

ESTUDIO TEORICO CONCEPTUAL DEL GAS NATURAL SINTÉTICO COMO
COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA A GAS

CARLOS ALBERTO SARMIENTO BRIZUELA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PETRÓLEOS Y GAS
BUCARAMANGA

2024

ESTUDIO TEORICO CONCEPTUAL DEL GAS NATURAL SINTÉTICO COMO
COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA A GAS

CARLOS ALBERTO SARMIENTO BRIZUELA

Trabajo de grado para optar título de
Magíster en Ingeniería de Petróleos y Gas

Director:

Jabid Eduardo Quiroga Méndez

Doctor

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PETRÓLEOS Y GAS
BUCARAMANGA

2024

Contenido

Lista de tablas	7
Introducción	9
1. Planteamiento del problema.....	12
1.1 Contexto y justificación de la investigación	12
1.2 Objetivos y preguntas de investigación.....	13
1.2.1 Objetivo General.....	13
1.2.2 Objetivos específicos	13
1.2.3 Pregunta de investigación	14
1.3 Metodología	14
2. Fundamentos teóricos	15
2.1 Definición y características de gas natural.....	15
2.2 GLP mezclado con aire	15
2.3 Propiedades del gas natural, GLP y la mezcla GLP – aire	17
2.3.1 Propiedades del gas natural.....	17
2.3.2 Propiedades del GLP.....	22
2.3.3 Propiedades de la mezcla de GLP con aire.	23
2.3.4 Propiedades a considerar para realizar una mezcla GLP – aire	24
2.3 Eficiencia del uso de una mezcla de GLP con aire	30

3.	Análisis y discusión de resultados	31
3.1	Metodología de la investigación	31
3.2	Caracterización de los gases.....	31
3.3	Desarrollo de cálculos de intercambiabilidad para los gases seleccionados	32
3.3.1	Determinación de contenido de propano y butano	33
3.3.2	Cálculo de gravedad específica y el número de átomos de hidrogeno y carbono ..	33
3.3.3	Cálculo del contenido total de hidrocarburos	35
3.3.4	Cálculos de poderes caloríficos	35
3.3.5	Cálculo del factor de compresibilidad (Z)	36
3.3.6	Cálculo de los índices de Wobbe y Wobbe modificado	36
3.3.7	Cálculo del número de octano de motor y el número de metano.....	37
3.3.8	Cálculo de límites de inflamabilidad	37
3.3.9	Índice de Delbourg.....	38
3.4	Intercambiabilidad en la mezcla de gases	39
3.4.1	Cálculos asociados al gas de estudio 1	39
3.4.2	Cálculos asociados al gas de estudio 2	41
3.4.3	Cálculos asociados al gas de estudio 3	43
3.5	Gráficos de inflamabilidad	45
3.6	Índice de Delbourg.....	46
3.7	Resumen	46

4. Conclusiones y recomendaciones	48
Bibliografía	49

Lista de figuras

Figura 1. Metodología para la determinación de variables e índices de intercambiabilidad de los gases estudiados.	33
Figura 3. Diagrama de inflamabilidad de los gases estudiados.	45
Figura 4. Diagrama de Delbourg de los gases evaluados.	46

Lista de tablas

Tabla 1. Composición promedio del gas natural.....	18
Tabla 2. Poder calorífico promedio del gas natural.....	19
Tabla 3. Determinación de constantes de Delbourg.....	29
Tabla 4. Caracterización composicional de los gases.	32
Tabla 5. Fracción molar representada en propanos y butanos.	33
Tabla 6. Determinación de la gravedad específica y los átomos de H y C.	34
Tabla 7. Cálculo del contenido total de hidrocarburos de los gases de estudio.	35
Tabla 8. Determinación del poder calorífico de los gases de estudio.	35
Tabla 9. Cálculo del factor de compresibilidad (Z) de los gases de estudio	36
Tabla 10. Cálculo de los índices de Wobbe y Wobbe modificado de los gases de estudio.....	37
Tabla 11. Análisis de MON y MN de los gases de estudio.....	37
Tabla 12. Cálculo del potencial de combustión de los gases <i>de estudio</i>	38
Tabla 13. Clasificación de los gases por familias según el índice <i>de Wobbe</i>	39
Tabla 14. Determinación de la relación de gas de estudio 1 – aire y coeficientes de poder calorífico.	39
Tabla 15. Cálculo de índice de Wobbe e índice Modificado de Wobbe para el gas de estudio 1. 40	40
Tabla 16. Resumen de la mezcla gas de estudio 1 – aire.	41
Tabla 17. Determinación de la mezcla de gas de estudio 2 – aire y coeficientes de poder calorífico.	41
Tabla 18. Cálculo de índice de Wobbe e índice Modificado de Wobbe para la mezcla gas de estudio 2 - aire.	42
Tabla 19. Resumen de la mezcla gas de estudio 2 – aire.	42

Tabla 20. Determinación de la relación mezcla de gas de estudio 3 – aire y coeficientes de poder calorífico.	43
Tabla 21. Cálculo de índice de Wobbe e índice Modificado de Wobbe para la mezcla gas de estudio 3 - aire.	44
Tabla 22. Resumen de la mezcla gas de estudio 3 – aire	44
Tabla 23. Cuadro comparativo de condiciones de intercambiabilidad de los gases evaluados ...	47
Tabla 24. Cuadro de propiedades las mezclas de los gases de estudio para los motores de combustión a gas.....	47

Resumen

Título: Estudio teórico conceptual del gas natural sintético como combustible alternativo en motores de combustión interna a gas.*

Autor: Carlos Alberto Sarmiento Brizuela**

Palabras Clave: Gas natural sintético, índice de Wobbe, motores de combustión interna.

Esta tesis analiza tres mezclas de gas natural con aire para evaluar su intercambiabilidad mediante índices clave como Wobbe, Wobbe Modificado y Delbourg, junto con la gravedad específica, asegurando que cumplen con los rangos de inflamabilidad, combustión y seguridad. Los resultados destacan la viabilidad de estas mezclas y enfatizan la importancia de pruebas prácticas para optimizar su uso en aplicaciones reales, proporcionando una base sólida para gestionar la variabilidad del gas natural en el contexto de la transición hacia energías más sostenibles.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de ingeniería de petróleos. Director: Jabid Eduardo Quiroga Méndez. Doctor en Ingeniería Civil.

Resumen

Title: Theoretical and conceptual study of synthetic natural gas as an alternative fuel in internal combustion gas engines.*

Author: Carlos Alberto Sarmiento Brizuela**

Keywords: Synthetic natural gas, Wobbe index, internal combustion engines.

Description:

This thesis analyses three mixtures of natural gas with air to assess their interchangeability using key indices such as Wobbe, Modified Wobbe and Delbourg, along with specific gravity, ensuring that they meet flammability, combustion and safety ratings. The results highlight the feasibility of these mixtures and emphasize the importance of practical testing to optimize their use in real applications, providing a solid basis for managing natural gas variability in the context of the transition to more sustainable energies.

*Degree Work

** School of Physicochemical Engineering. School of Petroleum Engineering. Director: Jabid Eduardo Quiroga Méndez. Ph.D. Civil Engineering.

Introducción

El gas natural ha emergido como una fuente de energía de creciente relevancia en la búsqueda de alternativas más limpias y sostenibles a los combustibles fósiles convencionales. Su uso se ha extendido a diversas aplicaciones, desde la generación de energía eléctrica hasta el abastecimiento de combustibles en el sector del transporte. Sin embargo, la diversidad en la composición del gas natural y las variaciones en sus propiedades termodinámicas plantean desafíos significativos en cuanto a su manejo y utilización eficiente.

Uno de los aspectos cruciales en la evaluación y aplicación del gas natural es su comportamiento cuando se mezcla con el aire, un escenario común en muchas aplicaciones de combustión. La mezcla de gas natural con aire, si no se maneja adecuadamente, puede afectar tanto la seguridad como la eficiencia de los procesos de combustión. Para abordar estos desafíos, se han desarrollado índices y parámetros específicos, como el Índice de Wobbe, el Wobbe Modificado, el Índice de Delbourg y la gravedad específica, que se utilizan para caracterizar y evaluar las mezclas de gas natural con aire.

En esta tesis, se llevó a cabo una investigación centrada en tres mezclas específicas de gas natural con aire, con el objetivo de comprender cómo estas variables influyen en la eficiencia y la seguridad de los procesos de combustión. Se realizaron cálculos detallados de índices clave, se recopilaron datos de gravedad específica y se analizaron los resultados en función de las especificaciones de intercambiabilidad de gases.

Los resultados de esta investigación subrayan la importancia de evaluar minuciosamente las mezclas de gas natural con aire en función de los índices de Wobbe, Wobbe Modificado y Delbourg, así como de considerar la gravedad específica. Estos parámetros permitieron definir que

la intercambiabilidad es viable, dado que cumple con los rangos de inflamabilidad, potencial de combustión y seguridad en composición.

Esta tesis no solo contribuye al entendimiento fundamental de las propiedades de las mezclas de gas natural con aire, sino que también subraya la necesidad de considerar enfoques prácticos y pruebas experimentales para la optimización de su uso en aplicaciones reales. A medida que el gas natural continúa desempeñando un papel crucial en la transición hacia fuentes de energía más sostenibles, esta investigación ofrece una base sólida para abordar los desafíos inherentes a su variabilidad y diversidad de composición.

1. Planteamiento del problema

1.1 Contexto y justificación de la investigación

La intercambiabilidad se puede definir como la capacidad de sustituir un combustible gaseoso por otro, sin cambiar sustancialmente la seguridad operativa, la eficiencia o un incremento significativo en las emisiones de contaminantes atmosféricos (Comisión de regulación de energía y gas, 2008). Haciendo énfasis en el área de la ingeniería de petróleos, donde se puede observar que la mayoría de los campos producen un volumen de gas natural, el cual no siempre puede ser aprovechado económicamente, una de las principales soluciones planteadas ha sido la quema de estos, para así evitar su tratamiento (NGC+, 2005; Saavedra et al., 2013). No obstante, las recientes normativas ambientales han restringido seriamente este tipo de operaciones, llevando a las empresas operadoras a investigar nuevas alternativas para el aprovechamiento de este compuesto (Echeverry, 2017). Una de las más importantes, que ha sido estudiada desde 1927, es utilizar los gases de provenientes de los pozos en los procesos de producción del campo como autogeneración, compresión, calderas, etc., para evitar la quema del gas por sus implicaciones ambientales y

legales. Pese a lo anterior, actualmente las compañías han visto afectados los procesos dado que los gases de producción de los campos generan una disminución energética en sus equipos y daños en sus partes, debido a que la calidad del gas que se usa está por debajo de los parámetros estipulados por el fabricante.

En aras de optimizar los procesos relacionados con el uso del gas de campo, la presente investigación planteó implementar la teoría de intercambiabilidad, para desarrollar un proceso que incluya un gas sintético, considerando una modificación que incluye retirar los C5+, mezclar la corriente con aire y garantizar el implementar un gas alternativo en un equipo de combustión interna, sin reducir o afectar el desempeño de este. La idea del aprovechamiento energético de este nuevo compuesto supone una reducción de costos en tratamientos y emisiones de gases de efecto invernadero.

1.2 Objetivos y preguntas de investigación

1.2.1 Objetivo General

Realizar un estudio teórico conceptual para evaluar el desempeño energético de tres mezclas de gases combustibles – Aire (Gas Natural Sintético) vs el gas natural para un potencial uso en un motor a combustión interna dedicado a gas.

1.2.2 Objetivos específicos

- ✓ Calcular las propiedades fisicoquímicas y las asociadas a la teoría de intercambiabilidad de gases, a las mezclas propuestas de gas natural sintético.
- ✓ Analizar las diferentes variables, como la composición del gas base, la proporción gas combustible base – aire (Gas Natural Sintético), índice de Wobbe, Índice de Wobbe modificado, poder calorífico, número de metano, entre otros.

- ✓ Analizar los datos obtenidos de las mezclas propuestas de gas natural sintético comparándolos y/o relacionándolos entre el gasto calórico y el potencial de combustión de acuerdo con el índice de Wobbe y el índice de Delbourg.

1.2.3 Pregunta de investigación

¿Cómo podría mejorar la eficiencia de combustión de un motor con el uso de gas natural sintético?

El gas natural sintético presenta una eficiencia superior en comparación con el gas natural corriente como combustible para un motor reciprocante. Esto se fundamenta en la idea de que el gas natural sintético, debido a su composición y propiedades específicas, tiene el potencial de mejorar el rendimiento del motor y generar una mayor producción de energía en comparación con el gas natural corriente. Ajustando adecuadamente la proporción de aire y combustible es fundamental para una combustión eficiente. Mediante el monitoreo y control preciso de la relación aire-combustible, se puede lograr una mejor mezcla y, por lo tanto, una combustión más completa y eficiente.

1.3 Metodología

FASES METODOLÓGICAS

Enfoque cuantitativo

Diseño no experimental

Fase 1. Identificar las variables que afectan las relaciones gas y aire para emular el gas natural, de acuerdo con la teoría de la intercambiabilidad de gases y la composición fisicoquímica del gas combustible.

Fase 2. Realizar cálculos y/o simulaciones de las diferentes alternativas propuestas a evaluar para obtener los datos comparativos.

Fase 3. Elaborar matrices u otras formas de organización de datos:

- ✓ Usar una hoja de cálculo para analizar los datos obtenidos.
 - ✓ Preparar los resultados para presentarlos utilizando tablas y gráficos.
-

Fase 4. Realizar análisis y conclusiones de los resultados obtenidos que genera la investigación y sus posibilidades de aplicación.

2. Fundamentos teóricos

2.1 Definición y características de gas natural

El gas natural mezclado con aire es una combinación de gases, principalmente metano/etano/propano/butano y oxígeno y nitrógeno a una proporción específica, diseñada para lograr una relación aire – combustible óptima para la combustión en motores y otros dispositivos. Esta mezcla se basa en sistemas de combustión de baja potencia, tales como los quemadores de gas para calentar agua. Esta mezcla puede tener varios propósitos, como aumentar la seguridad en aplicaciones donde se necesitan mezclas ligeras o con menor riesgo de atmosferas explosivas. Otra de las ventajas que presenta esta mezcla es la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero, además del aumento en la eficiencia de la combustión en los dispositivos candidatos a su implementación. En aplicaciones técnicas, se hace referencia a esta relación como la "proporción estequiométrica" o "relación estequiométrica". Esto se refiere a la mezcla en la que todo el gas natural se quema completamente sin exceso de oxígeno. Cuando la relación aire – combustible es estequiométrica, se produce una combustión completa con emisiones mínimas. Sin embargo, en algunos casos, se puede ajustar la relación aire-combustible para lograr ciertos objetivos, como reducir emisiones específicas o mejorar la eficiencia en condiciones de carga parcial.

2.2 GLP mezclado con aire

GLP es la abreviatura de "gases licuados del petróleo", denominación aplicada a diversas mezclas de propano y butano que alcanzan el estado gaseoso a temperatura y presión atmosférica,

y que tienen la propiedad de pasar a estado líquido a presiones relativamente bajas, propiedad que se aprovecha para su almacenamiento y transporte en recipientes a presión. Tiene su origen en los Estados Unidos entre los años 1900 y 1912 donde se comprobó que la gasolina natural no refinada tenía una gran tendencia a evaporarse debido a la presencia de estos hidrocarburos ligeros. A final de los años 30 eran ya varias empresas las que habían entrado en este mercado, y como innovaciones técnicas de esta época tenemos los primeros vagones para transporte de G.L.P. por ferrocarril, y el establecimiento de plantas de llenado de botellas por todo Estados Unidos. En Europa.

Los GLP pueden encontrarse formando parte del crudo y del gas natural; sin embargo existen diversos procesos de refinería que los pueden producir:

- **Reformado catalítico:** Se alimenta de naftas ligeras para producir aromáticos y gasolinas. El rendimiento en GLP está entre un 5 – 10%.
- **Cracking catalítico:** Se alimenta de gas-oil o nafta produciendo etileno y propileno para petroquímica. El rendimiento en GLP está entre un 5 – 12%.
- **Steam Cracking:** Se alimenta con gas-oil o nafta produciendo etileno y propileno. El rendimiento en GLP está entre un 23 – 30%.
- **Polimerización y alquilación:** Se alimentan de butenos para producir gasolinas. El rendimiento en GLP está entre un 10 – 15%.
- **Cracking térmico:** Se alimenta de gas-oil y fuel-oil para producir gasolina. El rendimiento en GLP está entre un 10 - 20%.
- **Coking y visbreaking:** Se alimenta de gas-oil pesado y residuo para producir coque. El rendimiento en GLP está entre un 5 – 10%.a primera botella se vendía en Francia en 1934.

La mezcla de GLP con aire, generalmente se refiere a la preparación de una mezcla adecuada para su combustión en aplicaciones específicas, como motores de combustión interna. El rango de mezcla de GLP con aire se expresa típicamente en términos de la relación estequiométrica, que es la proporción ideal de combustible y oxígeno necesaria para lograr una combustión completa sin exceso de ninguno de los componentes. En el caso del GLP, la mezcla estequiométrica es aquella en la que se tiene la cantidad justa de GLP y oxígeno para que todos los componentes se quemen completamente. Cuando la mezcla de GLP y aire es estequiométrica, se produce una combustión completa, generando dióxido de carbono (CO_2) y vapor de agua (H_2O) como productos principales, lo que es deseable para minimizar emisiones contaminantes.; sin embargo, en algunas aplicaciones, puede ser necesario o deseable tener mezclas no estequiométricas para satisfacer requisitos específicos de rendimiento.

2.3 Propiedades del gas natural, GLP y la mezcla GLP – aire

2.3.1 Propiedades del gas natural

El gas natural es un compuesto ampliamente caracterizado en la industria petrolera, debido a su alto poder calorífico y su bajo costo asociado a extracción, tratamiento y consumo. Su uso, no solo doméstico, ha incrementado en los últimos años, principalmente por el avance tecnológico, el cual ha permitido aprovechar las cantidades de este compuesto que son extraídos de yacimientos petroleros. Las propiedades más importantes se describen a continuación:

- ✓ **Composición.** La composición química del gas varía, pero generalmente contiene un alta proporción de metano y trazas de otros compuestos hidrocarburos. Además de esto, algunos componentes del gas natural son considerados contaminantes, tales como el nitrógeno (N_2) y el dióxido de carbono (CO_2). En la tabla 1 se puede ver una estimación de la composición promedio del gas natural (Faramawy et al., 2016).

Tabla 1.*Composición promedio del gas natural.*

Componentes	Composición (%)	
	Húmedo	Seco
Hidrocarburos		
Metano	84.6	96.0
Etano	6.4	2.0
Propano	5.3	0.6
iButano	1.2	0.18
nButano	1.4	0.12
iPentano	0.4	0.14
nPentano	0.2	0.06
Hexano	0.4	0.1
Heptano	0.1	0.8
No hidrocarburos		
Dióxido de carbono	<5	
Helio	<0.5	
Ácido sulfhídrico	<5	
Nitrógeno	<10	
Argón	<0.05	
Radio, Kriptón, xenón	Trazas	

Nota. Tomado de Faramawy et al., 2016. Natural gas origin, composition, and processing: A review.

Dentro de los componentes se desarrolla una clasificación entre hidrocarburos y no hidrocarburos. En su mayoría, el gas natural se compone de metano, mientras que entre los no hidrocarburos predomina la presencia de dióxido de carbono, ácido sulfhídrico y nitrógeno.

- ✓ **Poder calorífico.** El poder calorífico del gas natural, desde una perspectiva técnica, se refiere a la cantidad de calor liberada por la combustión completa de una unidad de volumen o masa de gas natural. Se expresa en unidades de energía por unidad de volumen (generalmente BTU/ft³ o J/m³) o por unidad de masa (como BTU/lb o J/kg). El poder calorífico del gas natural es una propiedad crítica para determinar cuánta energía puede ser producida a partir de una cantidad dada de gas natural (Fanchi, 2010). Esta propiedad es esencial para evaluar la eficiencia y la capacidad de

generación de calor en aplicaciones que utilizan gas natural como combustible, como sistemas de calefacción, generación de electricidad y procesos industriales (Fanchi, 2010).

El poder calorífico puede expresarse de dos maneras: inferior y superior. Dentro de la literatura, el poder calorífico inferior (PCI) considera la liberación de calor durante la combustión del gas natural, pero no incluye el calor latente de vaporización del agua producida en la reacción de combustión. El PCI se refiere al calor producido cuando el agua se condensa durante la combustión. Por su parte, el poder calorífico superior (PCS) tiene en cuenta el calor liberado durante la combustión del gas natural, incluyendo el calor latente de vaporización del agua producida. En este caso, se asume que el vapor de agua generado permanece en estado gaseoso y no se condensa.

El poder calorífico varía según la composición, lo que a su vez dependerá si es un gas húmedo o seco. En la tabla 2 se presenta el valor del poder calorífico del gas natural seco. Por su parte, los valores de poder calorífico del gas natural húmedo dependerán exclusivamente de la cantidad de líquidos (hidrocarburos y agua) presentes en el gas, y este cambia significativamente según esto. En general, el poder calorífico del gas natural húmedo tiende a ser ligeramente menor que el del gas natural seco.

Tabla 2.

Poder calorífico promedio del gas natural.

Gas natural seco	Valor promedio (BTU/ft³)	Valor promedio (kJ/m³)
Poder calorífico inferior	1000	35441
Poder calorífico superior	1100	38848

Nota. Tomado de Faramawy et al., 2016. Natural gas origin, composition, and processing: A review.

- ✓ **Gravedad específica.** La gravedad específica del gas natural es una medida que compara la densidad del gas natural con la densidad del aire a condiciones estándar.

Se utiliza para caracterizar la ligereza o pesadez relativa del gas natural en comparación con el aire. La gravedad específica se expresa como un número adimensional y suele estar en el rango de 0.55 a 0.75.

La gravedad específica se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$SG = \frac{\text{Densidad del gas natural}}{\text{densidad del aire}} = \frac{\overline{PM}_{GN}}{PM_{aire}} \quad (1)$$

A condiciones estándar, la densidad del aire es de aproximadamente 1.225 kg/m³ o 0.075 lb/ft³, según las unidades utilizadas. Por lo tanto, la gravedad específica del gas natural se calcula dividiendo su densidad por la densidad del aire a condiciones estándar. Dado que el rango de gravedad específica del gas natural es amplio, se pueden encontrar diferentes valores para diferentes fuentes de gas natural.

- ✓ **Combustión.** Es una reacción química entre sustancias, que suele incluir oxígeno y suele ir acompañada de la generación de calor y luz en forma de llama. La tasa o velocidad a la que se combinan los reactantes es alta, en parte debido a la naturaleza de la propia reacción química y en parte porque se genera más energía de la que puede escapar al medio circundante, con el resultado de que la temperatura de los reactantes se eleva para acelerar aún más la reacción (Rehman & Alam, 2020). La combustión es un proceso químico en el que una sustancia reacciona rápidamente con el oxígeno y desprende calor. La sustancia original se denomina combustible y la fuente de oxígeno, comburente (Chauvy et al., 2020). El combustible puede ser sólido, líquido o gaseoso, aunque para la propulsión de los aviones suele ser líquido. El comburente también puede ser sólido, líquido o gaseoso, pero en los aviones suele ser gaseoso (aire) (Chauvy et al., 2020; Rehman & Alam, 2020). El gas natural sintético se quema de

manera más eficiente y produce menos emisiones de contaminantes como dióxido de carbono (CO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x) que el gas natural convencional.

- ✓ **Peso molecular.** El peso molecular del gas natural, que es una mezcla de varios hidrocarburos, varía según su composición específica. La composición del gas natural puede variar según la ubicación geográfica y la fuente de extracción. En promedio, el peso molecular del gas natural seco (sin considerar la presencia de líquidos de hidrocarburos) es aproximadamente de 16 g/mol. Este valor se deriva de la composición típica del gas natural seco, que consta principalmente de metano (CH_4), con una masa molar de aproximadamente 16 g/mol. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el gas natural puede contener otros hidrocarburos, como etano (C_2H_6), propano (C_3H_8) y butano (C_4H_{10}), que tienen masas molares diferentes. La presencia de estos compuestos puede afectar el peso molecular promedio del gas natural. En aplicaciones donde se requiere precisión, es importante conocer la composición exacta del gas natural y calcular su peso molecular en función de esa composición específica para cálculos y análisis precisos.
- ✓ **Punto de rocío.** El punto de rocío del gas natural se refiere a la temperatura y presión a las cuales los componentes hidrocarburos en el gas natural, como el metano, etano, propano, butano, etc., comienzan a condensarse y pasar de su estado gaseoso a su estado líquido. Este fenómeno de condensación ocurre porque, a temperaturas más bajas o a presiones más altas, la energía cinética de las moléculas de hidrocarburos en el gas disminuye, lo que provoca que se agrupen y se transformen en líquido. El punto de rocío del gas natural es una propiedad crítica que considerar en la industria del gas, ya que puede tener implicaciones en la formación de líquidos y sólidos en los

sistemas de transporte y almacenamiento de gas, lo que puede llevar a problemas de obstrucción y corrosión. Además, el punto de rocío varía según la composición específica del gas natural y puede afectar el diseño y la operación de los sistemas de gas. Por lo tanto, es esencial conocer el punto de rocío del gas natural en una aplicación particular para garantizar un funcionamiento eficiente y seguro del sistema.

2.3.2 Propiedades del GLP

El Gas Licuado de Petróleo (GLP), compuesto principalmente por propano y butano, es una fuente de energía versátil. A temperatura ambiente, se encuentra en estado gaseoso, pero se almacena y transporta en forma líquida. Con alta eficiencia de combustión, el GLP produce emisiones más limpias. A continuación, se presentan algunas de las propiedades más comunes:

- **Composición:** El GLP es una mezcla de gases hidrocarburos, siendo los componentes principales el propano y el butano. En ocasiones, puede contener pequeñas cantidades de otros hidrocarburos.
- **Estado físico:** A temperatura y presión ambiente, el GLP se encuentra en estado gaseoso. Sin embargo, se almacena y se transporta en estado líquido a través de la compresión y el enfriamiento.
- **Punto de ebullición:** El punto de ebullición del propano es aproximadamente -42 grados Celsius, mientras que el del butano es alrededor de 0 grados Celsius. Esto significa que a temperaturas ambiente y presiones moderadas, ambos gases se mantendrán en estado líquido.
- **Densidad:** El GLP es más denso que el aire, lo que significa que tiende a acumularse en áreas bajas en caso de fugas. Esto es un factor importante a considerar en términos de seguridad.

- **Inodoro:** Naturalmente, el GLP es inodoro, pero se le agrega un olor característico (usualmente un compuesto de azufre) para facilitar la detección de fugas.
- **Combustión:** El GLP tiene una alta eficiencia de combustión y produce emisiones más limpias en comparación con algunos otros combustibles. En una combustión completa, los principales productos son dióxido de carbono (CO_2) y vapor de agua.
- **Presión:** La presión del GLP varía dependiendo de la temperatura y la proporción de propano y butano. A temperatura ambiente, la presión en un cilindro de GLP puede ser relativamente alta debido al estado líquido del gas.

2.3.3 Propiedades de la mezcla de GLP con aire.

Las propiedades del gas natural mezclado con aire son fundamentales para comprender su comportamiento y sus aplicaciones. Algunas de las principales propiedades a considerar incluyen:

- ✓ **Composición.** La composición química del gas natural mezclado con aire dependerá de la proporción específica en la que se mezclen estos dos componentes. El gas natural típico se compone principalmente de metano (CH_4), con trazas de otros hidrocarburos más pesados y, a veces, componentes no hidrocarburos como el dióxido de carbono (CO_2) y el nitrógeno (N_2). En general, en la mezcla de gas natural con aire, el componente principal seguirá siendo el metano. La composición del aire es aproximadamente un 78% de nitrógeno (N_2) y un 21% de oxígeno (O_2), con trazas de otros gases como argón, dióxido de carbono y gases nobles.
- ✓ **Poder calorífico.** El poder calorífico se define como la energía que puede ser liberada de un sistema por unidad de masa, o un metro cúbico de combustible cuando es quemado por completo a condiciones estándares (Arroyo, 2016). En otras palabras, el poder calorífico puede denominarse como el valor absoluto de la entalpia (Arroyo,

2016). El gas natural sintético tiene un poder calorífico similar al del gas natural convencional, lo que significa que contiene una alta cantidad de energía por unidad de volumen. El poder calorífico del gas sintético depende de la proporción de hidrocarburos presentes y puede ajustarse según los requisitos de uso final. Una mezcla de un 59% de propano y un 41% de aire tiene un poder calorífico de 1465 BTU/ft³ y una gravedad específica de 1.311 (Torres, 2004a).

- ✓ **Relación Aire – Combustible.** La relación entre el gas natural y el aire es fundamental para una combustión eficiente. Esta relación puede variar según la aplicación, pero es importante para optimizar la eficiencia energética.
- ✓ **Propiedades de Combustión.** Las propiedades de combustión, como la velocidad de propagación de la llama y la temperatura de la llama, son importantes para aplicaciones de combustión, como motores y quemadores.

2.3.4 Propiedades a considerar para realizar una mezcla GLP – aire

2.3.4.1 *Intercambiabilidad e índice de Wobbe.* El índice de Wobbe (IW) relaciona el poder calorífico superior (PCS) con la raíz cuadrada de la densidad relativa del combustible (ecuación 1), y es un parámetro que se utiliza muy a menudo para caracterizar la intercambiabilidad de un combustible (Quintero-Coronel et al., 2023; Worasaen et al., 2017). Con esta relación se puede comparar el contenido de energía de un grupo combustibles para una configuración geométrica del inyector del quemador y presión de suministro determinadas. En 1927, Goffredo Wobbe, físico de Bolonia, Italia, observó que:

- ✓ La potencia calorífica de un quemador es proporcional al caudal por tiempo (presión constante y presión y tamaño de orificio constantes).

- ✓ La velocidad de flujo a través de un orificio de tamaño determinado a presión constante es proporcional al peso del gas.
- ✓ El poder calorífico de un gas es proporcional a su peso específico.

De esta manera, se asume que un combustible puede substituirse por otro sin necesidad de realizar cambios en los equipos de combustión, si ambos combustibles tienen índices de Wobbe muy similares (Quintero-Coronel et al., 2023).

$$IW = \frac{\text{Poder calorífico}}{\sqrt{\text{Gravedad específica}}} \quad (2)$$

El índice de Wobbe se utiliza para comparar la producción de energía de combustión de gases combustibles de composición diferente en un aparato (fuego, cocina, etc.). Si dos combustibles tienen índices de Wobbe idénticos, la producción de energía también será idéntica para una presión y unos ajustes de válvula determinados (CEN/TC, 2020). Normalmente se permiten variaciones de hasta el 5%, ya que el consumidor no las percibiría. El Índice de Wobbe es un factor crítico para minimizar el impacto del cambio cuando se analiza el uso de combustibles GNS como las mezclas de propano y aire (CEN/TC, 2020).

2.2.2.2 *Índice de Wobbe modificado*. El índice de Wobbe modificado es una variante del índice de Wobbe que tiene en cuenta la densidad del gas y la temperatura de suministro del gas. Esto es relevante porque, en algunas aplicaciones, la densidad del gas puede afectar la eficiencia de la combustión y el rendimiento del equipo. El índice de Wobbe modificado ajusta la ecuación original para considerar tanto la densidad relativa como el poder calorífico del gas.

$$MIW = \frac{\text{Poder calorífico}}{\sqrt{T * \text{Gravedad específica}}} \quad (3)$$

2.2.2.3 *Total Hydrocarbon Content in Hydrogen.* El Contenido total de Hidrocarburos en hidrogeno, se refiere a la cantidad total de átomos de hidrógeno presentes en los compuestos de hidrocarburos en una muestra o sustancia. Los hidrocarburos son compuestos químicos formados por átomos de carbono e hidrógeno. El contenido total de hidrocarburos hace referencia a la cantidad de hidrógenos que contiene un compuesto, medidos en hidrogeno destinados como combustible del metano. La norma ASTM D7675-22 describe el procedimiento desarrollado para la medición de los hidrocarburos totales (THC) en el hidrógeno destinado a ser utilizado como combustible sobre una base de metano (C1). La determinación de THC en base C1 es una técnica analítica en la que se supone que todos los hidrocarburos tienen la misma respuesta que el metano (CH₄). Se puede alcanzar una sensibilidad de 0,1 partes por millón en volumen (ppm(v), μmol/mol) hasta una concentración de 1000 ppm(v). Pueden analizarse concentraciones superiores utilizando técnicas de dilución adecuadas. Este es el método más comúnmente utilizado para la medición de *THC* en hidrogeno.

$$THC\ hydrogen = \%molar * \# de\ átomos\ de\ hidrogeno \quad (4)$$

2.2.2.4 *Total Hydrocarbon Content in Carbon.* El Contenido total de Hidrocarburos en Carbono se refiere a la cantidad total de hidrocarburos presentes en una muestra o sustancia en forma de carbono. Los hidrocarburos son compuestos químicos formados por átomos de carbono e hidrógeno. La medición del contenido total de hidrocarburos de carbono se lleva a cabo utilizando técnicas analíticas específicas, como cromatografía de gases o espectrometría de masas.

$$THC\ carbon = \%molar * \# de\ átomos\ de\ carbono \quad (5)$$

2.2.2.5 *Total Hydrocarbon Content Hydrocarbon/Carbon Ratio.* La relación THC Hidrógeno/Carbono, como propiedad de un gas hidrocarburo, se refiere a la proporción de átomos de hidrógeno en comparación con los átomos de carbono presentes en los compuestos de

hidrocarburos gaseosos. Esta relación es una medida importante para caracterizar la composición y el comportamiento de los gases hidrocarburos. La relación THC Hidrógeno/Carbono en los gases hidrocarburos puede variar dependiendo del tipo y la estructura molecular de los compuestos presentes. Los hidrocarburos gaseosos con una relación hidrógeno/carbono más alto tienden a ser más saturados y contienen una mayor proporción de átomos de hidrógeno en comparación con los átomos de carbono. Por otro lado, los hidrocarburos gaseosos con una relación THC Hidrógeno/carbono más baja son más insaturados y tienen una menor proporción de átomos de hidrógeno en relación con los átomos de carbono. La relación THC hidrógeno/carbono es una propiedad importante para entender las características físicas y químicas de los gases hidrocarburos. Puede influir en la densidad, el poder calorífico, la inflamabilidad y otras propiedades relevantes de estos gases.

$$THC \text{ hydrogen/carbon} = THC \text{ hydrogen}/THC \text{ carbon} \quad (6)$$

2.2.2.6 *Motor Octane Number (MON) & Research octane number (RON)*. El número de octano del motor (MON) es una medida de la resistencia del combustible a la detonación en motores de encendido por chispa. Un valor alto de MON indica que el combustible es menos propenso a la detonación, lo que es importante en motores de alto rendimiento. El MON se evalúa en condiciones de operación severas para simular el estrés del motor. La ecuación para el cálculo de esta propiedad depende de la razón de contenido total de hidrocarburos medidos en hidrógeno y carbono.

$$MON = -406,14 + \left(508,04 * THC_{\frac{H}{C}}\right) - \left(173,55 * THC_{\frac{H}{C}}^2\right) + \left(20,17 * THC_{\frac{H}{C}}^3\right) \quad (7)$$

El número de octano de investigación (RON) es otra medida de la resistencia a la detonación de un combustible, pero se determina bajo condiciones de prueba diferentes a las del MON. El RON se calcula en condiciones menos severas, y el valor RON y MON juntos se utilizan para determinar el índice de octano de un combustible, que es importante en motores de encendido

por chispa. Los octanajes de investigación y de motor proporcionan una medida de las características de detonación de los combustibles para motores de automoción en condiciones de funcionamiento suaves y severas, respectivamente. Para determinar el RON y el MON se utilizaron los métodos normalizados EN ISO 5164 y EN ISO 5163, respectivamente.

2.2.2.7 Número de metano. El Número de Metano es una medida de la resistencia del gas natural a la detonación cuando se quema como combustible en un motor. Al metano puro se le asigna un número de metano de 100 y al hidrógeno puro se le asigna un número de metano de cero. Un gas natural con un número de metano de 80, por ejemplo, tendría las propiedades de detonación de una mezcla compuesta por un 80% vol. de metano y un 20% vol. de hidrógeno. El concepto de número de metano es similar al número de octano de la gasolina. Sin embargo, a diferencia de la gasolina, todavía no existe una norma universal para probar el Número de Metano del gas natural como existe en la prueba de motor para la gasolina. Tampoco existe un método universalmente aceptado para calcular el Índice de Metano a partir de la composición del gas natural. Entre los métodos más destacados para la valoración del número de metano se destacan la norma ISO 15403 – 2006; la normativa europea ISO - TR22304, la cual determina el rango entre 65 (combustible regular) y 80 (combustible *premium*); y la normativa alemana DIN *Standard 5162*. Un parámetro de referencia se presenta en la ecuación 8, la cual relaciona el número de metano con el número de octano de motor.

$$\text{Methane number} = (1.624 * MON) - 119.1 \quad (8)$$

2.2.2.8 Índice de Delbourg. El potencial de combustión es un índice de naturaleza empírica relacionado con la velocidad de combustión del gas. Se expresa de forma diferente para las distintas familias de gases. Cuando un gas puede ser sustituido por otro en un quemador, sin ninguna clase de ajuste, se dice que ambos gases son intercambiables. En términos de

intercambiabilidad de gases, el potencial de combustión implica que diferentes gases combustibles puedan ser utilizados como combustibles alternativos sin que se produzcan cambios drásticos en la eficiencia de combustión, poder calorífico, estabilidad de la llama y otros aspectos cruciales. La ecuación del cálculo está dada por la ecuación 9, que es la versión modificada del planteamiento matemático de Delbourg (1966).

$$C = \sum X_{ic} C_i \sqrt{\left(\frac{S_i}{S_c}\right)} \therefore X_{ic} = \frac{X_i}{1 - X_{CO} - X_{CO_2} - X_{N_2} - X_{O_2}} \quad (9)$$

El índice de Delbourg se utiliza para evaluar la calidad de los gases combustibles en términos de su capacidad para proporcionar energía. Este índice se basa en la relación entre la densidad del gas y su poder calorífico superior. Ayuda a determinar si dos gases con diferentes densidades proporcionarán la misma potencia cuando se quemen a la misma presión y temperatura. Se han reportado en la literatura diferentes variantes de esta ecuación, basado en los experimentos desarrollados y los requerimientos de los gases utilizados. Una versión reciente de este índice consta de una serie de constantes, caracterizadas en la literatura, y que son descritas en la tabla 3. Asimismo, la ecuación para su cálculo se encuentra en la ecuación 11.

$$\text{Índice de Delbourg} = \%molar * constante de Delbourg / \sqrt{d} \quad (10)$$

Tabla 3.

Determinación de constantes de Delbourg.

Componente	Formula química	Constante de Delbourg
Methane	CH ₄	0,30
Ethane	C ₂ H ₆	0,95
Propane	C ₃ H ₈	0,95
I-Butane	C ₄ H ₁₀	1,10
N-Butane	C ₄ H ₁₀	1,10
I-Pentane	C ₅ H ₁₂	1,15

N-Pentane	C_5H_{12}	1,15
Hexanes	C_6H_{14}	1,15
Heptanes	C_7H_{16}	1,15

Nota. Tomado de ISO et al., 2006. Designación de calidad UNE-EN ISO 13686.

2.3 Eficiencia del uso de una mezcla de GLP con aire

La eficiencia energética de un motor de combustión interna que utiliza gas natural depende de varios factores, incluyendo el diseño del motor, la relación aire-combustible, la carga del motor y las condiciones de operación. Considerando entonces esta premisa, las variables relacionadas son:

- ✓ **Relación Aire – Combustible (A/F):** La eficiencia energética en motores de combustión interna está fuertemente influenciada por la relación aire-combustible. Para un motor de gas natural, la relación aire – combustible óptima varía según el diseño del motor y las condiciones de operación. A menudo, se busca una relación estequiométrica (la cantidad justa de aire para quemar completamente el combustible), pero en algunas aplicaciones, se utiliza una relación más rica o pobre dependiendo de los objetivos de rendimiento.
- ✓ **Diseño del Motor:** El diseño del motor también juega un papel importante en la eficiencia. Los motores diseñados específicamente para gas natural pueden lograr eficiencias superiores en comparación con los motores convertidos.
- ✓ **Carga del Motor:** La eficiencia de un motor de gas natural suele ser mejor cuando opera a una carga cercana a su capacidad máxima. La eficiencia tiende a disminuir a cargas parciales, por lo que la operación en condiciones de carga óptimas es deseable para maximizar la eficiencia.
- ✓ **Tecnología de Inyección:** Los motores modernos de gas natural utilizan tecnologías de inyección avanzadas que pueden mejorar la eficiencia. La inyección

secuencial y la inyección directa, por ejemplo, pueden contribuir a una combustión más eficiente.

- ✓ **Recuperación de Calor:** En algunas aplicaciones, se puede aprovechar el calor residual de la combustión para mejorar la eficiencia energética a través de sistemas de cogeneración o trigeneración.
- ✓ **Optimización del Encendido:** El ajuste preciso del tiempo de encendido es esencial para una combustión eficiente.
- ✓ **Relación de Compresión:** La relación de compresión en un motor de gas natural también puede influir en la eficiencia. Una mayor relación de compresión a menudo se asocia con una mayor eficiencia térmica.

3. Análisis y discusión de resultados

3.1 Metodología de la investigación

Basado en el requerimiento establecido anteriormente para la identificación de la intercambiabilidad de un gas y su uso en motores de combustión interna, la metodología planteada en esta investigación consta de dos (2) partes: 1. Caracterización de los campos seleccionados, etapa donde se analizarán los datos de las corrientes gaseosas. 2. Desarrollo de cálculos de intercambiabilidad, donde se llevará a cabo la implementación de las ecuaciones expresadas en el inciso 2.3.4.1 y se detallarán los resultados de cada uno de ellos, haciendo énfasis en los parámetros que mayor relevancia tengan sobre los datos de intercambiabilidad.

3.2 Caracterización de los gases

La identificación y caracterización de los gases se basó en el desarrollo de una minuciosa búsqueda en literatura de los parámetros relacionados con composición, poder calorífico inferior

y superior, y la densidad de estos. Una vez desarrollada esta búsqueda, tres (3) gases fueron seleccionados para ejecutar el proceso de intercambiabilidad y la evaluación de la relación aire – combustible óptima. Las características de estos gases se presentan en la tabla 4.

Tabla 4.

Caracterización composicional de los gases.

Componentes	Formula química	% molar del	% molar del	% molar del
		gas de estudio	gas de estudio	gas de estudio
		1	2	3
Methane	CH ₄	0,00%	0,00%	0,00%
Ethane	C ₂ H ₆	0,02%	3,90%	1,13%
Propane	C ₃ H ₈	51,73%	62,00%	52,70%
I-Butane	C ₄ H ₁₀	21,45%	16,60%	14,87%
N-Butane	C ₄ H ₁₀	26,65%	17,30%	30,64%
I-Pentane	C ₅ H ₁₂	0,14%	0,18%	0,59%
N-Pentane	C ₅ H ₁₂	0,01%	0,02%	0,08%
Hexanes	C ₆ H ₁₄	0,00%	0,00%	0,00%
Heptanes	C ₇ H ₁₆	0,00%	0,00%	0,00%
Octanes	C ₈ H ₁₈	0,00%	0,00%	0,00%
Nonanes	C ₉ H ₂₀	0,00%	0,00%	0,00%
Hydrogen	H ₂	0,00%	0,00%	0,00%
Helium	He ₂	0,00%	0,00%	0,00%
Nitrogen	N ₂	0,00%	0,00%	0,00%
Oxygen	O ₂	0,00%	0,00%	0,00%
Carbon Dioxide	CO ₂	0,00%	0,00%	0,00%

3.3 Desarrollo de cálculos de intercambiabilidad para los gases seleccionados

Caracterizados los componentes de los gases hidrocarburos, se procedió a calcular los parámetros de intercambiabilidad, los cuales incluyen índices de Wobbe, poder calorífico, densidad, número de metano, contenido total de hidrocarburos, entre otros. Para ello, se estableció un orden detallado que se describe a continuación (Figura 1).

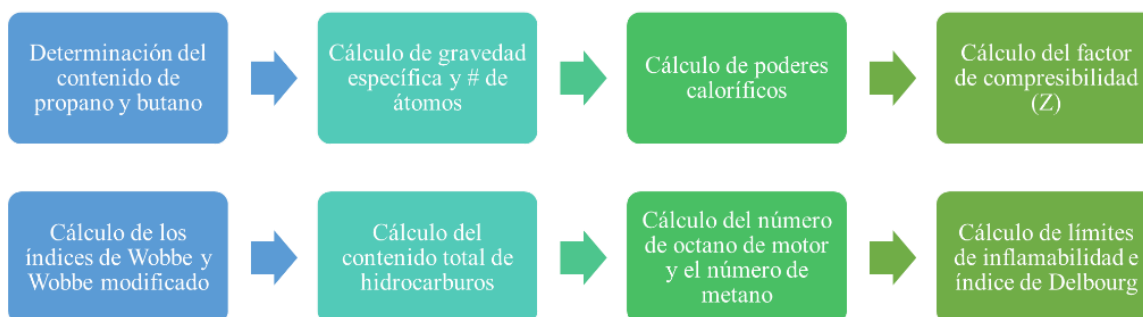


Figura 1. Metodología para la determinación de variables e índices de intercambiabilidad de los gases estudiados.

3.3.1 Determinación de contenido de propano y butano

El contenido de propano y butano en un gas se refiere a la cantidad de estos dos hidrocarburos gaseosos presentes en una mezcla de gases. Tanto el propano como el butano son hidrocarburos que se encuentran comúnmente en el gas natural, el gas licuado de petróleo (GLP) y otros combustibles gaseosos. En la tabla 5 se presenta el contenido de propano y butano para cada gas.

Tabla 5.

Fracción molar representada en propanos y butanos.

Propiedad	% molar del gas de estudio 1	% molar del gas de estudio 2	% molar del gas de estudio 3
Propano	51,73%	62,00%	52,70%
Butano	48,10%	33,90%	45,51%

3.3.2 Cálculo de gravedad específica y el número de átomos de hidrogeno y carbono

Una vez estimados las fracciones de propano y butano, se procedió a estimar la gravedad específica de los gases y el número de átomos de hidrogeno y carbono. Para el cálculo la gravedad específica se multiplica el peso molecular por la fracción molar, cuya sumatoria será dividida entre el peso molecular del aire. Por su parte, el número de átomos de carbono e hidrogeno se obtiene multiplicando la fracción molar por el número de átomos de cada componente en la corriente de

gas. En la tabla 6 se presentan las propiedades utilizadas, mientras que en las ecuaciones 11 a 16 se presentan los resultados de los cálculos desarrollados.

Tabla 6.

Determinación de la gravedad específica y los átomos de H y C.

Comp.	Formula química	Peso molec.	% molar del gas de estudio 1	% molar del gas de estudio 2	% molar del gas de estudio 3
Methane	CH ₄	16,043	0,00%	0,00%	0,00%
Ethane	C ₂ H ₆	30,07	0,02%	3,90%	1,13%
Propane	C ₃ H ₈	44,097	51,73%	62,00%	52,70%
I-Butane	C ₄ H ₁₀	58,124	21,45%	16,60%	14,87%
N-Butane	C ₄ H ₁₀	58,124	26,65%	17,30%	30,64%
I-Pentane	C ₅ H ₁₂	72,151	0,14%	0,18%	0,59%
N-Pentane	C ₅ H ₁₂	72,151	0,01%	0,02%	0,08%
Hexanes	C ₆ H ₁₄	86,178	0,00%	0,00%	0,00%
Heptanes	C ₇ H ₁₆	100,205	0,00%	0,00%	0,00%
Octanes	C ₈ H ₁₈	114,23	0,00%	0,00%	0,00%
Nonanes	C ₉ H ₂₀	128,25	0,00%	0,00%	0,00%
Hydrogen	H ₂	2,016	0,00%	0,00%	0,00%
Helium	He	4,003	0,00%	0,00%	0,00%
Nitrogen	N ₂	28,014	0,00%	0,00%	0,00%
Oxygen	O ₂	32	0,00%	0,00%	0,00%
Carbon Dioxide	CO ₂	44,009	0,00%	0,00%	0,00%

$$\text{Peso molecular gas}_1 = 50,88 \frac{g}{mol} \rightarrow SG_1 = 1,76 \quad (11)$$

$$\text{Peso molecular gas}_2 = 48,36 \frac{g}{mol} \rightarrow SG_2 = 1,91 \quad (12)$$

$$\text{Peso molecular gas}_3 = 41,52 \frac{g}{mol} \rightarrow SG_3 = 1,77 \quad (13)$$

$$\text{Número de átomos de carbono } SG_1 = 3,48 \quad (14)$$

$$\text{Número de átomos de hidrogeno } SG_1 = 8,97$$

$$\text{Número de átomos de carbono } SG_2 = 3,30 \quad (15)$$

$$\text{Número de átomos de hidrogeno } SG_2 = 8,61$$

$$\text{Número de átomos de carbono } SG_3 = 3,46 \quad (16)$$

$$\text{Número de átomos de hidrogeno } SG_3 = 8,91$$

3.3.3 Cálculo del contenido total de hidrocarburos

El cálculo del contenido total de hidrocarburos (*Total Hydrocarbon Content, THC*) es un proceso esencial en la evaluación y caracterización de combustibles, especialmente en aplicaciones que involucran gases y líquidos que contienen hidrocarburos. El *THC* es un parámetro fundamental que se utiliza para medir la concentración de hidrocarburos en una muestra, y su determinación es esencial en una amplia gama de aplicaciones industriales y medioambientales. Su cálculo se resume en la tabla 7.

Tabla 7.

Cálculo del contenido total de hidrocarburos de los gases de estudio.

Propiedad	Gas Natural	Gas de estudio 1	Gas de estudio 2	Gas de estudio 3
THC Hydrogen	4,33	8,97	8,61	8,81
THC Carbon	1,19	3,48	3,30	3,46
THC H/C Ratio	3,64	2,57	2,61	2,58

3.3.4 Cálculos de poderes caloríficos

El cálculo de los poderes caloríficos es una tarea fundamental en la caracterización y evaluación de los combustibles y los gases utilizados en diversas aplicaciones industriales y energéticas. El poder calorífico, también conocido como valor calorífico o poder calórico, es una medida de la cantidad de energía térmica liberada durante la combustión de un combustible específico. Este parámetro es esencial para comprender y optimizar procesos de combustión, desde la generación de energía en centrales eléctricas hasta la operación eficiente de motores de combustión interna. En la tabla 8 se presentan los resultados de los poderes caloríficos según los cálculos estimados a partir de las ecuaciones descritas anteriormente.

Tabla 8.

Determinación del poder calorífico de los gases de estudio.

Propiedad	Unidades	Gas de estudio 1	Gas de estudio 2	Gas de estudio 3
Poder calorífico neto	$\frac{BTU}{ft^3}$	2874,81	2741,20	2855,7
Poder calorífico bruto	$\frac{BTU}{ft^3}$	2649,28	2524,70	2631,5

3.3.5 Cálculo del factor de compresibilidad (Z)

El cálculo del factor de compresibilidad, representado como "Z", es un proceso fundamental en la termodinámica y la ingeniería que desempeña un papel crucial en diversas aplicaciones industriales y científicas. El factor de compresibilidad se utiliza para describir el comportamiento de los gases reales y su desviación respecto al comportamiento ideal de un gas, como se describe en la ecuación de estado de los gases ideales. Su cálculo es esencial para entender y predecir cómo los gases se comportan en una variedad de condiciones de temperatura y presión, desde aplicaciones en la industria química hasta la exploración de yacimientos de petróleo y gas.

Tabla 9.

Cálculo del factor de compresibilidad (Z) de los gases de estudio.

Propiedad	Gas de estudio 1	Gas de estudio 2	Gas de estudio 3
Factor Z	0.976	0.978	0.976

3.3.6 Cálculo de los índices de Wobbe y Wobbe modificado

El cálculo de los índices de Wobbe y Wobbe modificado es un proceso fundamental en la evaluación y caracterización de los gases combustibles, como el gas natural. Estos índices desempeñan un papel crucial en diversas aplicaciones industriales y de energía, particularmente en la distribución de gas, la generación de energía y la combustión eficiente. Su cálculo es esencial para garantizar un suministro de gas seguro y eficaz, así como para optimizar la eficiencia en la quema de combustibles gaseosos. En la tabla 10 se resume el cálculo de los índices de Wobbe y Wobbe modificado.

Tabla 10.

Cálculo de los índices de Wobbe y Wobbe modificado de los gases de estudio.

Propiedad	Gas de estudio 1	Gas de estudio 2	Gas de estudio 3
WI	2170	2267	2180
MWI	79,63	72,72	78,76

3.3.7 Cálculo del número de octano de motor y el número de metano

El *Motor Octane Number* (MON) mide la resistencia de un combustible a la detonación en condiciones de alta velocidad y carga, como las que se encuentran en los motores de combustión interna. Un valor más alto de MON indica una mayor resistencia a la detonación y un rendimiento más seguro y eficiente en motores. Por otro lado, el número de metano se refiere a la cantidad de metano presente en una muestra de gas combustible, como el gas natural. El metano es uno de los principales componentes del gas natural y afecta la calidad y el rendimiento del combustible en aplicaciones de combustión, como la generación de energía y la calefacción.

Tabla 11.

Análisis de MON y MN de los gases de estudio.

Propiedad	Gas de estudio 1	Gas de estudio 2	Gas de estudio 3
MON	95,7	96,2	95,75
MN	36,3	37,0	36,40

3.3.8 Cálculo de límites de inflamabilidad

El cálculo de los límites de inflamabilidad son procesos críticos en la evaluación y caracterización de gases combustibles, especialmente en aplicaciones que involucran seguridad y prevención de explosiones. Estos cálculos desempeñan un papel esencial en diversas industrias,

incluyendo la petroquímica, la minería y la industria manufacturera. Su determinación es fundamental para comprender los riesgos asociados con la presencia de gases inflamables y garantizar un entorno de trabajo seguro.

Tabla 12.

Cálculo del potencial de combustión de los gases de estudio.

Propiedad	Gas de estudio 1	Gas de estudio 2	Gas de estudio 3
LEL	56%	53%	56%
UEL	11%	11%	11%

3.3.9 Índice de Delbourg

Es un método creado en Francia, este define gráficamente el área aceptable de intercambiabilidad entre los gases de una misma familia, se desarrolló en 1953 y se empezó a construir a partir de los datos del índice modificado de Wobbe en uno de sus ejes y el potencial de combustión en el otro. Fue desarrollado para gases de la primera familia y segunda familia, los cuales fueron probados en un quemador tipo Bruleur para caracterizar equipos residenciales franceses y quemadores industriales. Delbourg agrupa 3 familias de gases combustibles; cada gas se ubica mediante coordenadas rectangulares en un punto del diagrama. Por simple comparación entre un punto de un gas con aquella del gas para el cual el equipo fue ajustado, puede saberse inmediatamente el tipo de inconvenientes que pueden ocurrir al reemplazar el gas base por el gas sustituto. La gran ventaja de este método es que nos permite ver la situación, pues entre más alejado está del punto del gas base, más probabilidad hay de que ocurran defectos como la combustión no higiénica, desprendimiento de la llama, retrollama y la insuficiencia de entrada de calor.

Delbourg afirma que dos gases de diferentes familias nunca pueden ser intercambiables (mínimo requiere un cambio de inyectores), por lo tanto se considera que el problema de intercambiabilidad está restringido a gases de una misma familia. Basado en este criterio, se puede

asignar una clasificación por familias, tal como se describe en la tabla 13. La primera familia hace referencia a los gases manufacturados, como el aire propanado y metanado; la segunda familia está relacionada con gases naturales y mezcla de hidrocarburos con aire y la tercera familia hace referencia al GLP, el cual es el caso de estudio de esta investigación.

Tabla 13.

Clasificación de los gases por familias según el índice de Wobbe.

Propiedad		Primera familia		Segunda familia		Tercera familia	
Índice de Wobbe (MJ/m³)	Grupo a	22,4	28,4	45,7	54,7	72,9	87,3
	Grupo b	22,36	27,64	39,1	44,8	72,9	76,8
	Grupo c	23,84	24,07	40,9	54,7	81,8	87,3
	Grupo d	19,13	24,15	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	Grupo e	21,07	22,93	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

3.4 Intercambiabilidad en la mezcla de gases

3.4.1 Cálculos asociados al gas de estudio 1

Realizados los cálculos de intercambiabilidad de los gases seleccionados, se procedió a ejecutar los cálculos de la mezcla de gas hidrocarburo con aire, para determinar la relación aire – combustible óptima. Para ello, fue necesario inicialmente, desarrollar un análisis estadístico que comparara el porcentaje de aire dentro de la mezcla con parámetros como el índice de Wobbe, Wobbe modificado. Asimismo, se asume que la corriente de gas solo consta de propano y butanos. De igual manera, se considera que En la tabla 13 se presenta la relación de gas natural con aire, para el cálculo del índice de Wobbe y Wobbe modificado. Por su parte, en la tabla 14 se desarrolla la relación de composición propano/butanos y su intercambiabilidad con la relación aire – combustible determinado.

Tabla 14.

Determinación de la relación de gas de estudio 1 – aire y coeficientes de poder calorífico. SG: Gravedad específica; GHV – NHV: Gross – Net Heat Value. MWI: Índice de Wobbe Modificado.

Wobbe	GLP	Aire	SG	GHV	NHV	MWI
536	20,000%	80,00%	1,1514	575	530	21
779	30,000%	70,00%	1,2270	862	795	30
1007	40,000%	60,00%	1,3027	1150	1060	39
1224	50,000%	50,00%	1,3784	1437	1325	47
1430	60,000%	40,00%	1,4541	1725	1590	55
1627	70,000%	30,00%	1,5298	2012	1854	63
1815	80,000%	20,00%	1,6054	2300	2119	70

Para los cálculos asociados al gas de estudio 1, y considerando que ellos límites establecidos, dentro del marco de esta investigación, para un valor de intercambiabilidad optimo están entre los 1393 (IW) y 54 (MIW), la relación aire – gas natural, el porcentaje establecido fue de 42% aire y 58% gas natural. Una vez establecida esta relación, se procedió a realizar el cálculo de la intercambiabilidad según la relación propano/butano.

Tabla 15.

Cálculo de índice de Wobbe e índice Modificado de Wobbe para el gas de estudio 1.

IW	C₃H₈	C₄H₁₀	SG LPG	LPG %	Air %	Total GHV	Total NHV	WMI
1188	0,00	100,00	2,0068	44%	56,29	1425,71	1315,80	57,9
1220	10,00	90,00	1,9584	46%	54,08	1463,48	1350,33	52,8
1254	20,00	80,00	1,9100	48%	51,64	1505,28	1388,53	48,8
1293	30,00	70,00	1,8615	51%	48,92	1551,77	1431,03	45,6
1336	40,00	60,00	1,8131	54%	45,88	1603,79	1478,59	43,0
1385	50,00	50,00	1,7647	58%	42,46	1662,41	1532,17	40,7
1441	60,00	40,00	1,7163	61%	38,57	1728,95	1593,00	38,8
1504	70,00	30,00	1,6679	66%	34,11	1805,14	1662,64	37,2
1578	80,00	20,00	1,6194	71%	28,96	1893,24	1743,17	35,7
1664	90,00	10,00	1,5710	77%	22,94	1996,28	1837,37	34,4
1765	100,00	0,00	1,5226	84%	15,80	2118,41	1949,01	33,2

Basados en los resultados presentados y el cálculo desarrollado y presentado en el anexo 2, para el gas de estudio 1 la relación de propano y butano varia desde 37% y 63% hasta 63,5% y 36,5%, respectivamente. Esta relación de componentes arroja un índice de Wobbe de 1393,0 y un índice de Wobbe modificado de 54. Asimismo, la relación aire – combustible es de

aproximadamente, 42% - 58%. Las demás variables fueron calculadas con las ecuaciones presentadas anteriormente y se resumen en la tabla 16.

Tabla 16.

Resumen de la mezcla gas de estudio 1 – aire.

Propiedad	Valor	Unidad
Wobbe Index (MJ/m³)	1393,0	
Modified Wobbe Index (MWI)	54	
Modified Wobbe Index Acceptable Deviation +/-	5%	
Modified Wobbe Index Acceptable Lower Limit	51,30	
Modified Wobbe Index Acceptable Upper Limit	56,70	
LPG Vapor %	58%	
Air %	42%	
SG	1,44	
Poder Calórico Bruto	1671,0	BTU/cuft
Poder Calórico Neto	1539,9	BTU/cuft
Densidad Calórica Bruta	1,764	Mj/cuft
Densidad Calórica Neta	1,626	Mj/cuft
System Flow	3637,6	cuft/h
Vapor Flow	2114,3	cuft/h
Air Flow	1523,2	cuft/h
Liquid Flow	62,9	gal/h
Ratio A/F	14,21	% Vol.

3.4.2 Cálculos asociados al gas de estudio 2

Siguiendo el procedimiento del inciso anterior, se desarrollaron los cálculos de intercambiabilidad para el gas de estudio 2. Basado en la metodología planteada, el proceso inició con el cálculo de la relación de aire y gas (Tabla 17).

Tabla 17.

Determinación de la mezcla de gas de estudio 2 – aire y coeficientes de poder calorífico.

Wobbe	GLP	Air	SG	GHV	NHV	MWI
515	20,000%	80,00%	1,1340	548	505	20
750	30,000%	70,00%	1,2009	822	757	29
974	40,000%	60,00%	1,2679	1096	1010	38
1186	50,000%	50,00%	1,3349	1371	1262	46
1389	60,000%	40,00%	1,4019	1645	1515	54
1583	70,000%	30,00%	1,4689	1919	1767	61
1770	80,000%	20,00%	1,5358	2193	2020	68

Añadiendo los resultados al análisis, se obtuvo una relación de 60% de gas natural y 40% de aire, conservando los límites establecidos en el índice de Wobbe y Wobbe modificado. Una vez planteada la relación aire – combustible, se calculó la proporción de propano y butanos que debe contener la mezcla GLP para asegurar la intercambiabilidad de los gases. Estos resultados se presentan en la tabla 18.

Tabla 18.

Cálculo de índice de Wobbe e índice Modificado de Wobbe para la mezcla gas de estudio 2 - aire.

IW	C3H8	C4H10	SG LPG	LPG%	Air%	Total GHV	Total NHV	WMI
1188	0,0%	100,0%	2,007	44%	56%	1426	1316	57,90
1220	10,0%	90,0%	1,958	46%	54%	1463	1350	52,80
1254	20,0%	80,0%	1,910	48%	52%	1505	1389	48,80
1293	30,0%	70,0%	1,862	51%	49%	1552	1431	45,60
1336	40,0%	60,0%	1,813	54%	46%	1604	1479	43,00
1385	50,0%	50,0%	1,765	58%	42%	1662	1532	40,70
1441	60,0%	40,0%	1,716	61%	39%	1729	1593	38,80
1504	70,0%	30,0%	1,668	66%	34%	1805	1663	37,20
1578	80,0%	20,0%	1,619	71%	29%	1893	1743	35,70
1664	90,0%	10,0%	1,571	77%	23%	1996	1837	34,40
1765	100,0%	0,0%	1,523	84%	16%	2118	1949	33,20

Considerando el rango de viabilidad de intercambiabilidad según Wobbe, la variación de la cantidad de propano y butano va desde 37% y 63% hasta 63.5% y 36.5% respectivamente. Con base en esto, las propiedades de la mezcla gas de estudio 2 con aire se presentan en la tabla 19.

Tabla 19.

Resumen de la mezcla gas de estudio 2 – aire.

Propiedad	Valor	Unidad
Wobbe Index	1393,0	
Modified Wobbe Index (MWI)	54	
Modified Wobbe Index Acceptable Deviation +/-	2%	
Modified Wobbe Index Acceptable Lower Limit	51,30	
Modified Wobbe Index Acceptable Upper Limit	56,70	

LPG Vapor %	60%	
Air %	40%	
SG	1,40	
Poder Calorífico Bruto	1649,5	BTU/cuft
Poder Calorífico Neto	1519,2	BTU/cuft
Densidad Calórica Bruta	1,742	Mj/cuft
Densidad Calórica Neta	1,604	Mj/cuft
System Flow	3684,9	cuft/h
Vapor Flow	2217,4	cuft/h
Air Flow	1467,5	cuft/h
Liquid Flow	57,4	gal/h
Ratio A/F	13,54	% Vol.

3.4.3 Cálculos asociados al gas de estudio 3

Corroborada la metodología y usando las propiedades del gas de estudio 3, se procedió a calcular la intercambiabilidad de este, una vez se realiza la mezcla con aire. En la tabla 20 se resume el resultado del análisis la relación de aire y combustible. Esta relación, basado en el índice de Wobbe (IW y MIW), arrojó que la relación optima estaba cercana a 26% de aire y 74% de GLP. Desarrollado el análisis de relación aire – combustible, se procedió a calcular la proporción de propano y butano, cuyos resultados se presentan en la tabla 21. Basado en esta información, la proporción estimada está en el rango de 37% y 63% de propano y butano. Así entonces, las propiedades de la proporción de aire y el gas de estudio 3 seleccionado se presentan en la tabla 22.

Tabla 20.

Determinación de la relación mezcla de gas de estudio 3 – aire y coeficientes de poder calorífico.

Wobbe	Vapor	Air	SG	GHV	NHV	MWI
533	20,000%	80,00%	1,1488	571	526	21
775	30,000%	70,00%	1,2232	857	789	30
1003	40,000%	60,00%	1,2976	1142	1052	39
1219	50,000%	50,00%	1,3720	1428	1316	47
1425	60,000%	40,00%	1,4464	1713	1579	55
1621	70,000%	30,00%	1,5208	1999	1842	63
1809	80,000%	20,00%	1,5952	2285	2105	70

Tabla 21.

Cálculo de índice de Wobbe e índice Modificado de Wobbe para la mezcla gas de estudio 3 - aire.

IW	C3H8	C4H10	SG LPG	LPG%	Air%	Total GHV	Total NHV	WMI
1188	0,0%	100,0%	2,007	44%	56%	1426	1316	57,90
1220	10,0%	90,0%	1,958	46%	54%	1463	1350	52,80
1254	20,0%	80,0%	1,910	48%	52%	1505	1389	48,80
1293	30,0%	70,0%	1,862	51%	49%	1552	1431	45,60
1336	40,0%	60,0%	1,813	54%	46%	1604	1479	43,00
1385	50,0%	50,0%	1,765	58%	42%	1662	1532	40,70
1441	60,0%	40,0%	1,716	61%	39%	1729	1593	38,80
1504	70,0%	30,0%	1,668	66%	34%	1805	1663	37,20
1578	80,0%	20,0%	1,619	71%	29%	1893	1743	35,70
1664	90,0%	10,0%	1,571	77%	23%	1996	1837	34,40
1765	100,0%	0,0%	1,523	84%	16%	2118	1949	33,20

Tabla 22.

Resumen de la mezcla gas de estudio 3 – aire.

Propiedad	Valor	Unidad
Wobbe Index	1393,0	
Modified Wobbe Index (MWI)	54	
Modified Wobbe Index Acceptable Deviation +/-	2%	
Modified Wobbe Index Acceptable Lower Limit	51,30	
Modified Wobbe Index Acceptable Upper Limit	56,70	
LPG Vapor %	58%	
Air %	42%	
SG	1,44	
Poder Calorífico Bruto	1688,4	BTU/cuft
Poder Calorífico Neto	1537,4	BTU/cuft
Densidad Calórica Bruta	1,762	Mj/cuft
Densidad Calórica Neta	1,623	Mj/cuft
System Flow	3643,2	cuft/h
Vapor Flow	2128,5	cuft/h
Air Flow	1514,6	cuft/h
Liquid Flow	62,4	gal/h
Ratio A/F	14,21	% Vol.

3.5 Gráficos de inflamabilidad

Los límites de inflamabilidad representan la concentración mínima de vapor, gases o nieblas inflamables en el aire por debajo o encima de la cual la mezcla no es explosiva. El LEL (límite inferior de inflamabilidad) de todos los gases y vapores inflamables conocidos está en el rango de 0.5 a 1.5%. por su parte, el UEL (límite superior de inflamabilidad) es la concentración máxima de los gases, vapores o nieblas inflamables en aire por arriba de la cual la mezcla no es explosiva. Si la mezcla de gases con el aire se encuentra por debajo del límite inferior de explosividad, la ignición no es posible debido a que la mezcla es demasiado pobre para encender. De igual manera, si está por encima, es demasiado rica para encender. Esto se traduce en que no habrá posibilidad de tener atmosferas explosivas. La Figura 3 muestra la gráfica elaborada para la evaluación de inflamabilidad de los gases de estudio seleccionados, donde se observa que están por fuera del rango de explosión/combustión.

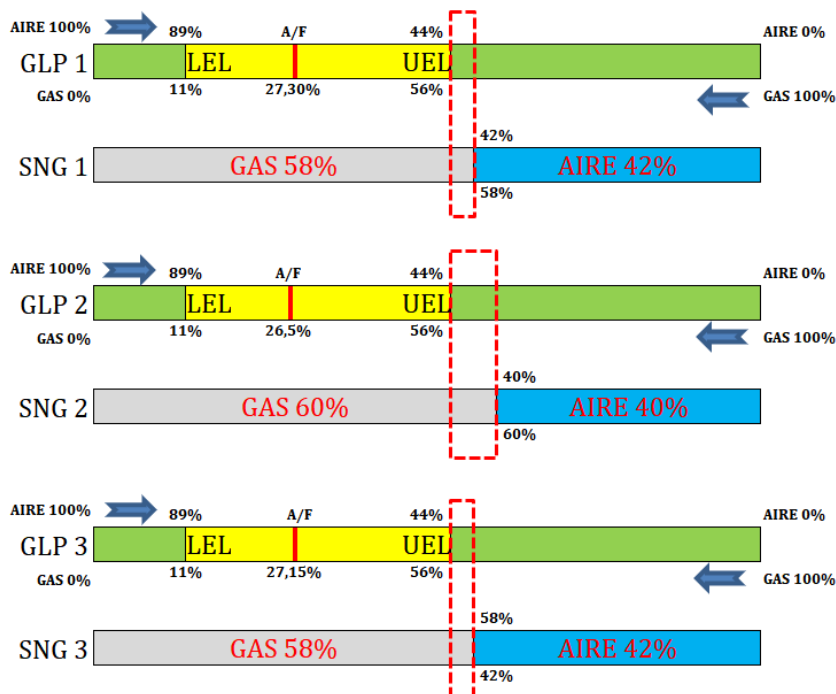


Figura 2. Diagrama de inflamabilidad de los gases estudiados.

3.6 Índice de Delbourg

La relación de potencial de combustión e índice de Wobbe arrojó que el gas es reemplazable, con la variación de la familia/clasificación de Delbourg atribuida.

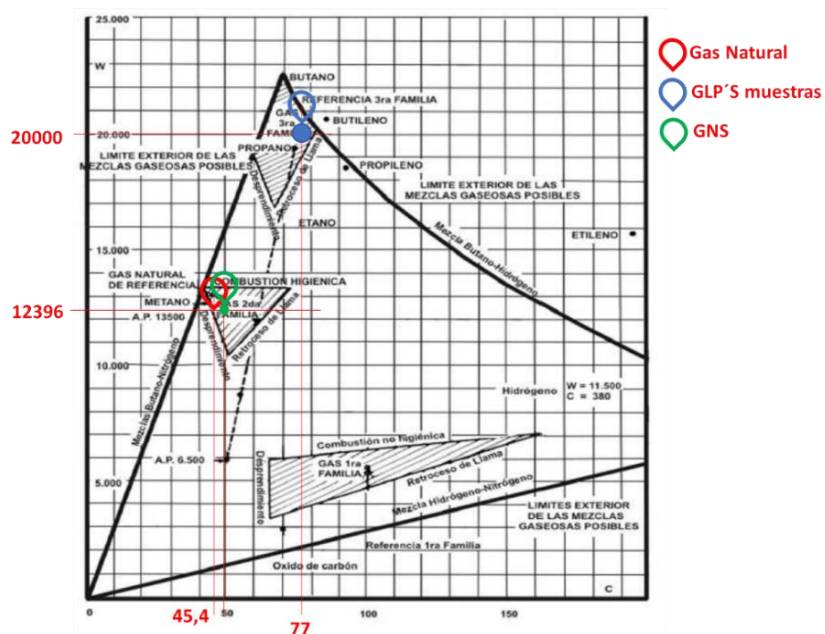


Figura 3. Diagrama de Delbourg de los gases evaluados.

3.7 Resumen

En la tabla 23 se presenta un gráfico comparativo donde se evalúan las propiedades del Gas Licuado de Petróleo (GLP) en relación con diferentes estándares y especificaciones, destacando su cumplimiento con algunos parámetros clave:

- ✓ Intercambiabilidad (Wobbe y Wobbe Modificado). El GLP cumple con los parámetros de intercambiabilidad establecidos por Wobbe y Wobbe modificado, con un valor de 54 MJ/m^3 , lo que lo hace adecuado en términos de calidad y capacidad calorífica.
- ✓ Relación THC. Al tener una menor relación atómica H/C que el gas natural, su combustión representa una menor eficiencia en cuanto a emisiones de gases de efecto invernadero.

- ✓ Número de Metano. El GLP presenta un número de metano de 37, en comparación con la referencia de Caterpillar, que es de 100 para el metano. Esto indica una diferencia significativa en la composición química del GLP en relación con el metano puro.
- ✓ Límites de Inflamabilidad. El GLP se encuentra dentro de los límites de inflamabilidad establecidos, lo que garantiza su seguridad y capacidad de combustión controlada en aplicaciones específicas. En la tabla 11 se presenta un gráfico comparativo donde se evalúan las relación de las diferentes mezclas de gases naturales sintéticos en relación con el gas natural a emular

Este cuadro comparativo resalta que el GLP es compatible con los estándares de intercambiabilidad, es seguro en términos de inflamabilidad. Por su parte, en la tabla 24 se muestran los valores de intercambiabilidad del LEL, UEL, MON, THC ratio y el número de metano.

Tabla 23.

Cuadro comparativo de condiciones de intercambiabilidad de los gases evaluados.

Propiedad	¿Cumple con las condiciones de intercambiabilidad?					
	Gas de estudio 1		Gas de estudio 2		Gas de estudio 3	
	Sí	No	Sí	No	Sí	No
Wobbe	X		X		X	
Wobbe modificado	X		X		X	
Delbourg	X		X		X	

Tabla 24.

Cuadro de propiedades las mezclas de los gases de estudio para los motores de combustión a gas.

Propiedad	Valor/dato
-----------	------------

		Gas natural	Gas de estudio 1	Gas de estudio 2	Gas de estudio 3
Límites de inflamabilidad	LEL	23%	56%	53%	56%
	UEL	7%	11%	11%	11%
MON		116,44	95,68	96,15	95,75
THC H/C Ratio		3,64	2,57	2,61	2,58
Número de metano		70,00	36,29	37,05	36,40

4. Conclusiones y recomendaciones

1. Los cálculos de intercambiabilidad para los 3 gases estudiados permitieron identificar el porcentaje de mezcla de gas natural con aire. En estos casos, la metodología empleada sirvió para estimar la capacidad de la mezcla de aire y GLP dentro de parámetros técnicos y de seguridad, encontrando el balance entre el índice de Wobbe y la densidad de la mezcla del gas.
2. La evaluación teórica de los parámetros clave, como el índice de Wobbe, el índice de Delbourg, la concentración de THC, el número de metano y los límites de inflamabilidad, proporciona una base sólida en el desarrollo metodológico descrito en esta investigación, para comprender y garantizar la intercambiabilidad del Gas Licuado de Petróleo (GLP). Estos parámetros son críticos para la eficiencia y seguridad en el uso de GLP en esta aplicación. El índice de Wobbe, al ser una medida de la capacidad calorífica relativa, asegura que el GLP mantenga una combustión estable y eficiente, mientras que el índice de Delbourg destaca la importancia de la mezcla de hidrocarburos para evitar problemas de formación de hollín y emisiones indeseadas.
3. Al evaluar la intercambiabilidad de tres gases tipo GLP dentro de la familia tipo III mediante el índice de Delbourg, se ha determinado que estos gases exhiben un parámetro dentro del rango de trabajo establecido. Esto sugiere que los gases en cuestión son

intercambiables de manera efectiva, lo que implica que se pueden utilizar de manera equivalente en aplicaciones específicas sin comprometer significativamente su desempeño. La consistencia en el índice de Delbourg dentro de los límites aceptables respalda la viabilidad de sustituir al gas natural de su tipo, proporcionando flexibilidad y opciones a los usuarios sin afectar negativamente la calidad o eficiencia del producto.

4. Como recomendación principal, se sugiere desarrollar pruebas a escala experimental de explosividad y arranque con motores de combustión interna a gas, para evaluar criterios propios asociados a esta metodología y validar la intercambiabilidad en conjunto con la eficiencia del motor.

Bibliografía

Abu, R., Kadirgama, K., Rahman, M. M., Sharma, K. V., & Semi. (2012). Application of Natural Gas for Internal Combustion Engines. In *Advances in Natural Gas Technology*. InTech. <https://doi.org/10.5772/38896>

Ahmadi, M. A., & Elsharkawy, A. (2017). Robust correlation to predict dew point pressure of gas condensate reservoirs. *Petroleum*, 3(3), 340–347. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2016.05.001>

ALAROUJ, M., ALOMAIR, O., & ELSHARKAWY, A. (2020). Gas condensate reservoirs: Characterization and calculation of dew-point pressure. *Petroleum Exploration and Development*, 47(5), 1091–1102. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(20\)60120-3](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(20)60120-3)

Alberto, E., & Gamboa, V. (n.d.). *ESTUDIO CONCEPTUAL SOBRE LA GENERACIÓN DE GAS NATURAL SINTÉTICO A PARTIR DE UNA FUENTE DE ENERGÍA RENOVABLE MEDIANTE TECNOLOGÍA “POWER TO GAS”* CARLOS ANDRÉS FONTALVO GÓMEZ.

- Andres Cardona Isaza, C. (n.d.). *ACONDICIONAMIENTO DEL MOTOR PARA CONVERSIÓN A GAS NATURAL VEHICULAR*.
- Azad, A. K. (Energy resources scholar), & Rasul, M. (n.d.). *Advanced biofuels : applications, technologies and environmental sustainability*.
- Beychok, M. R. (n.d.). *b COAL GASIFICATION AND THE PHENOSOLVAN PROCESS*.
- Bhandari, P., Kumar, A., & Huhnke, R. (2012). Review of syngas contaminants removal using carbon-based catalysts. *American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting 2012, ASABE 2012, 1*, 51–72. <https://doi.org/10.13031/2013.41702>
- Boehman, A. L., & Le Corre, O. (2008). Combustion of syngas in internal combustion engines. *Combustion Science and Technology*, *180*(6), 1193–1206. <https://doi.org/10.1080/00102200801963417>
- Boldt, K. (2018). *Motor (LP) Knock Test Method Development*.
- Bolt, A., Dincer, I., & Agelin-Chaab, M. (2020). A critical review of synthetic natural gas production techniques and technologies. In *Journal of Natural Gas Science and Engineering* (Vol. 84). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103670>
- Bradley, D. (2016). Fundamentals of lean combustion. In *Lean Combustion: Technology and Control: Second Edition* (pp. 21–61). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804557-2.00002-X>
- Briggs, T. (2014). *The Combustion and Interchangeability of Natural Gas on Domestic Burners*. 4(3). www.iiste.org
- Chandel, M., & Williams, E. (2009). *Synthetic Natural Gas (SNG): Technology, Environmental Implications, and Economics*.
- Chauvy, R., Dubois, L., Lybaert, P., Thomas, D., & De Weireld, G. (2020). Production of synthetic natural gas from industrial carbon dioxide. *Applied Energy*, *260*. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114249>
- Daza, C. E., Mondragón, F., Moreno, S., & Molina, R. (2011). Reformado de metano con CO₂ sobre óxidos mixtos Ni-Mg-Al-Ce derivados de hidrotalcitas: Efecto de la relación Mg/Ni CO₂ reforming of methane over Ni-Mg-Al-Ce mixed oxides derived from hydrotalcites: Mg/Ni ratio effect. In *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia N.º* (Vol. 57). Enero.
- Dybkjaj, I. (1995). Tubular reforming and autothermal reforming of natural gas-an overview of available processes. In *Fuel Processing Technology* (Vol. 42). ELSEVIER.
- Emergency Contact Information Classification of the substance or mixture OSHA HCS 2012 • Flammable Gases 1-H220 Compressed Gas-H280 Simple Asphyxiant.* (2019). www.dakotagas.com
- Espinoza, H., Patino, L., González, Y., & Irving, L. (2007). A predictive model of natural gas mixture combustion in internal combustion engines. In *AGOSTO DE* (Vol. 27, Issue 2).

- Fanchi, J. R. (2010). Fluid Properties. In *Integrated Reservoir Asset Management* (pp. 17–32). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-382088-4.00002-5>
- Faramawy, S., Zaki, T., & Sakr, A. A. E. (2016). Natural gas origin, composition, and processing: A review. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 34, 34–54. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.06.030>
- Fernández-González, J., Rumayor, M., Domínguez-Ramos, A., & Irabien, Á. (2022). CO₂ electroreduction: Sustainability analysis of the renewable synthetic natural gas. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 114. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2021.103549>
- García, A., García, L., López, E., Becerra, N., Ojeda, I., Goldwasser, M., & López, C. M. (2010). Reformado auto-térmico de metano con CO₂, vapor y O₂ a gas de síntesis, sobre catalizadores estructurados basados en perovskitas. In *Avances en Química* (Vol. 5, Issue 2). www.saber.ula.ve/avancesenquimica
- Gaz naturel-Désignation de la qualité(F) ii(F). (2013). <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/75ca4b48-Webwww.iso.orgPubliéenSuisseiTehSTANDARDPREVIEWhttps://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/75ca4b48->
- Halabi, M. H., de Croon, M. H. J. M., van der Schaaf, J., Cobden, P. D., & Schouten, J. C. (2008). Modeling and analysis of autothermal reforming of methane to hydrogen in a fixed bed reformer. *Chemical Engineering Journal*, 137(3), 568–578. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.05.019>
- Heyne, S. (n.d.). *THESIS FOR THE DEGREE OF LICENTIATE OF ENGINEERING Process Integration Opportunities for Synthetic Natural Gas (SNG) Production by Thermal Gasification of Biomass*.
- Introduction to Chemical Engineering*. (n.d.).
- Juraščík, M., Sues, A., & Ptasiński, K. J. (2010). Exergy analysis of synthetic natural gas production method from biomass. *Energy*, 35(2), 880–888. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.07.031>
- Katoh, S., Nakamura, M., & Skocpol, B. (2001). Reduction of olefins in FCC gasoline. *Studies in Surface Science and Catalysis*, 134, 141–152. [https://doi.org/10.1016/s0167-2991\(01\)82316-8](https://doi.org/10.1016/s0167-2991(01)82316-8)
- King, S. R. (1993). *Engine Knock Rating of Natural Gases-Methane Number*. <https://gasturbinespower.asmedigitalcollection.asme.org>
- Kopyscinski, J., Schildhauer, T. J., & Biollaz, S. M. A. (2010). Production of synthetic natural gas (SNG) from coal and dry biomass - A technology review from 1950 to 2009. In *Fuel* (Vol. 89, Issue 8, pp. 1763–1783). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.01.027>
- Kovacevic, V., & Wesseler, J. (2010). Cost-effectiveness analysis of algae energy production in the EU. *Energy Policy*, 38(10), 5749–5757. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.05.025>

- Kubesh, J., King, S. R., Liss, W. E., & Francisco, S. (n.d.). *Effect of Gas Composition on Octane Number of Natural Gas Fuels Reprinted from: Alternative Fuels in Transportation (SP-937) International Fuels and Lubricants Meeting and Exposition*
- Leal, A. L., Ribeiro, J. C., Silva, A. M. S., & Martins, F. G. (2018). Predicting Research and Motor Octane Numbers based on Near Infrared Spectroscopy: Models based on Partial Least Squares Regression and Artificial Neural Networks. In *Computer Aided Chemical Engineering* (Vol. 43, pp. 187–192). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64235-6.50034-6>
- Matsumoto, K., Doumpos, M., & Andriosopoulos, K. (2018). Historical energy security performance in EU countries. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 82, pp. 1737–1748). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.058>
- Moreno-Arciniegas, L.-S., Rodríguez-Corredor, F.-E., Afanador-Rey, L.-E., & Grosso-Vargas, J.-L. (2009). SYNGAS OBTAINMENT FROM THE GASIFICATION OF ASPHALTENES OF THE SAN FERNANDO CRUDE OIL. In *Tecnología y Futuro* (Vol. 3).
- Mu, L., & Cui, Q. (2018). Measurement and Prediction of Hydrocarbon Dew Points of Synthetic Natural Gas Mixtures. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 63(11), 4226–4233. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.8b00706>
- P. Yang, E. P. Columbus, J. Wooten, W. D. Batchelor, P. R. Buchireddy, X. Ye, & L. Wei. (2009). Evaluation of Syngas Storage Under Different Pressures and Temperatures. *Applied Engineering in Agriculture*, 25(1), 121–128. <https://doi.org/10.13031/2013.25419>
- Pannucharoenwong, N., Worasaen, A., Benjapiyaporn, C., Jongpluempiti, J., & Vengsungnle, P. (2017). Comparison of Bio-Methane Gas Wobbe Index in Different Animal Manure Substrate. *Energy Procedia*, 138, 273–277. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.056>
- Puga, E. V., Moumin, G., Neumann, N. C., Roeb, M., Ardone, A., & Sattler, C. (2022). Holistic View on Synthetic Natural Gas Production: A Technical, Economic and Environmental Analysis. *Energies*, 15(5). <https://doi.org/10.3390/en15051608>
- Quintero-Coronel, D. A., Salazar, A., Pupo-Roncallo, O. R., Bula, A., Corredor, L., Amador, G., & Gonzalez-Quiroga, A. (2023). Assessment of the interchangeability of coal-biomass syngas with natural gas for atmospheric burners and high-pressure combustion applications. *Energy*, 276. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127551>
- Rehman, S., & Alam, S. S. (2020). Rate of heat release characteristics of supercritical sprays of diesel line blend in constant volume combustion chamber. *Results in Engineering*, 6. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2020.100121>
- Rincon, H. E., Miller, C., & Almario, S. (n.d.). *CONVERTIR A GAS NATURAL UN MOTOR DE COMBUSTION INTERNA IGNICIADO POR CHISPA UNIVERSIDAD AUTONOMA DE OCCIDENTE FACULTAD DE INGENIERIAS DEPARTAMENTO DE AUTOMATICA Y MECANICA PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA SANTIAGO DE CALI 2003 1.*

- Simell, P., Hannula, I., Tuomi, S., Nieminen, M., Kurkela, E., Hiltunen, I., Kaisalo, N., & Kihlman, J. (2014). Clean syngas from biomass—process development and concept assessment. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 4(4), 357–370. <https://doi.org/10.1007/s13399-014-0121-y>
- Society for Testing, A. (n.d.). *ASTM D3588: Standard Practice for Calculating Heat Value, Compressibility Factor, and Relative Density (Specific Gravity) of Gaseous Fuels*.
- Steinberg, M. (n.d.). *Conversion of Coal to Substitute Natural Gas (SNG) •Steam-Oxygen Gasification •Catalytic Gasification •Hydrogasification •Underground Steam-Oxygen Gasification •Underground Hydrogasification (PCM) Presentation By*. www.hceco.com
- Synthetic natural GaS from coal, Dry BiomaSS, anD PoWer-to-GaS aPPlicationS*. (n.d.).
- Szima, S., & Cormos, C. C. (2021). Co2 utilization technologies: A techno-economic analysis for synthetic natural gas production. *Energies*, 14(5). <https://doi.org/10.3390/en14051258>
- Techno-economic and environmental assessment of biorefinery technologies View project EEA_EIM**2_PSO View project Daniel Flórez-Orrego École Polytechnique Fédérale de Lausanne*. (2011). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32284.03202>
- UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO CARRERA: INGENIERÍA MECÁNICA. (n.d.).
- USE OF NATURAL GAS IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES. (n.d.). <https://doi.org/10.13140/2.1.4630.4000>
- Wakamura, O. (n.d.). *Development of GTL (Gas to Liquid) Technology*.
- Worasaen, A., Pannuchaoenwong, N., Benjapiyaporn, C., Jongpluempiti, J., & Vengsungnle, P. (2017). Suitable Study of CBG Fuel by Considering in Wobbe Index from Compressed Bio-Methane Gas Plant, Khon Kaen University, Thailand. *Energy Procedia*, 138, 278–281. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.061>
- Xie, M., Tu, Y., & Peng, Q. (2023). Numerical study of NH₃/CH₄ MILD combustion with conjugate heat transfer model in a down-fired lab-scale furnace. *Applications in Energy and Combustion Science*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2023.100144>
- Yentekakis, I. V., Panagiotopoulou, P., & Artemakis, G. (2021). A review of recent efforts to promote dry reforming of methane (DRM) to syngas production via bimetallic catalyst formulations. In *Applied Catalysis B: Environmental* (Vol. 296). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2021.120210>
- Yolanda, M., Morales, R., & Guzmán, A. H. (n.d.). *CARACTERIZACIÓN DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA CON DOS TIPOS DE COMBUSTIBLE*.
- Zahedi nezhad, M., Rowshanzamir, S., & Eikani, M. H. (2009). Autothermal reforming of methane to synthesis gas: Modeling and simulation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(3), 1292–1300. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.11.091>

- Zamri, A. A., Ong, M. Y., Nomanbhay, S., & Show, P. L. (2021). Microwave plasma technology for sustainable energy production and the electromagnetic interaction within the plasma system: A review. *Environmental Research*, 197. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111204>
- Zhang, L., Wu, W., Zhang, Y., & Zhou, X. (2018). Clean synthesis gas production from municipal solid waste via catalytic gasification and reforming technology. *Catalysis Today*, 318, 39–45. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2018.02.050>