

# Interchangeability analysis in high and low pressure thermal systems for biogas/methane/propane/hydrogen mixtures

Pedro Bryan IVARROLA GRANADOS Ing., Waldir Eloy DE LA CRUZ FELIPE. Fernando SILVA MsC. ,  
Juan Pablo GÓMEZ MONTOYA PhD. <sup>\*</sup>  
*Universidad Tecnológica Del Perú, Lima – Perú. \*jgomezmo@utp.edu.pe*

**Abstract—** *A novel method is presented which allows to analyze the interchangeability of gases for fuel blends as biogas with hydrogen, methane, natural gas, propane and hydrogen. Which are based on thermodynamic laws and two methodologies which allows measure methane number and fuel energy quality. Some data was previously tested. In addition, simulations were done in software, METHANE 3.0 and ANSYS-CFD. The simulations were done in low pressure (atmospheric burner) previously drawn in the INVENTOR software. Experimental data were used from four biogas mixtures with additions of propane, hydrogen and methane, all with a methane number of 100. Mixtures that serve to establish the method of interchangeability of gaseous fuels in high-pressure thermal systems such as engines or turbines. Different physicochemical combustion properties were estimated for these mixtures, such as the Wobbe index, energy density, high and low heating value, adiabatic flame temperature and laminar flame speed. The mixtures turned out to be interchangeable at high pressure but not for low pressure, that is, they can be interchanged in engines or turbines but not in burners, furnaces or boilers.*

**Keywords—** *Fuel interchangeability, biogas, hydrogen, methane number, combustion.*

# Análisis de intercambiabilidad en sistemas térmicos de alta y baja presión para mezclas biogás/metano/propano/hidrogeno

Pedro Bryan IVARROLA GRANADOS Ing., Waldir Eloy DE LA CRUZ FELIPE. Fernando SILVA MsC. ,  
Juan Pablo GÓMEZ MONTOYA PhD.   
*Universidad Tecnológica Del Perú, Lima – Perú. [\\*jgomezmo@utp.edu.pe](mailto:jgomezmo@utp.edu.pe)*

**Resumen-** Se presenta un método novedoso que permite analizar la intercambiabilidad de gases combustibles usando mezclas de biogás con adiciones de hidrogeno, metano, gas natural, propano e hidrogeno. El método esta basado en las leyes de la termodinámica y dos metodologías científicas, una permite medir el número de metano y la otra cuantificar la calidad energética de los combustibles. Además, se hicieron simulaciones en los programas METHANE 3.0 y ANSYS - CFD. Las simulaciones se hicieron en baja presión (quemador atmosférico) previamente dibujado en el programa INVENTOR. Se usaron datos experimentales de cuatro mezclas de biogas con adiciones de propano, hidrogeno y metano todas con numero de metano de 100. Mezclas que sirven para establecer el método de la intercambiabilidad de combustibles gaseosos en sistemas térmicos de alta presión como motores o turbinas. A estas mezclas se le estimaron diferentes propiedades fisicoquímicas de combustion como el índice de Wobbe, la densidad de la energía, poder calorífico superior e inferior, temperatura de llama adiabática y velocidad de deflagración laminar. Las mezclas resultaron tener intercambiabilidad a alta presión, pero no para baja presión, es decir, se pueden intercambiar en motores o turbinas, pero no en quemadores, hornos o calderas.

**Keywords**—Intercambiabilidad de combustibles, biogás, hidrogeno, numero de metano, combustión.

## I. INTRODUCCIÓN

El aumento poblacional y el sistema capitalista actual, que por su concepción requiere una economía creciente, conllevan a mayores requerimientos de recursos naturales y energéticos cada año. Haciendo que las materias primas y los combustibles fósiles sean cada vez más usados y consumidos.

Esto ha generado un notorio cambio en el balance del clima, ya sea por presencias climatológicas como el caso del fenómeno del niño o de la niña que conllevan sequias o inundaciones, terminando en el efecto invernadero que causa el cambio climático. Para combatir el cambio climático con la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, se necesita implementar el uso de combustibles renovables para poder sustituir los combustibles fósiles. Lo anterior, con la esperanza de poder lograr una transición energética para la sociedad, consumiendo menos petróleo y aumentando el uso de energías renovables. Por este motivo, combustibles como el biogás y el hidrogeno son considerados vectores energéticos, libres de carbono [1-4], Sin embargo, los quemadores industriales y domésticos no son aptos para quemar el biogás o

hidrógeno, por eso se debe de tener en cuenta mezclas de estos con gas natural que facilitaran una composición química rica en combustible e intercambiable. De igual forma, hay diversas formas de combinar las energías renovables, tales como biogás/hidrogeno con gas natural/GLP. Aun así, por más que estos tipos de mezclas sean favorables para reducir las emisiones contaminantes, debemos de tener en cuenta sus propiedades de combustión ya que, al momento de inyectar varios tipos de gases en los gasoductos o en los sistemas térmicos, se provocarán fluctuaciones en la composición del gas y su calidad [5-8].

En Sudamérica, el gas natural tiene una gran demanda debido a su muy bajo costo en comparación a otros tipos de fuentes energéticas. Incluso se estima que llegue a representar 29% de la producción mundial de gas en 2030. Si bien la demanda ha crecido en muchas regiones, el más notorio fue en Europa. Regionalmente, para el caso de Colombia, se tiene una muy alta producción de gas natural. Sin embargo, ya se están registrando descensos en su producción en estos últimos años en los pozos de Cusiana y Cupiagua. [9], es por eso, por lo que la intercambiabilidad de gases es un factor crucial al momento de inyectar mezclas a quemadores, los mismos quemadores son sensibles al cambio de sus composiciones químicas [10]. Para que dos gases sean intercambiables, la potencia de entrada al quemador debe ser estable para que su combustión sea completa y que no se genere algún desbalance en los ajustes del quemador. El índice de Wobbe es sin duda uno de los parámetros más usado con respecto a la intercambiabilidad de un combustible tomando en cuenta el poder calorífico superior con la raíz cuadrada de la densidad relativa del combustible. Por lo tanto, si no se realizan cambios en los equipos de combustión, se debe garantizar que el índice de Wobbe debe ser similar [10], este análisis es claro para sistemas de baja presión, pero en sistemas de alta de presión como motores y turbinas no hay claridad de las especificaciones necesarias para el combustible. Debido a esto, se hace necesario implementar un análisis de las propiedades de la combustión, las cuales pueden determinar la intercambiabilidad de los gases en diversos sistemas térmicos con el fin de averiguar cómo afecta la composición de la mezcla la intercambiabilidad. Esto nos lleva a realizar la siguiente pregunta de investigación. ¿Cuáles son las propiedades fisicoquímicas de los combustibles con respecto a la intercambiabilidad de gases para sistemas térmicos de baja

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LEIRD).

**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LEIRD).

**DO NOT REMOVE**

presión y de alta presión para las mezclas de combustibles renovables y convencionales?

El tema de estudio es sobre el análisis de intercambiabilidad, es un tema de investigación presente en el estado del arte a partir del año 2011; se comenzó a enfatizar más el tema a tratar, pero no era muy investigado. Sin embargo, a partir del año 2016, comenzó a hacerse notar más el tema de estudio sobre el uso de estos gases para generar eficiencia energética en sistemas térmicos como los quemadores de cocina o motores. Es por eso que elementos comunes como lo son la intercambiabilidad, la ignición, la combustión y la adición de combustibles, fueron cruciales para poder desarrollar la presente investigación. Además, la influencia de la adición del hidrogeno en los quemadores de cocina, los posibles resultados al momento de adicionar el hidrogeno en equipos térmicos, para poder observar su rendimiento, los factores en el comportamiento de la ignición, la temperatura del quemador y las emisiones, son clave para la intercambiabilidad de los gases [1–5]. A su vez, en otros artículos científicos, la producción del biohidrógeno y biometano, y también la comparación de sus propiedades de combustión, fueron determinantes para poder hallar la velocidad de deflagración laminar en las mezclas de gas natural para así poder predecir sus propiedades combinadas con el aire normal [6–9]. Ahora, enfatizado en artículos con metodologías experimentales, el ámbito de experimentaciones numéricas con metodologías planteadas hace que la optimización de sistemas industriales y domésticas con GLP, biogás, hidrogeno verde y gas natural en diferentes regiones sean efectivas por sus propiedades físicas de los equipos de combustión. Aquí se menciona a la velocidad de deflagración laminar la cual cumple con los rangos esperados (27 a 41 cm/s), con una diferencia en su límite mayor del 16% de las composiciones respecto al gas natural; también, el índice de Wobbe no excedió el 5.5% lo cual da a entender lo alto que es su índice de intercambiabilidad en las mezclas [11–15]. De igual forma, las condiciones de operación, almacenamiento, normas técnicas, seguridad del sistema, las características de diseño y sus efectos sobre la combustión en un sistema que funciona con GLP y biogás, se basa calculando la velocidad, la turbulencia, la temperatura y la presión. A su vez, la intercambiabilidad de los dos tipos de gases naturales y también del hidrogeno verde que son suministrada para Antioquia provenientes de las regiones de Guajira y Cusiana en Colombia, pueden ser una buena implementación para la descarbonización de los equipos de combustión [16–19].

En los últimos artículos científicos revisados y analizados, el biogas y el metano son protagonistas en la investigación, pues su enfoque fue más en los fenómenos de detonación, la entropía, la temperatura de la llama, operación con turbulencias altas y el octanaje en motores con encendido provocado (MEP). Estos biogases en los MEP tuvieron la mayor eficiencia exergética (57-58%), en cambio el metano (55%). Los combustibles con numero de metano (MN)>97 tuvieron eficiencias exergética >55% y alcanzaron resultados superiores a 8,6 kW a 60 Hz; lo que indica un excelente

equilibrio entre el impacto, la exergía del combustible y las propiedades fisicoquímicas del combustible [20,21]. La intercambiabilidad solo puede funcionar si el gas implementado pertenece a la misma familia gaseosa. También, para los equipos de combustión se debe tener en cuenta el índice de Wobbe la cual debe estar fuera a del rango del +/- 5% en los quemadores domésticos [10,22,23]. Por este motivo, se hace enfatizar a los siguientes gases o combustibles las cuales cuentan con estos parámetros de intercambiabilidad: El gas natural que cuenta en su gran parte por etano y metano y con otros hidrocarburos más ligeros [24], el gas licuado de petróleo (GLP) también un gas muy usado a nivel mundial, la cual esta compuesto mayormente de propano, etano y butano, es muy útil para los sectores industriales y automovilísticos [25]. Biogás producido por biodigestión anaeróbica presenta una composición media de metano en un 60% con un 40% de dióxido de carbono; usado para la generación de energía o electricidad [26] y por último el hidrogeno producido principalmente por electrolisis del agua, usado principalmente en las industrias por su reactividad con respecto a sus propiedades físicas [27]. Ahora, para que estos parámetros puedan ser ejecutados de manera eficaz, se necesita de un calculo de propiedades para los sistemas térmicos, tanto de alta como de baja presión.

Los volúmenes de aire y masa estequiométricas son de ayuda para poder hallar el correcto manejo de aire-combustible en la mezcla. De igual forma para el volumen o masa de humos secos y humos húmedos [28]. Los poderes caloríficos de estos combustibles, tanto superiores (PCS) como inferiores (PCI) son cruciales para poder calcular la potencia térmica en cualquier equipo térmico, en este caso, para los quemadores y motores. Por otra parte, la velocidad de deflagración laminar ( $S_L$ ) para estos sistemas térmicos se define como la velocidad la cual se desplaza al frente de llama hasta la zona de gases sin que se queme (gases de premezcla) en una llama estable y sobre todo plana [29]. Para finalizar con las formulas y parámetros para el posterior calculo de los mismos, la energía mínima de ignición y también la distancia critica de enfriamiento permitirá que la combustión se propague y a su vez se pueda autosostener [30,31].

En el presente trabajo, se evalúa identificar las propiedades fisicoquímicas de los combustibles respecto a la intercambiabilidad de gases en los sistemas térmicos de alta y baja presión para las mezclas biogás/metano/propano/hidrogeno. El enfoque de esta investigación es cuantitativo con un alcance descriptivo basado en un análisis comparativo con las relaciones de las mezclas mencionadas anteriormente usando dos metodologías científicas.

## II. METODOLOGIA PARA EL ANÁLISIS DE LA INTERCAMBIABILIDAD CON PROPIEDADES DE COMBUSTIÓN

Para el apartado de la metodología se consultaron los artículos científicos disponibles para comprobar y determinar las diferentes formas para calcular las propiedades

fisicoquímicas de los sistemas térmicos de alta y baja presión. De igual forma, se realizó una estimación de las propiedades físicas de las mezclas con el uso del programa METHANE 3.0 de AVL, para poder simular los cálculos de la temperatura de llama adiabática, la velocidad de deflagración laminar, el índice de Wobbe, entre otros. De esta manera, se podrá realizar la comparación de los datos obtenidos en los programas. También, mediante el uso de otro programa llamado ANSYS, se realizó una simulación para poder determinar la combustión de las mezclas de gases junto a sus propiedades fisicoquímicas, para que los sistemas térmicos de alta y baja presión sean evaluados con las ecuaciones que se presentara a continuación:

#### A. Ecuaciones de combustión para baja presión

En la primera ecuación se da a conocer el índice de Wobbe la cual esta relacionada sobre el poder calorífico superior del gas entre la raíz cuadrada de la densidad relativa del gas.

$$W = \frac{PCS}{\sqrt{d}} \quad (1)$$

El índice de Wobbe será un dato crucial para la correcta ejecución de la investigación de tal forma que en la tabla 1 se presenta algunos datos de gases puros que permitirá obtener datos completamente correctos.

TABLA 1  
INDICE DE WOBBE

Componente	PCS (Kwh/m <sup>3</sup> )	√densidad Relativa	Wobbe (MJ/m <sup>3</sup> )
Propano	26.78	1.57	21.71
Hidrogeno	3.36	0.07	12.74
Dióxido de Carbono	0.00	1.65	0.00

A su vez, otros datos también importantes al momento de ejecutar las mezclas usadas en esta investigación, los combustibles también cuentan con un límite de inflamabilidad, las cuales determinarán que tan detonante puede ser una mezcla al momento de la combustión. En la tabla 2 se muestran los límites de inflamabilidad:

TABLA 2  
LIMITES DE INFLAMABILIDAD

Designación	Formula	LII%	LSI%
Metano	CH <sub>4</sub>	5	15
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	2.2	9.50
Biogás	CH <sub>4</sub> +CO <sub>2</sub>	3.67	7.67
Hidrogeno	H <sub>2</sub>	4.1	75

A continuación, se presentan las ecuaciones para poder calcular sus propiedades fisicoquímicas de las mezclas.

Para el volumen y masa de aire estequiométrico:

$$V_a = \frac{m_{st}^{aire}}{m_{st}^{gas}} \quad (2)$$

$$m_a = \frac{Kg_{aire}}{Kg_{gas}} \quad (3)$$

Para el volumen de humos húmedos y humos secos:

$$V_f = \frac{m_{st}^3 \text{ Humos Húmedos}}{m_{st}^3 \text{ gas}} \quad (4)$$

$$V_f = \frac{m_{st}^3 \text{ Humos Secos}}{m_{st}^3 \text{ gas}} \quad (5)$$

Para la velocidad de deflagración laminar en sistemas de alta presión:

$$SL = \frac{2 * \alpha * P_u}{C_{17} * P_h} \quad (6)$$

Donde:

pb	Densidad de la mezcla quemada
$\alpha$	Coefficiente de difusión térmica de la mezcla
C <sub>v</sub>	Calor específico de la mezcla a volumen constante
P <sub>u</sub>	Densidad de la mezcla no quemada

B. Ecuaciones de la combustión en sistemas térmicos de Alta presión.

Para la distancia de enfriamiento con la energía mínima, la cual esta relacionada con la llama adiabática y será usada en los sistemas de alta presión:

$$D_q = \frac{10k}{C_p \rho_o (S_L - 0.16u)} \quad (7)$$

$$E_{min} = C_p \rho_o \Delta T_{ad} \left(\frac{\pi}{6}\right) d_q^3 \quad (8)$$

Por otra parte, para que el presente proyecto sea efectivo y validado, según [19, 20, 32, 33], la primera metodología experimental para medir el número de metano (MN), será lo que más se tomara en cuenta al momento de realizar las comparaciones de las propiedades fisicoquímicas de las mezclas con la intercambiabilidad en condiciones de alta presión. En la siguiente tabla 3 se aparecen las composiciones químicas de cuatro mezclas de combustibles, medidas experimentalmente para alcanzar un MN=100 en todos los casos en un motor CFR, es decir las cuatro mezclas con diferente composición química y comparten el mismo índice

de resistencia a la detonación para MEP. las mezclas se usarán como datos para ejecutar las ecuaciones previamente mencionadas para medir la intercambiabilidad a alta presión.

TABLA 3  
COMPOSICIONES DE CUATRO MEZCLAS

Designación	%CH <sub>4</sub>	%CO <sub>2</sub>	%C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	%H <sub>2</sub>
100CH <sub>4</sub>	100	0	0	0
54.5B36.5M9H	69.2	21.8	0	9
90B10P	54	36	10	0
88B12H	53	35	0	12

En [20,21] se presentaron unas ecuaciones para estudiar la combustión de MEP de acuerdo a los principios termodinámicos, partiendo del proceso ideal para ciclos Otto, deduciendo una ecuación para la eficiencia exergética y formulando una relación de intercambiabilidad de acuerdo a la comparación de ciertas propiedades fisicoquímicas (Densidad de energía, velocidad de llama laminar, temperatura de llama adiabática, relación atómica entre los hidrógenos y carbonos presentes en cada molécula del combustible y la relación de calores específicos); con esta ecuación se puede cuantificar la calidad energética de un combustible comparando sus propiedades con las propiedades del metano, dando entonces un resultado de calidad energética relativa al metano; los factores a,b,c,d y e se calcularon usando información experimental para determinar cuales propiedades tienen mayor efecto sobre la potencia en el límite de la detonación. A continuación, se presentan las ecuaciones de intercambiabilidad para sistemas de alta presión:

$$\overline{X_f MN} = \left(\frac{ED_{CH_4}}{ED_f}\right)^a \left(\frac{SL_{CH_4}}{SL_f}\right)^b \left(\frac{T_{ad_{CH_4}}}{T_{ad_f}}\right)^c \left(\frac{H/C_{CH_4}}{H/C_f}\right)^d \left(\frac{Y_{CH_4}}{Y_f}\right)^e \quad (9)$$

$$\overline{X_f MN} = ED_r SL_r^{0.262} T_{ad_r}^{0.368} H/C_r^{0.001} Y_r^{0.001} \quad (10)$$

Con estas ecuaciones se podrá comparar las propiedades fisicoquímicas de los combustibles en relación con el metano para así poder estimar la calidad de estos combustibles. De igual forma, el presente proyecto tendrá un enfoque cuantitativo ya que se manipulará variables para poder analizar las interacciones de las propiedades fisicoquímicas de las mezclas para sistemas térmicos de alta presión y baja presión y así poder obtener datos, procesarlos y compararlos con los respectivos resultados en condiciones experimentales. También, se usa un método de validación por simulaciones, preexperimental con manipulación de variables y análisis de

los datos cuantitativos. Es decir, será probabilístico con simulaciones para identificar las variables en las propiedades fisicoquímicas de los combustibles y así poder obtener la estimación correspondiente.

Con respecto a las técnicas implementadas en el proyecto, se toma en cuenta las técnicas de análisis estadísticos de los resultados y cálculos de las propiedades fisicoquímicas para así poder cumplir el objetivo de investigación que es analizar la intercambiabilidad en sistemas térmicos de alta y baja presión para mezclas combustibles gaseosas. También, la comparación en sistemas de baja presión con el índice de Wobbe para ver el efecto con los combustibles analizados que comparten el mismo MN=100.

En el caso de los sistemas de alta presión se usa las ecuaciones (9) y (10) que están directamente relacionadas con la intercambiabilidad de gases. Los instrumentos implementados en la investigación son el programa ANSYS que se encarga de una simulación fisicoquímica para la intercambiabilidad en la combustión. También, en este mismo programa se podrá identificar diversos resultados experimentales que se hicieron. Además de esto, hay otro programa llamado METHANE3.0 de AVL, que se encarga del cálculo de algunas propiedades fisicoquímicas y el número de metano. A su vez, el uso de graficas (EXCEL) para la recopilación de datos y las implementaciones en general.

### III. RESULTADOS DEL MÉTODO Y DISCUSIONES

A. Resultados de las propiedades de la combustión para las mezclas en sistemas térmicos de baja presión.

El índice de Wobbe debe estar en el rango permisible de - 5% a 12% para que la intercambiabilidad se pueda garantizar. En la tabla 4 aparece el metano al 100% como dato comparativo, mientras las otras tres mezclas, analizadas en la investigación, exceden ese límite, teniendo diferencias del -61%, -73% y -120% respectivamente, indicando que no hay intercambiabilidad a baja presión de acuerdo al concepto previo descrito en la literatura.

TABLA 4  
ÍNDICE DE WOBBE DE LAS CUATRO MEZCLAS

Componente	PCS (Kwh/m <sup>3</sup> )	√densidad Relativa	Wobbe (MJ/m <sup>3</sup> )
1.- 100CH <sub>4</sub>	10.50	0.55	14.11
2.- 54.5B36.5M9H	7.57	0.75	8.75
3.- 90B10P	8.35	1.05	8.15
4.- 88B12H	5.97	0.88	6.37

En las Figuras 1 y 2 se puede observar los resultados de la estimación de los volúmenes estequiométricos, los volúmenes de humos secos y humos húmedos. Como se puede

observar hay una diferencia sustancial indicando que los dispositivos térmicos de baja presión que usen estos combustibles requieren una calibración del aire para la combustión y del sistema de salida de gases quemados.

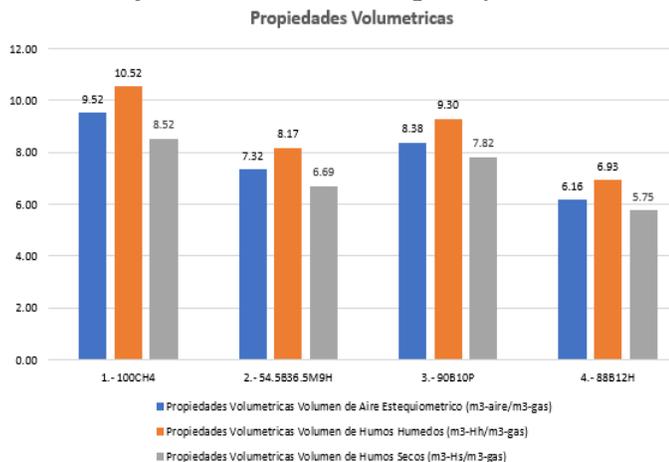


Fig. 1 Propiedades volumétricas de aire estequiometrico, volúmenes humos húmedos y volúmenes de humos secos.

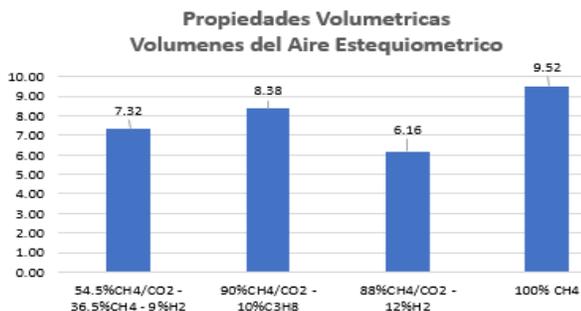


Fig. 2 Propiedades volumétricas de aire estequiometrico de las cuatro mezclas

De la misma forma en las Figuras 3 y 4, se calcula las masas estequiometricas y las masas de humos secos y húmedos para poder identificar las propiedades fisicoquímicas de las cuatro mezclas. Una vez más, hay una diferencia sustancial indicando que los dispositivos térmicos de baja presión que usen estos combustibles requieren una calibración del aire para la combustión y del sistema de salida de gases quemados.

Entonces las mezclas propuestas no cumplen el criterio de intercambiabilidad para baja presión porque no tienen índices de Wobbe similar y la cantidad de aire requerido para la combustión varía significativamente, requiriendo cambios estructurales en los quemadores de baja presión.

### Propiedades Masicas

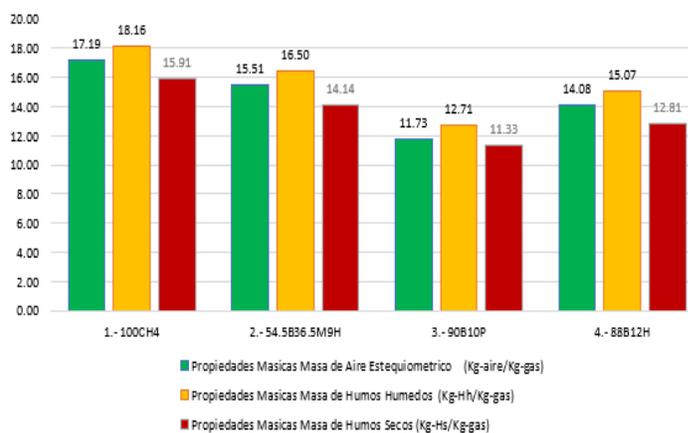


Fig. 3 Propiedades másicas de aire estequiometrico, masa de humos húmedos y masa de humos secos.

### Propiedades Masicas Masas de Aire Estequiometrico

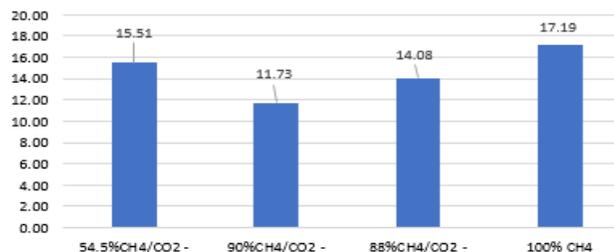


Fig. 4 Propiedades másicas de aire estequiometrico de las cuatro mezclas.

### B. Propiedades de la Combustión para las mezclas en Sistemas Térmicos de Alta Presión.

Para identificar los datos más destacados de la investigación, se analizan las propiedades fisicoquímicas de las mezclas usando las ecuaciones (9) y (10) para así poder estimar las principales diferencias para procesos de combustión en condiciones de alta presión, como sucede en MEP o en turbinas. Posterior a ello, pasaran a ser comparados con los resultados que la simulación CFD (combustion fluid dynamics).

La primera propiedad de la combustión es la Densidad de la Energía (ED) con unidades en MJ/m<sup>3</sup>, la cual se denomina el poder calorífico inferior (MJ/m<sup>3</sup>) dividido entre el volumen estequiometrico de aire de la mezcla combustible (m<sup>3</sup><sub>aire</sub>/m<sup>3</sup><sub>combustible</sub>), en la tabla 5 se presentan los datos de cada componente y de cada mezcla de este proyecto de investigación:

TABLA 5  
DENSIDAD DE ENERGÍA DE LAS CUATRO MEZCLAS.

Componente	PCI	V <sub>a</sub>	ED (Mj/m <sup>3</sup> )
1.- 100CH <sub>4</sub>	33.80	9.52	3.55
2.- 54.5B36.5M9H	23.86	7.02	3.40
3.- 90B10P	27.24	7.88	3.46
4.- 88B12H	18.60	5.68	3.27

De igual forma, para los gases puros se calcularon las propiedades para analizar el proceso de combustión. En la tabla anterior se ve los resultados de estos gases, es notoria la diferencia para los combustibles con respecto al poder calorífico, pero, la diferencia es menor en términos de densidad de energía. La densidad de energía se refiere a la cantidad de aire estequiométrico requerido para liberar calor.

Por otra parte, para la segunda propiedad requerida, que es la Velocidad de Deflagración Laminar (S<sub>L</sub>) medida en m/s. En la Tabla 6 se presentan los resultados de acuerdo con la ecuación (6), el metano tiene la mayor velocidad por ser 100% moléculas de combustible, mientras que las demás mezclas que incluyen biogás tienen moléculas de CO<sub>2</sub> que es un gas inerte que reduce la reactividad del combustible. A pesar de lo anterior, las velocidades no son muy diferentes por las mezclas con metano, propano o hidrógeno.

TABLA 6  
VELOCIDAD DE DEFLAGRACIÓN LAMINAR  
DE LAS CUATRO MEZCLAS

Componente	SL
1.- 100CH <sub>4</sub>	0.35
2.- 54.5B36.5M9H	0.31
3.- 90B10P	0.31
4.- 88B12H	0.33

También se toman en cuenta los otros dos gases puros involucrados en el análisis, para así poder llegar al resultado más factible, ver Tabla 7, donde es evidente la gran diferencia a favor del hidrogeno con respecto a todas las demás sustancias.

TABLA 7  
VELOCIDAD DE DEFLAGRACIÓN  
LAMINAR DE COMBUSTIBLES PUROS

Componente	SL
Propano	0.43
Hidrogeno	2.31

La tercera propiedad fisicoquímica es crucial ya que nos permite poder saber la temperatura de los procesos. La temperatura de llama adiabática (T<sub>ad</sub>) se representa en la

siguiente Tabla 8, la T<sub>ad</sub> representa la máxima temperatura que podría haber en un proceso si no hay pérdidas de calor hacia las paredes y con una combustión completa y estequiométrica. La máxima T<sub>ad</sub> es para el hidrógeno por su alta reactividad, a medida que aumenta el porcentaje de CO<sub>2</sub> en los combustibles la T<sub>ad</sub> disminuye, lo que aumenta la resistencia a la detonación del combustible y aumenta el número de metano.

TABLA 8  
TEMPERATURA DE LLAMA ADIABÁTICA DE LAS CUATRO  
MEZCLAS JUNTO A SUS COMBUSTIBLES PUROS

Componente	T <sub>ad</sub>
1.- 100CH <sub>4</sub>	2219
2.- 54.5B36.5M9H	2223
3.- 90B10P	2125
4.- 88B12H	2045

Componente	T <sub>ad</sub>
Propano	2240
Hidrogeno	2318

La cuarta propiedad es sobre relación atómica de átomos de hidrógeno sobre átomos de carbono (H/C), una medida cuántica de la composición química del combustible, este dato permitirá poder encontrar el resultado final en (9). La Tabla 9 presenta la información, de donde cabe resaltar que de acuerdo a la termodinámica la molécula de metano CH<sub>4</sub> es la mejor molécula para sistemas de alta presión, porque no hay un combustible con una relación H/C >4. Algo que da a pensar en la fabricación de combustibles, el siguiente paso sería, por ejemplo, un combustible con 5 átomos de hidrogeno por cada átomo carbono; lo que aumentaría la eficiencia exergética.

TABLA 9  
HIDROCARBUROS DE LAS CUATRO MEZCLAS Y  
COMBUSTIBLES PUROS

Componente	H/C
1.- 100CH <sub>4</sub>	4.00
2.- 54.5B36.5M9H	2.59
3.- 90B10P	2.62
4.- 88B12H	2.68

Componente	H/C
Propano	2.67
Hidrogeno	2

Para finalizar las propiedades de la combustión, el quinto dato importante es sobre el gamma (γ) que es la relación de calores específicos a volumen y presión constante, ver Tabla 10. El propano tiene el menor valor de gamma y el hidrogeno el mayor. De acuerdo a la eficiencia máxima de los ciclos

Otto, los combustibles con mayores gammas serán los más eficientes, el límite superior parece ser 1.4 relacionado con el gamma del aire, del CO<sub>2</sub> y del hidrogeno, indicando esto, que los combustibles mas ligeros y parecidos al aire deben ser los mejores combustibles para motores. El biogás tiene un gamma de 1.33 superior a la gamma del metano puro, junto con el alto octanaje del biogás lo perfilan como un gran combustible para MEP operando con alta relación de compresión y alta turbulencia [20–21].

TABLA 10  
GAMMA DE LAS CUATRO MEZCLAS JUNTO  
A SUS MEZCLAS PURAS

Componente	Y
1.- 100CH <sub>4</sub>	1.31
2.- 54.5B36.5M9H	1.34
3.- 90B10P	1.32
4.- 88B12H	1.35

Componente	Y
propano	1.13
hidrogeno	1.41
Dióxido de Carbono o Aire	1.40

Por último, al remplazar todos los datos obtenidos en las tablas anteriores en las ecuaciones (9) y (10), para finalmente estimar la calidad energética de las mezclas relativas al metano y sus propiedades fisicoquímicas, resultados que aparecen en la Tabla 11. La mezcla 90B10P (90% Biogás +10% C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) con un 6% de diferencia con respecto a la calidad energética del metano resulta ser la mezcla con mejor intercambiabilidad para alta presión, teniendo en mente que esta mezcla tiene un MN=100 similar al del metano puro. La mezcla 54.5B36.5M9H (54.5% Biogás +36.5% CH<sub>4</sub>+9%H<sub>2</sub>) con un 8% de diferencia con respecto a la calidad energética del metano resulta ser una mezcla con gran intercambiabilidad para alta presión para MEP, teniendo en mente que esta mezcla también tiene un MN=100 similar al del metano puro. Finalmente, La mezcla 88B12H (88% Biogás +12H<sub>2</sub>) con un 12% de diferencia con respecto a la calidad energética del metano resulta ser una mezcla con intercambiabilidad justa para alta presión para MEP, teniendo en mente que esta mezcla también tiene un MN=100 similar al del metano puro.

Cuando se realizó el análisis de intercambiabilidad para las mezclas de combustibles para sistemas térmicos de baja presión usando el Índice de Wobbe, se encontraron grandes diferencias que no permiten la intercambiabilidad. Ahora, con los mismos combustibles, probados experimentalmente en un motor CFR para medir el MN=100 para todas las mezclas, similar al metano; se aplicaron las ecuaciones (9) y (10) propuestas para intercambiabilidad a alta presión, encontrando que la cuantificación de la calidad energética menor al 12% garantiza que los combustibles se puedan usar sin problemas,

con base principal en el octanaje del combustible, como medida indirecta del MN, que esta correlacionada [20–21]. Esto facilitará el análisis de cambio de combustibles para motores y turbinas en sistemas de alta presión, antes solo se tenia como indicador el Índice de Wobbe para sistemas de baja presión como quemadores, hornos y calderas.

TABLA 11  
RESULTADOS DE LAS ECUACIONES 9 Y 10 PARA LA  
IMPLEMENTACIÓN DE LAS CUATRO MEZCLAS EN UN SISTEMA DE  
ALTA PRESIÓN.

Designación	EDr	SLr'0.262	Tadr'0.368	H/Cr'0.001	Yr'0.001	$X_{fMN}$
1.- 100CH <sub>4</sub>	1	1	1	1	1	1.00
2.- 54.5B36.5M9H	1.04	1.13	1.01	1.54	0.98	1.08
3.- 90B10P	1.03	1.13	1.00	1.53	0.99	1.06
4.- 88B12H	1.09	1.06	1.03	1.49	0.97	1.12

### C. Resultados Pre-Experimentales de las Propiedades de la Combustión en el programa ANSYS-CFD

Para los resultados de la simulación CFD en el programa ANSYS se simuló un quemador atmosférico para comparar la longitud de la llama y el perfil de temperatura; se ha realizado un ensayo en base a la temperatura y presión (300K y presión atmosférica) en un sistema de baja presión. A su vez, se tiene en cuenta los datos de las designaciones dadas previamente en la tabla 3. Se presentan los resultados de la simulación de las cuatro mezclas en el programa ANSYS en la Figura 6.

En la figura se observan los resultados, el primer combustible (100CH<sub>4</sub>) con respecto al volumen en la temperatura del sistema térmico. Dando un resultado en grados kelvin de 300K en la más baja temperatura y un 2192.76K como máxima temperatura en el sistema térmico; la longitud de la llama fue aproximadamente de 1m. De igual forma, para la segunda mezcla (54.5B36.5M9H) se dan resultados sobre la temperatura en el sistema térmico, dando resultados como la inicial de 300K y con una máxima temperatura en el sistema térmico de 2181.75K con una longitud de llama un poco menor a 1 m debido a la presencia del hidrogeno que reduce la longitud de combustión. La tercera mezcla (90B10P) la temperatura baja o inicial es de 300K, para la temperatura más alta es alrededor de 2202.65K con una longitud de llama aproximada de 1.15 m, debido a que el propano tarde más en reaccionar completamente. Por último, para la cuarta mezcla (88B12H) se puede observar que la temperatura máxima en este sistema térmico es alrededor de 2119.65K; la longitud de la llama es cercana a 0.7 m debido a la alta reactividad el hidrogeno. De acuerdo con las simulaciones CFD no es posible encontrar intercambiabilidad entre las mezclas debido a los gradientes de temperatura y las diferencias en los perfiles de temperatura a lo largo del quemador, lo que haría que las condiciones del proceso fueran diferentes para cada combustible en el quemador.

#### IV. CONCLUSIONES

Se propone un método novedoso el cual permite poder analizar y estimar la intercambiabilidad de gases combustibles para sistemas térmicos que operan en condiciones de alta presión como MEP o turbinas; además, se pueden usar mezclas de combustibles como biogás con hidrogeno, gas natural, metano y propano. El método está basado en las leyes termodinámicas y dos metodologías científicas, la primera usando el número de metano y la segunda que cuantifica la calidad energética de los combustibles relativo a las propiedades del metano. De esta manera, se puede definir la intercambiabilidad de un combustible con base a la composición química que este presenta.

La principal conclusión de la investigación es la siguiente: Cuando se realizó el análisis de intercambiabilidad para las mezclas de combustibles para sistemas térmicos de baja presión usando el Índice de Wobbe, se encontraron grandes diferencias que no permiten la intercambiabilidad entre los combustibles estudiados para sistemas térmicos como quemadores, hornos y calderas. Luego, con los mismos combustibles, probados experimentalmente en un motor CFR con un  $MN=100$  para todas las mezclas, similar al NM del metano puro; se aplicaron las ecuaciones (9) y (10) propuestas para intercambiabilidad a alta presión, encontrando que la cuantificación de la calidad energética es menor al 12%, lo que garantiza que los combustibles se puedan usar sin problemas; con base principal en el octanaje del combustible, como medida indirecta del MN, que esta correlacionada al octanaje, y que es de común conocimiento como medida de máxima potencia en MEP.

#### V. REFERENCIAS

- [1] Y. Zhao, V. McDonell, and S. Samuelsen, "Influence of hydrogen addition to pipeline natural gas on the combustion performance of a cooktop burner," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 23, pp. 12239–12253, May 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.03.100.
- [2] H. de Vries, A. V. Mokhov, and H. B. Levinsky, "The impact of natural gas/hydrogen mixtures on the performance of end-use equipment: Interchangeability analysis for domestic appliances," *Appl Energy*, vol. 208, pp. 1007–1019, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.09.049.
- [3] C. C. Mejía-Botero, F. Veiga-López, and J. Melguizo-Gavilanes, "Minimum tube diameters for detonation propagation in CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>-air mixtures: Implications for natural gas cooktop burners," *J Loss Prev Process Ind.*, vol. 80, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.jlp.2022.104919.
- [4] X. Lin, H. Ma, C. Liu, J. Zhang, Y. Zhang, and Z. Miao, "Experimental research on gas interchangeability indices for domestic fully premixed burners," *Fuel*, vol. 233, pp. 695–703, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.fuel.2018.06.097.
- [5] Y. Zhao, V. McDonell, and S. Samuelsen, "Assessment of the combustion performance of a room furnace operating on pipeline natural gas mixed with simulated biogas or hydrogen," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 19, pp. 11368–11379, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.02.071.
- [6] Serrano, Juan Carlos; Carranza Sánchez, Yamid Alberto *Scientia et Technica*, *ANÁLISIS TEÓRICO DE LA COMBUSTIÓN EN QUEMADORES DE GAS NATURAL* vol. xi, núm. 29, diciembre, 2005, pp. 139-143 universidad tecnológica de Pereira pereira, Colombia <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84911948003>.

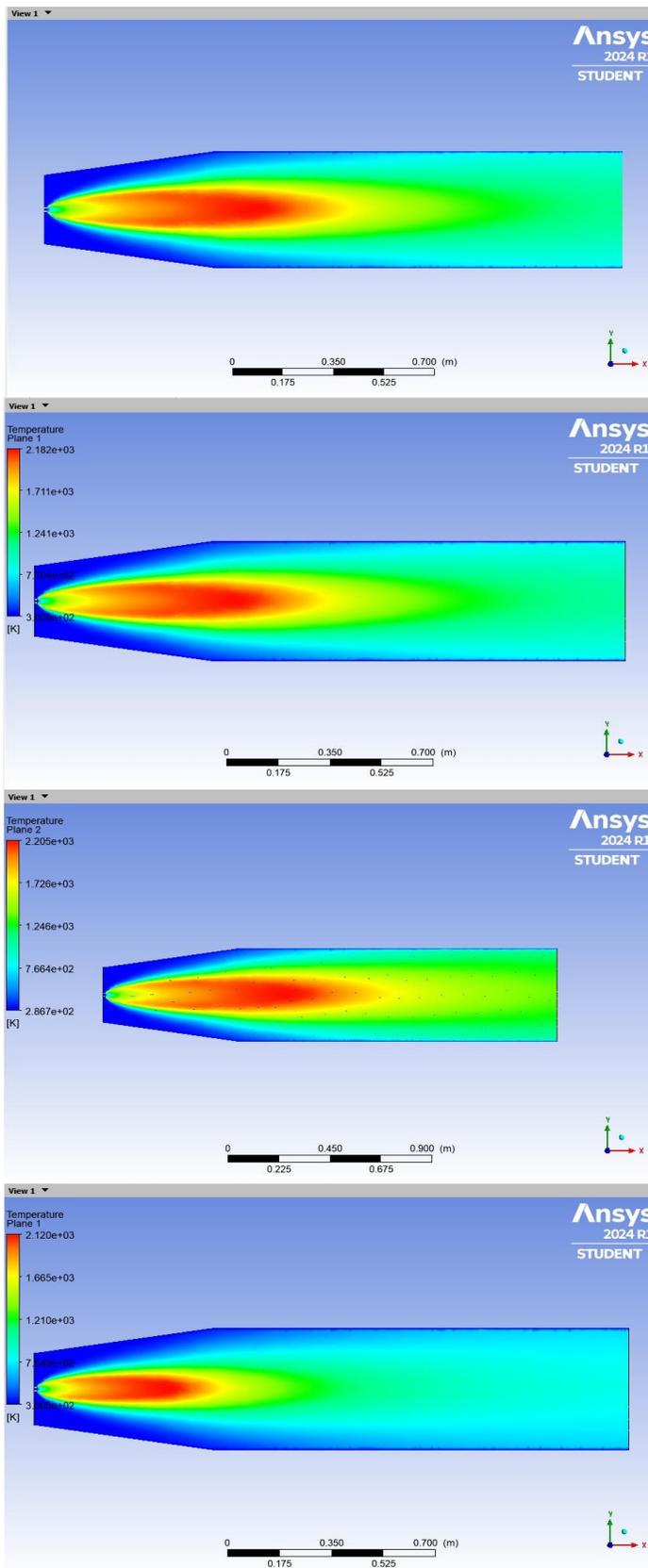


Fig. 6 Simulación realizada en ANSYS de las cuatro mezclas

- [7] CARDONA, CÉSAR; AMELL, ANDRÉS; BURBANO, HUGO LAMINAR BURNING VELOCITY OF NATURAL GAS/SYNGAS-AIR MIXTURE Dyna, vol. 80, núm. 180, julio-agosto, 2013, pp. 136-143 Universidad Nacional de Colombia Medellín, Colombia <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v80n180/v80n180a17.pdf>
- [8] Díaz-González, Carlos; Arrieta, Andrés-Amell; Suárez, José-Luis Comparison of combustion properties of simulated biogas and methane CT&F Ciencia, Tecnología y Futuro, vol. 3, núm. 5, diciembre, 2009, pp. 225-236 ECOPETROL S.A. Bucaramanga, Colombia <http://www.scielo.org.co/pdf/ctyf/v3n5/v3n5a14.pdf>
- [9] Baltazar Estrada-Arriaga, E., Guadarrama-Pérez, O., & Hernández-Romano, J. (2020). Potencial de producción de biometano y biohidrógeno a partir de residuos agrícolas: mucflago de café y cacao y estiércol de cerdo. Repository.Usta. Edu.Co, 3. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/15305>
- [10] I.Q. LINA MARIA RUBIO GAVIRIA, "ANÁLISIS DE LA INTERCAMBIABILIDAD DE MEZCLAS GLP/GAS DE SINTESIS CON ALTO CONTENIDO DE HIDRÓGENO, CON RESPECTO AL GAS NATURAL," UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA, 2015.
- [11] I. B. Özdemir and M. Kantaş, "Investigation of partially-premixed combustion in a household cooker-top burner," Fuel Processing Technology, vol. 151, pp. 107–116, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.fuproc.2016.04.039.
- [12] Theoretical, numerical and experimental study of interchangeability of natural gas in Antioquia 1 Edwin Yair Uribe-Salazar a, Bernardo Argemiro Herrera-Múnera a & Iván Darío Bedoya-Caro b <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n208.75116>
- [13] F. J. Rojas, F. O. Jiménez, B. G. Ramos, and R. Alván, "Análisis Experimental del Rendimiento Térmico, Potencia y Emisiones de Cocinas Anafé a Gas Licuado de Petróleo para Altitudes entre 2200 Y 4200 metros," Información Tecnológica, vol. 28, no. 4, pp. 179–190, 2017, doi: 10.4067/S0718-07642017000400020.
- [14] Venegas Vásconez, D., Ayabaca Sarria, C., Ortega, S. C., Rocha Hoyos, J., & Mena Mena, E. (2018). Optimización en el dimensionamiento de un sistema industrial de gas licuado de petróleo. I+D Tecnológico, 14(1), 41–48. <https://doi.org/10.33412/idt.v14i1.1801>
- [15] Castillo Rayo, M. T., & Izaba Umaña, C. J. (2021). Adaptación de una cocina industrial de gas licuado de petróleo a biogás. Revista Ciencia y Tecnología El Higo, 11(1), 15–25. <https://doi.org/10.5377/elhigo.v11i1.11713>
- [16] Núñez, V., Fonseca, J., Uribe, I., Peña Ballesteros, D. Y., Serna, A., & Machuca-Martínez, F. (2023). Preparando los gasoductos para el transporte de mezclas de gas natural – hidrógeno en Colombia. Ingeniería y Competitividad, 25(Suplemento). <https://doi.org/10.25100/iyc.v25i4.13279>
- [17] Panozo Villca, H., & Canelas Jaimes, E. (2023). Reducción de emisiones de carbono mediante el Blending de hidrogeno/gas natural en las redes de distribución de gas natural de Bolivia. Journal Boliviano de Ciencias, 19(Especial). <https://doi.org/10.52428/20758944.v19iespecial.452>
- [18] Venegas Vásconez, D. F., & Ayabaca Sarria, C. (2019). Análisis del almacenamiento en sistemas de gas licuado de petróleo: tanques estacionarios vs. cilindros. Ingenius, 22. <https://doi.org/10.17163/ings.n22.2019.11>
- [19] Venegas-Vásconez, D., Ayabaca-Sarria, C., Reina-Guzman, S., Tipanluisa-Sarchi, L., & Farías-Fuentes, Ó. (2024). Sistemas de gas licuado de petróleo: una revisión sobre lineamientos de diseño y dimensionamiento. Ingenius, 31. <https://doi.org/10.17163/ings.n31.2024.07>
- [20] J. Pablo Gómez Montoya and A. A. Arrieta, "Phenomenological Analysis of the Combustion of Gaseous Fuels to Measure the Fuel's Energy Quality and Availability to Produce Work in Spark Ignition Engines, Part 2," pp. 1–15, Dec. 2021, doi: 10.1115/1.4052648.
- [21] J. Pablo Gómez Montoya and A. A. Arrieta, "Methodology to estimate fuel's exergy in SI engines using Otto cycles principles limited by the knock," buenos aires, Jul. 2023.
- [22] International Gas Union; BP; GL Noble Denton. "Guidebook to gas interchangeability and gas quality". IGU-BP-GL 2011.
- [23] Natural Gas Council Plus. "White paper on natural gas interchangeability and non-combustion end use". NGC+ Interchangeability Work Group 2005.
- [24] J. Alejandro Abanto Bojórquez, "El Gas Natural en el Perú y los Proyectos Destinados a su Descentralización," Derecho & Sociedad 42, pp. 413–423, 2014, [Online]. Available: <http://www.coes.org>.
- [25] WorldLPGas. World LP Gas Association Annual Report 2013. 2013.
- [26] L. Mosquera, "UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA PROYECTO TÉCNICO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO," 2021.
- [27] G. Argelia, R. Vargas, R. Baquero, P. Yasuhiro, and M. Kuwabara, "'El hidrógeno como fuente alterna de energía' TESIS que presenta," CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL UNIDAD ZACATENCO, Ciudad de México, 2016.
- [28] Jorge García, A. Arrieta, and H. Burbano, "GarciaJorge\_2006\_MezclasMetanoHidrogeno," Ingeniería & Desarrollo. Universidad del Norte, vol. 20, pp. 19–34, 2006.
- [29] E. Echeverry, "Control de la intercambiabilidad de gases en Colombia," Universidad industrial de santander - Facultad de ingenierías Físicoquímicas, pp. 1–75, 2017.
- [30] Ballal DR, Lefebvre AH. Ignition and flame quenching in flowing gaseous mixtures. Proc R Soc London A Math Phys Sci 1977; 357:163–81.
- [31] Lefebvre AH. Ignition Theory. In: Francis T &, editor. Gas Turbine Combust., USA: n.d., p. 76–560.
- [32] I. Andrés and A. A. Arrieta, "UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA ESTIMACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE COMBUSTIÓN DE COMBUSTIBLES GASEOSOS Presentado por," Centro de Extensión Académica CESET GRUPO C & T DEL GAS DEPTO. DE ING. MECANICA, pp. 1–76, 2002.
- [33] J. P. Gómez Montoya, A. A. Amell, and D. B. Olsen, "Prediction and measurement of the critical compression ratio and methane number for blends of biogas with methane, propane and hydrogen," Fuel, vol. 186, pp. 168–175, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.fuel.2016.08.064.