D, Bonga, Mamey, Brillante, El Difícil.
Valle Medio del Magdalena	Lisama Profundo, Lisama Norte, Llanito, Lisama, La Cira-Infantas, Liebre, Juglar, Colon, Payoa, Corazón West, Corazón 9, Corazón West C, Corazón, La Salina, Opón, Provincia, Santa Lucia, Los Ángeles, Yarigui-Cantagallo.
Valle Superior del Magdalena	Abánico, Guando, Chaparro, Rio Ceibas, Guaduas, Purificación, La Jagua, Mana, Brisas, Dina Cretáceo, Dina Terciario, Loma Larga, Santa Clara, Tenay, Ortega, Toy, Pacande, Balcón, Palermo, San Francisco, Arrayan, Tempranillo, Toqui-Toqui, Espino, La Hocha, Tello, Toldado, Yaguará, Matachín Norte Y Sur, La Cañada Norte, Maracas.

La disponibilidad promedio de gas natural en Colombia es de 1,131 GBTUD y los campos de producción de la Guajira aportaron un promedio del 40% del total nacional equivalente, mientras que Cusiana – Cupiagua aportó el 36% equivalente a la producción nacional para el año 2015.

Para el año 2023 se espera que la cuenca de la Guajira contribuya el 16% y Cusiana – Cupiagua el 51% del consumo nacional de Colombia (UPME, 2015).

Entre los gases provenientes de Cusiana y Guajira existen diferencias representativas en su composición química que pueden ser determinantes al momento de evaluar la calidad de un artefacto a gas o la confiabilidad en la eficiencia de la combustión (A. A. Amell, 2007).

La diferencia más significativa entre los gases de Cusiana y Guajira es que el gas de Cusiana es un gas rico con un contenido importante de etano, propano, butano y CO₂, probablemente por su ubicación, naturaleza de los terrenos y explotación asociado como sub-producto de la explotación del crudo.

El gas de Guajira es un gas pobre con un contenido de casi el 98% de metano como se describe en la Tabla 1-3. Guajira es un gas no asociado con plataformas de exploración off-shore y on-shore, lo que representa suelos un poco más alcalinos con una geomorfología sedimentaria que beneficia la generación de gas natural prácticamente sin necesidad de realizarle ningún tratamiento y la posibilidad de incluirlo directamente al sistema de transporte.

Las variabilidades tan extremas en la composición química entre el gas de Cusiana y Guajira influyen de manera negativa en la calidad de la combustión y producen efectos adversos en la operatividad de los equipos de combustión evidenciados en fenómenos no deseados de combustión como desprendimiento de la llama del quemador, retroceso de llama, puntas de llama amarillas, autoignición del gas, apagado de la llama y combustión incompleta. Estos fenómenos indeseados generan emisiones mayores al ambiente de sustancias como el monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y algunos hidrocarburos.

Otro de los factores importantes a considerar respecto a la gran diferencia de la composición química de los gases extraídos de estas dos fuentes es que el gas de Cusiana en sus primeros años de operación fue re-inyectado al pozo para regular la presión y facilitar la salida del crudo. Con el agotamiento de las reservas de petróleo, la explotación comercial de Cusiana se enfocó principalmente en extracción de gas natural obligando a generar una limpieza y extracción de CO₂ para ajustarlo a la reglamentación vigente y así poderlo comercializar al interior del país. Esta práctica pudo haber influido en el desarrollo actual de su composición química.

Tabla 1-3: Composición química gas natural Cusiana y Guajira. (Nel, Hernández, Mario, & Bedoya, 2004)

COMPONENTE	CUSIANA (%Vol.)	GUAJIRA (% Vol.)
Metano	78,65	97,69
Etano	10,34	0,42
Propano	4,59	0,12
I Butano	1,96	0,07
N Butano	4,26	0,00
Nitrógeno	0,11	1,40
Dióxido de Carbono	0,09	0,30
Gravedad Especifica	0,7634	0,57
Poder calorífico (PCS) (MJ/m ³)	49,7	37,37

1.2 Propiedades de combustión en los combustibles gaseosos

Para la caracterización y aplicabilidad de combustibles gaseosos es de gran importancia conocer algunas propiedades volumétricas y másicas que permiten analizar un combustible en términos de disponibilidad energética, requerimientos mínimos de aire o comburente y potencialidad de emitir ciertos contaminantes. Igualmente, es de vital importancia el conocimiento de variables físicas y fenomenológicas que permiten predecir el comportamiento cinético químico y fluido-dinámico de la mezcla aire/combustible y sus productos al interior de las cámaras de combustión. Estas propiedades se describen a continuación.

1.2.1 Volumen de aire estequiométrico (V_a)

Es el volumen de aire mínimo o teórico necesario para la combustión; es el aire teóricamente indispensable para que todo el carbono del combustible se transforme en bióxido de carbono (CO₂), todo el hidrógeno se transforme en vapor de agua (H₂O) y todo el azufre (si existe en el combustible) se transforme en bióxido de azufre (SO₂). A este tipo de combustión se le denomina comúnmente completa o perfecta ya que no existe

presencia de especies intermedias como el monóxido de carbono (CO) o hidrocarburos sin quemar. El volumen de aire estequiométrico usualmente se reporta en unidades de $\frac{m_{st}^3 \text{aire}}{m_{st}^3 \text{gas}}$. Un análogo de esta variable es la masa de aire estequiométrica (m_a) que se reporta usualmente en $\frac{kg_{aire}}{kg_{gas}}$.

1.2.2 Volumen de humos (V_f)

Se define como el volumen de productos (humos) de la combustión por unidad de volumen de combustible para el balance de masa estequiométrico, es decir, considerando que se utiliza el volumen de aire estequiométrico y la combustión es completa. La combustión se realiza empleando como comburente no el oxígeno si no el aire, los gases procedentes de la combustión, serán para la combustión perfecta, anhídrido carbónico, vapor de agua y nitrógeno; para el caso de que la combustión no sea completa, generará monóxido de carbono y en algunos casos anhídrido sulfuroso para las mezclas con contenido de azufre

Los humos húmedos hacen referencia a los productos de la combustión incluyendo el vapor de agua, la masa o volumen de humos secos hace referencia a los productos sin incluir el vapor de agua. En este trabajo se sigue la siguiente convención y unidades:

Volumen de humos húmedos (V_f)	$\frac{m_{st}^3 \text{humos húmedos}}{m_{st}^3 \text{gas}}$
Masa de humos húmedos (m_f)	$\frac{kg_{\text{humos húmedos}}}{kg_{\text{gas}}}$
Volumen de humos secos (V_f)	$\frac{m_{st}^3 \text{humos secos}}{m_{st}^3 \text{gas}}$
Masa de humos secos (m_f)	$\frac{kg_{\text{humos secos}}}{kg_{\text{gas}}}$

1.2.3 Poder calorífico (PCS)

Es el calor liberado por unidad de masa o volumen de combustible cuando la combustión es completa usando la cantidad de aire estequiométrica o teórica en un proceso de flujo permanente, estando los reactivos y los productos en el estado de referencia (25 °C,

1atm). Se puede clasificar en poder calorífico superior (PCS) y poder calorífico inferior (PCI). Para determinar el agua presente en los productos está en fase líquida y para el PCI se considera que el agua presente en los productos está en fase vapor.

Para el caso de estudio se tiene en cuenta únicamente el poder calorífico Superior (PCS) en MJ/m³ definido en la (ecuación (1-1)).

Poder calorífico (PCS)
$$PCS = \sum X_i PCS_i \quad (1-1)$$

1.2.4 Densidad

Es la cantidad de masa de una sustancia por unidad de volumen. La densidad relativa es la relación existente entre la densidad de la sustancia evaluada y la densidad de otra sustancia de referencia. El valor de esta propiedad para el caso de los gases, indica cuantas veces es más o menos pesado un determinado gas con relación al aire. (Ver ecuación (1-)).

Densidad
$$d = \frac{\rho}{\rho_a} \quad (1-2)$$

El gas natural es mucho más liviano que el aire (relación peso – volumen) lo que le permite propagarse rápidamente en la atmosfera (Hairuddin, Yusaf, & Wandel, 2014).

1.2.5 Temperatura de llama adiabática (T_{ad})

Es la máxima temperatura lograda por los productos cuando no se realiza trabajo y no hay pérdidas de calor en un proceso de combustión de flujo permanente. La temperatura de llama adiabática depende de la relación aire/combustible, el estado termodinámico de los reactivos y el tipo de combustión (completa o incompleta). La temperatura de llama adiabática es la máxima posible cuando se utiliza el aire teórico y se da combustión completa.

1.2.6 Límite de inflamabilidad

Es la condición (relación combustible/aire) en la que una sustancia combustible está en condiciones de iniciar una combustión si se expone a una fuente de calor suficiente que alcance un punto de ignición. Los límites de inflamabilidad dependen de las condiciones de la mezcla y la temperatura de la fuente de calor, dado que existen límites de concentración superior e inferior en los gases inflamables sobre o debajo de los cuales no ocurre propagación de la llama en contacto con una fuente de ignición.

Una mezcla es inflamable con porcentajes por debajo del límite de inflamabilidad superior o superiores al límite de inflamabilidad inferior. No es posible mantener la combustión por fuera de dichos límites, definiéndose en consecuencia el llamado “dominio de inflamabilidad” a aquellas composiciones comprendida entre ambos límites (Hairuddin et al., 2014).

1.2.7 Energía mínima de ignición

Es la energía mínima requerida de una chispa para producir la ignición de un combustible a unas condiciones específicas de presión, temperatura y porcentaje de combustible en la mezcla y depende de los productos químicos específicos de la mezcla, la concentración del combustible y de la temperatura. Muchos hidrocarburos tienen energía mínima de ignición cercana a 0.25 mJ, lo cual es muy bajo comparado con la capacidad de las fuentes de ignición típicas (Sabia, de Joannon, Sorrentino, Giudicianni, & Ragucci, 2015).

1.2.8 Temperatura de Ignición

Es la temperatura mínima que debe alcanzarse para que se presente la ignición en un punto de una mezcla inflamable de aire y gas. La autoignición de una mezcla de gas natural y aire, comprendida dentro de los límites de inflamabilidad, tiene lugar a una temperatura del orden de los 650°C a 750°C (Deng et al., 2011).

1.2.9 Velocidad de llama laminar

Una llama estable de una mezcla aire – gas, comprendida entre los límites de inflamabilidad, se propaga a una cierta velocidad que depende de variables como la

composición de la mezcla, temperatura, presión, forma y dimensiones del quemador. El gas natural tiene una velocidad de deflagración del orden de 0.3 m/s (Brucart, 1987).

Para cada gas se define la máxima velocidad de propagación de llama como aquella a la que se inicia la deflagración de una mezcla estequiométrica gas – aire. La velocidad de propagación de llama es prácticamente nula en composiciones de mezcla gas – aire correspondiente a los límites de inflamabilidad, alcanzando su mayor valor en las mezclas estequiométricas (Sabia et al., 2015).

En la combustión de una mezcla estequiométrica, el desprendimiento de calor es muy superior al necesario para mantener la temperatura de inflamación y en consecuencia la velocidad sufre variaciones. Por lo anterior, normalmente para efectos de cálculos únicamente se define la velocidad inicial (Sabia et al., 2015).

1.2.10 Estabilidad de llama

Cuando la mezcla de gases fluye en una dirección opuesta a la de la propagación de la combustión y con una velocidad igual a la velocidad de deflagración del gas, la onda de combustión se estabiliza en una posición con respecto al quemador. El borde del puerto del quemador juega un importante papel en la estabilización de la llama, este actúa como un destructor de radicales de propagación de la combustión y como fuente de pérdidas de energía (Chen, Qin, & Zhang, 2014).

1.3 Llamas de premezcla

Las llamas de premezcla son aquellas que se obtienen cuando el combustible y el aire se mezclan al interior del cuerpo del quemador antes de presentarse la ignición.

Las llamas de premezcla total son generadas por una cantidad de aire primario mayor o igual a la mezcla estequiometría para oxidar por completo el combustible. Este tipo de llamas tienen una zona de difusión menos visible en comparación con las que trabajan con defecto de aire. Los dos términos más utilizados para medir las concentraciones de combustible y aire en una mezcla con respecto a las concentraciones ideales o estequiométricas son la tasa de aireación (λ) y el factor de equivalencia (ϕ) (ver ecuaciones (1-), (1-)). La tasa de aireación es la relación entre la cantidad de aire y la cantidad de combustible comparada con la relación estequiométrica, mientras que el factor de equivalencia es el inverso de la tasa de aireación (Speight JG, 2011).

$$\text{Tasa de aireación} \quad \lambda = \frac{\dot{V}_a}{\dot{V}_f (V_a)_{est}} \quad (1-3)$$

$$\text{Factor de equivalencia} \quad \phi = \frac{\dot{V}_f (V_a)_{est}}{\dot{V}_a} = \frac{1}{\lambda} \quad (1-4)$$

Donde \dot{V}_a es la cantidad de aire y \dot{V}_f la cantidad de combustible. La caracterización de una llama o identificación de sus principales regiones de estudio se realiza a partir del frente de llama, en el cual los gases sin quemar se calientan y se convierten en productos, sin importar si la llama es estacionaria o se mueve en el espacio (Yu et al., 2013).

En el frente de llama se puede calcular la velocidad de propagación de llama en donde se suponen llamas planas, adiabáticas y laminares en un modelo ideal unidimensional (Ver ecuación (1-)). Esta velocidad se ha definido como la rapidez relativa a la mezcla de gases, con lo cual el frente de llama se mueve desde la zona de reacción hacia la mezcla inflamable, siendo V_U la velocidad de los gases sin quemar, V_b la velocidad de los gases quemados y S_L la velocidad de deflagración (Nel et al., 2004).

$$\text{Ecuación de continuidad} \quad \rho_u V_U A = \rho_u S_L A = \rho_b V_b A \quad (1-5)$$

La estructura de una llama de premezcla se puede caracterizar en cuatro secciones principales definidas. La primera zona es llamada gases fríos o inquemados, donde los productos, el combustible y el aire se mezclan, pero no existe un aumento de temperatura. La segunda zona es la de precalentamiento, donde la temperatura inicia su ascenso hasta alcanzar la temperatura de ignición (entre 700 y 1000 K) y el porcentaje de combustible desciende a medida que se van formando especies intermedias resultado del calentamiento producido por la transferencia de calor por conducción y radiación desde la zona de reacción (McAllister, Chen, & Fernandez-Pello, 2011).

La tercera zona es la de reacción, donde se libera la mayor parte de la energía química. Para condiciones de baja presión el espesor de esta zona es muy pequeño, del orden de milímetros; allí ocurren simultáneamente la destrucción de moléculas de combustible y la creación de muchas especies intermedias, cuyas reacciones se describen utilizando reacciones bi-moleculares (Turns SR, 2000). Los altos gradientes de temperatura y de concentración de especies químicas presentes en esta zona permiten difusión de calor y

de radicales hacia la zona de precalentamiento, permitiendo que el proceso de oxidación del combustible se auto-sostenga.

En el caso del frente de llama se presenta altas temperaturas que generan una excitación de diferentes especies, las cuales radian en diferentes longitudes de onda y permiten identificar diferentes colores en la llama. Para el caso de los hidrocarburos en condiciones de mezcla pobre, la zona de alta actividad química se torna de un color azul turquesa debido a los radicales excitados CH y OH. Para condiciones de mezcla rica el color del frente de llama se torna de un azul verdoso debido a los radicales excitados C_2 (McAllister et al., 2011).

Una última zona es la de los gases quemados donde el consumo del combustible y el comburente se dan por la reacción química de oxidación, donde los productos característicos son el vapor de agua, monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO_2) (Kotzagianni, Yuan, Mastorakos, & Couris, 2016).

Para el caso de los hidrocarburos el oxígeno primario no alcanza a oxidar todo el combustible por lo que dicho combustible completa su oxidación con el aire de los alrededores y se presenta lo que se denomina una segunda reacción para finalmente liberar los productos de la combustión.

Lo anterior se puede identificar de una manera mas ilustrativa en la Figura 1-1.

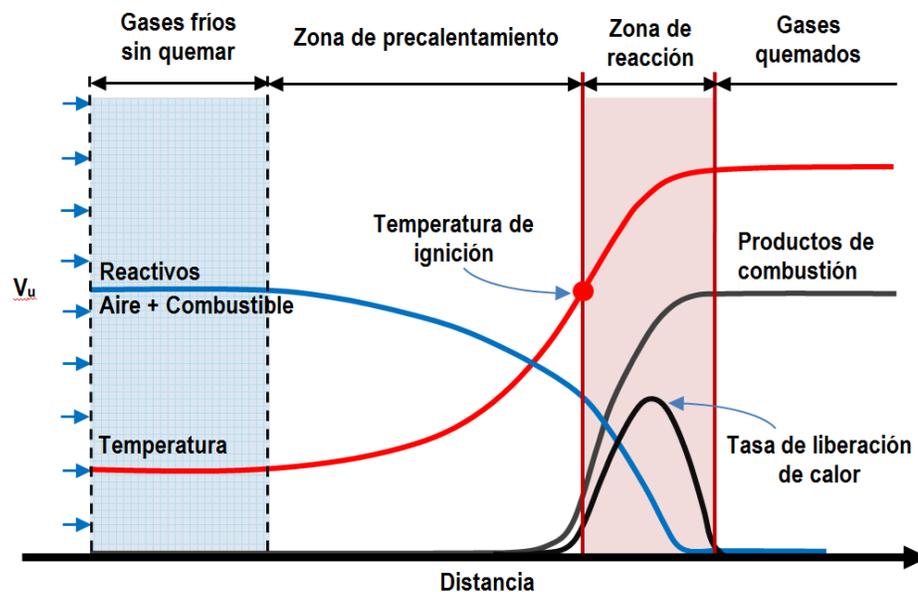


Figura 1-1: Estructura de una llama de premezcla (Rubio-Gaviria, 2015)

1.4 Inestabilidad de combustión

La inestabilidad en la combustión se puede determinar como una oscilación auto sostenida cerca de la frecuencia acústica, entre la liberación de calor y la fluctuación de la presión, el cual proporciona un ambiente ideal para que ocurra este fenómeno (J. Park & Lee, 2016).

El desprendimiento de llama ocurre por la inestabilidad del caudal que atraviesa la cámara de premezcla en función de la velocidad. Cuando el frente de llama se aleja lo suficiente del borde del quemador, esta permite la entrada de aire desde el exterior diluyendo la mezcla y provocando dicho efecto.

El fenómeno del retroceso de llama sucede cuando la mezcla de gas fluye en una dirección opuesta a la de la propagación de la combustión y con una velocidad igual a la de la deflagración del gas (Ebi & Clemens, 2016); así mismo el fenómeno de puntas amarillas y la combustión incompleta están relacionados con el flujo de aire en la mezcla y los componentes químicos de la misma, evidenciando incompatibilidades entre la composición del gas natural y el diseño del equipo de combustión.

1.5 Intercambiabilidad de gases

La intercambiabilidad se puede definir como la capacidad de sustituir un combustible gaseoso por otro, sin cambiar las propiedades de combustión ni afectar el rendimiento operativo en cuanto a su seguridad, eficiencia o emisiones, (Bp & International Gas Union, 2010), Igualmente Fishman et al. (Fishman, Martin, & Lamparski, 2004), describen la intercambiabilidad como: *“la capacidad de sustituir un combustible gaseoso por otro en un equipo de combustión, de manera que sin realizarle ningún ajuste, no se presenten diferencias desde el punto de vista de la seguridad operacional, la eficiencia, el desempeño o las principales característica de las emisiones al medio ambiente”*.

Para determinar si dos gases son intercambiables es necesario evaluar dos factores principales que inciden en la determinación de dicha condición: las características físicas del equipo a utilizar y la estructura o composición química de los gases objeto de estudio. Varios modelos han sido diseñados para medir la intercambiabilidad de los gases, pero la gran mayoría están soportados en resultados empíricos, derivando de allí índices y métodos ampliamente utilizados en todo el mundo según el tipo de gas y la necesidad de aplicación en cuanto a teoría de intercambiabilidad se refiere (Chen et al., 2014).

1.5.1 Métodos tradicionales de intercambiabilidad

Estos métodos se agrupan principalmente en dos categorías, los índices simples que se basan en la entrada de energía y los índices múltiples que incorporan los fenómenos fundamentales de la combustión. Estos métodos fueron basados en ensayos empíricos desarrollados al ajustar los resultados de intercambiabilidad (Group, 2005).

Los principales índices simples se clasifican de la siguiente manera:

- **Índice de Wobbe:** fue desarrollado en 1927 y está conceptualizado a partir de los fundamentos básicos de operación de los quemadores de gas (Slim, Darneveil, Gersen, & Levinsky, 2011). Los índices se basan en la descripción física del fenómeno de flujo de gas a través de un orificio de área constante que funciona como inyector o puerta de entrada de energía a un quemador. El flujo de energía del gas es equivalente al producto entre el poder calorífico superior (PCS) del gas y el caudal volumétrico a una presión constante y el flujo volumétrico a través del orificio es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de su densidad relativa (ver ecuación (1-1)). De esta manera se establece una proporcionalidad que combina las ecuaciones de flujo de entrada de energía al quemador y de la hidráulica asociada al flujo de gas. Algunas observaciones encontradas por Wobbe (Zacharahwolff, Egyedi, & Hemmes, 2007), describen que la energía que es suministrada por un quemador es directamente proporcional al caudal volumétrico del gas que ingresa al quemador, considerando que el diámetro y la presión en el inyector son constantes. Cuanto mayor sea el índice de Wobbe mayor será la energía asociada al flujo de gas que pasa a través de un orificio o inyector de determinado tamaño para alimentar un quemador, dado que en los aparatos de combustión el flujo de gas se regula haciendo pasar el gas a través de un orificio.

La gran utilidad del índice de Wobbe es que para cualquier orificio, todos los gases que tengan el mismo índice de Wobbe van a suministrar la misma cantidad de energía. La mayoría de equipos de combustión de carácter doméstico e industrial soportan variaciones del Índice de Wobbe más o menos entre un 5%, sin embargo la falencia de dicho índice consiste en su incapacidad para predecir la ocurrencia de fenómenos de inestabilidades de combustión.

$$\text{Índice de Wobbe} \quad W = \frac{PCS}{\sqrt{d}} \quad (1-1)$$

- **Índice de Knoy:** fue uno de los primeros trabajos que sirvió para determinar la intercambiabilidad entre gases, este índice asume que la mezcla aire – gas en el cabezal de un quemador atmosférico tiene un poder calorífico (PCS) de 175 BTU por pie cubico a condiciones estequiométricas donde C es el coeficiente de Knoy que define la relación del poder calorífico (PCS) sobre la raíz cuadrada de la gravedad específica (ver ecuación (1-2)); dicho resultado define la intercambiabilidad del gas si la evaluación del índice del gas estudiado, no presenta desviaciones mayores al 5% respecto al gas base; sirvió como base para la definición del índice de Wobbe. (Honus, Kumagai, Němček, & Yoshioka, 2016)

$$\text{Índice de Knoy} \quad C = \frac{(PC - 175)}{\sqrt{G}} \quad (1-2)$$

Los principales índices múltiples fueron desarrollados a finales de los años 40 con una mayor aplicación en el campo industrial; siendo en su mayoría la deducción por ensayo experimental.

Los más importantes son:

- **Índice de Weaver:** Es un índice que parte de la experimentación realizado a diferentes tipos de gases manufacturados con un poder calorífico (PCS) muy bajo y altos contenidos de hidrógeno (Magnussen & Boyle, 1995). Este índice es más orientado al estudio de problemas específicos de combustión que podrían presentarse como consecuencia de la intercambiabilidad de gases, como por ejemplo llamas amarillas, desprendimiento de llama, retroceso de llama. Este se utiliza debido a la necesidad de aprovechar y homologar la gran cantidad de gases que son hallados en los diferentes pozos de exploración y que por su ubicación geográfica, tipología del suelo, antigüedad y composición fósil varían sus propiedades y obliga a adaptar la infraestructura para el aprovechamiento energético de dichos gases y complementar y/o sustituir los gases ya utilizados. Con base en los datos obtenidos en la experimentación que definió Weaver se apoyan diversos estudios sobre la intercambiabilidad orientada a la descripción de problemas de combustión que en la

mayoría de casos estudiados corresponden a gases de composiciones muy diferentes al gas natural. Si bien los índices de Weaver brindan una descripción más completa de los fenómeno de combustión, estos están limitados en cuanto al tipo de quemadores y de mezclas que fueron probados experimentalmente para obtener los índices (Ortiz J. M., 2014). Dichos índices se adecúan de forma aceptable para quemadores tradicionales con pre mezcla de aire parcial ya que todos los índices observados con este método parten de un ajuste relativo al gas original como se muestra en la Tabla 1-4.

Los índices de Weaver se pueden clasificar dependiendo la necesidad y problema a observar en el contenido del gas y dependiendo de la combustión realizada después del quemador y lo observado en la llama, nos puede permitir definir qué aspecto interesa clasificar y observar para realizar comparaciones entre mezclas de gas relativamente parecidas de acuerdo al modelo grafico desarrollado presentado en la tabla 1-4 donde H representa la tasa de calor, D la densidad, A el suministro de aire, S el desprendimiento de llama y Q el caudal de la mezcla.

Tabla 1-4: Índice de Weaver según el fenómeno de combustión

INDICE	DESCRIPCIÓN
$J_H = \frac{H\sqrt{D_a}}{H_a\sqrt{D}}$	Índice de intercambiabilidad con respecto a la tasa a la cual se genera el calor
$J_A = \frac{A\sqrt{D_a}}{A_a\sqrt{D}}$	Índice de intercambiabilidad con respecto al suministro de aire para combustión
$J_L = J_A \frac{S * 100 - Q}{S_a * 100 - Q_a}$	Índice de intercambiabilidad con respecto al desprendimiento de llama
$J_F = \frac{S}{S_a} - 1,4J_A + 0,4$	Índice de retroceso de llama
$J_y = J_A + \frac{N - N_a}{110} - 1$	Índice de intercambiabilidad con respecto a la formación de llama amarilla

$$J_I = J_A + 0,366 \frac{R}{R_a} - 0,634 \quad \text{Índice de combustión incompleta}$$

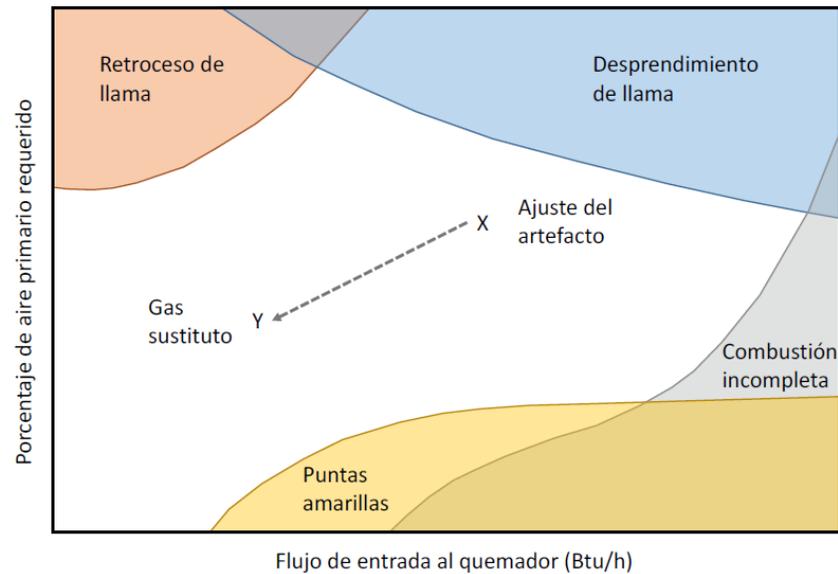


Figura 1-2: Marco de referencia para intercambiabilidad según índices de AGA y Weaver (Ortiz J. M., 2014)

- **Índice AGA:** La utilización de los modelos AGA Bulletin # 36 para predecir la intercambiabilidad de gas requiere el reconocimiento de los límites de cada índice y las distintas diferencias que existen entre los mismos. En general, la aplicación de los modelos produce resultados que pueden expresarse más simplemente como la combinación del Wobbe con uno o más parámetros complementarios tales como gravedad específica y valor de calentamiento desde el punto de vista de inflamabilidad (Halchuk-harrington, Energy, Wilson, & Energy, 1940). El boletín AGA se basa en el concepto de ajuste del aparato para las características de un quemador atmosférico; donde se determina por método gráfico las regiones de estabilidad e inestabilidad de llama, el factor de aireación y la tasa de entrada del

combustible; definió regiones de rendimientos aceptables e inaceptables que dependen de la velocidad relativa de flujo.

Sin embargo, el trabajo realizado en la década de 1940 por el American Gas Association, utilizó características de llamas específicas para medir la intercambiabilidad en gases por debajo de los 29.8 MJ/m³ (Bp & International Gas Union, 2010); energía que se encuentra muy por debajo de los gases naturales estudiados en la presente investigación pero que fijan un referente muy importante respecto a la importancia del índice de Wobbe en gases naturales respecto a la intercambiabilidad en quemadores atmosféricos.

En el reporte numero 8 sobre el factor de compresibilidad, se tratan los aspectos más importantes y condicionantes en cuanto a estabilidad de gases se refiere, es lo descrito por los factores de compresibilidad y supercompresibilidad lo cual definen la relación de la temperatura y la presión para cada uno de sus componentes químicos mediante el método simplificado y el método grueso lo que permite reducir la incertidumbre en el cálculo de la densidad.

El factor de compresibilidad esta dado en función de la presión absoluta y volumen del gas sobre el número de moles de la composición, la constante del gas y la temperatura absoluta del gas. (Starling & J.L., 1992)

La correlación del factor de compresibilidad y supercompresibilidad entre dos gases y su determinación de los límites de los mismos en función de los índices de wobbe y weaver, permiten no solo determinar con exactitud el grado de intercambiabilidad de dos gases, sino la forma de medición, corrección de volumen y formula tarifaria para el usuario final; dado que involucra propiedades detalladas de cada componente de la composición química de cada gas como la energía, fracción molar, temperatura, presión y gravedad a condiciones estándar y absoluta.

Muchas observaciones son relacionados con el índice de Weaver donde después de múltiples experimentos con diferentes tipos de gases se logró determinar unos parámetros específicos de intercambiabilidad o sustitución de gases dependiendo de la propiedad requerida ajustándose a los diferentes índices de Weaver correlacionados con el punto de medición en el experimento realizado en parámetros específicos como lo son la llama amarilla, el retroceso de llama y la altura de la

misma; ampliamente utilizado en los Estados Unidos y ajustado a su valor los diferentes equipos de combustión de la zona.

Uno de los principales estudios desarrollados para el índice AGA, (Halchuk-harrington et al., 1940), donde se estudió como la operación de un quemador de gas atmosférico afectaba las características de la llama, la investigación mostró como los gases sobre los 29.8 MJ por metro cubico podían sustituir o ser sustituidos por gases naturales de alto poder calorífico (PCS).

Existen otros métodos gráficos para determinar la intercambiabilidad entre dos gases, lo cual devuelven como resultado el grado de intercambiabilidad con respecto a la ubicación de un punto en el plano cartesiano con relación a las líneas límite.

- **Método de Duton:** fue desarrollado en el reino unido durante la década de los 70 y los 80 específicamente para gas natural y para todos los gases que contienen hidrogeno y sus respectivas mezclas; consiste en la representación gráfica por medio de tres ejes como se muestra en la Figura 1-3, el primero es el índice de Wobbe (que representa la tasa de flujo de energía a un segundo plano), el segundo eje es el porcentaje de propano más componentes inertes (N_2), y finalmente el porcentaje de hidrógeno (Bp & International Gas Union, 2010).

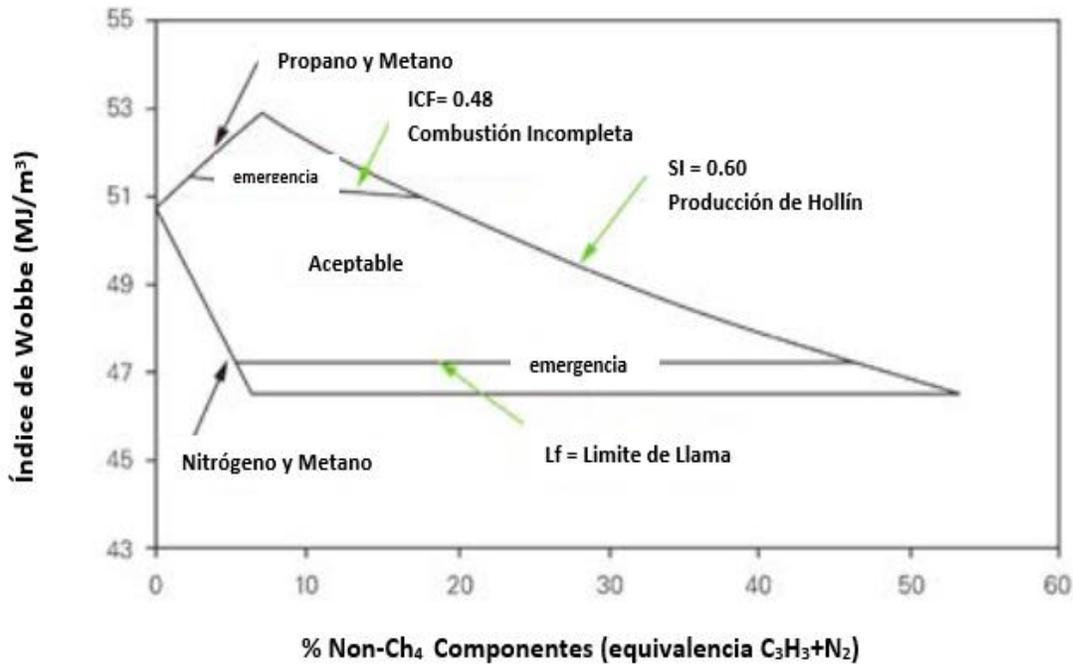


Figura 1-3: Método gráfico de Dutton para la determinación de la intercambiabilidad de gases, tomado y adaptado de (Bp & International Gas Union, 2010).

- **Método de Delbourg:** su representación gráfica estas dada en sus ejes por el índice de Wobbe modificado con un coeficiente de descarga del orificio, Delbourg clasifica el combustible en tres familias llamadas gas residente, gas natural y gas licuado del petróleo; donde atreves de la determinación de un punto en el plano cartesiano por comparación de coordenadas se puede inferir el tipo de inconveniente que puede ocurrir al reemplazar el gas base con el sustituto como retrollama, desprendimiento, hollín o pérdida de calor (Delbourg P & Lafon J, 1971) como se ilustra en la Figura 1-4.

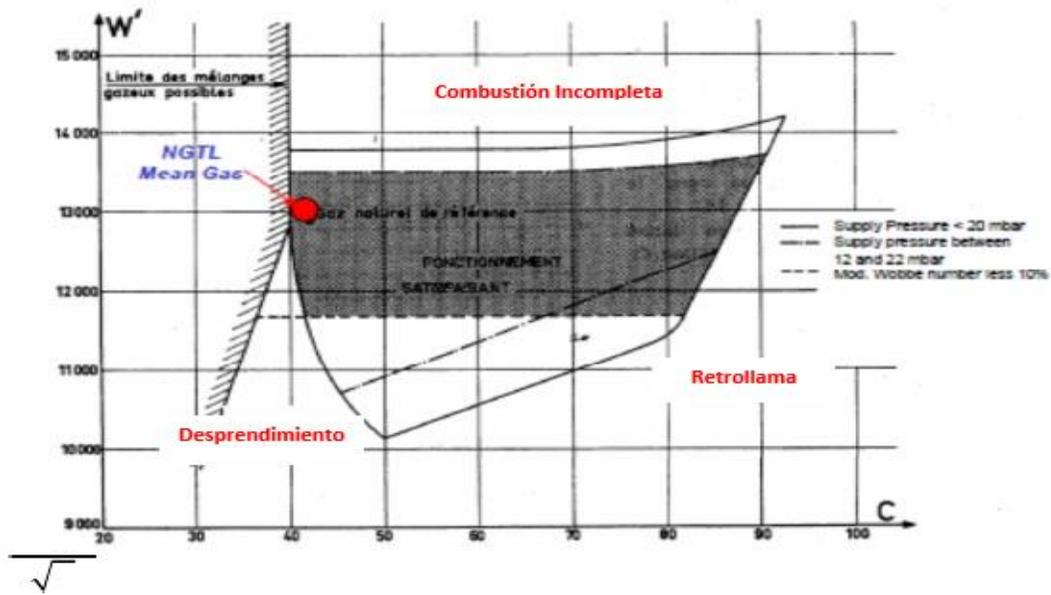


Figura 1-4: Método gráfico de Delbourg para la determinación de la intercambiabilidad de gases (Delbourg P & Lafon J, 1971).

En un análisis de intercambiabilidad de gases reciente, Cardona y Amell (Cardona & Amell, 2013) evaluaron la utilidad del índice de Wobbe como parámetro de intercambiabilidad para el Biogás comparado con mezclas de otros gases. Los autores definieron un índice de Wobbe igual al del metano y eligieron como combustible alternativo el Biogás, el cual posee menor poder calorífico (PCS), menor velocidad de quema y peor estabilidad de llama, para mezclarlo con una mezcla de metano, propano y dióxido de carbono. Igualmente se adicionan hidrógeno, oxígeno y nitrógeno y con la herramienta computacional GRI-Mech 3.0 y ensayos experimentales logran obtener una mezcla con una intercambiabilidad muy aproximada al gas natural. La variación entre los resultados experimentales y las simulaciones se reportan cercanos al 10% respecto a los cálculos obtenidos en el programa GRI-Mech 3.0 el cual la definen como un 33% de Metano, 17% Dióxido de Carbono, 40% Propano y 10% Hidrogeno; sin embargo no se define la forma de extracción y la fuente de los componentes de mayor participación como lo son el metano y el propano que aportan una gran cantidad de energía a la mezcla y se ve reflejado en los niveles del poder calorífico (PCS) el cual produce un factor clave para la aceptabilidad de la mezcla en los niveles óptimos de combustión.

La intercambiabilidad de gases ha sido muy estudiada desde la afectación o variación del metano CH_4 como lo realizado por (Lee, Hwang, & Lee, 2008), donde estudió la intercambiabilidad de mezclas de biogás (LFG) y gas licuado de petróleo (LPG) en las que se buscó tener un índice de Wobbe similar al gas natural licuado (LNG). Las mezclas fueron evaluadas en un quemador de premezcla y las variables de comparación fueron la temperatura de llama adiabática, la velocidad de combustión con la técnica Schlieren, y la estabilidad de combustión.

La biomasa también ha sido estudiada como combustible alternativo del gas natural. Un estudio de intercambiabilidad, usando la técnica de quimioluminiscencia en un quemador atmosférico de premezcla, de mezclas gas natural-gas de síntesis demostró que estas mezclas pueden ser intercambiables con el gas natural en porcentajes volumétricos de gas de síntesis hasta un 37% (Hernández, Lapuerta, & Barba, 2013). El gas de síntesis, obtenido a través de la gasificación de bagazo de uva desalcoholizada, permitió la operación estable en mezclas más pobres, con temperaturas más bajas de combustión y menores emisiones de NO_x , a medida que se aumentaba el porcentaje de hidrógeno al aumentar el porcentaje de gas de síntesis.

Algunas mezclas formadas por los componentes químicos del gas natural, comparan el metano con mezclas syngas como lo hizo (Vu et al., 2011). Encontraron que al adicionar hidrocarburos pesados al syngas, tales como propano y butano, la velocidad de deflagración disminuye si se compara con las llamas de syngas/metano. Este comportamiento se explica por la generación de radicales metilo (CH_3), los cuales son mayores en la combustión del propano, estos se combinan fácilmente con el hidrogeno atómico (H) disponible en la mezcla e inhiben la reacción de formación de radicales OH ($\text{H} + \text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{OH}$), reacción elemental que tiene una fuerte incidencia sobre la velocidad de deflagración laminar.

En China, se estudió el efecto sobre la tasa de aireación y la posibilidad de replantear los límites definidos por Weaver y el índice de levantamiento por AGA; lo que después de estudiar el efecto de gases ricos y pobres en diferentes equipos de combustión, se determinó corregir sus límites de intercambiabilidad y proponer una nueva ecuación para el cálculo del índice de elevación AGA (Zhang, Gao, Yu, Wang, & Chen, 2016).

Países como Estados Unidos y Europa, dado sus rangos definidos para la intercambiabilidad de gases, se ha estudiado la posibilidad de un sustituto de gases derivados por los excedentes de plásticos a través de la pirolisis, donde a partir de la incineración de materiales de polipropileno, polietileno y poli-cloruro de vinilo se ha encontrado rangos aceptables para el índice de Wobbe y Weaver dando la posibilidad de generar un sustituto del gas natural y del propano (Honus, Kumagai, & Yoshioka, 2016).

1.6 Velocidad de deflagración laminar

La velocidad de combustión laminar es una propiedad intrínseca del combustible y es muy importante para el desarrollo de la cinética química (Li et al., 2016).

El sostenimiento y propagación de la llama depende de dos procesos consecutivos. En el primero, el calor que se produce en la zona de reacción se transfiere a la mezcla sin quemar, hasta que esta alcanza la temperatura de ignición. Mientras que en el segundo, la mezcla reactiva y las primeras especies intermedias, producto de dichas reacciones tienen lugar en la zona de precalentamiento (Miao, Jiao, Huang, & Jiang, 2009).

La estimación teórica de la velocidad de deflagración tiene una alta complejidad cinética y matemática dado los fenómenos asociados a esta, lo que dificulta la obtención de una expresión matemática que permita estimar su valor. Para esto se parte de una reacción estequiométrica y varias suposiciones en cuanto a estabilidad, difusividad térmica, calor específico igual en todas las especies y reacción de oxidación en un solo paso (Turns SR, 2000).

La ecuación relaciona la tasa de consumo másico del combustible \overline{m}_f''' e involucra la cinética química, α es la difusividad térmica e involucra las propiedades de transporte, ν es el coeficiente estequiométrico del oxidante involucrando la composición de la mezcla reactiva, y ρ_u es la densidad de la mezcla sin quemar que involucra la presión y temperatura a la que se realiza el proceso (Ver ecuación (1-8)).

$$\text{Velocidad de deflagración laminar} \quad S_L = \left[-2\alpha(\nu + 1) \frac{\overline{m}_f'''}{\rho_u} \right]^{1/2} \quad (1-8)$$

1.7 Altura de cono azul

En la tecnología de los combustibles gaseosos, la altura del cono azul se ha utilizado como un criterio para examinar la capacidad de intercambio de gases de la misma familia, al igual que para predecir la estabilidad de la llama y emisiones de monóxido de carbono cuando las condiciones de altitud son bien definidas (A. A. Amell, 2007).

Para poder definir la altura de cono azul, se debe tener una llama de premezcla en régimen laminar, en donde se muestre el frente de llama como lo ilustra la Figura 1-5, lugar en el que se dan las reacciones químicas y que forma la zona primaria de combustión. La mezcla de gas-aire que fluye a través del quemador reacciona en el frente de llama, aunque cuando se tienen premezclas parciales no todo el combustible se quema en la zona primaria, formando un cono externo en donde se quema el combustible restante por medio de difusión molecular (A. A. Amell, 2007).

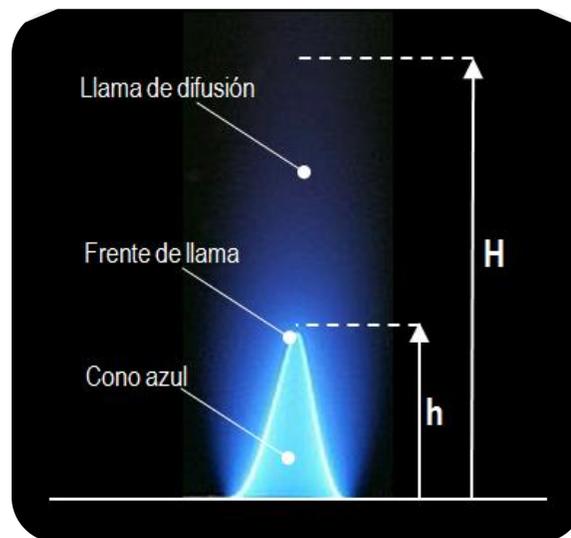


Figura 1-5: Identificación del cono azul en una llama de premezcla (Rubio-Gaviria, 2015)

Amell (A. A. Amell, 2007) determinó una expresión teórica para la estimación de la altura del cono azul, dependiendo de la geometría del puerto, el caudal de premezcla y la velocidad de deflagración (ver ecuación (1-)), donde h es la altura del cono azul, Q_g caudal del gas, m^3/s , n es la tasa de aireación primaria, V_a es el volumen de aire

estequiométrico en $m^3_{\text{aire}}/m^3_{\text{gas}}$, A_p es el área del puerto del quemador y V_f es la velocidad de deflagración en m/s.

$$\text{Altura del cono azul} \quad h = \frac{Q_g(n \cdot V_a + 1)}{\sqrt{\pi \cdot A_p \cdot V_f}} \quad (1-9)$$

1.8 Fenómeno de retrollama

El fenómeno de retrollama o retroceso de llama es un fenómeno que se presenta generalmente al tener cambios bruscos en el caudal de aire y gas que fluyen por el quemador, normalmente puede darse por la aparición de un flujo inverso debido a la aparición de contracciones de flujo y oscilaciones termo-acústicas (Benim, Syed, Benim, & Syed, 2015), el cual permite la propagación de la llama dentro de la capa límite en función de un gradiente de velocidad crítica (Ebi & Clemens, 2016).

El fenómeno de retrollama también se produce cuando la velocidad de combustión excede la velocidad local de la mezcla de combustible (Dam, Love, & Choudhuri, 2011). El problema de retrollama es más susceptible a presentarse en sistemas en los que el combustible se mezcla previamente con el oxidante, promoviendo la autoignición y permitiendo que el oxidante reaccione con el combustible (Chen et al., 2014).

El fenómeno de retrollama se define como una condición de combustión en que la llama se propaga aguas arriba contra la corriente de gas en la sección del quemador (Dam et al., 2011), como se ilustra en la

6, siendo un tema crítico para los diseños de cámaras de combustión de premezcla, puesto que no solo causan problemas mecánicos sino que también aumentan las emisiones contaminantes.

En flujos laminares, la mejor forma de controlar el fenómeno de retrollama es controlar la velocidad de flujo del combustible que se está suministrando al quemador de premezcla en función de las cantidades de gas- aire, permitiendo así un flujo constante en el quemador y evitando los cambios bruscos de la relación del combustible respecto al oxidante en el momento de la combustión.

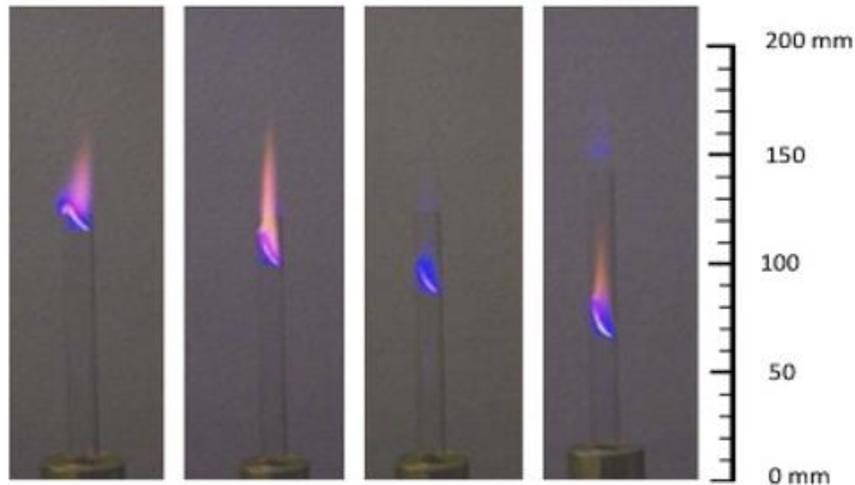


Figura 1-6: Retrollama contra la corriente del combustible (Dam et al., 2011)

1.9 Fenómeno de desprendimiento:

La extinción de llama o desprendimiento se presenta cuando la velocidad de deflagración es menor que la velocidad del flujo, generando un desprendimiento de la llama del puerto del quemador, para finalmente extinguirse. Este es un problema de cinética química puesto que el apagado varía dependiendo de la composición del combustible. La presencia de hidrógeno en el combustible genera un efecto que opone resistencia al apagado de la llama como se puede observar en la Figura 1-7, dada su alta velocidad de deflagración (Rubio-Gaviria, 2015).

Se ha estudiado la forma de estabilizar la llama en flujos de premezcla para corrientes longitudinales y transversales en donde se ha encontrado que la salida de los gases en la capa límite es muy reducido y cualquier flujo cruzado, hace que la estabilización de la llama sea más complicada generando la creación de pequeños remolinos que conllevan a un flujo turbulento (Hu, Lin, Gu, & Li, 2014).

Igualmente se evidencian efectos de la presión en el fenómeno de desprendimiento, debido a diferencias en la presión atmosférica estándar, lo cual varía el desprendimiento de llama en función de la sección del quemador de premezcla. (Wang et al., 2015)

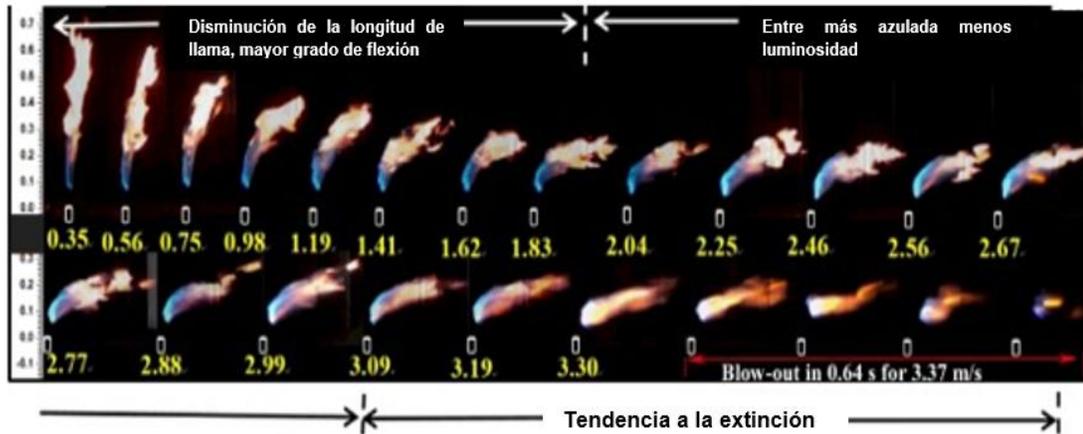


Figura 1-7: Efecto Desprendimiento para flujos de llama premezclada, tomada y adaptada de (Wang et al., 2015).

1.10 Fenómeno de puntas amarillas:

Las puntas amarillas se presentan cuando la cantidad de aire primario es insuficiente para obtener una adecuada combustión.

La reducción de aire primario permite la aparición de puntas amarillas, las cuales son causadas por partículas de carbón que brillan dentro de la llama. Si estas llamas chocan contra una superficie fría, se presentará el medio ideal para que se forme el monóxido de carbono y genere el indeseable hollín al finalizar el proceso de combustión.

2. Metodología

Para el desarrollo de la presente investigación fue necesario obtener información de fuentes oficiales en cuanto a medición del gas natural se refiere, aplicar diferentes técnicas de análisis estadísticos para el tratamiento de los datos, utilizar herramientas computacionales para las simulaciones cinéticas y técnicas experimentales para la determinación de propiedades de combustión. Para una mejor comprensión del estudio realizado se explican las metodologías utilizadas a continuación:

2.1 Determinación de las mezclas representativas

Debido a variabilidad de la composición química del gas natural que llega a Antioquia se hace necesario obtener un tamaño de muestra que permita clasificar los rangos de poder calorífico (PCS) del gas natural para seleccionar mezclas representativas.

2.1.1 Obtención de datos

Para la adquisición de datos de la cromatografía del gas natural se seleccionó la estación de transferencia de custodia entre los transportadores del combustible del sistema central de Colombia administrado por la Transportadora de gas Natural internacional T.G.I y el gasoducto regional administrado por Transmetano S.A. Dicha estación se define como: *“la transferencia física de gas entre dos sistemas de transporte en donde se determina el volumen, la energía y la calidad del gas que interconectan dos o más transportadores del sistema nacional de transporte y en el cual el transportador que recibe el gas asume la custodia del mismo”* (CREG, 2007). La estación está ubicada en Sebastopol, cuenta con un cromatógrafo en línea con puerto serial PC RS232 desde donde se realizan las mediciones minuto a minuto de la composición química del gas natural suministrado para Antioquia y desde allí se recolectan los datos para consolidar la composición química del gas diario registrado para este punto de transferencia del sistema nacional de transporte. Los datos, una vez consolidados, se publican en la página de internet oficial de

transportadora de gas natural (TGI, n.d.), en nuestro caso se encontraron en la sección de remitentes, boletines electrónicos de operación, poderes caloríficos, tramos antes y después de octubre 2011

Una vez ubicado en la sección descrita, se seleccionó la opción de cromatografía específica y se eligió el periodo comprendido entre el 01 de agosto del 2011 al 31 de julio de 2015 como objeto muestral aleatorio debido a que la fecha de obtención de datos se realizó el mes de agosto del 2015 y se decidió obtener datos de al menos un periodo de 4 años inmediatamente anterior con el fin de garantizar que los datos no estuvieran afectados por eventos exógenos a la cadena de distribución del gas natural como son los mantenimientos correctivos de gran envergadura en los pozos de extracción, picos de demandas estacionales anuales o fenómenos climáticos que alteraran el comportamiento histórico de la bolsa de energía en Colombia.

La cromatografía del periodo muestral se obtuvo en un archivo en Excel con todos los datos de la composición química del gas natural medido en dicho punto de transferencia de custodia y consolidado diariamente.

De acuerdo a la ubicación del punto de transferencia y la zona geográfica objeto de estudio, se logra evidenciar que las principales cuencas de yacimientos de gas natural que pueden suministrar mayor cantidad de gas natural por el punto de transferencia de Sebastopol son las ubicadas en la Guajira y en los Llanos orientales como se ilustra en la Figura 2-1.

Figura 2-1: Sistema de transporte de gas natural en Colombia. Tomado y adaptado de: <http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno02/gasmarket/3.2.htm>



En el archivo en Excel se obtuvieron las variables de los porcentajes en cuanto a composición química de nitrógeno (N₂), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), etano (C₂H₆), propano (C₃H₈), I-butano (C₄H₁₀), N-butano (C₄H₁₀), N-hexano (C₆H₁₄), valores

de densidad y poder calorífico (PCS) consolidados diario para el tamaño muestral seleccionado.

2.1.2 Cálculo de propiedades físico químicas

Para clasificar los rangos de poder calorífico (PCS) de la muestra evaluada en alto, medio y bajo, se procedió a calcular las propiedades físicas de cada componente de la composición química, obteniendo de tablas termodinámicas la masa molar y la capacidad calorífica; la densidad relativa fue calculada con la ecuación (1-)

Se clasificó del total de la muestra la composición química más alta, la cual identificaremos como el gas natural 1, y la composición más baja, la cual identificaremos como el gas natural 2, con respecto al porcentaje de participación del metano. Luego se definieron distintas mezclas donde se varió la proporción del gas natural 1 y 2 de 0% a 100%, calculando en cada una de ellas la composición resultante de cada especie química dependiendo de la proporción de los gases naturales 1 y 2 con el fin de distribuir de manera porcentual la participación de cada componente químico de dichas composiciones con respecto a la capacidad calorífica de cada componente.

En la Tabla 2-1, se muestra las composiciones químicas más extremas con respecto al porcentaje de participación del metano.

Tabla 2-1: Composiciones químicas altas y bajas con respecto al metano.

Componente	Capacidad calorífica [MJ/m ³]	Composición gas natural 1 [%mol]	Composición gas natural 2 [%mol]
metano	37,70	98,07	82,11
etano	66,07	0,26	9,85
propano	93,94	0,04	0,67
iso-butano	121,40	0,01	3,60
normal-butano	121,79	0,00	0,55
iso-pentano	149,36	0,00	0,56
normal-pentano	149,66	0,00	0,10
hexanos	177,55	0,01	0,05
Heptanos	205,42	0,00	0,00
Nitrógeno	0,00	1,50	0,52

Con la composición resultante de cada mezcla de los gases naturales 1 y 2 se calculó la densidad de cada mezcla y su poder calorífico (PCS), lo cual permitió realizar una discretización de dicha propiedad en función de la densidad, obteniendo así unos intervalos que permitieron clasificar el gas natural en función de su densidad como lo muestra la Tabla 2-2.

Tabla 2-2: Límites y clasificación de densidades

Clasificación Densidad	Limite Bajo Kg/m³	Limite Alto Kg/m³
Baja	0,688	0,725
Media	0,726	0,786
Alta	0,787	0,826

Con los límites de la densidad definidos, se procedió a identificar y delimitar las composiciones de gas natural de la muestra según lo descrito en la Tabla 2-2, y se graficaron dichos resultados por periodos de tiempo anual y semestral para observar su comportamiento en función del tiempo.

2.1.3 Modelo estadístico

El tamaño muestral contenido en el periodo evaluado (01 de agosto del 2011 al 31 de julio de 2015) contiene una matriz de datos comprendida por 1461 filas y 16 columnas, por lo que debe reducirse a 3 filas y 16 columnas (cada fila representa una composición química y cada columna un componente de dicha composición química). Se aplicó estadística descriptiva debido a la cantidad de datos y la definición de variables respecto al tiempo bajo la metodología de distribución espectral y series de tiempo, debido a que la muestra cumple con los criterios de espectro, es decir su representación gráfica presenta picos altos y bajos de tipo III llamados multipicos en donde la dispersión angular tiene más de dos picos pronunciados (Lopatoukhin, 2002). Además, su representación está dada en un periodo de tiempo definido con intervalos regulares (diario, semanal, mensual, semestral, anual).

No se utilizó el modelo estadístico de inferencia paramétrica debido a que se conoce la forma y los parámetros esperados; puesto que, si se utiliza un estimador, este no describe el comportamiento de los valores de la composición química y el error y

magnitud del mismo es muy alto con respecto a la desviación estándar del periodo evaluado.

Con el propósito de facilitar el análisis de datos, visualizar los diferentes comportamientos de las variables y garantizar la correcta aplicación de la metodología estadística, se parametrizó una tabla en Excel, con las ecuaciones de promedio, desviación estándar, mediana, moda acotada al 20%, máximos, mínimos y moda (ver ecuaciones ((2-1), (2-2), (2-3), (2-4)) para cada tipo de gas según su clasificación en cuanto a la densidad y se graficaron los periodos de tiempo de acuerdo a su participación temporal.

Promedio
$$X = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_n}{N} \quad (2-1)$$

Desviación estándar
$$S = \sqrt{\frac{\sum(x - x_i)^2}{n - 1}} \quad (2-2)$$

Mediana
$$Me = L_{i-1} + \frac{\frac{N}{2} - F_{i-1}}{f_i} * a_i \quad (2-3)$$

Moda
$$M = L_i + \frac{D_1}{D_1 + D_2} * A_i \quad (2-4)$$

Una vez se obtuvieron los resultados de las ecuaciones anteriores, se compararon entre sí con los resultados de los periodos de tiempo totales para cada tipo de gas respecto a los periodos de tiempo de las composiciones químicas con mejor relación entre el índice de Wobbe y el poder calorífico (PCS), observando que la mediana presenta una menor desviación estándar respecto al total de datos, lo que permitió obtener las tres mezclas representativas de gas natural objeto de evaluación.

2.2 Cálculo numérico de la temperatura de llama adiabática y la velocidad de deflagración laminar

Con el fin de realizar los cálculos numéricos de las reacciones químicas representativas, se debe tener en cuenta que la cinética de los hidrocarburos es altamente compleja, lo

que implica la adopción de un software especial para el cálculo de las mismas y que sea acorde a los mecanismos reaccionales de los hidrocarburos a evaluar.

Debido a que la composición química de las mezclas representativas pertenece a la segunda familia de los gases, donde su principal componente es el metano, se decidió realizar el cálculo numérico con el software CHEMKIN Pro, ya que por medio de sus subrutinas es posible calcular equilibrio químico, velocidad de deflagración laminar, análisis de sensibilidad de las reacciones elementales, retrasos de ignición y observar los cambios de las especies químicas, entre otras funciones.

Dentro de los mecanismos cinéticos más utilizados se encuentra el USC Mech II, el cual cuenta con 111 especies y 784 reacciones elementales para la simulación de la combustión de hidrocarburos, hidrógeno, monóxido de carbono y mezclas resultantes entre ellos mismos (S.-H. Park, Lee, & Hwang, 2011), por lo que es ideal para mezclas con variaciones de hidrógeno.

El mecanismo C1-C3 es especializado para la simulación de hidrocarburos pesados, incluyendo CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_4 , C_3H_6 y C_3H_8 , y consta de 258 reacciones y 56 especies químicas (Qin et al., 2000).

El mecanismo de San Diego sólo tiene en cuenta las reacciones necesarias para reproducir la cinética del metano con 50 especies químicas y 235 reacciones elementales; es muy utilizado para mezclas SYNAGAS en el análisis de combustión interna (Qin et al., 2000).

El mecanismo de combustión Gri-mech 3.0 ha sido optimizado para reproducir la cinética del metano con 53 especies químicas y 325 reacciones elementales, permitiendo la simulación completa de los componentes químicos pesados, posibilitando la observación del comportamiento de productos y reactivos del gas natural (Halter, Chauveau, Djebaïli-Chaumeix, & Gökalp, 2005).

Dado lo anterior y aunque cualquier mecanismo es aceptado para la simulación cinética de una mezcla de gas natural, se seleccionó el mecanismo Gri-mech 3.0 dado su constante actualización, cantidad de especies y reacciones químicas posibles para el tipo de gas estudiado y los objetivos propuestos.

2.2.1 Temperatura de llama adiabática

Para poder determinar la velocidad de deflagración laminar es necesario calcular primero la temperatura de llama adiabática debido a que esta hace parte de un dato de entrada en el software CHEMKIN Pro® para el cálculo de dicha velocidad.

Se utilizó la rutina EQUIL, el cual permite determinar el estado químico de una mezcla bajo condiciones de equilibrio (Arrieta & Amell, 2014).

La solución del problema depende de las propiedades termodinámicas, la composición de los elementos y las condiciones de transporte; todos estos datos son suministrados por las librerías de ejecución pertenecientes al mecanismo de reacción de Davis, el cual es un mecanismo reducido a 30 reacciones y 14 especies el cual permite resolver la ecuación de balance de masa y conservación de energía (Qin et al., 2000) para la oxidación del monóxido de carbono de una manera más rápida en cuanto a cálculo computacional se refiere y mayores compuestos disponibles respecto a la composición del gas natural evaluado.

Como parámetros de entrada del gas natural para el presente cálculo, se utilizaron las condiciones de Medellín con temperatura de 298K y presión estándar de 849 mbar y las composiciones químicas de cada mezcla combustible definidas detalladamente en el capítulo de resultados (Tabla 3-1). Igualmente, se utilizó una temperatura de llama inicial estimada en 2000K debido a que las temperaturas de llama adiabática son altas y así lo recomienda el manual de la rutina (Kee RJ, Rupley FM, Miller JA, Coltrin ME, Grcar JF, 2000), condiciones del problema a presión y entalpía constante, aire seco como agente oxidante y los productos de una combustión estequiométrica completa definidos como dióxido de carbono CO₂, agua H₂O y nitrógeno N₂.

Las simulaciones numéricas se realizaron de forma paramétrica e incremental con respecto al dosado, con el fin de obtener la curva de temperatura desde una condición de mezcla pobre de $\phi = 0.8$, hasta una condición de mezcla rica de $\phi = 1.2$.

Con todos los anteriores parámetros definidos, se realizó la simulación numérica y se obtuvo la temperatura de llama adiabática para las tres mezclas representativas.

2.2.2 Velocidad de deflagración laminar

La velocidad de deflagración laminar se obtuvo a partir de la subrutina PREMIX del software CHEMKIN Pro®, el cual permite simular la velocidad de deflagración laminar

mediante un modelo de llama plana estacionaria, unidimensional y adiabático, que resuelve todas las ecuaciones de transporte (Kee RJ, Rupley FM, Miller JA, Coltrin ME, Grcar JF, 2000), generando información de la composición química, la evolución de las especies intermedias. Igualmente, permite predecir los perfiles de temperatura de llama libremente propagada y realizar análisis de sensibilidad.

En el presente trabajo se incluyó como complemento de la velocidad de deflagración laminar el análisis de sensibilidad para las composiciones químicas evaluadas.

Los parámetros de entrada para el cálculo de la velocidad de deflagración laminar en la subrutina PREMIX se describen a continuación en la Tabla 2-3, clarificando que los valores ingresados para el parámetro de la temperatura de llama adiabática corresponden a los obtenidos para cada mezcla representativa para dosado estequiométrico.

Tabla 2-3: Datos de entrada calculo velocidad de deflagración laminar

Descripción del parámetro	Valor y/o condición de ingreso
Temperatura estándar	298K
Presión estándar	849 mbar
Temperatura de llama adiabática	Solución para $\phi = 1,0$ de cada muestra representativa
Condición de frontera de temperatura	400K
Número máximo de puntos	1200
Numero adaptativo de puntos	30
Magnitud de malla inicial	0,0
Magnitud de malla final	1,0
Aumento número de nodos GRAD	0,9
Aumento número de nodos CURV	0,9
Posición estimada del frente de llama (mm)	0,05
Espesor estimado del frente de llama (mm)	0,1

2.3 Estudio experimental

2.3.1 Adquisición de las muestras físicas de gas natural

Con el fin de realizar una comparación aceptable sobre los resultados obtenidos en la simulación cinética es necesario obtener composiciones de gas natural iguales o muy cercanas a las mezclas representativas seleccionadas, donde los compuestos más relevantes metano (CH_4), etano (C_2H_6) y propano (C_3H_8) sean iguales o se aproximen en su participación a los valores de las mezclas representativas.

Debido a la variación diaria y horaria que tiene la composición del gas natural que se recibe en el departamento de Antioquia se realizó un seguimiento durante 4 meses a la cromatografía del gas natural, el cual es medido de manera instantánea y en tiempo real desde el centro de control integrado del gas natural de Empresas Públicas de Medellín E.S.P. Dicha lectura pertenece al gas natural entregado al área metropolitana en el nodo Tasajera ubicado en el municipio de Barbosa como se ilustra en la Figura 2-2.



Figura 2-2: Ubicación cromatógrafo nodo tasajera estación transferencia de custodia Transmetano – Empresas Públicas de Medellín E.S.P.

Las composiciones químicas más ajustadas a lo requerido para el presente trabajo se obtuvieron el 08 de abril y el 06 de mayo de 2016., Se procedió a comprimir dicho combustible en cilindros de gas preparados y adaptados con los equipos necesarios como se ilustra en la Figura 2-3 por la unidad de Operación y mantenimiento gas región Antioquia de Empresas Públicas de Medellín E.S.P.

La actividad de compresión de dichos cilindros se llevó a cabo en el nodo Parque de las aguas identificado como (PAG) en la Figura 2-2.



Figura 2-3: Cilindros adaptados para compresión de gas natural

2.3.2 Calibración de rotámetros

La composición de los gases evaluados tiene una conformación química específica, lo que obliga a adaptar los equipos de medición en el banco de rotámetros del laboratorio de combustión de la Universidad de Antioquia para garantizar la modulación adecuada de cada uno al momento de ejecutar la fase experimental.

Dicha calibración se hace necesaria debido a la necesidad de modular y controlar el caudal de aire y gas de cada mezcla representativa, con el fin de medir comportamientos de combustión en diferentes dosados y controlar efectos fenomenológicos indeseados durante la ejecución del experimento.

Se conectó uno de los cilindros de gas natural con el combustible comprimido al banco de rotámetros y a través de reguladores y válvulas se disminuyó la presión del combustible hasta llegar por debajo de los 50 milibares, debido a que esta es la presión máxima de trabajo del medidor de sello húmedo.

El gas natural fue comprimido a 11 bares y fluye por una primera etapa de regulación en lo cual la presión es disminuida a 5 bares, para finalmente ingresar al regulador de presión del banco de rotámetros que lo lleva a presiones por debajo de 1 bar.

Una vez el gas fluyendo por el rotámetro y registrado en el medidor de sello húmedo como se ilustra en la Figura 2-4, se procedió al registro de los datos de temperatura, presión y caudal en 22 puntos diferentes escalonados de acuerdo a la capacidad de dicho medidor.

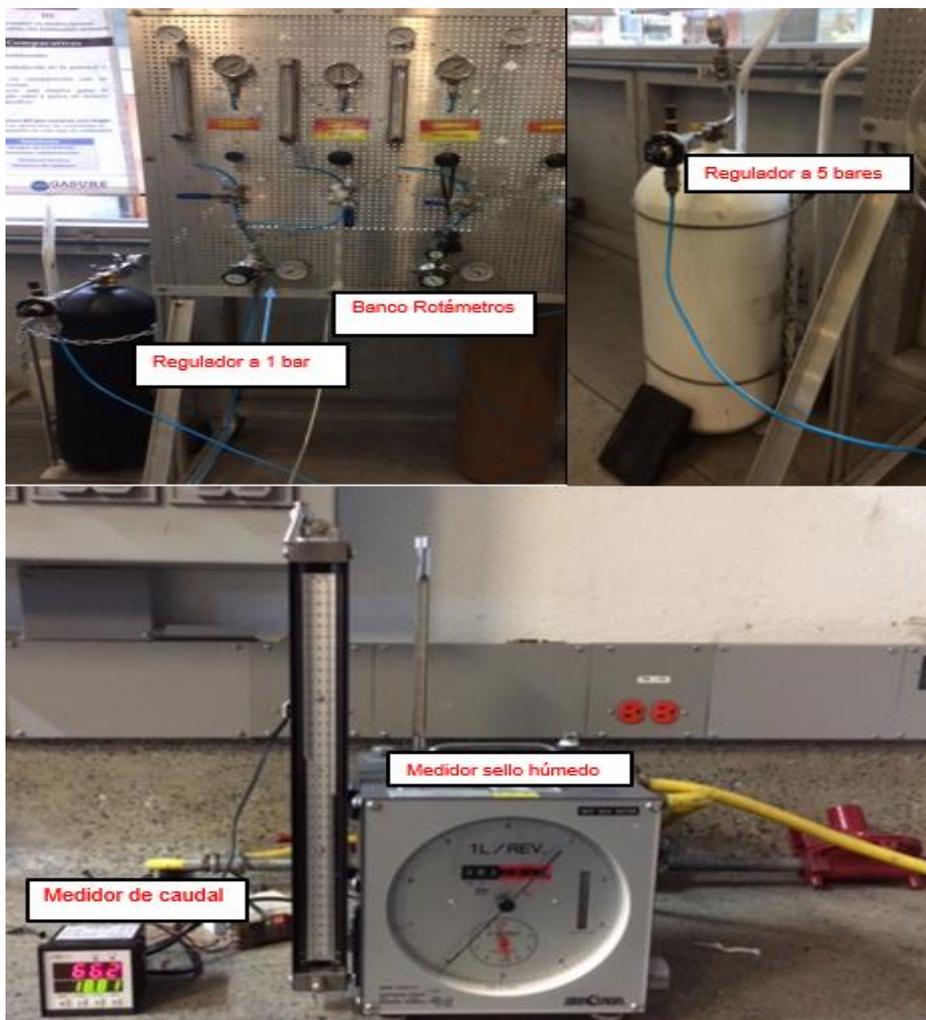
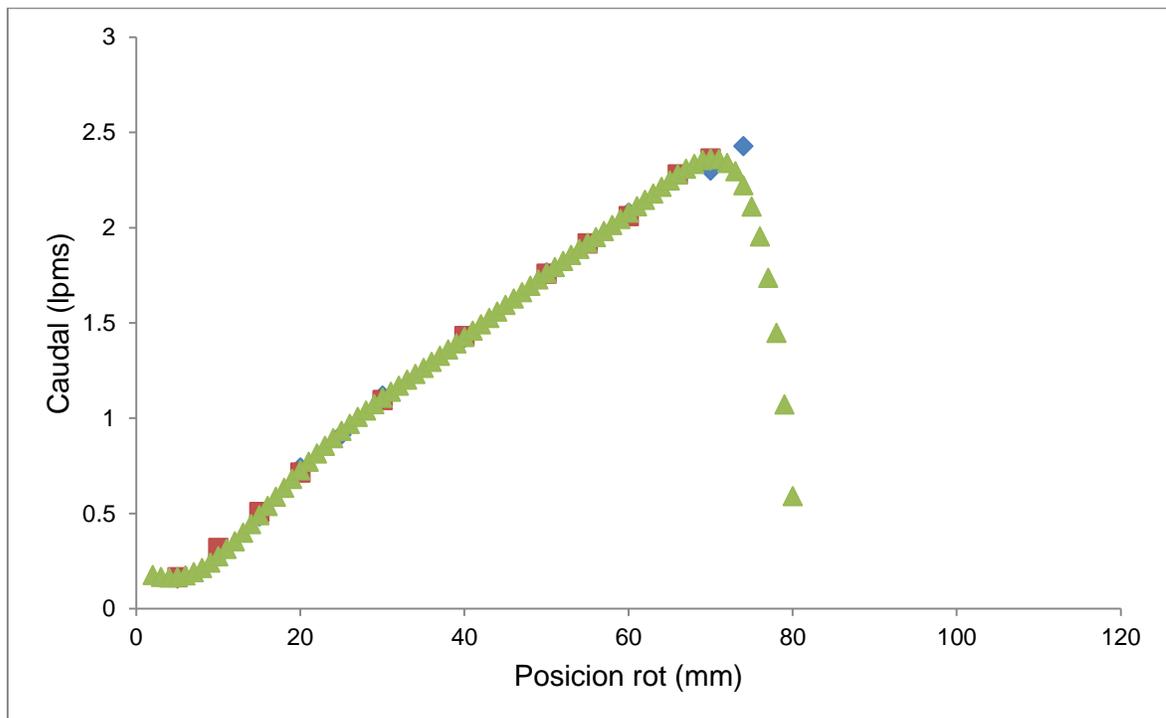


Figura 2-4: Calibración de las mezclas de gas natural

Finalizada la medición para todos los puntos y los gases con poder calorífico (PCS) alto y bajo, se obtuvieron las gráficas de ajuste (Ver Figura 2-5). Los puntos en color rojo corresponden a los datos de revisión, los puntos de color azul corresponden a los datos de prueba y los puntos verdes corresponden al polinomio de ajuste. Este polinomio permite posicionar en los rotámetros la medición, permitiendo el cálculo de los caudales de aire y combustible mediante un software de cálculo elaborado por el grupo GASURE en el programa MATLAB.

**Figura 2-5:** Grafica de ajuste para gas con poder calorífico (PCS) alto

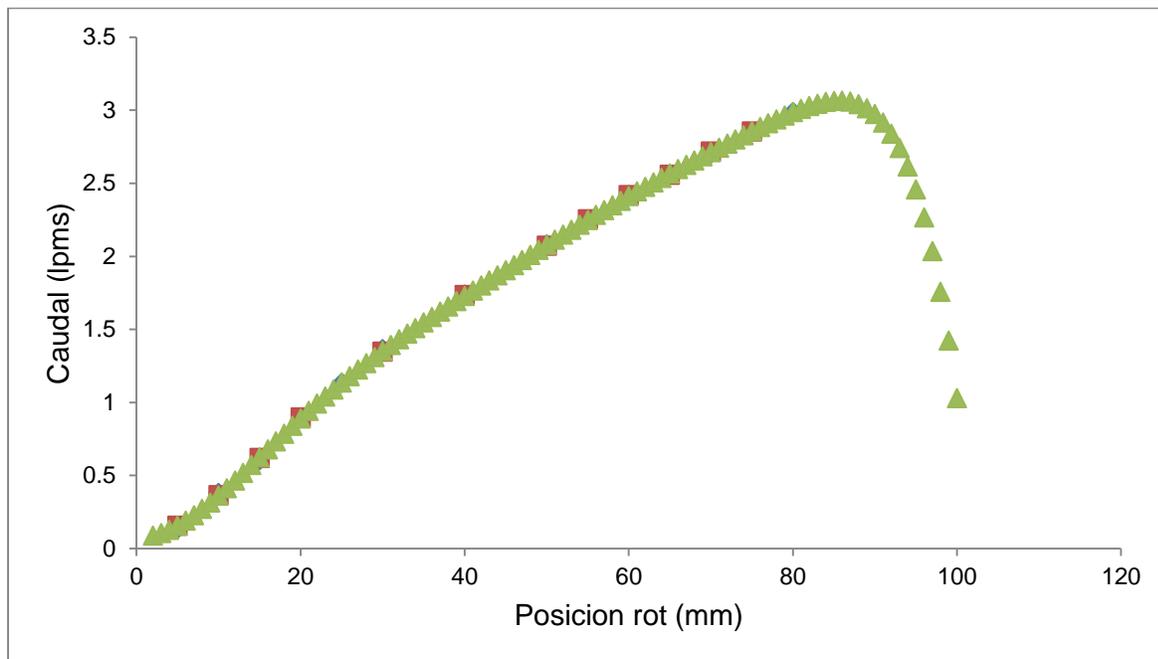


Figura 2-6: Gráfica de ajuste para gas con poder calorífico (PCS) bajo

2.3.3 Medición experimental de la velocidad de deflagración laminar con la técnica Schlieren

Por medio de la técnica Schlieren, se determinó la velocidad de deflagración laminar para las mezclas representativas de gas natural objeto de estudio. El montaje experimental para la aplicación de esta técnica comprende un sistema óptico de varios lentes ubicados a distancias específicas donde se aprovecha el índice de refracción. Los rayos de luz son obligados a pasar por un filo cortante, donde finalmente es capturado por una cámara que permite obtener una grabación del perfil de llama en imágenes a blanco y negro que permiten observar los puntos de gradientes de densidad.

El resto del montaje experimental está dado por el cilindro de gas natural que contiene la muestra evaluada, el banco de rotámetros, la conexión del combustible y el flujo de aire seco y el quemador de premezcla de puerto rectangular de contorno curvado. El quemador (Ver Figura 2-7) tiene dimensiones de 9.4 mm x 29.8 mm . Este tipo de puerto garantiza obtener valores de número de Reynolds menores a 1200 para flujos laminares (Rubio-Gaviria, 2015) permitiendo así obtener un perfil de velocidades uniforme y lograr una imagen de llama triangular como se ilustra en la Figura 2-8.

El quemador utilizado cuenta con un sistema de refrigeración de agua circulante abastecido por una pequeña bomba, garantizando de esta manera una temperatura constante en la zona de generación de llama.

Se ubicó una fuente de luz con un bombillo tipo HID de 8000K conectado a un balastro y batería para el suministro de energía. Una vez se ubicó la fuente de luz, se instaló una placa con orificio para concentrar la luz en un punto del área del juego de lentes, después se instalaron 2 lentes plano-convexo de 2 pulgadas de diámetro y un foco de 250 milímetros. Como fue necesario darle un giro de 45° al haz de luz, se instaló un porta lente donde se colocó un lente biconvexo de 2 pulgadas de diámetro y un foco de 33,8 milímetros el cual permitió ajustar la dirección y el ángulo del haz de luz a los puntos deseados.

Seguidamente se ajustó el quemador a la altura y distancia requerida, de tal forma que se pudiera observar el frente de llama seguido por otro lente convexo de 2 pulgadas de diámetro y un foco de 250 milímetros para enfocar el haz de luz a un filo cortante ajustable que permitió centrar los rayos de luz hacia el lente de la cámara. Este montaje se ilustra en las Figuras 2-9 y 2-10.

La cámara utilizada fue una ICCD (Intensifier Charge-Coupled Device) de referencia PI-MAX IK RB FG 4, provista de un captador CCD de 1024x1024, con la capacidad de capturar 0,9 cuadros por segundo a máxima resolución.

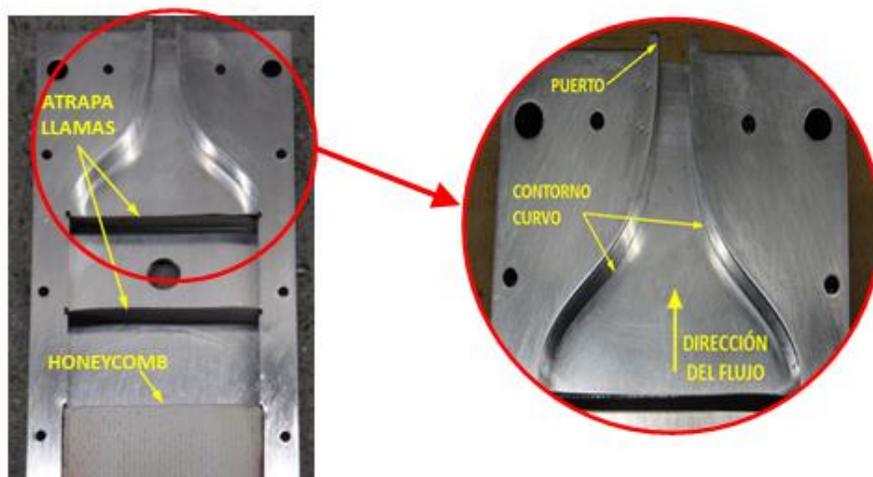


Figura 2-7: Quemador de premezcla para flujos laminares (Rubio-Gaviria, 2015)

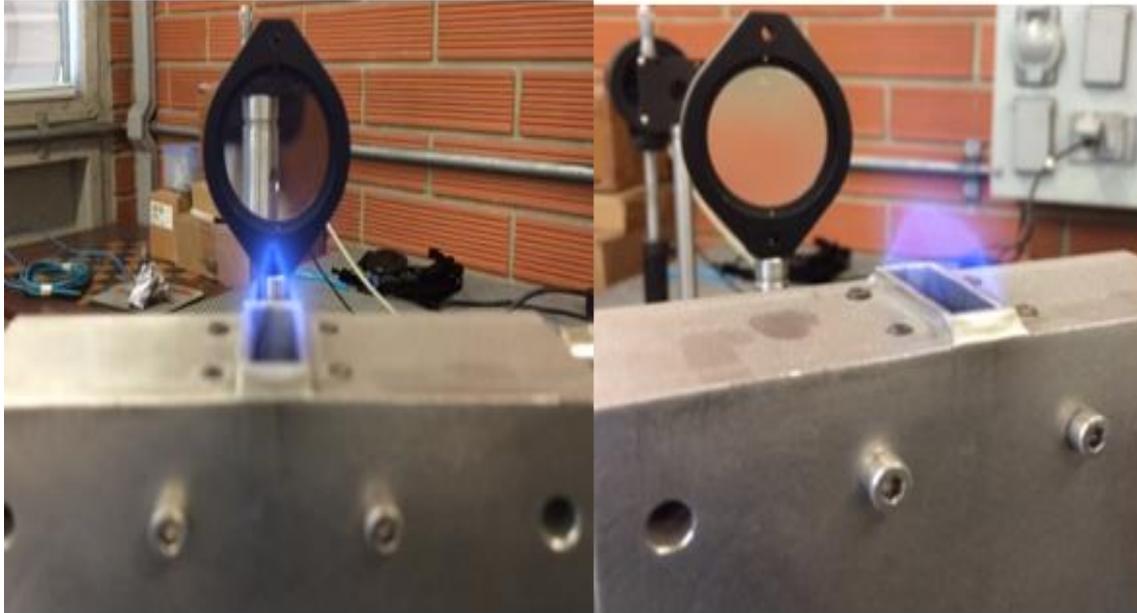


Figura 2-8: Frente de llama triangular en quemador de premezcla

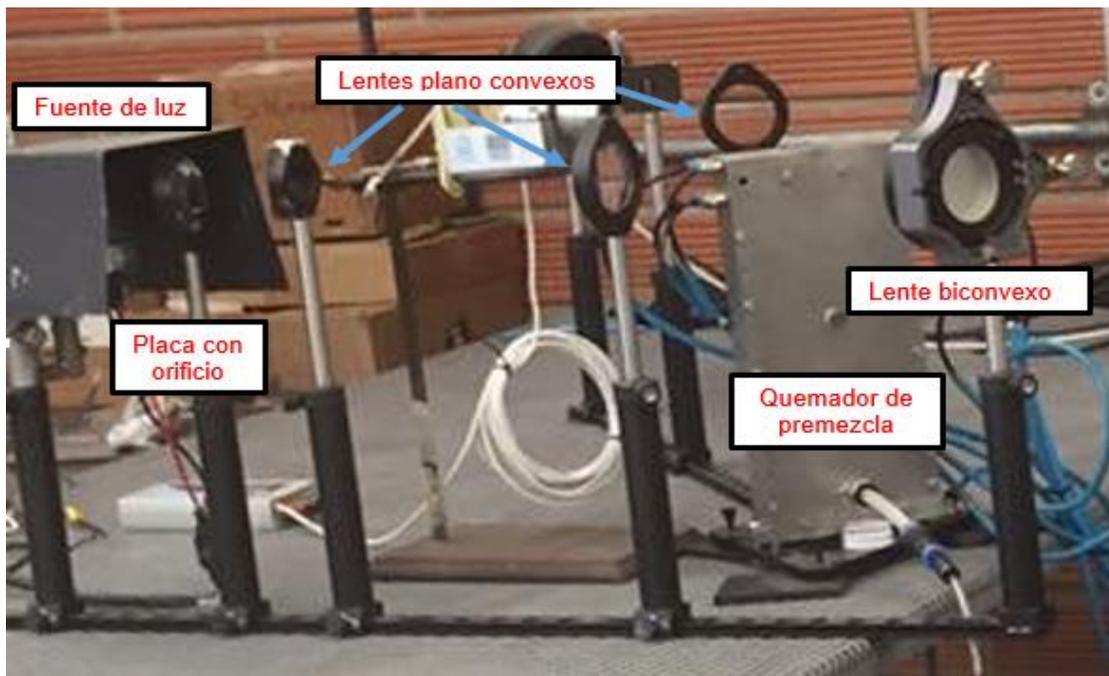


Figura 2-9: Montaje Schlieren vista lateral

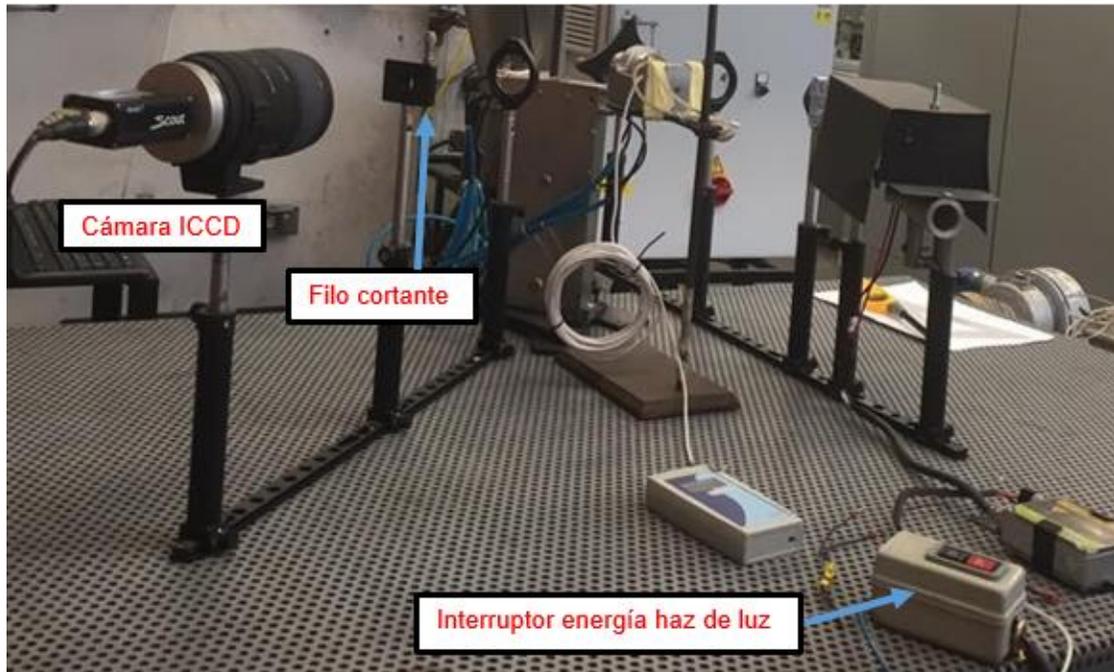


Figura 2-10: Montaje Schlieren vista frontal

Se realizaron 7 pruebas para cada mezcla de gas natural en cada dosado con un total de 70 mediciones.

Se registraron entre 38 y 42 fotografías para cada dosado (aproximadamente 2800 fotos); garantizando de esta manera la confiabilidad de los datos adquiridos.

El procesamiento y tratamiento de los registros fotográficos fue realizado con el software MATLAB usando un código computacional generado por el grupo GASURE. Este código identifica los puntos de máxima intensidad, los cuales corresponde al frente de llama y permiten calcular la velocidad de deflagración laminar.

Toda la fase de calibración de rotámetros y pruebas experimentales, se llevaron a cabo en el Laboratorio de Combustión de la Universidad de Antioquia a una temperatura promedio de 298K, presión promedio de 849 mbar y altura de 1550 metros sobre el nivel del mar.

2.3.4 Observación de fenómenos de retrollama y desprendimiento

La observación de los fenómenos de retrollama y desprendimiento se realizó en un quemador de premezcla tipo bunsen. Se partió de los flujos medidos y calibrados previamente en el banco de rotámetros para cada tipo de gas natural y a diferentes velocidades de deflagración, se observó el comportamiento de la llama hasta que esta presentara un fenómeno crítico de retrollama o desprendimiento.

Dicho gradiente crítico se registró y se repitió al menos unas 3 veces para garantizar el punto de medición y posición del gradiente.

Las condiciones utilizadas en esta prueba se describen en la Tabla 2-4.

Tabla 2-4: Condiciones experimentales de laboratorio

Variable	Valor
Temperatura ambiente	295K
Presión atmosférica	849 mbar
Diámetro del puerto (desprendimiento)	8,1 mm
Diámetro del puerto (retrollama)	17,2 mm

En la Figura 2-11 se ilustra el montaje realizado para la observación de los gradientes críticos de velocidad.



Figura 2-11: Montaje experimental para la observación de los gradientes críticos

Una vez obtenidos los datos experimentales, se aplicaron los conceptos teóricos para la representación numérica del fenómeno aplicando la teoría de Lewis-Von Elbe definida por los límites gradientes (ver ecuaciones (2-5) y (2-6)); siendo Q_m el caudal de la premezcla, g_r gradiente crítico de retollama, g_s gradiente crítico de desprendimiento y R el radio de la tubería.

$$\text{Límite del gradiente} \quad g_r < g < g_s \quad (2-5)$$

$$\text{Gradiente para quemador circular} \quad g = (4/\pi) Q_m / R^3 \quad (2-6)$$

2.4 Observación de emisiones

Se realizaron mediciones para encontrar la concentración de dióxido de carbono (CO_2) y monóxido de carbono (CO) en los productos de combustión para el gas natural con poder calorífico (PCS) bajo y el gas con poder calorífico (PCS) medio después de la

combustión. Se utilizó un analizador SICK MAIHAK s710 para medir las concentraciones de CO_2 , CO y O_2 en los productos de combustión. Este dispositivo utiliza el método de infrarrojo no dispersivo para el CO y CO_2 con un rango de medición de 0-40000 ppm y 0-40 %vol. Para el O_2 utiliza el método paramagnético (Colocar rango de medición y precisión) respectivamente como se muestra en la figura 2-12.

Se realizó un montaje con un quemador de premezcla tipo bunsen cubierto por todos sus costados para evitar la fuga de los gases producto de la combustión y la alteración de la medición por los flujos de aire tomados del ambiente.

Se instaló una campana concentradora de gases en la parte alta del quemador con su respectivo punto de medición para instalar el equipo analizador como se muestra en la figura 2-13.

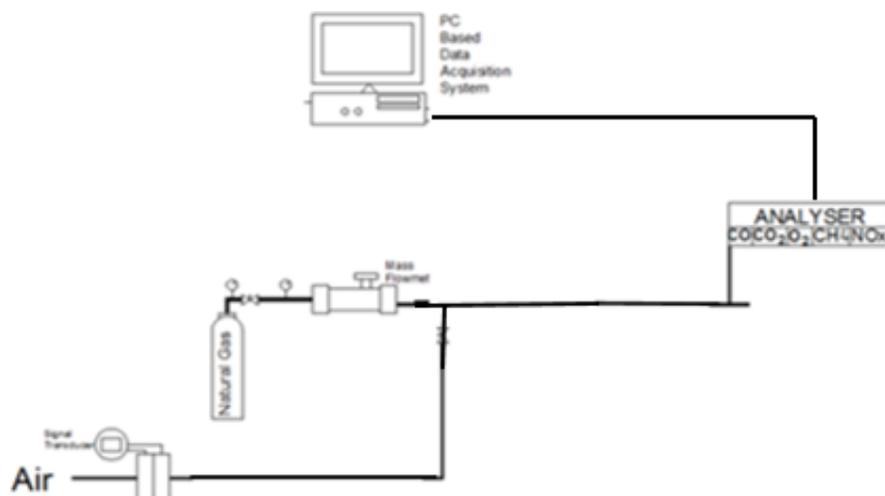


Figura 2-12: Analizador SICK MAIHAK s710

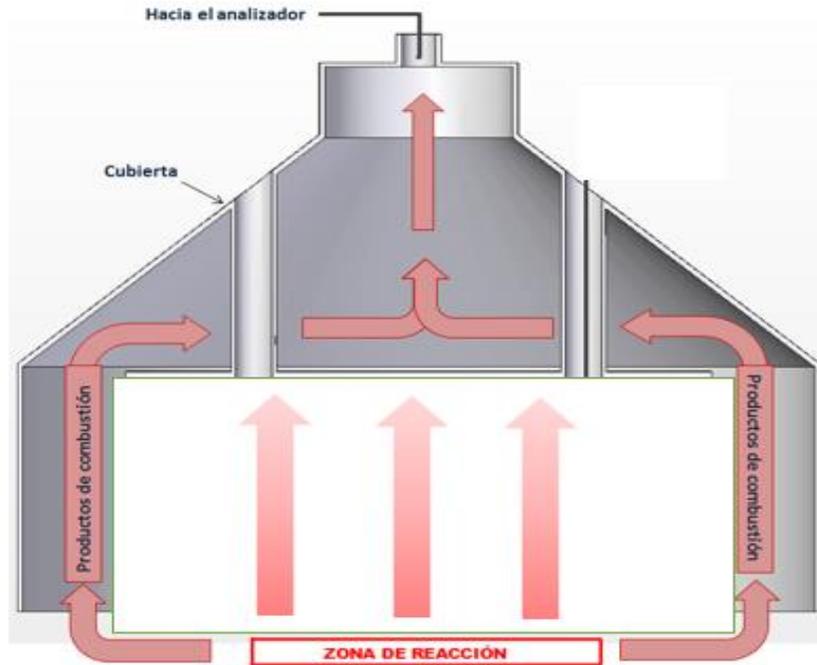


Figura 2-13: Campana concentradora de gases

2.5 Cálculo de los índices de intercambiabilidad

Los índices de intercambiabilidad fueron aplicados y calculados de acuerdo a la definición matemática de cada uno de los índices de Wobbe, Weaver y AGA descritos en la Sección 1.5 sobre teoría de Intercambiabilidad de gases. Una vez se obtuvieron los valores de las propiedades físicas químicas de las mezclas representativas se aplicó la formulación del índice de Wobbe, las formulas del índice de Weaver con respecto a la generación de calor y la tasa de aireación en la combustión y el factor de compresibilidad AGA 8 en función de la temperatura, la presión y la composición química del combustible descritas en el reporte AGA 8. (Starling & J.L., 1992).

Para la validación y aplicación del AGA 8 se partió de la formula general del factor de compresibilidad (ver ecuación(2-7)) donde Z es el factor de compresibilidad, P es la presión absoluta del gas, V el volumen del gas n el número de moles, R la constante universal de los gases y T la temperatura del gas, la determinación de la masa molar (ver

ecuación (2-8)) donde Mr es la masa molar y X_i son las cantidades de cada componente de la composición química; para así poder expresar la densidad de la mezcla de gas natural en términos del factor de compresibilidad (ver ecuación (2-9)).

$$\text{Factor de compresibilidad} \quad Z = \frac{PV}{nRT} \quad (2-7)$$

$$\text{Masa molar de la mezcla} \quad Mr = \sum_{i=1}^N X_i M_{r,i} \quad (2-8)$$

$$\text{Densidad en términos de compresibilidad} \quad \rho = \frac{M_r P}{ZRT} \quad (2-9)$$

Se aplicó el factor de supercompresibilidad para cada uno de los gases; lo que implicó hallar los factores de presión, temperatura y correcciones de volumen según lo descrito en las ecuaciones. (ver ecuación (2-10, 2-11, 2-12, 2-13, 2-14)).

$$\text{Corrección de volumen} \quad V_c = V_m \times K_p \times K_T \times F_{pv}^2 \quad (2-10)$$

$$\text{Factor de presión} \quad K_p = \frac{(P_m + P_{atm}) \times 14.504}{P_{est}} \quad (2-11)$$

$$\text{Factor de Temperatura} \quad K_T = \frac{T_{est} + 273.15}{T_m + 273.15} \quad (2-12)$$

$$\text{Factor de Supercompresibilidad} \quad F_{pv}^2 = \frac{Z_b(P_{est}, T_{est})}{Z_f(P_m, T_m)} \quad (2-13)$$

$$\text{Corrección de Volumen extendido} \quad V_c = V_m \times \left[\frac{(P_m + 0.87) \times 14.504}{14.65} \right] \times \left[\frac{15.56 + 273.15}{T_m + 273.15} \right] \times \left[\frac{Z_b(14.65bar, 15.56^\circ C)}{Z_f(P_m, T_m)} \right] \quad (2-14)$$

Sin embargo, el método detallado descrito en el AGA 8 implica igualmente el cálculo del factor de compresibilidad detallado para cada tipo de gas y cada componente de la composición química; donde a partir de las siguientes ecuaciones (ver ecuaciones (2-15, 2-16)), se parametrizó el procesamiento matemático con ayuda del programa MATLAB, permitiendo así encontrar los factores para cada composición química.

$$\text{Factor de compresibilidad detallado} \quad z = 1 + \frac{DB}{K^3} - D \sum_{i=1}^{N18} C_n T^{-u} + \sum_{i=1}^{N18} C_n T^{-u} (B_n - C_n - K_n D^{K_n}) \quad (2-15)$$

$$\text{Densidad Reducida} \quad D = K^3 d \quad (2-16)$$

Donde B es el coeficiente de variación de cada componente de la mezcla, K es el tamaño de cada componente en la mezcla y d es la densidad molar de cada componente.

2.6 Cálculo de la eficiencia térmica y observación de llama en gasodomésticos

Se evaluó la eficiencia o rendimiento del funcionamiento en un gasodomestico de cocción con gas natural bajo la norma NTC 2832-1 y NTC 2832-2 Gasodomesticos para la cocción de alimentos requisitos de seguridad (*Gasodomesticos Para la Cocción de Alimentos NTC 2832*, 2015) con el fin de evidenciar los posibles cambios que se puedan presentar en el proceso de cocción, eficiencia térmica de las composiciones químicas y morfología de las llamas en términos de intercambiabilidad de gases.

Para el desarrollo de la prueba, se llenó con 3,7 kilogramos de agua un recipiente con diámetro de 22 centímetros y se colocó sobre la llama de gas natural generada por una estufa marca Haceb referencia ESTUF AR-V GAB MIX 3X1 GN220 PL con una potencia de 1,15 KW por quemador, donde se midió el flujo de gas, temperatura inicial y final del agua (entre 21°C y ±90°C), temperatura del gas y tiempo.

La prueba de laboratorio se llevó a cabo con una presión de 23 mbares de suministro de gas y una presión atmosférica de 849 mbares.

El quemador fue precalentado antes de iniciar la prueba durante 10 minutos según lo indica la norma de ensayo.

Para el cálculo de la eficiencia, se utilizó la ecuación relacionada en la Norma Técnica Colombiana 2832-1 (ver ecuaciones (2-10) y (2-11)) donde define a η como el rendimiento del gasodomestico, M_e como masa del agua, V_c volumen de gas seco, P_a presión atmosférica, P presión de entrada al gasodomestico, P_w presión parcial de vapor de agua, T_g temperatura del gas, M_c masa de gas seco consumido, H_s poder calorífico (PCS) del gas, T_2 temperatura final del agua, T_1 temperatura inicial del agua y V_{mes} volumen de gas medido en m³.

$$\text{Rendimiento} \quad \eta = 4,186 * 10^{-3} M_e \frac{T_2 - T_1}{V_c (M_c) H_s} * 100 \quad (2-10)$$

$$\text{Volumen gas seco} \quad V_c = V_{mes} \frac{P_a + P - P_w}{1013,25} * \frac{280,15}{273,15 + T_g} \quad (2-11)$$

3.Resultados

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de acuerdo a los objetivos planteados al inicio de la investigación, y el análisis de cada uno de ellos.

3.1 Mezclas representativas de gas natural

La definición de las mezclas representativas de gas natural fue uno de los resultados más importantes dentro de la investigación debido a que marcó el flujo de trabajo en el estudio teórico numérico y experimental.

3.1.1 Variación de la composición del gas natural

Se obtuvo inicialmente la caracterización del tipo de gas de acuerdo a la clasificación en función de poder calorífico (PCS), con el fin de observar el comportamiento en el tiempo del tipo de gas recibido en Antioquia durante el periodo evaluado desde el 01 de Agosto de 2011 al 31 de Julio de 2015.

Se dividió el periodo en años, con el fin de evidenciar el consolidado mensual del tipo de gas natural registrado en la estación de Sebastopol, lo que evidencia que para el año 2011 y 2012 predominó el gas con poder calorífico (PCS) bajo a excepción de los meses de diciembre, como se ilustra en la Figura 3-1 y Figura 3-2. Este resultado posiblemente se debe al mantenimiento preventivo que generalmente se lleva acabo directamente en los pozos de extracción y en el gasoducto central.

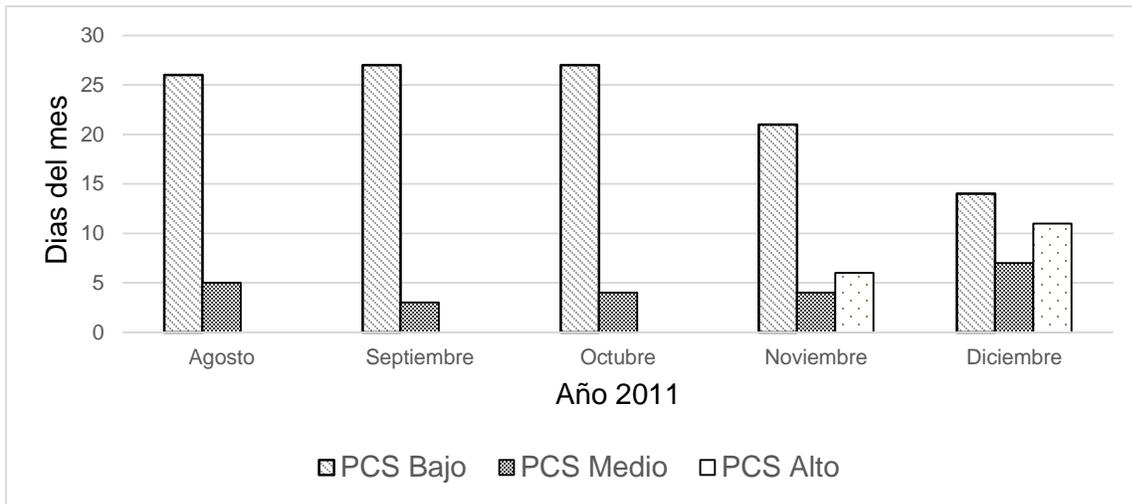


Figura 3-1: Participación gas natural año 2011

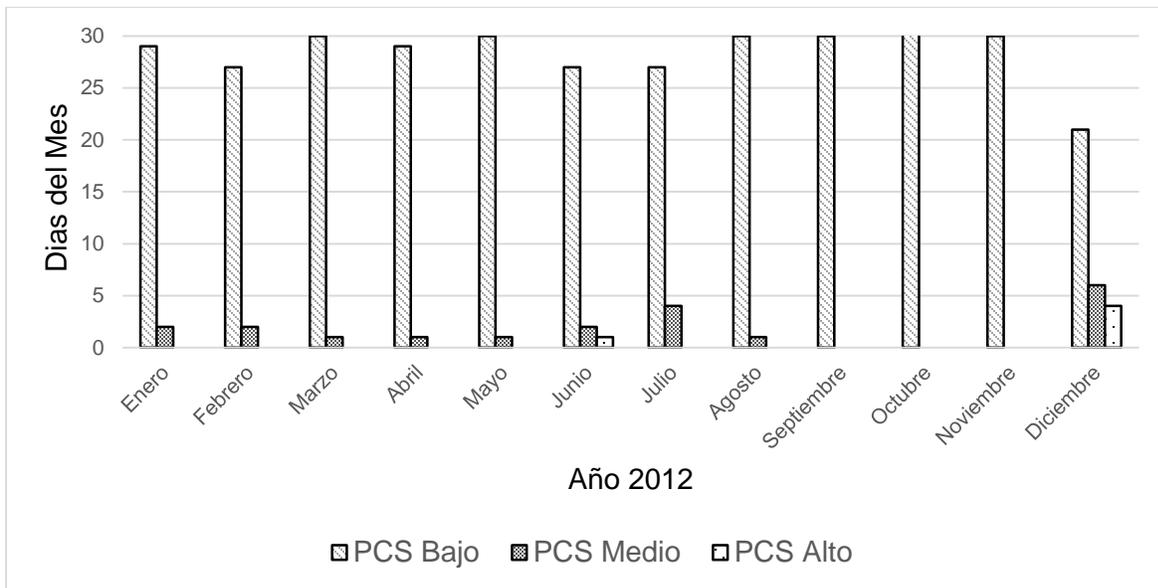


Figura 3-2: Participación gas natural año 2012

Para los años 2013 y 2014, se evidenció una gran variabilidad del tipo de gas natural recibido y medido para el departamento de Antioquia como se ilustra en las Figura 3-3 y Figura 3-4, lo que significa variaciones en un solo mes del poder calorífico (PCS) del orden de los 995 Btu/ft³ y 1155 Btu/ft³; situación que se repitió de manera constante en el 100% de los meses del año 2013 y en el 92% de los meses del año 2014.

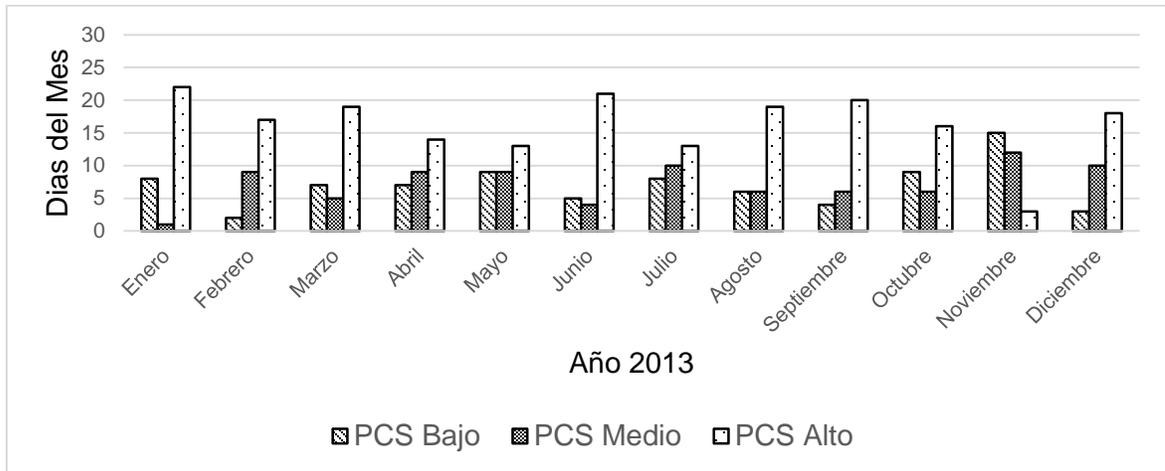


Figura 3-3: Participación gas natural año 2013

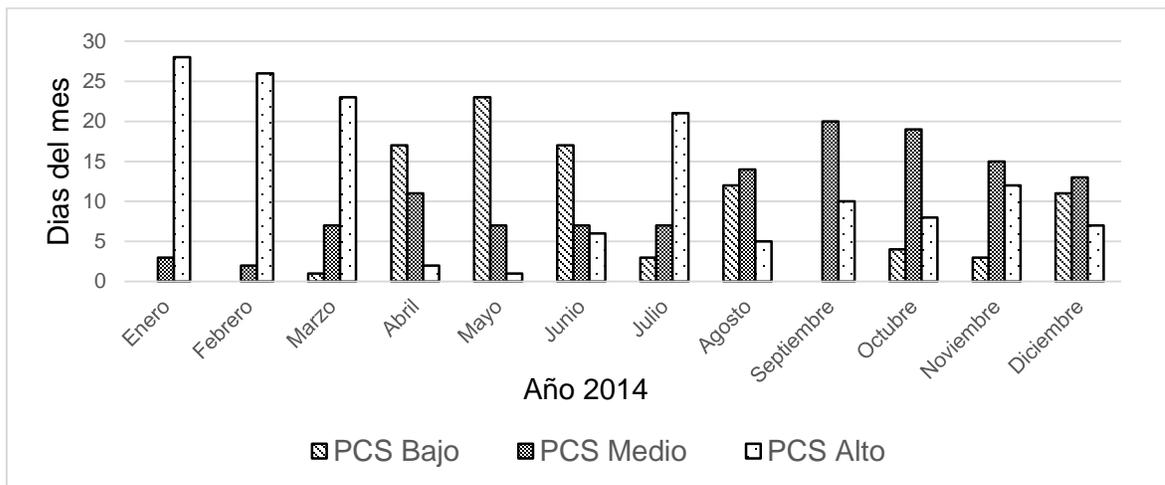


Figura 3-4: Participación gas natural año 2014

Para el año 2015, aunque se conservó la tendencia que se venía presentando con respecto a la variación del poder calorífico (PCS) del gas natural en los años 2013 y 2014, se evidenció un incremento constante en cuanto a la participación del gas natural de poder calorífico (PCS) bajo, como se ilustra en la Figura 3-5. Este resultado puede ser atribuido a decisiones de tipo técnico y/o administrativo que son tomados por los agentes productores y transportadores del gas natural.

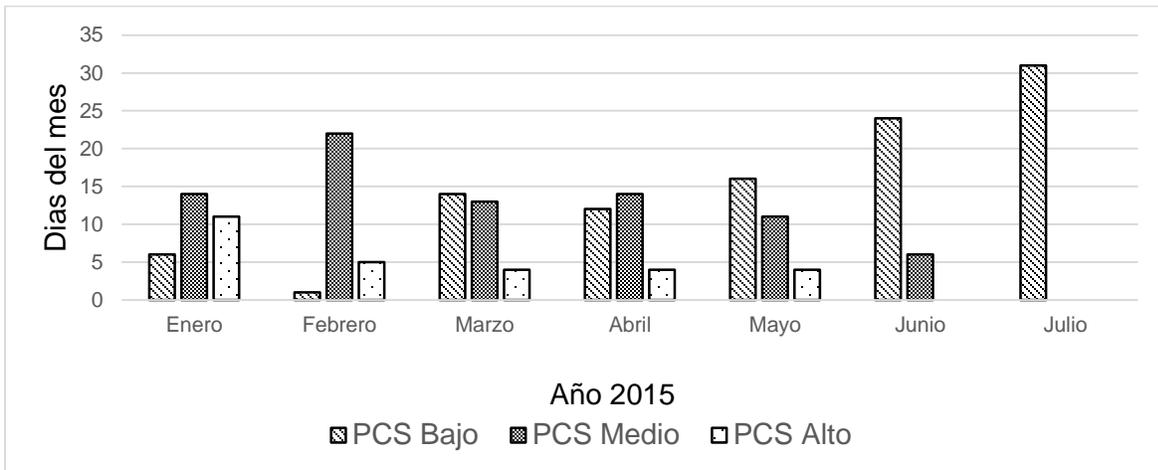


Figura 3-5: Participación gas natural año 2015

En 2011 el poder calorífico (PCS) y la composición química del gas natural era mucho más estable y definida, permitiendo así el diseño, calibración y funcionamiento de gasodomestico de forma más eficiente respecto al proceso de combustión.

La alta variabilidad del poder calorífico (PCS) del gas natural presentado entre 2013 y 2015 evidencia la alta exploración de nuevos pozos y la extracción de dicho energético, presentando alteraciones en la composición química del mismo.

La tendencia encontrada en el periodo muestral, refleja que cada vez es más predominante el gas natural de poder calorífico (PCS) alto y medio respecto al bajo como se observa en la Figura 3-6. Es decir, densidades de composiciones químicas con concentraciones de metano (CH_4) menores y cantidad de etano (C_2H_6) y propano (C_3H_8) mayores.

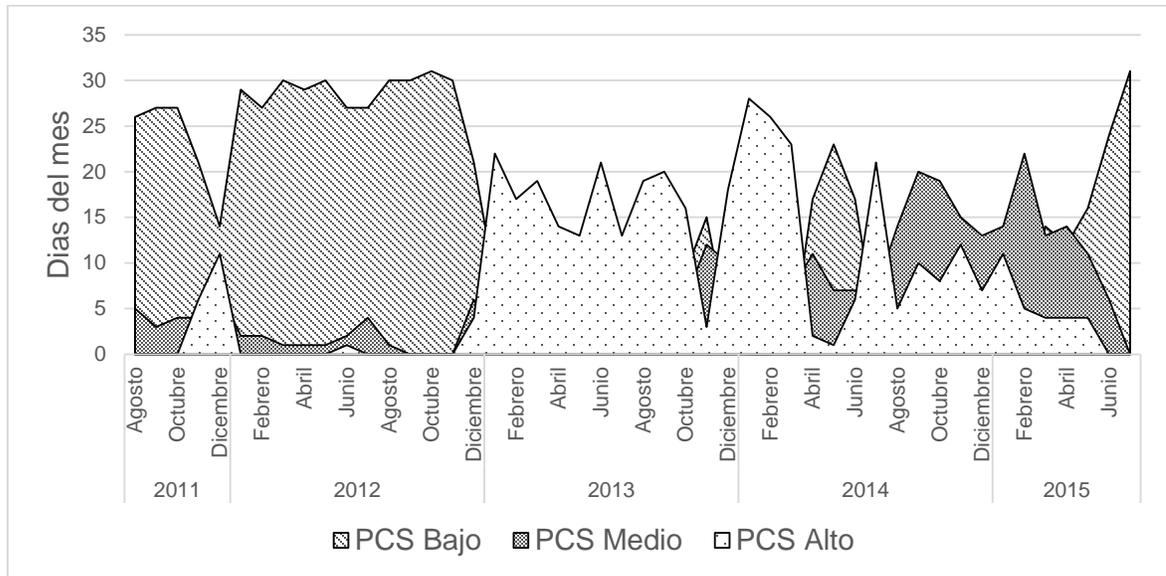


Figura 3-6: Comportamiento del poder calorífico (PCS) del gas natural

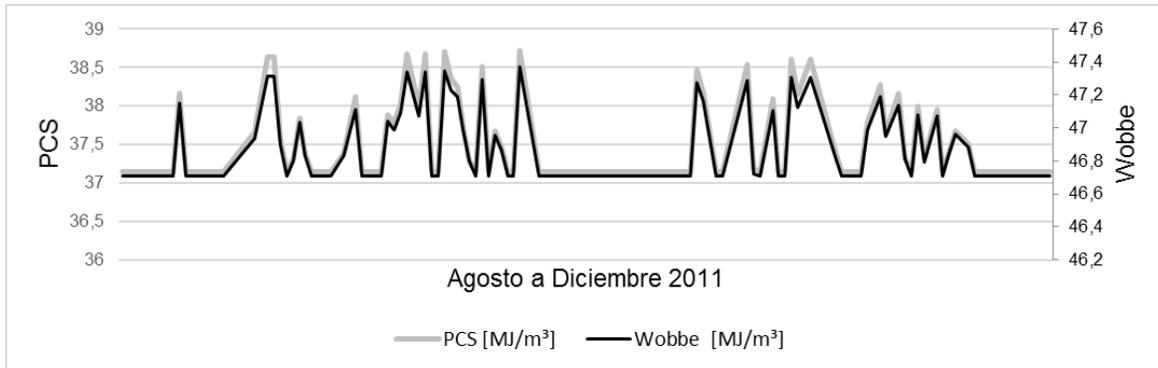
La tendencia encontrada y descrita respecto al poder calorífico (PCS) superior del gas natural se encuentra directamente relacionada con lo indicado en los informes del plan indicativo de abastecimiento de gas natural de la Unidad de Planeación Minero Energética del año 2015 y el balance de gas natural presentado por la Unidad de Planeación minero energética en el año 2015 (UPME, 2015) De acuerdo a estos documentos los pozos principales de Colombia de producción de gas natural ya se encuentran en un periodo de declinación y surgen unos nuevos en diferentes regiones del país con la capacidad de inyectar dicho energético al sistema de transporte del gasoducto central. Adicionalmente, otros factores que tienden a afectar la composición del gas natural en Colombia son el potencial crecimiento de importación de gas natural de Venezuela en las futura demanda de Colombia (NATURGAS, 2016) y la construcción de nuevas plantas regasificadoras como la que se construye actualmente en Cartagena para el ingreso de gas natural licuado desde países como Canadá, costa del golfo de Estados Unidos y Trinidad y Tobago. Se espera que dichas fuentes de gas natural tengan que ajustarse a los parámetros de calidad definidos por la regulación Colombiana.

3.1.2 Relacionado con la estadística aplicada

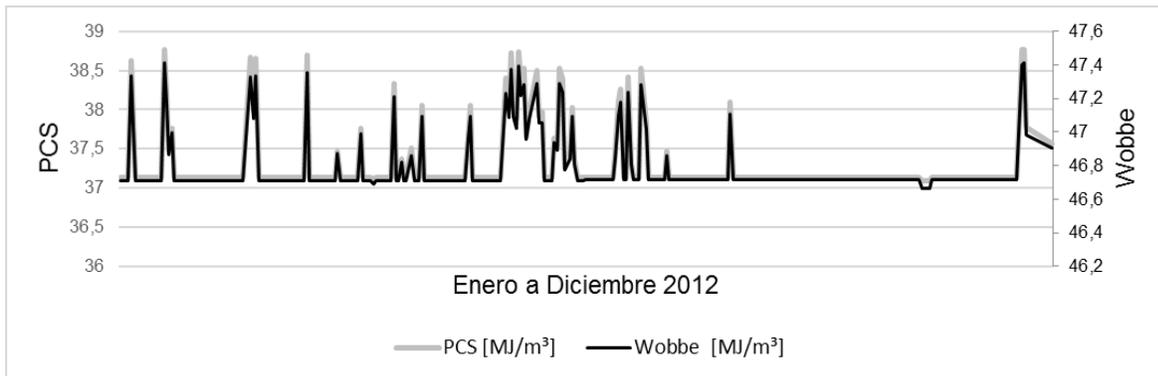
Para definir periodos de tiempo comparables y evidenciar comportamientos deseables para la caracterización de las muestras representativas, se realizó el cálculo del índice de

Wobbe aplicando la formula (1-1) para cada composición química, obteniendo la relación de manera gráfica entre el poder calorífico (PCS) superior y el índice de Wobbe como se ilustra en Figura 3-7, Figura 3-8, Figura 3-9 y Figura 3-10.

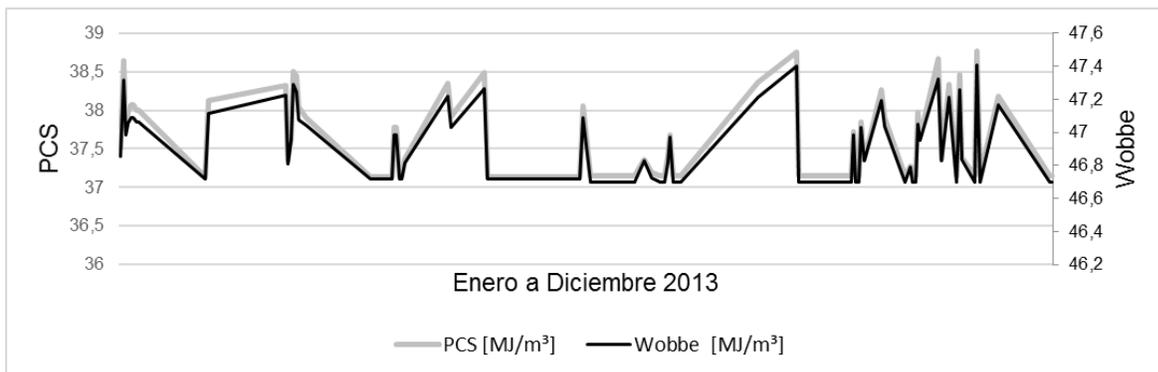
Se obtuvieron las gráficas por periodos anuales según la clasificación determinada anteriormente para el poder calorífico (PCS) superior en función de la densidad.



a)



b)



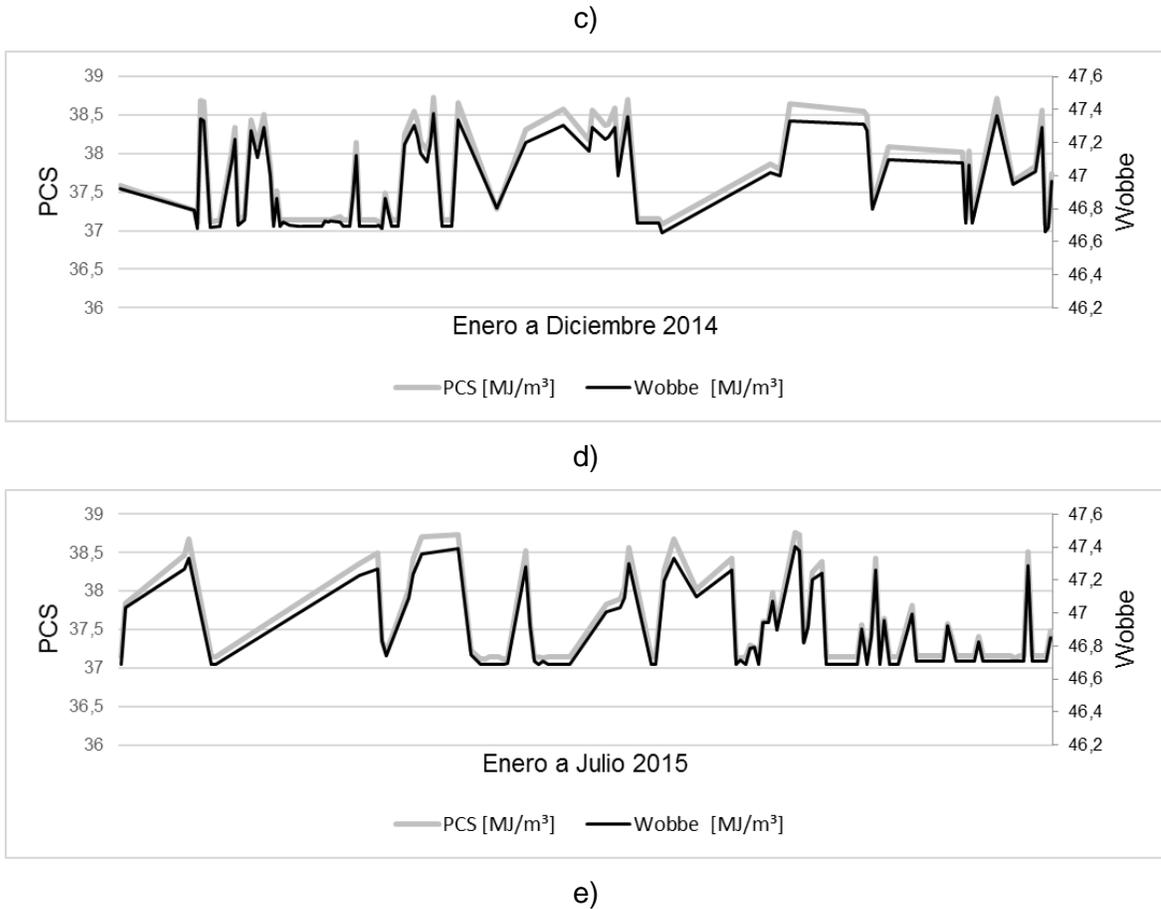
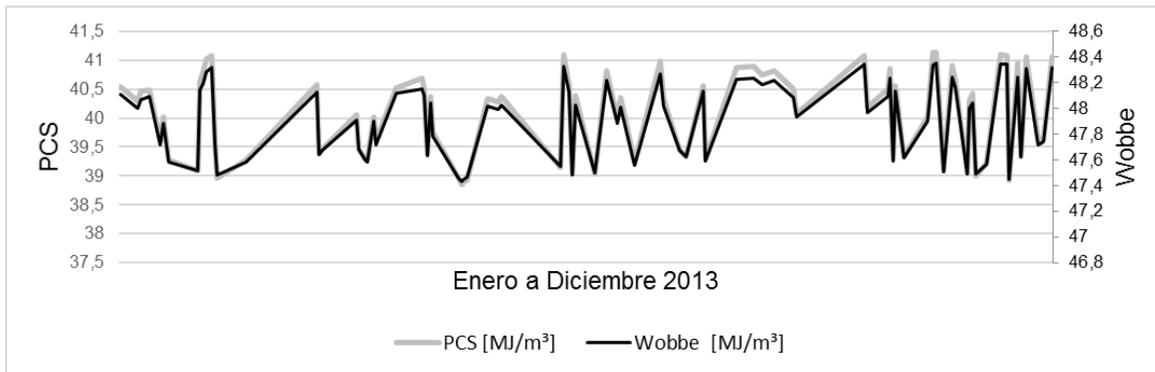


Figura 3-7: Comportamiento del índice de Wobbe y el poder calorífico (PCS) bajo

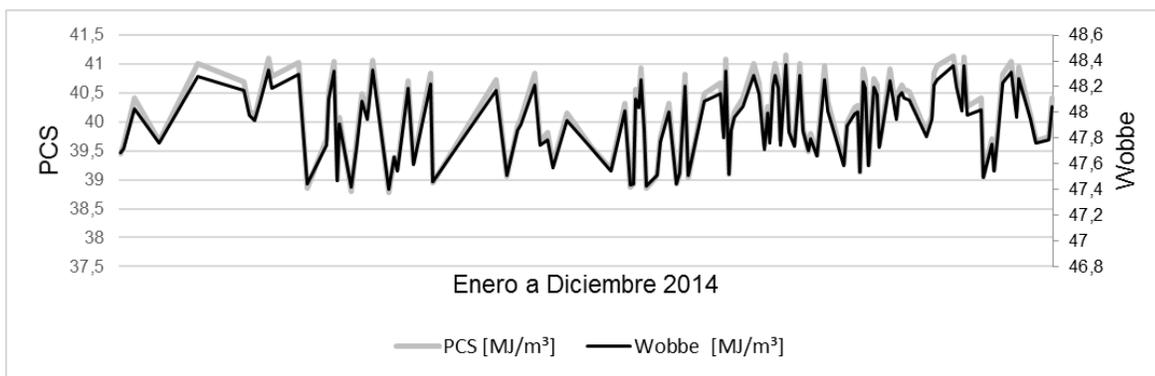
En las Figuras 3-7 a), b), c), d) y e) se muestra como entre el poder calorífico (PCS) bajo y el índice de Wobbe existe una relación lineal en la gran mayoría de los casos y de los periodos evaluados, a excepción de algunos periodos donde sus comportamientos son inversos como lo observado en la Figura 3-7 b) al finalizar el periodo.

Es válido tomar cualquier periodo como referencia estadística, dado que la correlación entre el índice de Wobbe y el poder calorífico (PCS) es directo y lineal. Para el caso de estudio se tomó el periodo enero a diciembre del 2014 representado en la Figura 3-7 d).

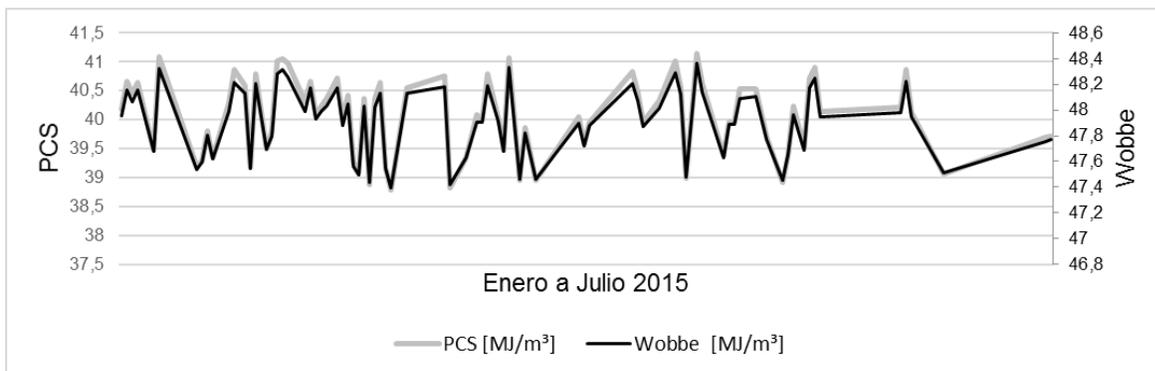
Para el poder calorífico (PCS) medio se realizó la misma distribución de series anuales como se ilustra en la figura 3.8, descartando el periodo desde agosto de 2011 a diciembre de 2012, debido a su poca participación durante este tiempo como se evidenció en la Figura 3-6.



a)



b)



c)

Figura 3-8: Comportamiento del índice de Wobbe y el poder calorífico (PCS) medio

En las Figuras 3-8 a), b) y c) se evidencia un comportamiento lineal respecto al poder calorífico (PCS) y el índice de Wobbe de las composiciones químicas contenidas en dichos periodos. La Figura 3-8 c) en el periodo enero a julio de 2015, es la que mayor relación presenta dado que define los límites de los datos presentados con una correlación más ajustada que las encontradas en los otros periodos y sin

comportamientos inversos, lo que permite elegirla como referencia estadística respecto al total de la muestra del gas con poder calorífico (PCS) medio.

Para el gas clasificado con poder calorífico (PCS) alto, se descartó los periodos agosto a diciembre 2011, enero a diciembre 2012 y Enero a Julio 2015, debido a la poca participación de este gas en los periodos descritos.

Sin embargo, en los años 2013 y 2014 la participación del mismo fue muy alta con una gran cantidad de datos en cuanto a composición química se refiere, pero la relación del poder calorífico (PCS) y el índice de Wobbe no presentó un comportamiento lineal como se observa en la Figura 3-9 y es contrario a lo hallado en los gases con poder calorífico (PCS) bajo y medio; posiblemente debido a la participación porcentual de cada componente químico. Se esperaría que para estos gases con poder calorífico (PCS) alto por su compuesto elevado en propano y etano la densidad sea más alta y por lo tanto el número de Wobbe más elevado en proporción al poder calorífico (PCS) sin comportamientos inversos.

Por lo anterior, se decidió aplicar la base estadística a toda la muestra con poder calorífico (PCS) alto comprendido entre los años 2013 y 2014 evitando así la distorsión o falta de datos que puedan alterar la obtención de la mezcla representativa.

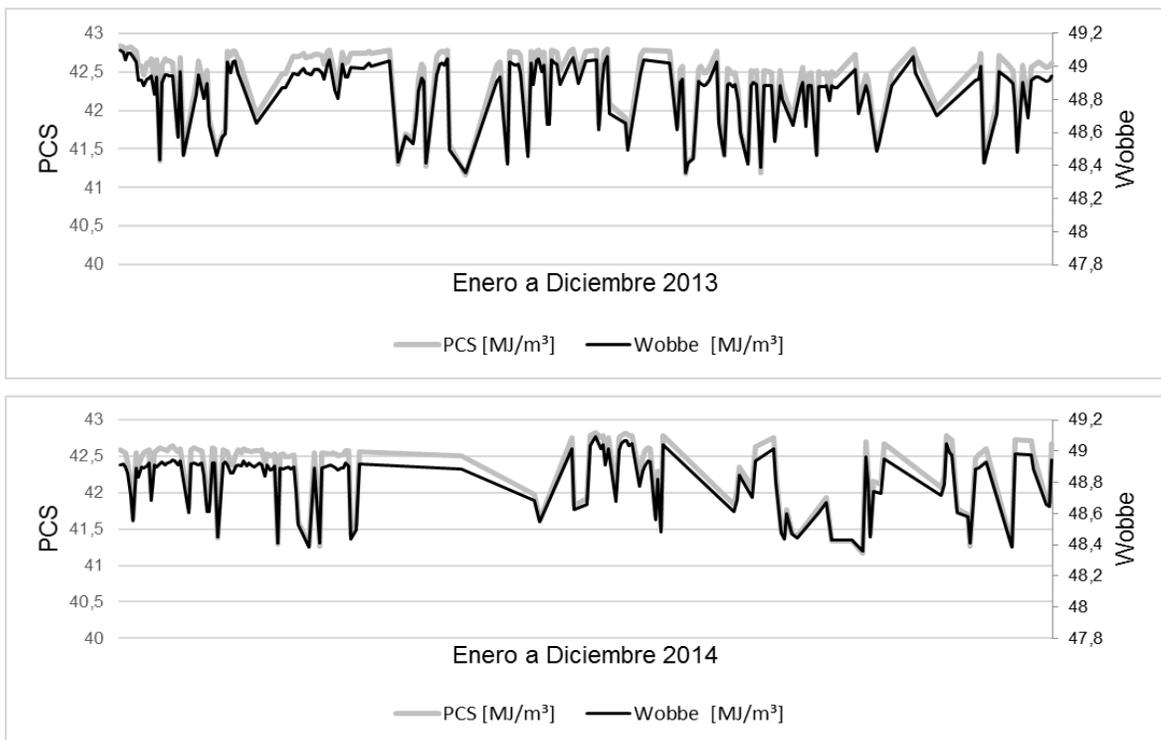


Figura 3-9: Comportamiento del índice de Wobbe y el poder calorífico (PCS) alto

Una vez establecida la correlación del poder calorífico (PCS) y el índice de Wobbe y definidas las series de tiempo comparables con el total de la muestra, se aplicó la formulación descrita en la sección 2 numeral 2.1.3 modelo estadístico y se encontró como parámetro más acertado los resultados obtenidos con la Mediana en comparación con el promedio, media acotada varianza y moda.

De acuerdo con lo anterior, se obtuvieron las mezclas representativas para cada tipo de gas natural, en la Tabla 3-1 se detalla la composición química para cada una de ellas.

Componente	Poder calorífico (PCS) bajo [%mol]	Poder calorífico (PCS) medio [%mol]	Poder calorífico (PCS) alto [%mol]
metano	98.07	88.89	83.14
etano	0.26	5.68	9.54
propano	0.047	0.62	3.66
iso-butano	0.016	1.99	0.54
normal-butano	0.01	0.31	0.57
iso-pentano	0.00	0.29	0.08
normal-pentano	0.00	0.05	0.04
hexanos	0.00	0.02	0.01
Dióxido de carbono	0.04	1.15	1.71
nitrógeno	1.51	0.97	0.56
Poder calorífico (PCS) (MJ/m ³)	37.14	40.12	42.66

Tabla 3-1: Composiciones químicas representativas de gas natural

Igualmente, con el fin de establecer un parámetro base comparable de las composiciones químicas representativas seleccionadas del periodo muestral, se obtuvo un certificado de parametrización y utilización general de la composición química del gas natural en equipos de medición y cálculos específicos utilizado por el comercializador de dicho combustible en la región geográfica objeto de estudio.

Dicha información fue emitida por Empresas Públicas de Medellín E.S.P., con el único propósito de ser utilizado en la presente investigación y se encuentra en el anexo 1 del documento.

En la Tabla 3-2 se observa la composición química del gas natural que en adelante se llamará mezcla base para la comparación de los resultados numéricos y experimentales.

Componente	Poder calorífico (PCS) bajo [%/mol]
metano	97.97
etano	0.27
propano	0.05
iso-butano	0.01
normal-butano	0.00
iso-pentano	0.00
normal-pentano	0.00
hexanos	0.01
Dióxido de carbono	0.03
nitrógeno	1.61
Poder calorífico (PCS) (MJ/m ³)	37.07

Tabla 3-2: Composición base gas natural

3.2 Simulación numérica CHEMKIN Pro ®

La simulación numérica realizada en CHEMKIN Pro ® permitió obtener los resultados para la temperatura de llama adiabática, velocidad de deflagración laminar y un análisis de sensibilidad en cuanto a la afectación de especies químicas sobre las variables estudiadas.

3.2.1 Relacionado con la temperatura de llama adiabática

La temperatura de llama adiabática es una propiedad que depende de la composición del combustible y de las condiciones (temperatura, presión y composición) de los reactivos. Dicha temperatura varía en función de la relación de equivalencia o dosado, sin embargo, no se obtuvieron diferencias muy apreciables entre las mezclas evaluadas. Las mezclas pertenecen a la segunda familia de los hidrocarburos y la variación del metano es menor al 10% entre las mezclas extremas evaluadas, por lo que la composición no alcanza a afectar dicha propiedad en este estudio. La temperatura de llama adiabática debe ser conocida para la obtención de la velocidad de deflagración laminar, la cual permite identificar la posible intercambiabilidad entre gases.

La mayor incidencia en las variaciones de la temperatura de llama adiabática podría ser la del nitrógeno en la composición química, pero para estos gases su participación es mínima y no afecta los resultados. Por regulación CREG 071 de 1999 y CREG 054 de 2007, el porcentaje de nitrógeno se debe mantener por debajo del 3% para el gas natural distribuido en Colombia.

En la Figura 3-10 se observa como el comportamiento de las 3 mezclas representativas y la mezcla base, son idénticas para todos los dosados con una desviación máxima del 0.5% con respecto al gas natural base.

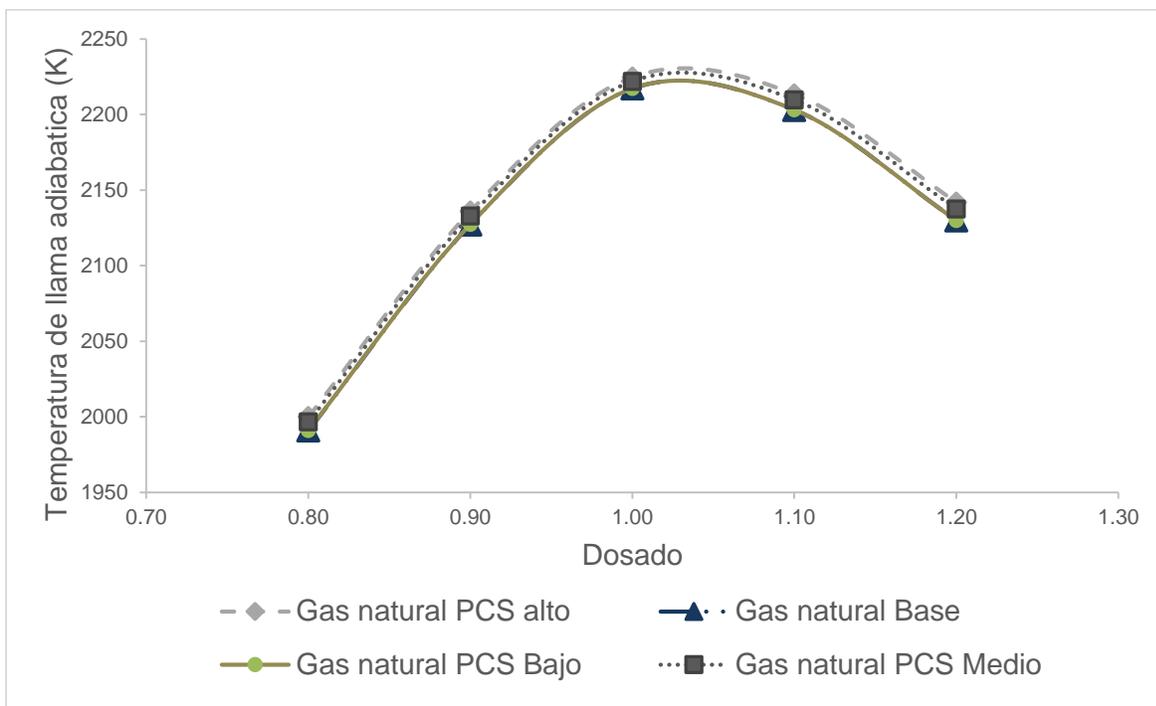


Figura 3-10: Simulación numérica temperatura de llama adiabática

3.2.2 Velocidad de deflagración laminar

La velocidad de deflagración laminar constituye uno de los principales resultados de este estudio, debido a que partiendo de los datos encontrados numéricamente se puede realizar una comparación de los datos experimentales obtenidos bajo la técnica Schlieren.

La Figura 3-11 muestra como el gas natural base y el gas natural con poder calorífico (PCS) superior bajo presentan una velocidad de deflagración similar en los diferentes

dosados, esto debido a que si bien existen cambios en la composición química de estos dos gases, dichos cambios no exceden el 1% respecto al porcentaje de volumen de participación de cada componente químico.

Con respecto a los gases naturales de poder calorífico (PCS) medio y alto, se evidenció un sustancial cambio en el comportamiento de la velocidad de deflagración laminar para los dosados definidos respecto al gas natural base, debido a que el máximo de la velocidad de deflagración laminar del gas natural base se presenta cerca al dosado estequiométrico (dosado relativo de 0.95 aproximadamente) y para los gases naturales con PCS medio y alto la máxima velocidad de deflagración se alcanza para dosados ligeramente ricos, cercanos a 1.1.

Igualmente se encontró que la velocidad de deflagración laminar del gas natural con poder calorífico (PCS) bajo y el gas natural base es menor a la de los gases con poder calorífico (PCS) medio y alto para dosados superiores a 1, por lo que estos últimos son más propensos a experimentar fenómenos de retrollama en los quemadores de premezcla bajo estas condiciones de mezclas ricas.

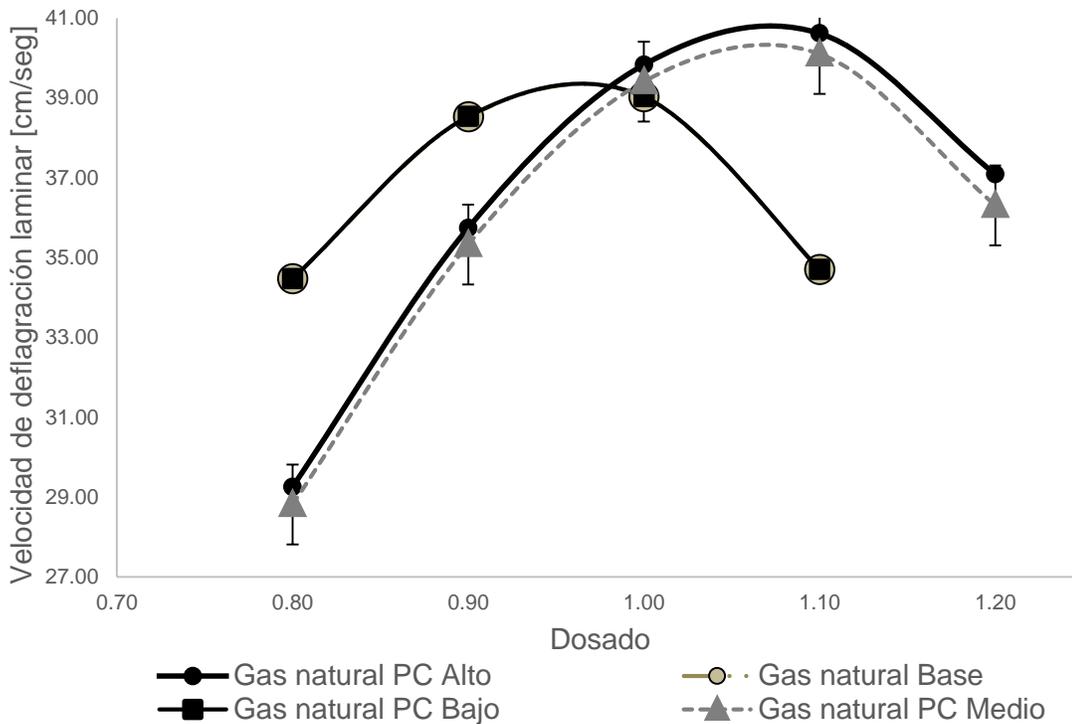


Figura 3-11: Velocidad de deflagración laminar

Entre las mezclas con poder calorífico (PCS) medio y alto se presenta un desarrollo de velocidad de llama simétrico, con una desviación estándar máxima de 0,55 cm/s, lo que puede definirse como gases idénticos en cuanto a dicha propiedad y con una velocidad de deflagración mayor respecto al gas natural base.

Este comportamiento, se presenta debido a que la distribución en cuanto a volumen de los componentes químicos principales del gas natural, es más lineal entre el gas con poder calorífico (PCS) medio y alto, que el presentado entre el poder calorífico (PCS) medio y bajo como se representa en la Figura 3-12.

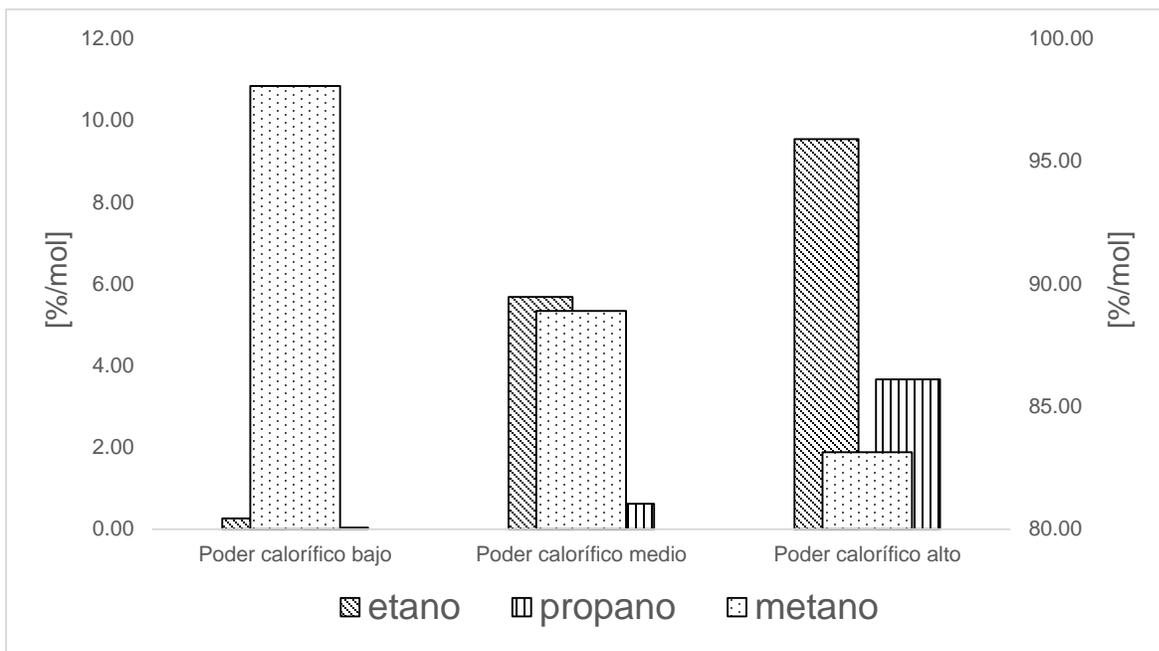


Figura 3-12: Componentes químicos principales gas natural

En términos de intercambiabilidad, se puede afirmar que las composiciones evaluadas en la simulación numérica respecto a la velocidad de deflagración laminar, cumplen con los rangos esperados (27 a 41 cm/seg), con una diferencia en su límite mayor del 16% de las composiciones respecto al gas natural base en dosados de 0,8; sin embargo se debe aclarar que la determinación de la misma depende no solo de dicha propiedad, si no de

la incidencia que esta pueda tener en los componentes químicos y la variación del poder calorífico (PCS) de cada mezcla en particular.

3.2.3 Análisis de sensibilidad

Con el fin de complementar los resultados obtenidos con la simulación de cinética química en el software CHEMKIN Pro® se realizó un análisis de sensibilidad de los mecanismos reaccionales de las composiciones de gas natural simuladas para una relación de equivalencia $\phi = 1$. Se encontró que las reacciones más sensibles y que presentan mayor influencia en la composición de los productos son las identificadas como $\text{CH}_2\text{O} + \text{CH}_3 = \text{HCO} + \text{CH}_4$ (R38) y $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{H} = \text{H}_2\text{O} + \text{OH}$ (R52) del GRIMECH 3.0, denominados como los formaldehídos, perturbando en mayor grado las condiciones de los reactantes en todas las composiciones de gas natural.

En la Figura 3-13 se observa que la reacción $\text{CH}_2\text{O} + \text{CH}_3 = \text{HCO} + \text{CH}_4$ (R38) tiene en su cadena de productos presencia de CH_4 , descomponiendo el CH_2O y generando HCO ; lo que permite una mayor tasa de liberación de calor en el frente de llama dando como resultado un aumento en la velocidad de llama (Medwell, Kalt, & Dally, 2007).

El efecto negativo de la reacción $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{H} = \text{H}_2\text{O} + \text{OH}$ (R52), está dado por la presencia de H_2O en los productos de la reacción, los cuales afectan la propagación de la velocidad de deflagración laminar dado que su efecto es inverso en mezclas con alto contenido de metano (Boushaki, Dhué, Selle, Ferret, & Poinsot, 2012).

La presencia de H_2O en los reactivos, puede ser utilizada para varios fines, como la reducción de los efectos contaminantes y la reducción de las concentraciones de oxígenos afectando notablemente la temperatura de llama (Mazas, Fiorina, Lacoste, & Schuller, 2011).

La reacción $\text{CH}_2\text{O} + \text{CH}_3 = \text{HCO} + \text{CH}_4$ (R38) incide en mayor proporción en las mezcla base y en el gas natural con poder calorífico (PCS) bajo debido a sus altos contenido de metano y la resultante de dicho compuesto en los productos de la reacción, afectando directamente la velocidad de deflagración laminar de estas dos mezclas como se observó en la Figura 3-11.

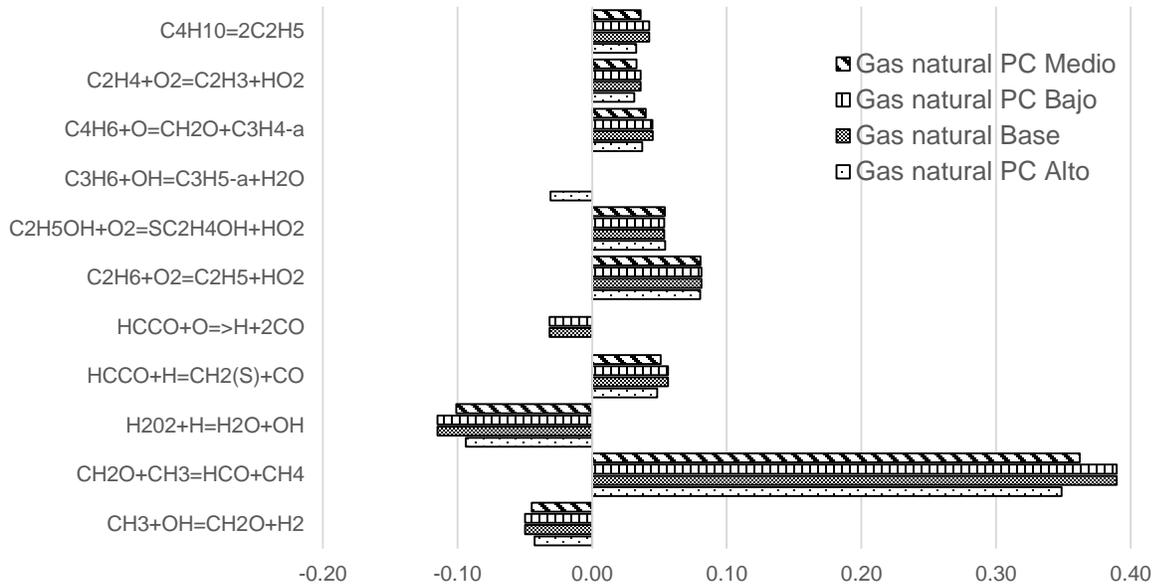


Figura 3-13: Análisis de sensibilidad para $\phi = 1$

3.3 Resultados experimentales

3.3.1 Relacionado con la velocidad de deflagración laminar

Dado que se requería obtener de manera física la composición del gas natural específica, de acuerdo a las mezclas representativas; se siguió la metodología para la adquisición de las mismas siguiendo lo descrito en la sección 1 en el numerar 2.3.1 Adquisición de las muestras físicas de gas natural, logrando obtener únicamente 2 tipos de gas natural con la composición química que se detalla en la

Tabla 3-3.

Componente	Poder calorífico (PCS)	Poder calorífico (PCS)
	bajo [%/mol]	medio [%/mol]
metano	98,07	88,89
etano	0,64	6,85
propano	0,047	0,72

Tabla 3-3: Composición química gas natural experimental

No fue posible obtener la composición exacta en porcentaje de volumen del gas natural con poder calorífico (PCS) medio para el etano ni una composición al menos parecida para la mezcla representativa de gas natural con poder calorífico (PCS) alto.

Sin embargo, de acuerdo a los resultados obtenidos numéricamente mediante la simulación, se puede asumir que el comportamiento descrito por el gas natural con poder calorífico (PCS) medio, será igual para el gas natural con poder calorífico (PCS) alto en cuanto a velocidad de deflagración laminar se refiere; puesto que los datos de uno con respecto al otro tienen una desviación estándar de 0,55 como máximo valor de manera simétrica en los dosados simulados.

En la Tabla 3-4, se presentan los experimentos realizados con la técnica Schlieren para la obtención de la velocidad de deflagración laminar de las dos mezclas de gas natural obtenidas físicamente de acuerdo a lo expuesto anteriormente.

Tipo de gas natural	Dosado ϕ	Numero de repeticiones
Poder calorífico (PCS) Superior bajo	0,8	7
	0,9	7
	1,0	7
	1,1	7
	1,2	7
Poder calorífico (PCS) Superior medio	0,8	6
	0,9	6
	1,0	6
	1,1	6
	1,2	6

Tabla 3-4: Experimentos realizados para determinar la velocidad de deflagración laminar

En la Figura 3-14, se muestran los resultados numéricos y experimentales obtenidos para el gas natural con poder calorífico (PCS) bajo, y se aclara que no fue posible estabilizar la llama en la fase experimental para el factor de equivalencia $\phi = 0,8$ en ninguno de los intentos, posiblemente debido al poco flujo de combustible respecto del oxidante afectando de esta manera la generación y propagación de la llama.

En cuanto a la evolución de la velocidad de deflagración laminar para los dosados definidos, se encontró que la tendencia es similar entre los resultados numéricos y experimentales con desviaciones entre resultados de 0,042 y 0,008 obteniendo una mayor velocidad en la fase experimental a partir de factores de equivalencia mayores a $\phi = 1,0$.

Se puede definir que los resultados experimentales, para un gas natural con poder calorífico (PCS) bajo, confirman los resultados numéricos para dosados cercanos al punto estequiométrico pero aunque la tendencia de la curva es la misma en los resultados numéricos y experimentales, los extremos del resultado experimental presentan una velocidad de deflagración baja para dosados menores $\phi < 1,0$ y velocidades mayores para $\phi > 1,0$.

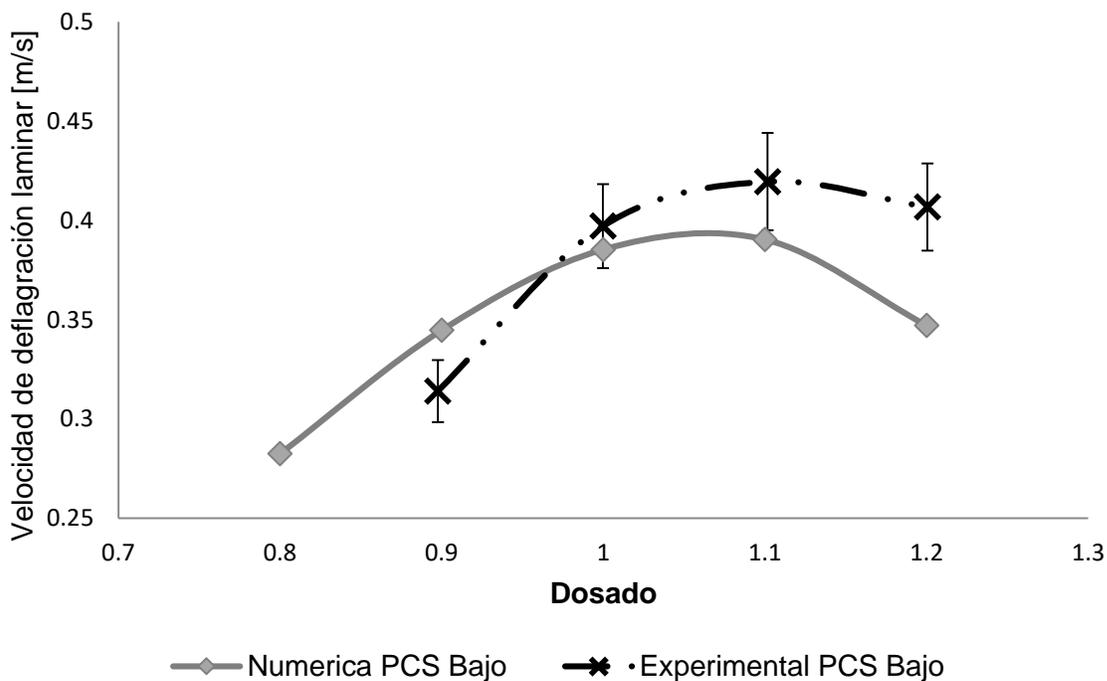


Figura 3-14: Velocidad de deflagración laminar gas natural poder calorífico (PCS) bajo

Para el gas natural con poder calorífico (PCS) medio, se logró evidenciar que los resultados experimentales, predicen de una manera muy ajustada los resultados obtenidos con la simulación numérica, describiendo un comportamiento simétrico en todo el factor de equivalencia definido como se ilustra en la Figura 3-15.

Dado que los resultados experimentales, describen los resultados numéricos para el gas natural con poder calorífico (PCS) medio, podemos afirmar que dichos resultados también pueden describir al gas natural con poder calorífico (PCS) alto, de acuerdo a los resultados ya explicados en el numeral 3.2.2.

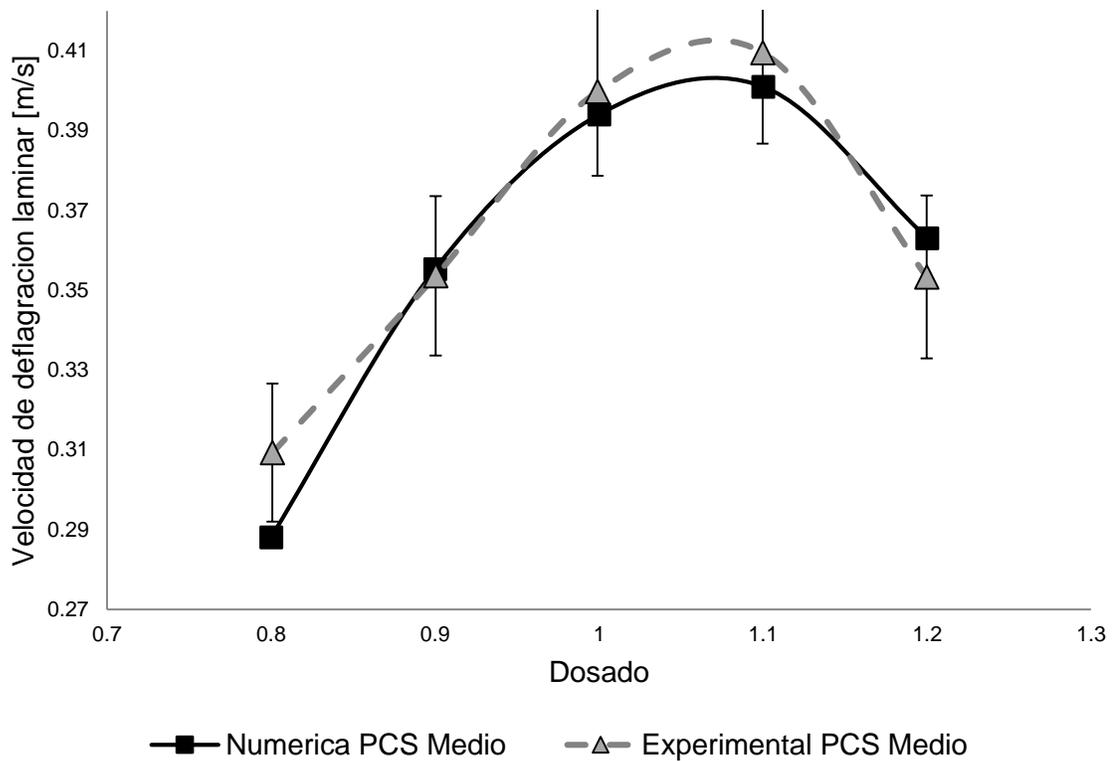


Figura 3-15: Velocidad de deflagración laminar gas natural poder calorífico (PCS) medio

En termino de intercambiabilidad de gases, podemos afirmar que de acuerdo a los resultados obtenidos numéricamente y validados con el procedimiento experimental, los gases naturales con poder calorífico (PCS) alto, medio y bajo seleccionados en el presente estudio, son intercambiables entre sí en cuanto a temperatura de llama

adiabática y velocidad de deflagración laminar se refiere; puesto que los resultados para dichas propiedades y para todos los gases, se encuentran contenidos en una sección muy estrecha y relacionada entre sí para los dosados evaluados; adicionalmente todos los resultados para los gases evaluados coinciden de una manera casi exacta en el punto estequiométrico como se ilustra en la Figura 3-16.

Sin embargo, se debe hacer la claridad que si bien existe intercambiabilidad entre los tres gases de acuerdo a los resultados ya expuestos, esto no garantiza la combustión eficiente de la misma o la aparición de efectos fenomenológicos indeseables y se hace necesario validar los demás criterios en cuanto a intercambiabilidad de gases se refiere como son los índices de Wobbe, Weaver y AGA.

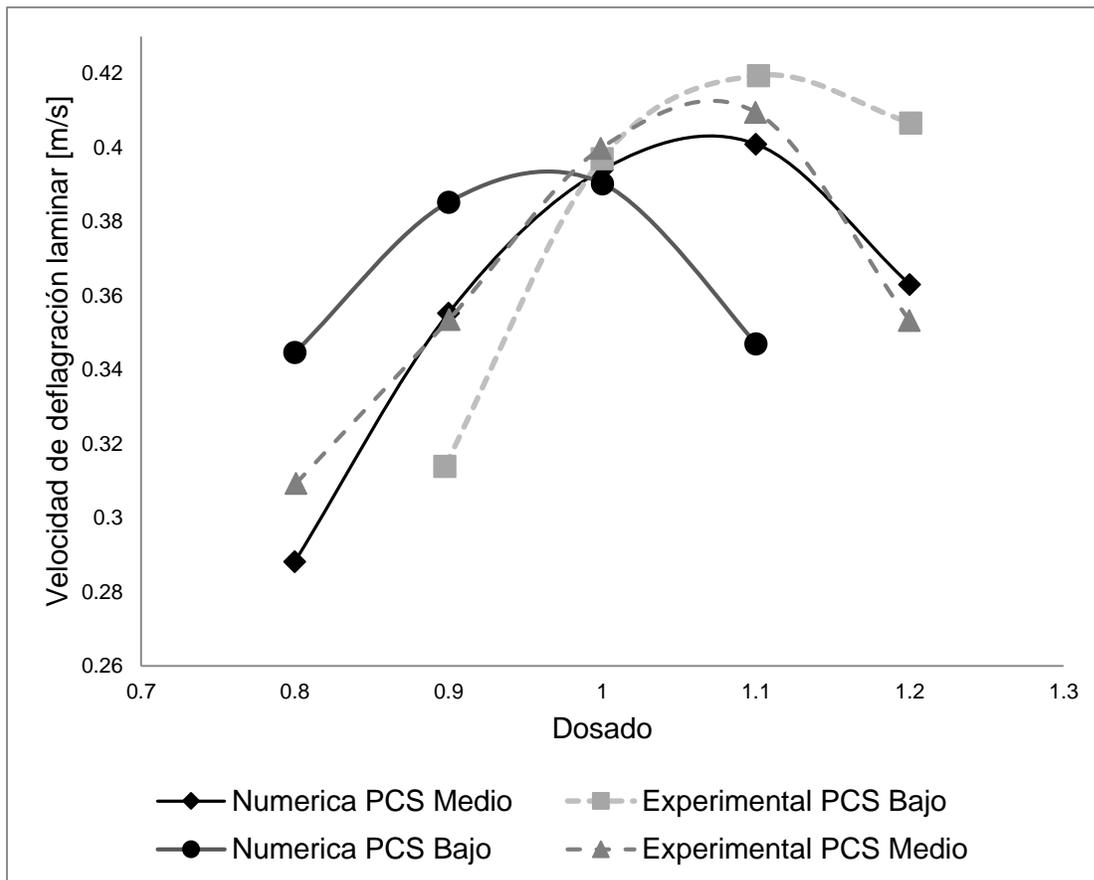


Figura 3-16: Comparación velocidad de deflagración laminar gas natural con poder calorífico (PCS) bajo y medio.

3.4 Gradientes críticos de velocidad

3.4.1 Relacionado con Retrollama

Se realizaron las observaciones para cada dosado variando la velocidad de deflagración hasta encontrar el gradiente crítico para las mezclas de gas natural representativas con poder calorífico (PCS) bajo y medio como se ilustra en la Tabla 3-5

Tipo de gas natural	Dosado ϕ	Numero de repeticiones
Poder calorífico (PCS) Superior bajo	0,8	6
	0,9	6
	1,0	7
	1,1	5
	1,2	9
Poder calorífico (PCS) Superior medio	0,8	6
	0,9	6
	1,0	4
	1,1	5
	1,2	5

Tabla 3-5: Experimentos realizados para Retrollama

El comportamiento de la llama en el gradiente crítico de cada dosado, presenta un movimiento circular e inestable en toda la pared interna del quemador; el cual de manera repetitiva intenta introducirse al interior del quemador pero sin apagarse. Esto es debido a que al reducir el caudal de la premezcla la velocidad de deflagración se hace mayor que la velocidad de flujo.

En la Figura 3-17 se ilustra de manera secuencial el comportamiento de la llama.

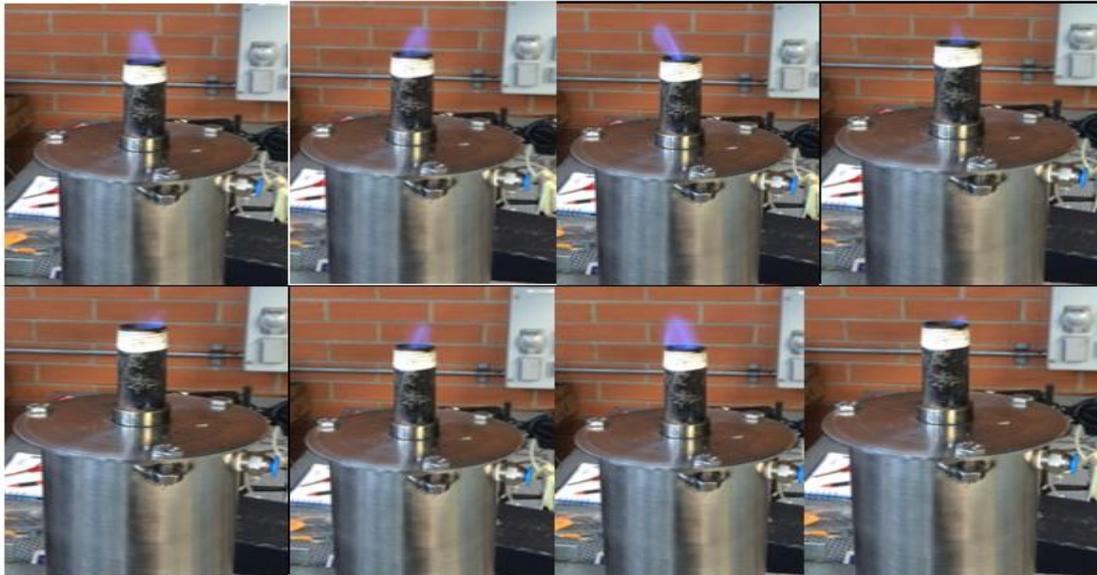


Figura 3-17: Efecto Retrollama de una llama de premezcla de gas natural

En la Figura 3-18 se ilustra los gradientes críticos de desprendimiento de llama o Retrollama para el gas natural con poder calorífico (PCS) bajo y gas natural con poder calorífico (PCS) medio, en donde se encontró un comportamiento típico de un hidrocarburo 100% metano (Delbourg P & Lafon J, 1971), en donde los gradientes críticos en función de la tasa de aireación definen una llama estable por debajo de los 200 seg^{-1} y un fenómeno de retrollama por encima de gradientes de 200 seg^{-1} .

Para el gas con poder calorífico (PCS) bajo no se pudo encontrar el gradiente crítico para el dosado $\phi = 0,8$ lo cual era de esperarse dado que tampoco se logró estabilizar dicha llama durante la prueba experimental de la velocidad de deflagración debido al poco flujo de combustible respecto del oxidante, afectando de esta manera la generación y propagación de la llama.

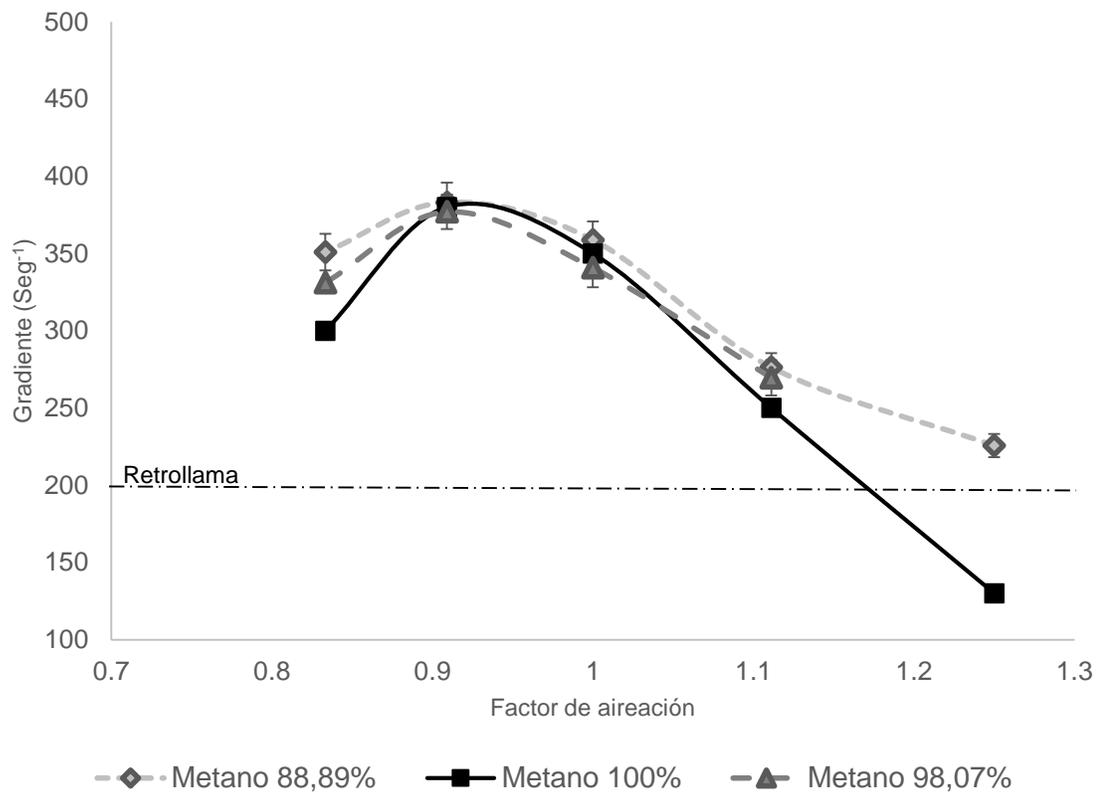


Figura 3-18: Gradientes críticos de velocidad para el efecto Retrollama

3.4.2 Relacionado con Desprendimiento

Se realizaron las observaciones para cada dosado variando la velocidad de deflagración laminar hasta encontrar el gradiente crítico del desprendimiento de llama para las mezclas de gas natural representativas con poder calorífico (PCS) bajo y poder calorífico (PCS) medio como se ilustra en la Tabla 3-6.

Tipo de gas natural	Dosado ϕ	Numero de repeticiones
Poder calorífico (PCS) Superior bajo	0,8	10
	0,9	12
	1,0	14
	1,1	9
	1,2	16
	Poder calorífico (PCS) Superior medio	0,8
0,9		8
1,0		10
1,1		11
1,2		10

Tabla 3-6: Experimentos realizados para Desprendimiento

El comportamiento de la llama en el gradiente crítico de cada dosado, presenta una inestabilidad en el frente de llama; lo cual se evidencia de manera física con el desprendimiento de la llama de manera inmediata del quemador, pero con una formación claramente visible del cono azul en la pared interna de la llama, evidenciando los efectos de la velocidad de flujo en la formación y extinción de la llama.

En la Figura 3-19 se ilustra de manera secuencial el desprendimiento de la llama.



Figura 3-19: Efecto Desprendimiento de una llama de premezcla de gas natural

En la Figura 3-20, se ilustra los gradientes críticos para el desprendimiento de llama o Desprendimiento para el gas natural con poder calorífico (PCS) bajo metano al 98,07% y gas natural con poder calorífico (PCS) medio metano al 88,89% encontrando como los gases evaluados se ubican dentro de la región del desprendimiento de llama para un hidrocarburo 100% metano (Delbourg P & Lafon J, 1971), en donde los gradientes críticos están en función de la tasa de aireación con gradientes por encima de los 1200 seg^{-1} .

Se observa que para las mezclas de gas natural con metano al 98,07% y 88,89% su rango de operación es mucho más amplio que para el hidrocarburo con 100% metano; dado por la presencia de etano, propano y nitrógeno, lo cual benefician la liberación de radicales activos y aceleran la velocidad de deflagración laminar.

En cuanto a la intercambiabilidad de los gases naturales evaluados, se observa que tienen una mayor resistencia al fenómeno de extinción dado que sus valores de gradiente crítico se encuentran por encima de los 3200 seg^{-1} y se concluye que para la operación en equipos de combustión no se compromete la estabilidad y seguridad de los mismos dado que estos se encuentran dentro de la zona de operación segura del gas natural.

Para el gas con poder calorífico (PCS) bajo no se pudo encontrar el gradiente crítico para el dosado $\phi = 0,8$ lo cual era de esperarse dado que tampoco se logró estabilizar dicha llama durante la prueba experimental de la velocidad de deflagración ni el gradiente crítico Retrollama debido al poco flujo de combustible respecto del oxidante, afectando de esta manera la generación y propagación de la llama.

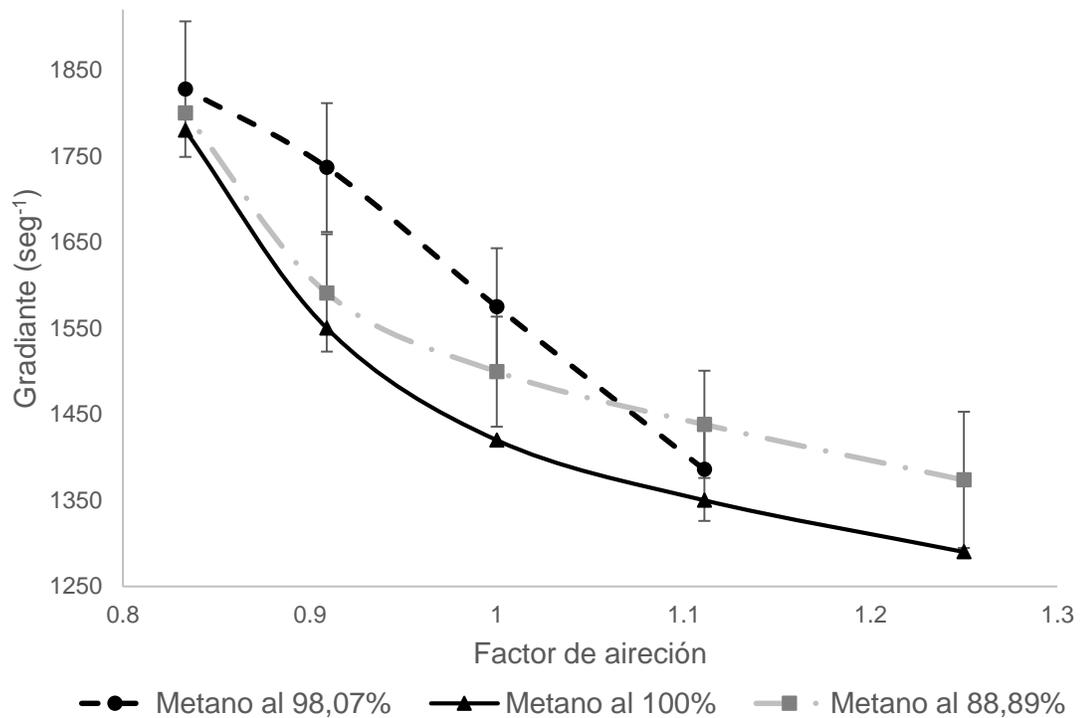


Figura 3-20: Gradiente crítico de velocidad para el efecto Desprendimiento

3.5 Volumen de humos y aire estequiométrico

Se realizaron los cálculos para las propiedades de combustión para volúmenes de aire, humos húmedos y humos secos en las mezclas representativas objeto de estudio con el software COMBUGAS del grupo GASURE de la Universidad de Antioquia a condiciones estándar y aplicando las ecuaciones relacionadas en el capítulo 1.

En la Figura 3-21 se ilustran los resultados para cada propiedad relacionadas con las mezclas representativas objeto de estudio y en la Tabla 3-7 se ilustran las variaciones en términos de porcentaje para cada mezcla representativa respecto a la mezcla base.

Para el volumen de aire estequiométrico, se encontró que la variación de dicha propiedad entre las mezclas con respecto a la mezcla base en límites superiores, no excede el 13% de variación; teniendo en cuenta que dicha propiedad es muy sensible a la variación del contenido de carbono lo que demandaría mayor aire estequiométrico para oxidar el combustible.

En cuanto a los humos húmedos y humos secos, se encontró que las variaciones tampoco exceden el 13% de las mezclas base en límites superiores; lo que indica que existe una linealidad en el cambio de las propiedades de las mezclas desde las más ricas hasta las más pobres en cuanto a contenido energético se refiere para las mezclas evaluadas.

En términos de intercambiabilidad se puede decir que las propiedades de combustión de las mezclas evaluadas no se ven comprometidas para el funcionamiento en equipos de combustión con aire de premezcla donde la inyección de aire es atmosférico; pero si existe la posibilidad de mejorar su eficiencia en cuanto a oxidación del combustible se refiere en equipos en los que el flujo de aire puede ser controlado o ajustado según las necesidades de combustión.

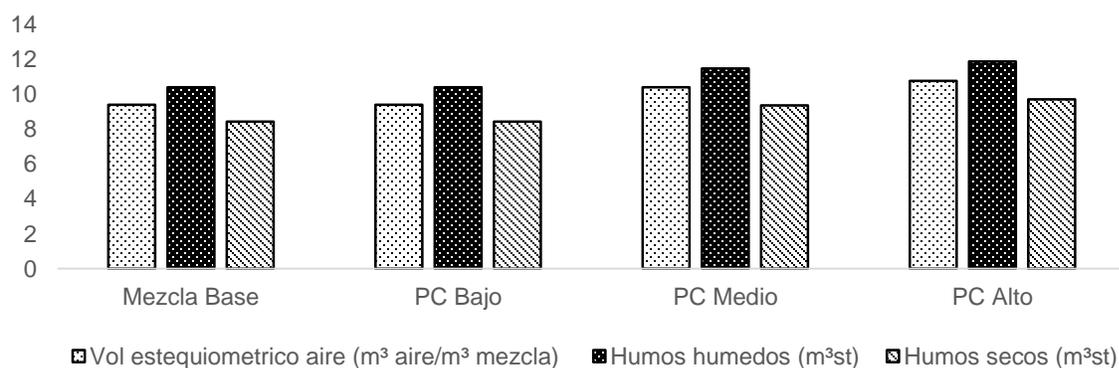


Figura 3-21: Resultados volumen de humos y aire estequiométrico

	% Desviación Vol. estequiométrico aire	% Desviación Humos húmedos	% Desviación Humos secos
PCS Alto	12,80	12,46	13
PCS Medio	9,69	9,43	10,08
PCS Bajo	0,07	0,06	0,06

Tabla 3-7: Variación de las propiedades de las mezclas representativas respecto a la mezcla base

3.6 Emisiones

Con respecto a la producción de dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO) y oxígeno (O_2) en la combustión del gas natural con poder calorífico (PCS) bajo y el gas natural con poder calorífico (PCS) medio, a diferentes dosados, se encontró que mientras para el gas natural con poder calorífico (PCS) medio existió más producción durante la combustión de dióxido de carbono (CO_2) que lo encontrado en el gas natural con poder calorífico (PCS) bajo; las emisiones de oxígeno (O_2), fueron mayores para el gas natural con poder calorífico (PCS) bajo que para el gas natural con poder calorífico (PCS) medio; esto posiblemente debido a los efectos que produce la concentración de propano y etano en la mezcla de gas natural con poder calorífico medio, aumentando la producción de CO_2 y consumiendo mayor oxígeno durante el desarrollo de la combustión, beneficiando así su contenido energético.

La producción de monóxido de carbono (CO) durante la combustión, se vio marcada principalmente por los dosados y variaciones de la cantidad de combustible y el agente oxidante (aire). Para el gas natural con poder calorífico (PCS) bajo se evidenció mayor CO para los dosados extremos que para el punto estequiométrico y para el gas natural con poder calorífico (PCS) medio se encontró mayor producción de CO en el punto estequiométrico que en los dosados extremos.

Para el gas natural con poder calorífico (PCS) bajo, no fue posible estabilizar la llama para dosado de 0,8, lo cual era un efecto esperado debido al poco flujo de combustible respecto del oxidante.

En la Figura 3-22 se muestran los valores medidos del dióxido de carbono (CO_2) para el gas natural con poder calorífico (PCS) bajo y el gas natural con poder calorífico (PCS) medio a diferentes dosados, encontrando que la variación entre ellos está comprendida entre el 18% y el 24% y ninguno excede el 3% de producción de CO_2 siendo menor para el punto estequiométrico y mayor para el dosado igual a 0,9; condición extrema para el gas natural con poder calorífico (PCS) bajo en cuanto a relación aire – combustible se refiere.

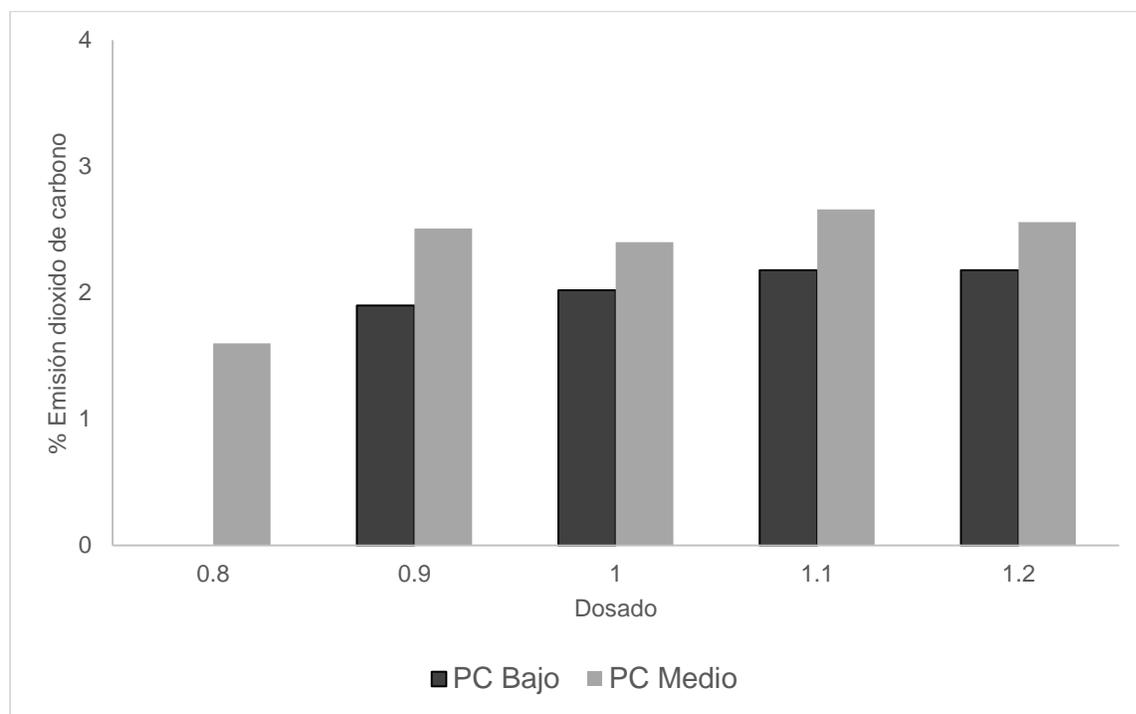


Figura 3-22: Producción de dióxido de carbono en las mezclas de gas natural

En la Figura 3-23 se muestran los resultados obtenidos en cuanto a la producción de monóxido de carbono producto de la combustión del gas natural con poder calorífico (PCS) bajo y el gas natural con poder calorífico (PCS) medio; encontrando una diferencia

esperada en el punto estequiométrico entre los dos gases, evidenciando mayor producción de monóxido de carbono al ambiente del gas con poder calorífico (PCS) medio; esto dado principalmente por su mayor temperatura de llama, lo que representa un mayor contenido energético favoreciendo la producción de monóxido de carbono por disociación de CO_2 .

La emisión de monóxido de carbono en el gas con poder calorífico (PCS) medio es controlable y se puede disminuir variando el factor de aireación en la premezcla; sin embargo, se debe tener en cuenta que al reducir dicho factor igualmente afecta de forma negativa el contenido energético del mismo.

Con respecto al gas natural con poder calorífico (PCS) bajo, la producción de monóxido de carbono se puede considerar estable en los diferentes dosados evaluados; dado que dicha producción está comprendido entre las 47 ppm y 51 ppm. Lo que se considera normal en cuanto a emisiones se refiere para ambos gases.

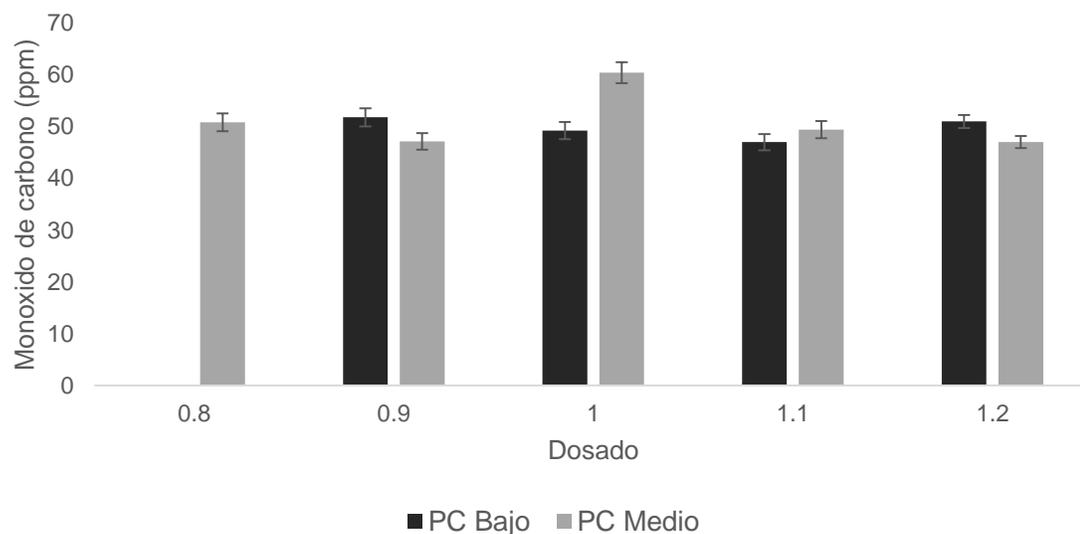


Figura 3-23: Producción monóxido de carbono

Relacionado con la intercambiabilidad de los gases en función de las emisiones medidas en el laboratorio, se encontró que las variaciones en el dióxido de carbono (CO_2) y monóxido de carbono (CO) no son significativos entre el gas natural con poder calorífico (PCS) bajo y el gas natural con poder calorífico (PCS) medio, debido a que sus variaciones en los valores evaluados tienen un promedio del 13% y se explican claramente con la variación del contenido energético de cada mezcla.

Dado lo anterior se concluye que la operatividad de los equipos de combustión, no se ve comprometido con el suministro de dichos combustibles.

3.7 Rendimiento térmico y observación de llama en un gasodomesticos de uso convencional

De acuerdo a la prueba de rendimiento según lo descrito en la norma técnica colombiana 2832-1 y 2832-2 y lo descrito el capítulo 2 en la sección 2.6, se encontró que el rendimiento para el gas natural con poder calorífico (PCS) bajo con metano al 98% fue del 43,4% y para el gas natural con poder calorífico (PCS) medio con metano al 88% fue de 40,4%, observando una diferencia entre ambos de tan solo el 3%.

Se hace evidente una relación directa del rendimiento en gasodomesticos convencionales con respecto a la cantidad de metano de la mezcla de gas natural inyectada al gasodomesticos y la poca afectación de la misma en cuanto al contenido de etano y propano se refiere; dado que a medida que la cantidad de metano disminuye, el rendimiento de la misma también lo hace, como se demuestra en los resultados obtenidos en investigaciones anteriores para un gas natural con contenido de metano 100% su rendimiento fue de 51,38% (Rubio-Gaviria, 2015), y un gas natural con contenido de metano del 96% rendimiento de 44,91% (A. Amell, Cadavid, & Ospina Juan, 2001) todos a condiciones iguales de laboratorio y aplicación de la misma normatividad.

En cuanto a la morfología de la llama, se observó para ambos gases una buena estabilidad, no se presentaron problemas en el encendido y su color azul intenso no varió en ningún momento del ensayo.

En la Figura 3-24 se observó una estructura de llama estable sin formación de puntas amarillas para el gas natural con poder calorífico (PCS) bajo.

En la Figura 3-25 para el gas natural con poder calorífico (PCS) medio, se observó un mayor alargamiento de puntas, posiblemente debido a una captura pobre de aire de premezcla producto de la composición química del gas, permitiendo así un ambiente ideal para la formación de penachos amarillos y emisión de monóxido de carbono.

Se puede concluir que, si bien existe una pequeña variación del rendimiento y comportamiento del gasodomestico en función de la composición química del gas natural, este se hace despreciable en términos de intercambiabilidad, puesto que una

diferencia del 3% en su rendimiento y la mínima formación de puntas amarillas no afectan la calidad ni compromete el buen funcionamiento de los gasodomeísticos.



Figura 3-24: Estructura de llama gas natural poder calorífico (PCS) bajo



Figura 3-25: Estructura de llama gas natural poder calorífico (PCS) medio

3.8 Intercambiabilidad de los gases naturales estudiados

Hemos encontrado que en cuanto a propiedades de las mezclas representativas, propiedades y efectos fenomenológicos de la combustión, las mezclas objeto de estudio se ajustan a los parámetros operativos para el funcionamiento en cualquier tipo de quemador ajustado a la mezcla base, el cual nos ha servido como parámetro comparativo en la presente investigación.

Finalmente para determinar la intercambiabilidad de los gases naturales representativos, se obtuvo el índice de Wobbe para cada mezcla ilustrado en la Figura 3-26 como el

contenido energético de la combustión, observando que la variación del índice de Wobbe no excede el 5,5% entre cada una de las mezclas representativas; logrando así un alto grado de intercambiabilidad dado que, según la literatura para el índice de Wobbe en mezclas de gas natural, es aceptable porcentajes mucho más altos de intercambiabilidad como lo registra México en 9,5%, Australia en 11,54%, Alemania en 18,48% Unión Europea y Reino Unido en 13,35% (Suarez, Osorio, & Blanco, 1986).

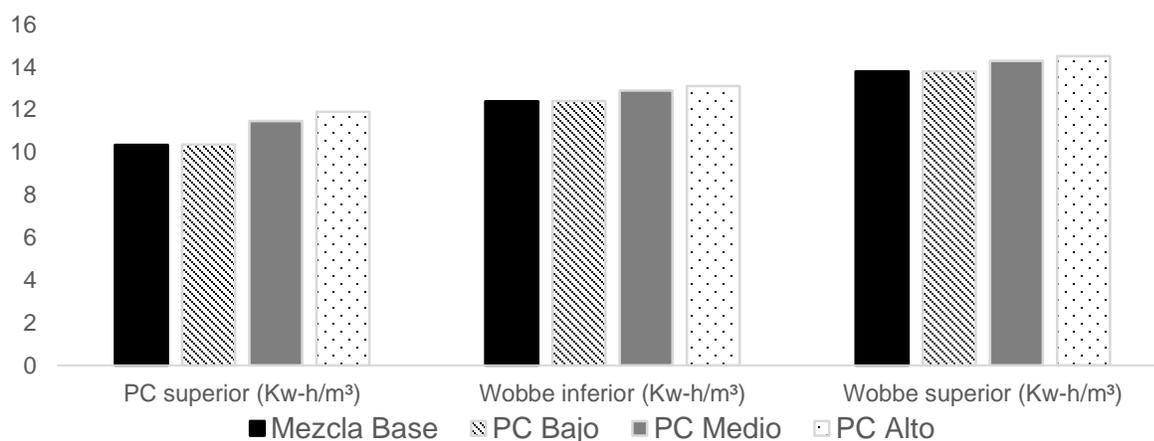


Figura 3-26: Contenido energético de las mezclas de gas natural estudiadas

Si bien la mezcla con mayor ajuste en cuanto a índice de Wobbe respecto a la mezcla base es el gas natural con poder calorífico (PCS) bajo con una variación de 0,07%, se hace necesario dar claridad que según las proyecciones y tendencias encontradas y descritas en detalle en el capítulo uno de la presente investigación, la mezclas que viene ganado participación en el mercado energético colombiano en cuanto a gas natural se refiere, son aquellas con poder calorífico (PCS) medio y alto, lo cual obtuvieron variaciones del índice de Wobbe sobre la mezcla base de 3,9% y 5,4% respectivamente por lo que es más conveniente ajustar los parámetros de combustión teniendo como base dichas composiciones químicas.

Se calcularon los índices de Weaver utilizando las ecuaciones descritas en la tabla 1.4 obteniendo la intercambiabilidad con respecto a la cual se genera el calor y con respecto a suministro de aire para combustión; obteniendo como resultado para las mezclas con poder calorífico (PCS) bajo y poder calorífico (PCS) alto resultados satisfactorios en

cuanto a la generación de calor de 1,04 y en cuanto al suministro de aire de 1,09 lo que indica que dichas mezclas cumplen criterios de intercambiabilidad debido a que según la condición del índice de Weaver dicho resultado debe ser igual a 1,0 (Ortiz J. M., 2014), para considerar que dichas mezclas sean intercambiables entre sí.

El factor de compresibilidad definido en el AGA 8 permite determinar la relación de la presión y la temperatura en cuanto a los efectos producidos sobre una partícula de gas natural en función de su composición química a condiciones estándar y condiciones reales (Starling & J.L., 1992), por lo que se calculó dicho factor para el gas natural con poder calorífico (PCS) bajo y el gas natural con poder calorífico (PCS) medio, mediante el programa MATLAB usando el procedimiento descrito en la sección 2.5 de la metodología, variando la temperatura y presión de ambos gases, obteniendo un factor de compresibilidad para el gas natural con poder calorífico (PCS) bajo de 0,998 y para el gas natural con poder calorífico (PCS) medio de 0,997 lo que representa una variación despreciable en cuanto a intercambiabilidad se refiere ilustrado en la figura 3-27.

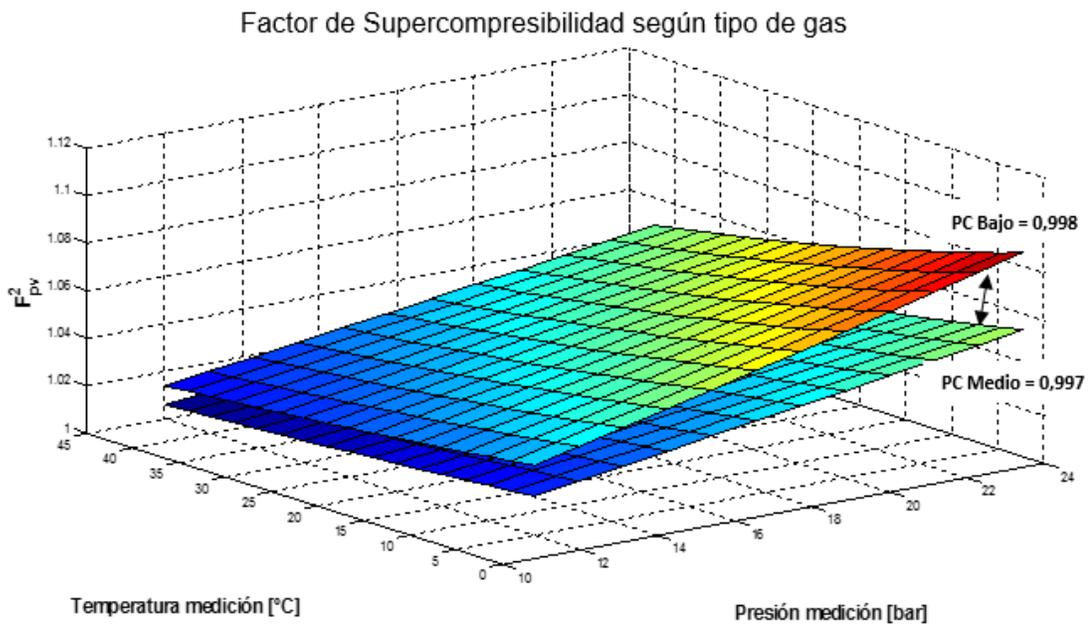


Figura 3-27: Región de operación del factor de supercompresibilidad para el gas con poder calorífico (PCS) Bajo y medio.

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

Para determinar la intercambiabilidad en equipos de combustión convencionales de los gases naturales suministrados para Antioquia en función de la variación de la composición química, se determinaron unas mezclas representativas de gas natural por métodos estadísticos tomando como base una cromatografía de un periodo de tiempo específico de un sitio web oficial donde se registra la composición química del gas natural suministrado para el departamento de Antioquia. Se determinó la temperatura de llama adiabática y la velocidad de deflagración laminar mediante simulación numérica, además se obtuvieron cálculos de humos, aire estequiométrico y contenido energético de las mezclas de gas natural.

Experimentalmente se obtuvieron 2 gases naturales con poder calorífico (PCS) bajo y medio, a los cuales se les realizaron mediciones de velocidad de deflagración laminar, efecto Retrollama, Desprendimiento y emisiones; por lo que los resultados obtenidos permiten realizar las siguientes afirmaciones:

Se encontró que la manera más correcta de identificar el tipo de gas natural suministrado para Antioquia es desde la cantidad de poder calorífico (PCS) que este contiene y no desde el nombre de su fuente de extracción; debido a que el mismo puede tener variaciones significativas en su composición química aun así proviniendo desde la misma fuente de extracción.

Con los intervalos de tiempo definidos se encontró que la mediana es el estadístico que describió de manera completa la composición química seleccionada de cada intervalo respecto al universo muestral de los periodos de tiempo seleccionados con una desviación estándar del 0,24% representado principalmente en la variación porcentual del contenido de metano, etano y propano de cada composición química.

Se realizaron simulaciones numéricas con el software CHEMKIN Pro® utilizando el mecanismo reaccional Grimech 3.0 con las mezclas representativas seleccionadas, encontrando una temperatura de llama adiabática igual para los 3 gases y una velocidad de deflagración laminar menor para el gas natural con poder calórico bajo respecto a los gases con poder calorífico (PCS) medio y alto; resultados que se pudieron validar experimentalmente utilizando el método Schlieren en los gases naturales con poder calorífico (PCS) bajo y medio; lo que permite concluir que existe intercambiabilidad entre los gases evaluados dado que las mayores velocidades de deflagración laminar se encontraron entre los 39 cm/s y 41 cm/s, diferencias que no afectan significativamente la intercambiabilidad de los gases naturales evaluados.

Los resultados de gradientes críticos de velocidad permitieron determinar la región de operación segura de las mezclas de gas natural, entre la retrollama y el límite de desprendimiento de llama encontrando que en cuanto a operatividad no se compromete la seguridad de los equipos de combustión.

Se determinaron los humos húmedos y humos secos como propiedades complementarias relacionadas con la intercambiabilidad de los gases, donde se encontró que las variaciones no exceden el 13% respecto a la mezcla base de gas natural en límites superiores; lo que indica que existe una linealidad en el cambio de las propiedades de las mezclas desde las más ricas hasta las más pobres en cuanto a contenido energético se refiere por lo que no afecta la intercambiabilidad de los gases evaluados.

Las emisiones evaluadas en los gases naturales con poder calorífico (PCS) medio y poder calorífico (PCS) bajo para el dióxido de carbono (CO₂) presentaron variaciones entre el 18% y 24% y ninguno excedió el 3% de producción de CO₂, lo que representa un resultado acorde a lo esperado dado la variación del contenido energético. En cuanto al monóxido de carbono (CO) sus emisiones estuvieron entre las 47 ppm y 51 ppm. Lo que se considera normal en cuanto a emisiones se refiere para ambos gases. También son intercambiables

El rendimiento encontrado en el gasodomestico convencional fue el esperado para los gases naturales evaluados, y su diferencia en cuanto a rendimiento y contenido energético de la mezcla se refiere, fue del 3%, lo que demuestra que existe una buena intercambiabilidad sin que se haga necesario aplicar estrategias de atenuación o mejoramiento de dicha intercambiabilidad.

La variación del índice de Wobbe calculado para las mezclas de gas natural con poder calorífico (PCS) bajo, medio y alto no excedió el 5,5%, para el índice de Weaver en cuanto a generación de calor fue de 1,04 y suministro de aire de 1,09; para los factores de compresibilidad según AGA 8 las variaciones entre los mismos fue de 0,001; concluyendo así por los tres índices que existe un alto grado de intercambiabilidad con estándares superiores a los referenciados internacionalmente en las mezclas de gas natural evaluadas para el funcionamiento en quemadores atmosféricos; por lo que no se hace necesario aplicar estrategias que posibiliten la intercambiabilidad de los mismos puesto que fueron suficientemente demostrados con los resultados obtenidos en los quemadores de premezcla de aire inducido durante el desarrollo de la investigación.

Es importante señalar que si bien se encontró una alta intercambiabilidad de los gases naturales evaluados en los quemadores de premezcla, estos no definen los comportamientos que se puedan presentar en los motores de combustión interna, turbinas de alta eficiencia o variaciones de las condiciones de presión y temperatura en los equipos de combustión.

4.2 Recomendaciones

El desarrollo de esta investigación, permite enmarcar en un contexto de calidad de gas natural al sector regional y nacional permitiendo el complemento de nuevos estudios en cuanto a diversidad de fuentes de producción y extracción de gas natural se refiere; dado las perspectivas de globalización del mercado energético mundial.

La normatividad colombiana en cuanto a calidad del gas natural debe ser revisada y ajustada a las nuevas tecnologías de producción de gas natural sea licuado, enriquecido o sustituido por otras mezclas Syngas o biometano, lo cual dependerá de factores críticos de eficiencia y operatividad segura en cuanto a equipos y emisiones al medio ambiente

se refiere por lo que dicha investigación puede servir como base para fijar los límites de calidad permisibles en cuanto a intercambiabilidad de gases.

Actualmente existen desarrollos tecnológicos y equipos mucho más sofisticados para la determinación de las diferentes propiedades de combustión y el estudio de las llamas de premezcla de gas natural, como lo son las tecnologías laser, espectroscopia, quimioluminiscencia entre otros, que pueden permitir la validación de los resultados de la presente investigación de una manera diferente y posiblemente con resultados más exactos.

A. Anexo:

Bibliografía

- Amell, A. A. (2007). Influence of altitude on the height of blue cone in a premixed flame. *Applied Thermal Engineering*, 27(2), 408–412.
doi:10.1016/j.applthermaleng.2006.07.013
- Amell, A. A., Cesar, B. A., & Bladimir, S. (n.d.). Efectos del cambio de la composición química del gas natural sobre el comportamiento de turbinas a gas: Una aproximación al caso colombiano. Retrieved April 22, 2015, from <http://www.bdigital.unal.edu.co/26475/1/24071-84240-1-PB.pdf>
- Amell, A., Cadavid, francisco, & Ospina Juan. (2001). Análisis comparativo de eficiencia en cocción con gas natural y electricidad. *Facultad de Ingenierías*, 22, 101–105.
Retrieved from <http://jaibana.udea.edu.co/investigacion/grupogas/docs/comparativo.pdf>
- Arrieta, C. E., & Amell, A. A. (2014). Combustion analysis of an equimolar mixture of methane and syngas in a surface-stabilized combustion burner for household appliances. *Fuel*, 137, 11–20. doi:10.1016/j.fuel.2014.07.079
- Benim, A. C., Syed, K. J., Benim, A. C., & Syed, K. J. (2015). Chapter 7 – Flashback Due to Turbulent Flame Propagation in the Core Flow. In *Flashback Mechanisms in Lean Premixed Gas Turbine Combustion* (pp. 45–57). doi:10.1016/B978-0-12-800755-6.00007-6
- Boushaki, T., Dhué, Y., Selle, L., Ferret, B., & Poinso, T. (2012). Effects of hydrogen and steam addition on laminar burning velocity of methane–air premixed flame: Experimental and numerical analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(11), 9412–9422. doi:10.1016/j.ijhydene.2012.03.037
- Bp, & International Gas Union. (2010). Guidebook to Gas Interchangeability and Gas Quality. *Secretary*, 154. Retrieved from [http://www.igu.org/igu-publications-2010/Guidebook to Gas Interchangeability and Gas Quality 23Aug10.pdf](http://www.igu.org/igu-publications-2010/Guidebook%20to%20Gas%20Interchangeability%20and%20Gas%20Quality%2023Aug10.pdf)
- Brown, A. S., Milton, M. J. T., Cowper, C. J., Squire, G. D., Bremser, W., & Branch, R. W. (2004). Analysis of natural gas by gas chromatography. *Journal of Chromatography*

- A, 1040(2), 215–225. doi:10.1016/j.chroma.2004.04.007
- Brucart, E. B. (1987). *Gas natural: características, distribución y aplicaciones industriales*. Reverte. Retrieved from <https://books.google.com/books?id=QKM6R6OlnP8C&pgis=1>
- Cardona, C. A., & Amell, A. A. (2013). Laminar burning velocity and interchangeability analysis of biogas/C₃H₈/H₂ with normal and oxygen-enriched air. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(19), 7994–8001. doi:10.1016/j.ijhydene.2013.04.094
- Chen, Z., Qin, C., & Zhang, Y. (2014). Flame stability of partially premixed combustion for PNG/LNG interchangeability. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 21, 467–473. doi:10.1016/j.jngse.2014.09.018
- CREG. Especificaciones de calidad del gas natural en el punto de entrada del sistema de transporte (2007). Colombia. Retrieved from [http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/2b8fb06f012cc9c245256b7b00789b0c/7b4ee1f9a7c1a73d0525785a007a6e58/\\$FILE/D-017 CALIDAD EN TRANSPORTE DE GAS.pdf](http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/2b8fb06f012cc9c245256b7b00789b0c/7b4ee1f9a7c1a73d0525785a007a6e58/$FILE/D-017%20CALIDAD%20EN%20TRANSPORTE%20DE%20GAS.pdf)
- Dam, B., Love, N., & Choudhuri, A. (2011). Flashback propensity of syngas fuels. *Fuel*, 90(2), 618–625. doi:10.1016/j.fuel.2010.10.021
- Delbourg P., & Lafon J. (1971). *Interchangeabilité Des Gaz. Assoc Tech L'Industrie Du Gaz*. Retrieved from <http://www.worldcat.org/title/interchangeabilite-des-gaz/oclc/494977598>
- Deng, J., Ma, F., Li, S., He, Y., Wang, M., Jiang, L., & Zhao, S. (2011). Experimental study on combustion and emission characteristics of a hydrogen-enriched compressed natural gas engine under idling condition. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(20), 13150–13157. doi:10.1016/j.ijhydene.2011.07.036
- Ebi, D., & Clemens, N. T. (2016). Experimental investigation of upstream flame propagation during boundary layer flashback of swirl flames. *Combustion and Flame*, 168, 39–52. doi:10.1016/j.combustflame.2016.03.027
- Elizalde-González, M. P., & Ruíz-Palma, R. (1999). Gas chromatographic characterization of the adsorption properties of the natural adsorbent CACMM2. *Journal of Chromatography A*, 845(1-2), 373–379. doi:10.1016/S0021-9673(99)00245-9
- Fishman, V. N., Martin, G. D., & Lamparski, L. L. (2004). Comparison of Series 5 gas

- chromatography column performances from a variety of manufacturers for separation of chlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans using high-resolution mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 1057(1-2), 151–161.
doi:10.1016/j.chroma.2004.09.034
- Flórez-orrego, D. A. (2011). Métodos para el estudio de la intercambiabilidad de una mezcla de Gas Natural y Gas Natural-Syngas en quemadores de premezcla de régimen laminar: Un artículo de revisión.
- Gasdomesticos Para la Cocción de Alimentos NTC 2832*. (2015). Retrieved from <https://tienda.icontec.org/wp-content/uploads/pdfs/NTC2832-1.pdf>
- Group, I. W. (2005). White Paper on Natural Gas Interchangeability and Non-Combustion End Use NGC + Interchangeability Work Group.
- Hairuddin, A. A., Yusaf, T., & Wandel, A. P. (2014). A review of hydrogen and natural gas addition in diesel HCCI engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 739–761. doi:10.1016/j.rser.2014.01.018
- Halchuk-harrington, R., Energy, X., Wilson, R. D., & Energy, K. (1940). AGA Bulletin # 36 and Weaver Interchangeability Methods : Yesterday ' S Research and Today ' S Challenges 1 . Gas Interchangeability Today, 1–22.
- Halter, F., Chauveau, C., Djebaïli-Chaumeix, N., & Gökalp, I. (2005). Characterization of the effects of pressure and hydrogen concentration on laminar burning velocities of methane–hydrogen–air mixtures. *Proceedings of the Combustion Institute*, 30(1), 201–208. doi:10.1016/j.proci.2004.08.195
- Hernandez J, & Cortés J. (2003). Validación de la intercambiabilidad de gases en el contexto colombiano, 111. Retrieved from <http://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/66/1/ValidacionIntercambiabilidadDeGasesContextoColombiano.pdf>
- Hernández, J. J., Lapuerta, M., & Barba, J. (2013). Flame stability and OH and CH radical emissions from mixtures of natural gas with biomass gasification gas. *Applied Thermal Engineering*, 55(1), 133–139. doi:10.1016/j.applthermaleng.2013.03.015
- Honus, S., Kumagai, S., Němček, O., & Yoshioka, T. (2016). Replacing conventional fuels in USA, Europe, and UK with plastic pyrolysis gases – Part I: Experiments and graphical interchangeability methods. doi:10.1016/j.enconman.2016.08.055
- Honus, S., Kumagai, S., & Yoshioka, T. (2016). Replacing conventional fuels in USA, Europe, and UK with plastic pyrolysis gases – Part II: Multi-index interchangeability

- methods. *Energy Conversion and Management*, 126, 1128–1145.
doi:10.1016/j.enconman.2016.08.054
- Hu, M., Lin, W., Gu, A., & Li, J. (2014). Isothermal vapor–liquid equilibrium in CH₄/H₂/N₂ system at a cryogenic temperature range from 100.0K to 125.0K. *Fluid Phase Equilibria*, 366, 16–23. doi:10.1016/j.fluid.2014.01.002
- Jordan, A., Mcdonell, V., & Samuelsen, S. (2013). Fuel Interchangeability Effects on a Scaled Industrial Boiler.
- Kee RJ, Rupley FM, Miller JA, Coltrin ME, Grcar JF, M. E. (2000). *The PREMIX program* (CHEMKIN Co).
- Kotzagianni, M., Yuan, R., Mastorakos, E., & Couris, S. (2016). Laser-induced breakdown spectroscopy measurements of mean mixture fraction in turbulent methane flames with a novel calibration scheme. *Combustion and Flame*, 167, 72–85.
doi:10.1016/j.combustflame.2016.02.025
- Lee, C.-E., Hwang, C.-H., & Lee, H.-Y. (2008). A study on the interchangeability of LFG–LPG mixed fuels with LFG quality in domestic combustion appliances. *Fuel*, 87(3), 297–303. doi:10.1016/j.fuel.2007.04.025
- Li, H.-M., Li, G.-X., Sun, Z.-Y., Zhou, Z.-H., Li, Y., & Yuan, Y. (2016). Effect of dilution on laminar burning characteristics of H₂/CO/CO₂/air premixed flames with various hydrogen fractions. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 74, 160–168.
doi:10.1016/j.expthermflusci.2015.11.026
- Lopatoukhin. (2002). *Capítulo IV Análisis espectral de las series de tiempo*.
- Magnussen, S., & Boyle, T. J. B. (1995). Estimating sample size for inference about the Shannon-Weaver and the Simpson indices of species diversity. *Forest Ecology and Management*, 78(1-3), 71–84. doi:10.1016/0378-1127(95)03596-1
- Mazas, A. N., Fiorina, B., Lacoste, D. A., & Schuller, T. (2011). Effects of water vapor addition on the laminar burning velocity of oxygen-enriched methane flames. *Combustion and Flame*, 158(12), 2428–2440.
doi:10.1016/j.combustflame.2011.05.014
- McAllister, S., Chen, J.-Y., & Fernandez-Pello, A. (2011). *Fundamentals of Combustion Processes*. Springer.
- Medwell, P. R., Kalt, P. A. M., & Dally, B. B. (2007). Simultaneous imaging of OH, formaldehyde, and temperature of turbulent nonpremixed jet flames in a heated and

- diluted coflow. *Combustion and Flame*, 148(1), 48–61.
doi:10.1016/j.combustflame.2006.10.002
- Miao, H., Jiao, Q., Huang, Z., & Jiang, D. (2009). Measurement of laminar burning velocities and Markstein lengths of diluted hydrogen-enriched natural gas. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(1), 507–518.
doi:10.1016/j.ijhydene.2008.10.050
- Muñoz, S. G., Mejia, L. F., Castellanos, D., Corchuelo, A., Castro, S., Camacho, A., ... Aguilar, C. M. (2014). *Plan Nacional de Desarrollo 2014 - 2018*. Bogota. Retrieved from [https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/PND/PND 2014-2018 Tomo 1 internet.pdf](https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/PND/PND%202014-2018%20Tomo%201%20internet.pdf)
- NATURGAS. (2016). *Plan de abastecimiento de gas natural*. Cartagena. Retrieved from <http://www.naturgas.com.co/uploads/congreso/2016/presentaciones/jorgevalenciamarin.pdf>
- Nel, P., Hernández, B., Mario, C., & Bedoya, H. (2004). MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LLAMAS PREMEZCLADAS DE METANO-AIRE Y GAS NATURAL GUAJIRA –AIRE UTILIZANDO EL MÉTODO DEL ÁNGULO DEL CONO, 141, 7–14.
- Ortiz J. M. (2014). Fundamentos de la Intercambiabilidad del Gas Natural. Retrieved March 1, 2015, from [http://www.cnogas.org.co/documentos/1_Intercambiabilidad del gas natural.pdf](http://www.cnogas.org.co/documentos/1_Intercambiabilidad%20del%20gas%20natural.pdf)
- Park, J., & Lee, M. C. (2016). Combustion instability characteristics of H₂/CO/CH₄ syngases and synthetic natural gases in a partially-premixed gas turbine combustor: Part II—Time lag analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(2), 1304–1312. doi:10.1016/j.ijhydene.2015.10.065
- Park, S.-H., Lee, K.-M., & Hwang, C.-H. (2011). Effects of hydrogen addition on soot formation and oxidation in laminar premixed C₂H₂/air flames. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(15), 9304–9311. doi:10.1016/j.ijhydene.2011.05.031
- Prospectiva del Mercado de Gas natural. (2015). Retrieved October 6, 2015, from http://www.sener.gob.mx/res/PE_y_DT/pub/ProspGasNatural2006.pdf
- Qin, Z., Lissianski, V. V., Yang, H., Gardiner, W. C., Davis, S. G., & Wang, H. (2000). Combustion chemistry of propane: A case study of detailed reaction mechanism optimization. *Proceedings of the Combustion Institute*, 28(2), 1663–1669.
doi:10.1016/S0082-0784(00)80565-2
- Rubio-Gaviria, L. M. (2015). *Análisis de la intercambiabilidad de mezclas glp/gas de*

- síntesis con alto contenido de hidrógeno, con respecto al gas natural*. Universidad de Antioquia.
- Sabia, P., de Joannon, M., Sorrentino, G., Giudicianni, P., & Ragucci, R. (2015). Effects of mixture composition, dilution level and pressure on auto-ignition delay times of propane mixtures. *Chemical Engineering Journal*, 277, 324–333.
doi:10.1016/j.cej.2015.04.143
- Slim, B. K., Darneveil, H. D., Gersen, S., & Levinsky, H. B. (2011). The combustion behaviour of forced-draught industrial burners when fired within the EASEE-gas range of Wobbe Index. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 3(5), 642–645. doi:10.1016/j.jngse.2011.07.004
- Speight JG. (2011). *Handbook of Industrial Hydrocarbon Processes*. doi:10.1016/B978-0-7506-8632-7.10010-6.
- Starling, K. E., & J.L., S. (1992). *Compressibility Factors of Natural Gas and other Related Hydrocarbon Gases*. USA: American Gas Association. Retrieved from WWW.aga.org
- Suarez, S. M. H., Osorio, J. A. F., & Blanco, H. A. (1986). Calidad del gas natural, 6–17.
- Tellez, E., & Vilela, S. (2014, April). La revolución del gas natural. *Primera Edición*, 198. Retrieved from <http://www.naturgas.com.co/libro/sources/index.htm?pop=1>
- TGI. (n.d.). PipelineTransporter - Energy Solutions International. Retrieved October 25, 2015, from <http://cen.tgi.com.co/PLTGWeb/Public/Reports/>
- Turns SR. (2000). *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*. McGraw-Hill Education.
- UPME. (2015). *Balance gas natural en colombia*. Bogota. Retrieved from http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/BALANCE_GAS_NATURAL_FINAL.pdf
- Villada, J., & Olaya, Y. (2013). A simulation approach for analysis of short-term security of natural gas supply in Colombia. *Energy Policy*, 53, 11–26.
doi:10.1016/j.enpol.2012.08.032
- Vu, T. M., Park, J., Kim, J. S., Kwon, O. B., Yun, J. H., & Keel, S. I. (2011). Experimental study on cellular instabilities in hydrocarbon/hydrogen/carbon monoxide–air premixed flames. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(11), 6914–6924.
doi:10.1016/j.ijhydene.2011.02.085
- Wang, Q., Hu, L., Zhang, X., Zhang, X., Lu, S., & Ding, H. (2015). Turbulent jet diffusion

- flame length evolution with cross flows in a sub-pressure atmosphere. *Energy Conversion and Management*, 106, 703–708. doi:10.1016/j.enconman.2015.09.052
- Yu, J. F., Yu, R., Fan, X. Q., Christensen, M., Konnov, A. A., & Bai, X. S. (2013). Onset of cellular flame instability in adiabatic CH₄/O₂/CO₂ and CH₄/air laminar premixed flames stabilized on a flat-flame burner. *Combustion and Flame*, 160(7), 1276–1286. doi:10.1016/j.combustflame.2013.02.011
- Zacharahwolff, J., Egyedi, T., & Hemmes, K. (2007). From natural gas to hydrogen via the Wobbe index: The role of standardized gateways in sustainable infrastructure transitions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(9), 1235–1245. doi:10.1016/j.ijhydene.2006.07.024
- Zhang, Y., Gao, W., Yu, Y., Wang, M., & Chen, C. (2016). Primary air ratio change and gas interchangeability index correct for domestic gas cooker burning multi-source natural gases. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 35, 276–282. doi:10.1016/j.jngse.2016.08.060