

Design of Combustion Engines for Renewable and Alternative Gaseous Fuels: Bioenergy Territorial Planning Proposal; Part 2/2

Juan Pablo GÓMEZ MONTOYA PhD.¹* Juan Francisco TISZA, MsC², Hernando Alexander YEPES TUMAY, PhD³, Antony BAZÁN AGUILAR, PhD¹.

¹Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica del Perú, Lima, Perú. *jgomezmo@utp.edu.pe.

²Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

³Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña, Colombia.

Abstract– A conceptual design of internal combustion engines for renewable and alternative gaseous fuels is presented; the mathematical modelling is based on thermodynamic principles applied to Otto cycles for spark-ignition engines and on the results of experimental tests conducted on two engines; an octane rating research engine and other optimized for biogas. Validation of the mathematical model of design was carried out with a third, larger-scale engine for biogas. It was found that the fuels with the highest capacity to produce work are biogas and natural gas.

Keywords– SI engines, exergy, knocking, biogas and natural gas.

Diseño de motores de combustión para combustibles gaseosos renovables y alternativos: Propuesta de planificación territorial bioenergética; Parte 2/2

Juan Pablo GÓMEZ MONTOYA PhD.¹[✉]* Juan Francisco TISZA, MsC²[✉], Hernando Alexander YEPES TUMAY, PhD³[✉], Antony BAZÁN AGUILAR, PhD¹[✉].

¹Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica del Perú, Lima, Perú, *jgomezmo@utp.edu.pe.

²Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

³Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña, Colombia.

Resumen- Se presenta un diseño conceptual de motores de combustión interna para combustibles gaseosos renovables y alternativos; el modelamiento matemático se basa en los principios termodinámicos aplicados a los ciclos Otto para motores de encendido provocado (MEP) y en los resultados de pruebas experimentales en dos MEP; un motor de investigación de octanaje y un motor optimizado para biogás, la validación del modelo matemático del diseño se hizo con un tercer MEP de mayor escala para biogás. Encontrando que los combustibles con mayor capacidad de producir trabajo son el biogás y gas natural.

Keywords—MEP, exergía, golpeo, biogás y gas natural.

I. INTRODUCCIÓN

Uno de los mayores problemas a los que se enfrenta la humanidad en la actualidad es el cambio climático, el cual es impulsado principalmente por las actividades humanas, como la quema de combustibles fósiles y la deforestación, que han generado el llamado efecto invernadero; el cambio climático ha tenido consecuencias significativas y multifacéticas en el medio ambiente y la sociedad. Según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), la temperatura global promedio ha aumentado aproximadamente 1.2°C desde la era preindustrial, desencadenando una serie de fenómenos adversos [1]. Entre los efectos más considerables se encuentra el aumento en la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos, como huracanes, sequías y olas de calor, los cuales ponen en riesgo la vida y la propiedad, además afectan negativamente la agricultura, reduciendo la productividad de los cultivos y amenazando la seguridad alimentaria global [2].

El cambio climático también acelera el derretimiento de los glaciares y las capas de hielo polar, elevando el nivel del mar e incrementando la temperatura atmosférica en esas regiones, lo que resulta en una amenaza a las comunidades costeras por todo el mundo [3]. Además, el aumento de la temperatura del océano afecta los ecosistemas marinos, acidificando el agua y destruyendo arrecifes de coral, hábitats vitales para numerosas especies. La biodiversidad terrestre también se ve afectada, al modificarse la dinámica natural de las estaciones climáticas, muchos organismos se enfrentan a dificultades para adaptarse a los rápidos cambios en su entorno [4]. En el ámbito social y económico, el cambio climático agrava las desigualdades existentes, ya que las comunidades más vulnerables son las que

más sufren sus impactos. La migración forzada y los conflictos por recursos escasos son fenómenos que se ven agravados por estas condiciones ambientales adversas. El cambio climático es un desafío global que requiere acciones urgentes y concertadas para mitigar sus efectos y adaptarse a sus inevitables consecuencias [5].

Las energías renovables y alternativas son decisivas en la mitigación del cambio climático, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero resultantes de la combustión de combustibles fósiles. La energía solar y eólica han resultado ser las tecnologías más usadas, con una capacidad global en constante crecimiento; según la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), la capacidad instalada de energía solar fotovoltaica y eólica alcanzó los 710 GW y 743 GW respectivamente en 2020 [7] y continua con una proyección creciente. El uso de estas fuentes de energía renovable disminuye la dependencia de combustibles fósiles, lo que resulta en una reducción significativa de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera. La implementación masiva de energías renovables podría evitar hasta 4.8 gigatoneladas de CO₂ por año para el 2030. Además, las energías renovables contribuyen a la mejora de la calidad del aire, reduciendo la contaminación atmosférica y los riesgos para la salud asociados [7]. La transición energética hacia una matriz más sostenible también impulsa la innovación tecnológica y la creación de nuevos empleos. La Agencia Internacional de Energía (IEA) destaca que las energías renovables generaron cerca de 11.5 millones de empleos en 2019. Sin embargo, esta transición requiere políticas firmes y un marco regulatorio propicio para incentivar la inversión y el desarrollo de infraestructuras adecuadas. Las energías renovables y alternativas son esenciales para reducir el cambio climático, una ruta viable hacia un futuro energético limpio y sostenible [8].

Las tecnologías de los paneles solares y turbinas eólicas son consideradas prácticamente limpias debido a su bajo impacto ambiental durante la fase de generación de electricidad. Sin embargo, hay aspectos que deben ser considerados en el análisis de su ciclo de vida completo y en la huella de carbono equivalente.

Para los paneles solares, en la fabricación se requiere de la extracción y procesamiento de materiales como silicio, plata y otros metales; este proceso es intensivo en energía con huella de carbono equivalente y genera residuos tóxicos [9]. Aunque los paneles solares generan electricidad sin emisiones durante

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

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

DO NOT REMOVE

su operación, la producción y el transporte de los materiales necesarios para su fabricación sí generan emisiones de gases de efecto invernadero y tienen una huella de carbono [10]. Al final de su vida útil, los paneles solares podrían ser reciclados, pero el proceso no está completamente desarrollado y es costoso. Recién se están desarrollando tecnologías para mejorar la eficiencia del reciclaje y reducir el impacto ambiental [11].

En el caso de las turbinas eólicas, la fabricación de aerogeneradores implica la extracción y procesamiento de materiales como acero, cobre y tierras raras. La producción de estos materiales tiene impactos ambientales significativos [12]; las turbinas eólicas generan electricidad sin emisiones durante su operación, sin embargo, la construcción, instalación y mantenimiento de los aerogeneradores también generan emisiones de gases de efecto invernadero [13]. Las turbinas eólicas tienen impactos locales en la fauna, especialmente en aves y murciélagos que pueden colisionar con las aspas. Apenas se están desarrollando métodos y tecnologías para mitigar estos impactos [14]. La mayoría de los componentes de los aerogeneradores, como las torres y las bases, son reciclables; sin embargo, las aspas, hechas de materiales compuestos, presentan un desafío mayor, actualmente se están investigando mejores métodos de reciclaje de las aspas [15]. Aunque las tecnologías asociadas a los paneles solares y los molinos de viento son mucho más limpias que las tecnologías basadas en combustibles fósiles, están lejos de ser exentas de impactos ambientales; se requiere un enfoque integral que incluya mejoras en la producción, operación, mantenimiento y reciclaje para minimizar los impactos.

La bioenergía y el biogás son vitales en la matriz de energías renovables, aprovechando residuos orgánicos para generar electricidad y calor, y reduciendo emisiones de metano a la atmósfera por la descomposición de la biomasa. Aunque la contribución de la bioenergía es menor que la energía eólica y solar, las cuales dominan por su capacidad y rápida expansión, la bioenergía ofrece ventajas como la producción constante de energía y el apoyo a la economía circular, con una tendencia creciente. La energía solar y eólica lideran en capacidad instalada y reducción de CO₂, pero la bioenergía complementa estas fuentes al proporcionar soluciones de gestión de residuos y oportunidades para el desarrollo rural [16].

El biogás enfrenta desafíos que limitan su masificación mundial, incluyendo los costos de producción, logística compleja para gestionar la materia prima, y tecnología variable en eficiencia; cabe resaltar que las tecnologías en tipos de biodigestores no han evolucionado significativamente en los últimos años, permaneciendo en disponibilidad comercial solo de los tipos de biodigestores que ya se consideran clásicos. La falta de políticas de apoyo y competencia con energías renovables consideradas más baratas como la solar y eólica también son barreras significativas. Además, el biogás, aunque eficiente como combustible para motores de combustión interna requiere motores adaptados para su composición química; la infraestructura y mantenimiento también deben ser especializados. Problemas ambientales y sociales derivados de

la producción de biogás, como olores y contaminación, también complican su adopción generalizada [17-19]; Además, en la bioeconomía del biogás se generan abonos orgánicos por digestión anaeróbica, que pueden ser usados para la agricultura, este hecho normalmente no se tiene presente al momento de fomentar la masificación de la producción de biogás, perdiéndose la oportunidad de incentivar ambas, la reducción de combustibles derivados del petróleo y la disminución en el uso de agroquímicos, lo que beneficia la economía de la bioenergía y promete ser una solución para garantizar la seguridad alimentaria global, con alimentación basada en alimentos orgánicos de mejor calidad, más saludables y con precios asequibles.

El biogás, generado a partir de la digestión anaeróbica de materia orgánica, tiene varias propiedades fisicoquímicas que influyen en su utilidad y eficacia como fuente de energía. El biogás, compuesto principalmente de metano y CO₂, presenta características fisicoquímicas que afectan su eficiencia como fuente de energía. Su velocidad de llama es baja debido a la dilución del metano por el CO₂ [19]. La temperatura de llama del biogás varía entre 1,100 y 1,200°C, menor que la del metano puro [20]. Con una densidad energética de aproximadamente 20-25 MJ/m³, también es inferior a la del metano puro. Aunque el biogás no tiene un octanaje convencional, su equivalencia en octanaje se basa en el número de metano, que suele ser de aproximadamente 140-150 en la escala de números de octano [21], lo que hace que sea un combustible ideal para MEP con alta relación de compresión (RC), y que puede operar en condiciones de alta turbulencia para lograr mayores niveles de potencia que los combustibles convencionales como diésel, gasolina, gas natural y GLP por su alta resistencia a la detonación [22,23].

Finalmente, el gas natural, compuesto principalmente de metano, junto con otros gases combustibles dependientes del pozo, se utiliza como combustible alternativo tanto para la generación de electricidad como en automoción. Sus ventajas incluyen una combustión más limpia que el carbón, el diésel y la gasolina, con menores emisiones de CO₂ y otros contaminantes [24]. Además, es más eficiente y económico en comparación con otros combustibles derivados del petróleo por su alto octanaje. Sin embargo, sus desventajas incluyen la liberación de metano durante la extracción y el transporte, dejando una huella de carbono alta, porque el metano es un potente gas de efecto invernadero, con un impacto 20 veces mayor al CO₂. También, la infraestructura de distribución es costosa y su dependencia sigue contribuyendo a los problemas climáticos globales [25].

Los combustibles líquidos, como la gasolina y el diésel, tienden a ser más contaminantes que los combustibles gaseosos. Emiten grandes cantidades de CO₂, la gasolina libera 2.3 kg de CO₂ por litro y el diésel hasta 2.7 kg [26]. Además, generan óxidos de nitrógeno (NOx) y partículas finas, contribuyendo a problemas de salud y smog [27]. Por otro lado, los combustibles gaseosos, como el gas natural, emiten menos CO₂ (2.0 kg por m³) y tienen menores emisiones de NOx y partículas [25].

Por todo lo anterior, se presenta la pregunta de investigación ¿Es posible hacer un diseño innovador de motores de combustión interna para combustibles gaseosos renovables y alternativos que contribuya al avance de la bioenergía como un insumo para la reducción de contaminantes?

Para responder a esta pregunta se usará una metodología para estimar la exergía de los combustibles para MEP usando los principios termodinámicos de los ciclos Otto y limitada por el fenómeno de la autoignición, metodología propia [28], desarrollada y publicada previamente, y que se mejora con el presente trabajo buscando hacer una prestación más simple y enfocada en los detalles más relevantes para el diseño.

El enfoque de esta investigación es cuantitativo con un alcance descriptivo, que busca cuantificar la calidad energética y la eficiencia exergética de los combustibles gaseosos renovables y alternativos, usando dos ecuaciones propuestas desde la investigación y que servirán para el diseño de los MEP basadas en las propiedades fisicoquímicas de los combustibles y en las leyes de la termodinámica; además usando el fenómeno de la detonación como límite de potencia, medido con el número de metano y el octanaje de los combustibles. Como método y procedimiento de investigación el diseño está basado en la correlación de ciertas propiedades fisicoquímicas de los combustibles gaseosos con la geometría y condiciones de operación de los motores para garantizar la máxima eficiencia exergética posible de acuerdo con los principios de los ciclos Otto. Como técnica la investigación está basada simulaciones numéricas de las propiedades fisicoquímicas de los combustibles (realizadas previamente en el programa Chemkin Pro) y en simulaciones CFD en el programa ANSYS para los MEP para garantizar la eficiencia exergética; además, de datos experimentales tomados en tres MEP de la investigación y otros datos científicos tomados de la literatura. Como herramienta se usaron dos programas para las simulaciones, para crear un diseño conceptual de MEP usando combustibles gaseosos, el cual dependiendo del octanaje del combustible entrega las condiciones ideales que debe cumplir el motor, buscando así un balance exergético al garantizar una buena correlación entre la máquina y el combustible usado. El objetivo de la investigación es presentar un diseño innovador de motores de combustión interna para combustibles gaseosos renovables y alternativos con el propósito de fomentar el uso de combustibles renovables como el biogás y el hidrógeno; y combustibles alternativos como el gas natural y el GLP; para sustituir el uso de los combustibles convencionales líquidos como la gasolina y el diésel. Esta investigación formula dos artículos proponiendo analizar un escenario para la economía circular urbano y el diseño eficiente de motores para combustibles renovables. La investigación presenta los antecedentes, metodología del diseño, modelo matemático, diseño conceptual, validación del modelo y resultados experimentales.

II. ANTECEDENTES Y METODOLOGÍA DEL DISEÑO

A. Marco teórico de la tecnología de los MEP

En las últimas décadas, los MEP han experimentado una notable evolución en términos de potencia y eficiencia; las principales modificaciones tecnológicas han sido impulsadas por la necesidad de cumplir con normativas ambientales más estrictas y satisfacer las demandas de los consumidores por vehículos más eficientes y potentes. A continuación, se presenta un detalle de la evolución y las mejoras de los MEP:

1. Tecnología de Inyección Electrónica

La introducción de la inyección electrónica de combustible ha reemplazado a los carburadores tradicionales, permitiendo una dosificación más precisa del combustible y mejorando tanto la eficiencia como las emisiones [29]. Los sistemas de inyección directa, donde el combustible se inyecta directamente en la cámara de combustión, han aumentado la eficiencia térmica y la potencia del motor.

2. Control Electrónico del Motor

El uso de unidades de control electrónico (ECU) ha optimizado la sincronización del encendido y la inyección de combustible, adaptándose a diferentes condiciones de operación del motor [30]. Esto ha permitido mejorar el rendimiento y reducir las emisiones.

3. Turboalimentación y Sobrealimentación

La adopción de turboalimentadores y supercargadores ha incrementado significativamente la potencia de los MEP sin aumentar su tamaño ni peso [31]. Estos dispositivos permiten una mayor densidad de aire en la cámara de combustión, mejorando la combustión y aumentando la potencia específica del motor.

4. Desactivación de Cilindros

La tecnología de desactivación de cilindros, que apaga algunos cilindros cuando no se necesita toda la potencia del motor, ha contribuido a mejorar la eficiencia del combustible en condiciones de baja carga [32].

5. Materiales y Diseño Avanzados

El uso de materiales ligeros y resistentes al calor, junto con mejoras en el diseño de los componentes del motor, ha reducido el peso y mejorado la eficiencia térmica [33]. Además, el diseño de motores de baja fricción ha minimizado las pérdidas de energía internas.

Estas innovaciones han permitido que los MEP modernos sean significativamente más eficientes y potentes que sus predecesores, contribuyendo a una reducción en el consumo de combustible y las emisiones contaminantes, cumpliendo con las crecientes demandas regulatorias y del mercado.

Por otro lado, En las últimas décadas, la RC de los MEP ha aumentado, mejorando la eficiencia del combustible y reduciendo las emisiones. En los años 1980-1990, la RC típica estaba entre 8:1 a 9.5:1 debido a preocupaciones sobre el pre-encendido y la detonación [29]. Con la introducción de la inyección electrónica y mejores sistemas de control en los años 1990-2000, la RC aumentó entre 9.5:1 y 10:1 [30]. En los años 2000-2010, tecnologías como el control de válvulas variable permitieron RC de 10.5:1 a 11:1 [34]. En la década de 2010-2020, la inyección directa de gasolina, el control térmico y la turboalimentación elevaron las RC hasta valores máximos de

12:1, mejorando la eficiencia térmica y la combustión [35]. Además, los avances en combustibles, materiales y control electrónico facilitaron estos incrementos. A pesar de que es claro que la mejor estrategia para aumentar la eficiencia térmica es elevar la RC, de acuerdo con los principios de los ciclos Otto, los combustibles con bajo octanaje, relativamente, como el GLP o la gasolina no pueden operar con RC más altas a 12:1, mientras que otros combustibles como el gas natural y el biogás, con mayor octanaje, pueden operar con RC de 14:1 y 17:1 respectivamente; pero no hay disponibilidad comercial de MEP con estas características para estos combustibles con alta resistencia a la detonación, debido al interés y la disponibilidad de combustibles como la gasolina y el GLP.

B. Antecedentes de esta investigación

En trabajos anteriores se presentaron las bases para el diseño que se presenta sobre MEP. En orden cronológico, las ideas y contribuciones presentadas anteriormente:

Se midieron el número de metano MN y la RC crítica (CCR) de doce mezclas de biogás/CH₄/C₃H₈/H₂, en un motor de investigación cooperativa (CFR). Además, se dedujo una correlación entre el MN y la CCR para 60 combustibles [36].

El comportamiento del golpeteo o detonación en un MEP fue analizado usando diferentes intensidades de golpeteo: insignificante, baja y alta. Se definió un umbral de golpeteo (KT), por sus siglas en inglés, con una presión pico de golpeteo entre 0.2-0.5 bar promedio durante 200 ciclos [37].

Se probaron diferentes estrategias para mejorar el desempeño de un MEP (grupo electrógeno) operando con biogás. Se encontró que la máxima energía eléctrica (EE_{max}) generada dependía de la resistencia al golpeteo del combustible medida con el MN [38].

Se analizó el efecto de la combustión pobre en la tendencia al golpeteo en el motor CFR y en el MEP diseñado para biogás. Encontrando que una reducción en la relación de equivalencia o dosado relativo, lleva a un aumento en la tendencia al golpeteo en el MEP de biogás para todos los combustibles [39].

Antes, se simuló (3D-CFD en el programa ANSYS) y se probó numérica y experimentalmente el efecto de la intensidad de la turbulencia en la tendencia al golpeteo en el MEP para biogás, con diferentes cabezas de pistón. La mayor intensidad de turbulencia incrementó la tendencia al golpeteo del MEP. El biogás fue el único combustible que logró mayor EE_{max} [23].

Se analizó en detalle el efecto de la combustión pobre en la tendencia al golpeteo en el MEP para biogás, demostrando que se aumentaba la tendencia al golpeteo debido a que la mayor apertura de la mariposa incremento la presión en los ciclos de admisión y compresión, aumentando la tendencia al golpeteo [40].

Se propuso que el MN para combustibles gaseosos sirviera de manera similar al número de octano de investigación (RON), por sus siglas en inglés, para combustibles líquidos. Las propiedades de combustión densidad de energía (E_D), velocidad de llama laminar (S_L) y temperatura de llama adiabática (T_{ad}), se correlacionaron con la CCR y el MN del combustible. Se propuso una ecuación para la eficiencia térmica máxima en

términos del MN (η_{qMN}), similar a la eficiencia máxima del ciclo Otto η_{Otto} [41].

Se propuso una metodología para estimar la calidad energética de los combustibles gaseosos relativa al metano puro, comparando las siguientes propiedades: E_D, S_L, T_{ad}, relación de calores específicos (γ), relación atómica hidrógeno/carbono (H/C) y MN. El η_{qMN} se derivó de η_{Otto} y las leyes de la termodinámica. Resultando que los combustibles con MN > 97 obtuvieron una mayor EE_{max} y eficiencia térmica que el propano, gas natural y el diésel [22].

Se presentó una metodología para estimar la eficiencia exergética para combustibles gaseosos y líquidos para MEP, basada en las leyes termodinámicas y dos metodologías [42].

C. Principios termodinámicos de los ciclos Otto y estado del arte relacionado con el diseño de MEP para biogás.

La eficiencia máxima (η_{Otto}) convencional para MEP puede evaluarse usando los principios de los ciclos Otto, dividido en varios tiempos el proceso de combustión, según Figuras 1 y 2:

- La admisión es un proceso isobárico (P₁, T₁).
- La compresión es un proceso isentrópico (P₂₋₁, T₂₋₁).
- La adición de calor es un proceso isocórico (P₃₋₂, T₃₋₂).
- La potencia es una expansión isentrópica (P₄₋₃, T₄₋₃).
- El escape está dividido en dos, un proceso isocórico (P₁₋₄, T₁₋₄) y un proceso isobárico (P₁, T₁).

η_{Otto} se determina utilizando tanto la RC como el γ de la mezcla aire-combustible, según (1). η_{Otto} podría escribirse en términos de las temperaturas y presiones al inicio (T₁, P₁) y al final (T₂, P₂) de la carrera de compresión; pero la ecuación no tiene un límite por el golpeteo [29]. Un ciclo real en un MEP difiere del ciclo Otto ideal porque el fenómeno de golpeteo limita el rendimiento máximo del motor y la combustión requiere un corto tiempo para la formación del frente de llama con pérdidas de calor hacia las paredes del cilindro.

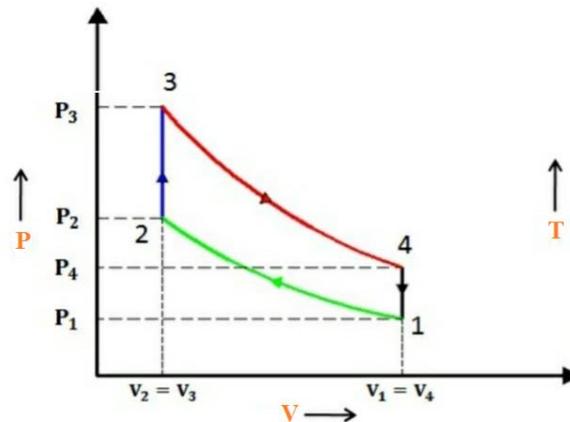


Figure 1 Ciclo Otto, diagrama P-V.

$$\eta_{\text{Otto}} = 1 - \frac{1}{CR^{(\gamma-1)}} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \left[\frac{P_1}{P_2} \right]^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (1)$$

La ecuación (1) predice que usar mezclas con altos γ, reducir T₁ utilizando aire acondicionado e incrementar T₂ utilizando MEP con altas RC, aumentarían η_{Otto}. También, predice que reducir P₁ utilizando estrangulación con la válvula

de mariposa (aceleración parcial) e incrementar P_2 utilizando alta RC también aumentará η_{Otto} . Basados en estos principios termodinámicos de los ciclos Otto se hace el diseño.

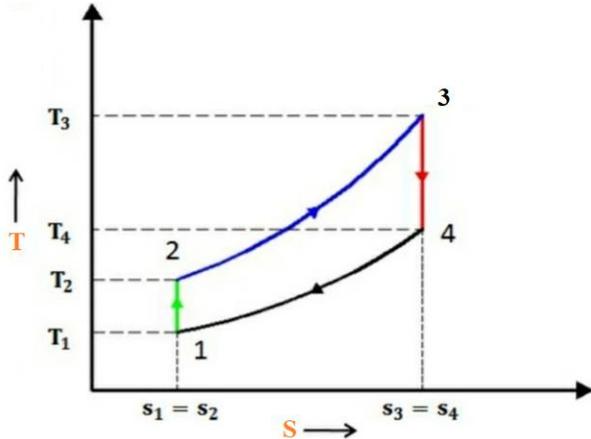


Figure 2 Ciclo Otto, diagrama T-S.

La exergía es el trabajo útil máximo que puede extraerse de un sistema a medida que este alcanza de forma reversible el equilibrio (mecánico, térmico y químico) con su entorno. La eficiencia de la segunda ley, también encontrada en la literatura como efectividad, exergía o eficiencia exergética, mide cuán efectivamente la energía gastada (energía química del combustible) se convierte en energía útil mecánica o eléctrica [43]. Se evaluó la exergía de varios combustibles hidrocarburos y se presentó una ecuación para estimar la exergía química cuando se conoce el poder calorífico inferior (LHV) [44],

$$e = LHV_f * \left(1.0334 + 0.0183 \frac{H}{C} - 0.0694 \frac{1}{C} \right) \quad (2)$$

Donde, (e) es la exergía gastada; además, la eficiencia exergética (ε) mide la conversión en exergía recuperada (x), a través de un ciclo ideal con procesos reversibles; ε es similar a la eficiencia de la segunda ley (η_{II}) definida como [45],

$$\varepsilon = \frac{x \cdot m_f}{e \cdot m_f} = \frac{\text{Energía util recuperada (X)}}{\text{Exergía gastada (E)}} \quad \varepsilon = \frac{X}{E} \quad (3)$$

Con datos de investigaciones experimentales, se presentaron varias correlaciones entre el número de octano del motor (MON), RON, la relación H/C y el MN [46],

$$MN = 1.445 * MON - 103.42 \quad (4)$$

$$MON = -406.14 + 508.04 * \frac{H}{C} - 173.5 * \left(\frac{H}{C} \right)^2 + 20.17 * \left(\frac{H}{C} \right)^3 \quad (5)$$

$$MON = 50.022 * e^{0.2381 * H/C} \quad (6)$$

$$MON = 0.894 * RON \quad (7)$$

D. Metodología de Diseño

La Tabla 1 presenta las especificaciones técnicas principales de los motores usados durante toda la investigación. El primer motor CFR es un motor clásico de investigación de octanaje adaptado para medir el MN en la Universidad Estatal del Colorado en EE.UU. [36]; el segundo motor, es de un grupo electrógeno diésel convertido a MEP optimizado para biogás, con cambio de pistones, en la Universidad de Antioquia en

Colombia [37-42], con las pruebas en estos motores se generó el diseño presentado en esta investigación. Finalmente, el tercer motor, es también de un grupo electrógeno con un motor diésel convertido a MEP y optimizado bicombustible para biogás ya gas natural, usando recirculación de gases de escape (EGR) en la Universidad tecnológica del Perú, en este motor se valida el diseño presentado basado en las propiedades fisicoquímicas de los combustibles gaseosos y de acuerdo con la termodinámica.

Tabla 1 Especificaciones técnicas de los motores usados

Características	Motor CFR	MEP biogas 1	MEP biogas 2
Cilindraje (cm ³)	612	1550	3990
Relación de compresión	Variable 4-18:1	15.5	17.5
Velocidad (rpm)	940	1800	1800
Avance de chispa (°APMS)	25	Optimizado con η_q	Optimizado con η_q
Potencia máxima (kW)	3.7	8	38
Aspiración	Natural sin mariposa	Natural con mariposa	Natural con mariposa
Cilindros (N°)	1	2	4

Se presentó una metodología para estimar cuantitativamente la calidad energética de los combustibles gaseosos para la generación de energía eléctrica (EE) en MEP, comparando las propiedades fisicoquímicas de los combustibles relativo con el metano puro; utilizando datos de pruebas experimentales en los motores CFR y en el MEP para biogás 1, se presentó la siguiente ecuación en [22],

$$\overline{X}_{fMN} = \frac{ED_{CH_4}}{ED_f} \left(\frac{SL_{CH_4}}{SL_f} \right)^{0.262} \left(\frac{Tad_{CH_4}}{Tad_f} \right)^{0.368} \left(\frac{H/C_{CH_4}}{H/C_f} \right)^{0.001} \left(\frac{\gamma_{CH_4}}{\gamma_f} \right)^{0.001} \quad (8)$$

De acuerdo con la metodología, si $\overline{X}_{fMN} > 1$ el combustible evaluado tiene una calidad energética superior a la del metano; si $\overline{X}_{fMN} = 1$ el combustible evaluado tiene una calidad energética similar a la del metano y sería intercambiable con el metano; y si $\overline{X}_{fMN} < 1$, el combustible evaluado tiene una calidad energética inferior a la del metano.

Luego, con los resultados de las pruebas experimentales con 60 mezclas de combustibles gaseosos en el motor CFR, midiendo el MN y la CCR se obtuvo la siguiente relación [36],

$$CCR = 7.1635 * e^{0.0069 * MN} \quad (9)$$

Ahora, haciendo un cambio de variable en la ecuación (1), cambiando la RC del motor por la CCR del combustible (9),

$$\eta_{Otto} \approx \eta_{qMN} = 1 - \frac{1}{[7.1635 * e^{0.0069 * MN}]^{(\gamma-1)}} \quad (10)$$

Donde η_{qMN} es la máxima eficiencia en el motor con referencia al combustible utilizado y su resistencia a la detonación usando el número de metano como medida, ya la máxima eficiencia no se mide con referencia al motor sino al combustible utilizado y de acuerdo con sus propiedades. Luego, usando las ecuaciones (4) y (7) en (10), se obtiene,

$$\eta_{qRON} = 1 - \frac{1}{[7.1635 * e^{(0.008914 * RON - 0.713598)}]^{(\gamma-1)}} \quad (11)$$

Donde η_{qRON} es la máxima eficiencia en el motor con referencia al combustible utilizado y su resistencia a la detonación usando el número de octano como medida. Luego, usando las ecuaciones (5) y (6) se obtiene,

$$\eta_{qH/C} = 1 - \frac{1}{[7.1635 * e^{(0.498744 * e^{0.2381 * H/C} - 0.713598)}]^{(\gamma-1)}} \quad (12)$$

Donde $\eta_{qH/C}$ es la máxima eficiencia en el motor con referencia a la calidad energética del combustible, utilizado la relación atómica H/C para un análisis detallado a nivel cuántico. Ahora, para tener en cuenta ambos efectos, la disponibilidad energética y la resistencia al golpeteo del combustible, se propone una eficiencia total (η_{qT}) promedio, que tiene presente ambas características para combustibles gaseosos y líquidos,

$$\eta_{qT} = \frac{\eta_{qC}^{H/C} + \eta_{qMN}}{2}, \quad \eta_{qT} = \frac{\eta_{qC}^{H/C} + \eta_{qRON}}{2} \quad (13)$$

Antes, la estimación de la eficiencia exergética del combustible para ciclos Otto en MEP fue propuesta [42] con base en el cálculo de la eficiencia exergética total $\eta_{qT} \approx \varepsilon$. Para los ciclos Otto, la energía útil recuperada (X_{Otto}), a partir de (3), se define como la máxima energía química (exergía gastada) convertida en trabajo útil (potencia o energía eléctrica); de acuerdo con los principios de los ciclos Otto y las propiedades fisicoquímicas de la mezcla aire-combustible, y limitada por el fenómeno del golpeteo o detonación, medido con el índice de octano. El subíndice Otto de X_{Otto} , denota la relación del sistema (motor y mezcla aire-combustible) para los ciclos Otto. Además, el rendimiento del motor estaría limitado por el fenómeno del golpeteo del combustible, medido con el RON y utilizando η_{qT} propuesto. Teniendo en cuenta que la única exergía gastada (E) que puede convertirse en trabajo útil en los ciclos Otto es el calor liberado (Q) por la reacción química,

$$X_{Otto} = \eta_{Otto} * E \quad (14)$$

En términos diferenciales,

$$\partial X_{Otto} = \eta_{Otto} * \partial E + E * \partial \eta_{Otto} \quad (15)$$

El análisis del diseño del motor se enfoca en los ciclos de compresión, liberación de calor y expansión, para obtener la máxima presión durante la combustión y el máximo trabajo útil; integrándose la ecuación (14) en la dirección del proceso del ciclo Otto, entre 1 y 4, y dividiendo por T, se obtiene,

$$\int_1^4 \frac{\partial X_{Otto}}{T} = \eta_{Otto} \int_1^4 \frac{\partial E}{T} + E \int_1^4 \frac{\partial \eta_{Otto}}{T} \quad (16)$$

Luego, teniendo presente que E=Q por la combustión, y como la compresión y la expansión son isentrópicas (S=0); la entropía (S) del ciclo se estima utilizando la expresión que da el calor liberado en una transformación isócara, donde la temperatura está en grados Kelvin (K).

$$S_{Otto} = S_3 - S_2 = \int_2^3 \frac{\partial Q}{T} = n * C_v * \int_2^3 \frac{\partial T}{T} = n * C_v * \ln \frac{T_3}{T_2} \quad (17)$$

Donde, Q es el calor liberado por el combustible durante la combustión completa hasta la temperatura de llama adiabática, n es el número de moles, y C_v es el calor específico a volumen constante. Ahora, T_2 se puede calcular utilizando la relación para el proceso isentrópico y la definición de $CR = V_1/V_2$ para ciclos Otto,

$$\frac{P_1}{P_2} = \left[\frac{V_2}{V_1} \right]^{\gamma} = \left[\frac{T_1}{T_2} \right]^{\gamma-1} \rightarrow T_2 = T_1 * CR^{\gamma-1} \quad (18)$$

Debido a que la compresión y la expansión son isentrópicas, $Q_{2-1} = Q_{4-3} = 0$, tomando Q=E, y reemplazando (18) en (17), se obtiene como resultado:

$$\int_1^4 \frac{\partial X_{Otto}}{T} = \eta_{Otto} \int_2^3 \frac{\partial Q}{T} + Q \int_1^4 \frac{\partial \eta_{Otto}}{T} \quad (19)$$

$$\int_1^4 \frac{\partial X_{Otto}}{T} = \eta_{Otto} * S_{Otto} + E \int_1^4 \frac{\partial \eta_{Otto}}{T} \quad (20)$$

Expresión que representa como la energía útil recuperada en el ciclo Otto depende primero, de la relación entre la entropía generada y la máxima eficiencia del ciclo, y segundo de la exergía disponible en el ciclo y como la eficiencia térmica se desarrolla a través del ciclo por la construcción del motor. Entonces motores con altas RC desarrollan altas eficiencias como se ha mencionado, pero también alta entropía es generada en condiciones de alta presión y turbulencia. Luego, al reemplazar (18) en (17), se obtiene la entropía del ciclo en función de γ , CR, n, y C_v .

$$S_{Otto} = n * C_v * \ln \frac{T_3}{T_1 * CR^{\gamma-1}} \quad (21)$$

Teniendo presente la ecuación (2), y con la masa de combustible por ciclo (m_f), la exergía gastada es,

$$E = m_f * LHV_f * \left(1.0334 + 0.0183 \frac{H}{C} - 0.0694 \frac{1}{C} \right) \quad (22)$$

Reemplazando (21) en (20), cambiando las variables, $\eta_{Otto} = \eta_{qT}$, $T_3 = T_{ad}$ y $CR = CCR$, para tener en cuenta las propiedades fisicoquímicas, calidad energética y la resistencia al golpeo de los combustibles, se llega a la siguiente ecuación final (23) para la máxima energía que se puede recuperar en un ciclo Otto,

$$\int_1^4 \frac{\partial X_{SI}}{T} = \eta_{qT} * n * C_v * \ln \frac{T_{ad}}{T_1 * CCR^{\gamma-1}} + E * \int_1^4 \frac{\partial \eta_{qT}}{T}$$

Esta expresión para la energía útil recuperada de los combustibles durante un ciclo Otto ideal, representa los límites del diseño del motor, divididos en dos aspectos: primero, la relación de la máxima eficiencia térmica de la máquina (teniendo presente las propiedades fisicoquímicas del combustible) con respecto a la entropía producida durante el proceso de combustión; y segundo, la relación entre la exergía gastada, considerando la naturaleza de la mezcla de combustible y aire, y su uso eficiente durante el ciclo Otto.

Finalmente, en la tabla 2 se presenta la composición química de los combustibles usados en la investigación y algunas propiedades principales.

Tabla 2 Composición química de los combustibles y propiedades principales.

Designación de la mezcla	Composición de la mezcla	LHV (MJ/m ³)	E _D (MJ/m ³)	MN	SL (cm/s)
140	100% biogás (60/40 CH ₄ /CO ₂)	20.35	3.44	140	23.57
120	Biogás B (80/20 CH ₄ /CO ₂)	27.14	3.57	120	30.22
105	57% Biogás+38% CH ₄ +5% H ₂	25.00	3.58	105	30.32
100	100% CH ₄	34.55	3.58	100	34.98
97	54% Biogás+36% CH ₄ +10% H ₂	24.22	3.59	97	31.74
66	83% Biogás+17% C ₃ H ₈	31.98	3.64	66	32.83
65	79% Biogás+16% C ₃ H ₈ +5% H ₂	30.89	3.65	65	33.91
64	75% Biogás+15% C ₃ H ₈ +10% H ₂	30.71	3.77	64	34.95
37	100% C ₃ H ₈	94.10	3.73	37	43.50

La hipótesis de esta investigación es que el diseño eficiente de MEP para combustibles renovables y alternativos debe estar en concordancia con los principios termodinámicos de los ciclos Otto y usando como límite el fenómeno del golpeteo.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 3 presenta los resultados del análisis de la calidad energética de los combustibles de acuerdo con el análisis hecho

usando la ecuación (8) y los resultados de máxima generación de energía eléctrica medidos en el MEP de biogás 1, operando el motor hasta el límite del golpeteo y ajustando la combustión de acuerdo con la máxima eficiencia térmica para cada mezcla con el avance de chispa y el dosado relativo óptimos. Los combustibles se ubicaron de acuerdo con su MN, incrementándose de derecha a izquierda. De acuerdo con los resultados, la calidad energética de los combustibles aumenta con el incremento de la resistencia al golpeo medido con el MN, es decir, las propiedades fisicoquímicas en conjunto (E_D , S_L , T_{ad} , H/C y γ) mejoran con respecto a las propiedades del metano puro, que se usa como referencia, solo que a medida que el MN aumenta más, se requiere mayor RC y mayor turbulencia durante la combustión. Los biogases con $MN > 100$ tienen características de alto octanaje, baja E_D , baja S_L , baja T_{ad} , baja relación H/C y alto γ . En el otro extremo, el propano tiene bajo octanaje, alta E_D , alta S_L , alta T_{ad} , baja H/C y baja γ . El metano puro, que es el combustible de referencia tiene medio-alto octanaje, media E_D , media-alta S_L , media-alta T_{ad} , la máxima relación H/C y alto γ .

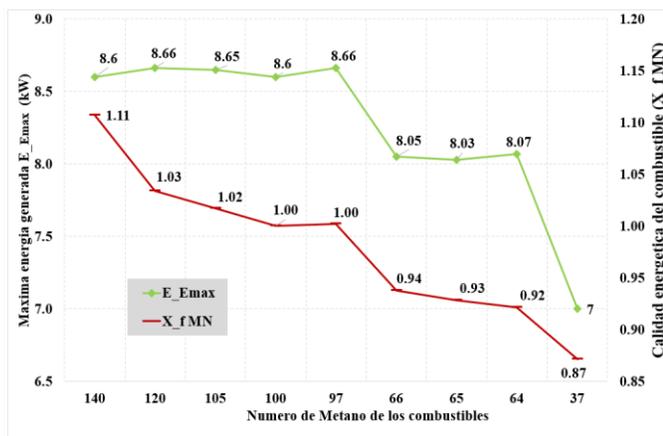


Figura 3 Calidad energética de los combustibles y resultados de máxima generación de energía eléctrica en el MEP de biogás 1.

La Figura 4 presenta los resultados máxima energía recuperada versus de la estimación usando la máxima eficiencia térmica basada en el MN, la cual es similar a la máxima eficiencia del ciclo Otto, solo que se hace el cambio de variables entre RC y CCR, y luego incluyendo la correlación entre CCR y MN, lo cual ha sido validado experimentalmente. Como se puede observar en la figura, la eficiencia térmica tiene una tendencia similar a los resultados de la energía generada al límite de la detonación; entre mayor valor de η_{qMN} mayor energía eléctrica se obtuvo limitado por la detonación. Aunque, para biogases ultra-pobres con $MN > 140$ se observa que la eficiencia η_{qMN} seguiría aumentando -pero la relación cuántica que cuenta los átomos de hidrógenos y carbonos (H/C) se reduce cada vez más por la reducción de la molécula de CH_4 -mientras que la E_{Emax} tiende a tener un máximo asintótico.

La Figura 5 presenta la máxima energía recuperada versus la máxima eficiencia térmica $\eta_{qH/C}$, el mayor valor de la $\eta_{qH/C}$

es para el metano (CH_4) debido a que tiene la mayor relación atómica H/C (4/1) de todos los combustibles gaseosos, razón por la cual se usó el metano como combustible para el análisis relativo a sus propiedades fisicoquímicas para determinar la calidad energética de las mezclas. Para el caso de los biogases, a medida que el octanaje aumenta por el aumento de la concentración de CO_2 , la relación atómica H/C se reduce y la eficiencia $\eta_{qH/C}$ también lo hace; reduciendo la disponibilidad energética, y requiriendo mayores RC e intensidades de turbulencia para la combustión para recuperar la energía. En el otro lado, el propano (C_3H_8) tiene una baja relación H/C (2.667) y una baja eficiencia $\eta_{qH/C}$, lo que resulta en baja energía eléctrica generada al límite de la detonación; en MEP los buenos resultados del GLP, que contienen alto porcentaje de propano, se deben a que el combustible tiene alta E_D , S_L y T_{ad} , pero bajo MN; entonces el uso del combustible debe ser en MEP con bajas RC. Como se mencionó antes, para $MN > 140$, la relación H/C continúa bajando y la $\eta_{qH/C}$ también disminuye.

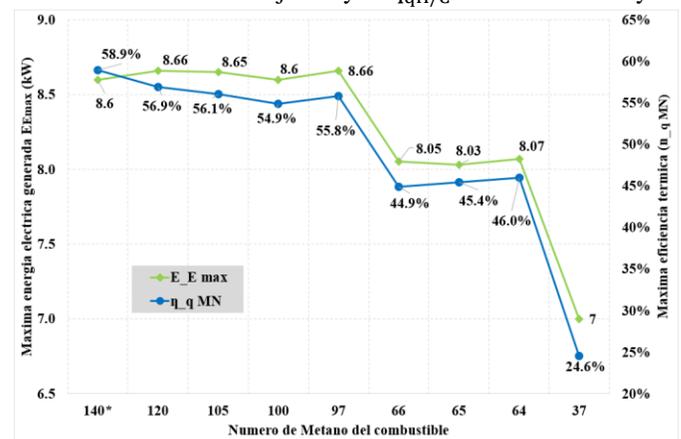


Figura 4 Máxima energía recuperada versus máxima eficiencia térmica MN

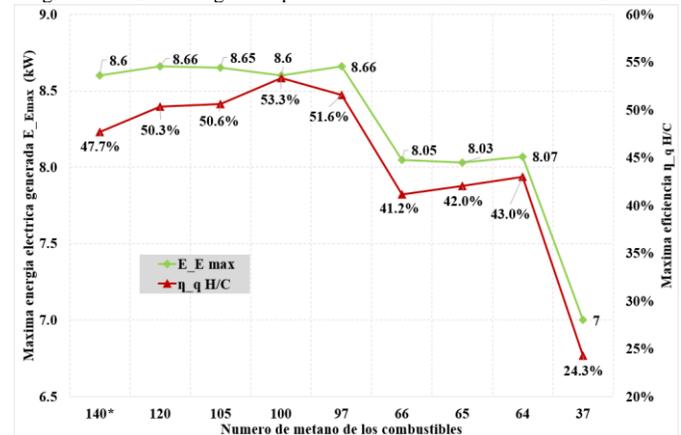


Figura 5 Máxima energía recuperada versus máxima eficiencia térmica H/C

La Figura 6 presenta la máxima energía recuperada versus la máxima eficiencia térmica total, la cual tiene presente el límite del octanaje y el límite de la calidad energética. Al promediar η_{qMN} y $\eta_{qH/C}$ para obtener η_{qT} se están teniendo presentes dos efectos, resistencia al golpeo y disponibilidad química, u octanaje y calidad energética de acuerdo con las propiedades

fisicoquímicas mencionadas, para estimar la máxima energía recuperada en un MEP bajo los principios de los ciclos Otto; por lo cual se propone a η_{qT} para estimar la eficiencia exergética de los MEP. Como puede observarse la tendencia de η_{qT} sigue una correlación que se ajusta mayor para la energía eléctrica generada limitada por la detonación; en este caso ambas, η_{qT} y la energía recuperada tienen una tendencia asintótica, lo que indica que a medida que el MN aumenta, se requieren mayores RC e intensidades de turbulencia para lograr recuperar la energía del combustible. La mayor eficiencia exergética (54.1%) es para el metano puro debido a que este combustible tiene la mayor relación atómica H/C y tiene alto octanaje (MN=100), además que el balance de sus propiedades fisicoquímicas es el más favorable para los MEP de acuerdo con los principios de los ciclos Otto. El biogás (MN=140) tiene una muy alta eficiencia exergética (53.3%) debido a su alto octanaje que compensa la baja relación H/C pudiéndose operar en MEP con altas RC y altas intensidades de turbulencia, lo que, desde el punto de vista termodinámico, resulta en las condiciones más cercanas a las condiciones ideales de los ciclos Otto. En el otro extremo, está el propano con NM=37, tiene alta tendencia al golpeteo y baja relación H/C, su buen desempeño en MEP con bajas RC se debe a su alta densidad de energía. Los biogases mezclados con hidrogeno (MN 97 y 105) obtuvieron valores de \bar{X}_{fMN} similares a 1, lo que indica que son mezclas combustibles con alto potencial de intercambiabilidad con el metano puro o con el gas natural, debido su combinación en sus propiedades fisicoquímicas.

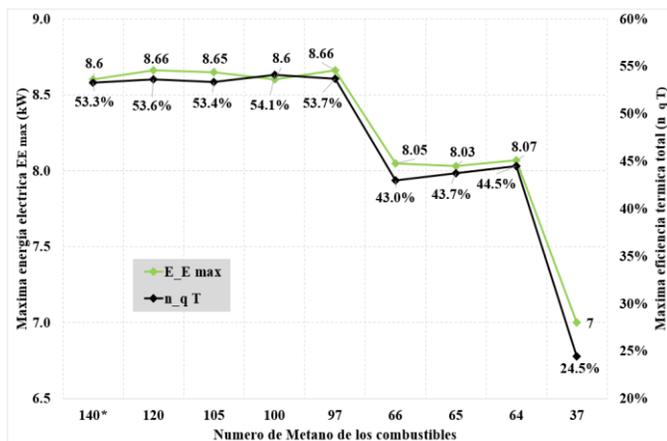


Figura 6 Máxima energía recuperada versus máxima eficiencia térmica total

La Figura 7 presenta la eficiencia exergética total versus el número de octano para todos los combustibles, líquidos y gaseosos; en este caso, los combustibles se ubicaron de acuerdo con el RON para los combustibles líquidos, y el RON equivalente para los combustibles gaseosos usando las ecuaciones (5) y (7), incrementándose de izquierda a derecha. De acuerdo con el diseño propuesto y su modelo matemático propuesto para estimar la eficiencia exergética en ciclos Otto en MEP, el metano (RON143) obtiene el valor más alto de eficiencia exergética (η_{qT} =54.1%) porque tiene la mayor relación H/C, combinado con su alto índice de octanaje. El

biogás mezclado con 36% CH₄ y 10% H₂ (RON 141) tiene el segundo valor más alto (η_{qT} =53.7%); este tiene una alta eficiencia exergética por su alto RON y alta relación H/C por la adición de H₂. Luego, el biogás (80%CH₄/20%CO₂) con RON157 es tercero (η_{qT} =53.6%) debido a un buen balance entre su disponibilidad química, la relación H/C, γ y su alto RON. Luego, biogás mezclado con 38% CH₄ y 5% H₂ (RON147) es cuarto (η_{qT} =53.4%). Además, el biogás con una composición típica (60%CH₄/40%CO₂) es quinto, con alta eficiencia exergética (η_{qT} =53.3%), debido a que tiene la mayor eficiencia η_{qMN} =59% por tener el mayor índice de octanaje (CCR=18:1 y RON171), pero el CO₂ reduce la relación H/C, resultando con un bajo $\eta_{qH/C}$ =48%, lo que reduce la eficiencia exergética total. Este tipo de combustibles debe utilizarse en MEP con una alta RC y alta intensidad de turbulencia durante la combustión, debido a la baja S_L y a la baja E_D.

La gasolina premium RON98 tiene el sexto lugar por el balance entre la relación H/C y γ . La gasolina grado medio RON93 es séptima y la gasolina regular RON91 es octava, con índices de octanaje más bajos que la gasolina premium. Las mezclas de biogás con propano e hidrógeno RON118 y RON119 están de noveno y décimo lugar, debido a su bajo γ y a un RON medio, debido a la presencia de propano e hidrógeno que aumentan la tendencia al golpeteo. El etanol es 11° lugar, con el RON109 más alto, entre todos los combustibles líquidos, una alta relación H/C, pero un γ bajo (1.25). Luego, una mezcla de biogás con propano (RON117) es 12° lugar, con un índice de octanaje medio, bajo γ y baja relación H/C. El queroseno A y B están en 13° y 14° lugar; ambos tienen un bajo RON (50 y 40) y una baja relación H/C. El propano RON99 es 15° lugar por su bajo γ y muy bajo RON. El n-hexano y el n-heptano están en los últimos lugares 16° y 17°, con los octanajes más bajos (RON 24 y 0) y el γ más bajo. El modelo matemático utilizado para estimar la eficiencia exergética permite una evaluación directa entre combustibles gaseosos y líquidos para determinar el potencial de energía recuperada máxima, lo que es una contribución de la investigación.

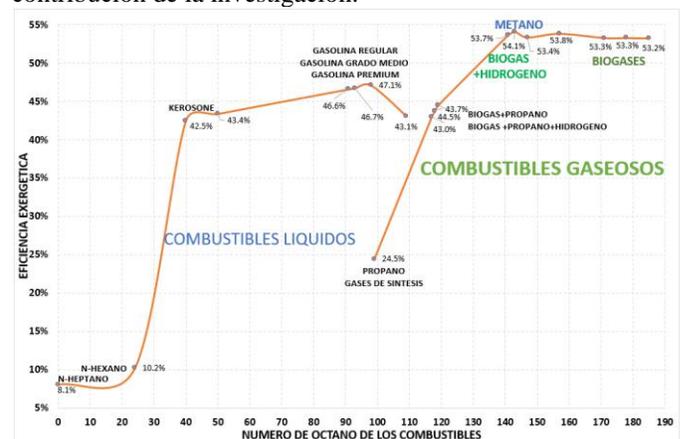


Figura 7 Eficiencia exergética total versus número de octano para combustibles líquidos y gaseosos.

La Tabla 3 presenta las características y las propiedades de los combustibles de acuerdo con las condiciones del motor requeridas para una correcta combustión. Un buen balance entre

las propiedades fisicoquímicas del combustible y las características del motor seleccionado, garantizarán estar cerca de la máxima eficiencia disponible por las características químicas y los principios del ciclo Otto. Los combustibles con RON<94 requieren MEP con CR< 8:1, estos combustibles tienen muy altas E_D , S_L , T_{ad} , bajos γ y relación H/C; el proceso de combustión se debe a dar en condiciones de muy baja presión y turbulencia, y la mezcla con EGR sería una excelente alternativa para mejorar la resistencia al golpeteo y así poder operarlos en MEP con mayores RC. Los combustibles con RON entre 94-115 requieren MEP con 8:1<CR<11:1, estos combustibles tienen altas E_D , S_L , T_{ad} , bajos γ y relación H/C; el proceso de combustión se debe a dar en condiciones de baja presión y turbulencia, y la mezcla con EGR sería una buena estrategia para mejorar la resistencia al golpeteo y así poder operarlos en MEP con mayores RC, en este grupo están las gasolinas y el GLP. Los combustibles con RON entre 115-136 requieren MEP con 11:1<CR<14:1, estos combustibles tienen medias E_D , S_L , T_{ad} , γ y relación H/C; el proceso de combustión se debe a dar en condiciones de presión media y turbulencia, y la mezcla con EGR sería una buena alternativa para aumentar la resistencia al golpeteo y así poder operarlos en MEP con mayores RC, en este grupo normalmente estarían los diferentes tipos de gas natural. Los combustibles con RON entre 136-157 requieren MEP con 14:1<CR<17:1, estos combustibles tienen bajos E_D , S_L , T_{ad} , medios γ y relación H/C; el proceso de combustión se debe a dar en condiciones de presión y turbulencia alta, y la mezcla con EGR no sería una buena alternativa, en este grupo normalmente estarían biogases enriquecidos, purificados o mezclados con hidrógeno. Los combustibles con RON>157 requieren MEP con CR>17:1, estos combustibles tienen muy bajos E_D , S_L , T_{ad} , relación H/C y altos γ ; en este caso el proceso de combustión se debe dar en condiciones de muy alta presión y turbulencia sin EGR, en este grupo estarían biogases convencionales y ultra-pobres.

Tabla 3 Características de las propiedades de los combustibles y condición del motor para la combustión.

Características de las propiedades de los combustibles					
MN	RON<94	94<RON<115	115<RON<136	136<RON<157	RON>157
CCR	CCR<8	8<CCR<11	11<CCR<14	14<CCR<17	CCR>17
E_D	↑↑↑	↑↑	↑	↓	↓↓
S_L	↑↑↑	↑↑	↑	↓	↓↓
T_{ad}	↑↑↑	↑↑	↑	↓	↓↓
γ (Cp/Cv)	↓↓	↓	↓	↑	↑
Relación H/C	↓	↓	↑	↑	↓
Condición del motor para la combustión					
CR	↓↓	↓	↑	↑↑	↑↑↑
Presión	↓↓	↓	↑	↑↑	↑↑↑
Temperatura	↑↑	↑↑	↑	↓	↓↓
Turbulencia	↓↓	↓	↓	↑	↑↑
EGR	↑↑	↑↑	↑↑	↓	↓↓

La Figura 8 presenta los resultados experimentales de potencia en el MEP bicomcombustible biogás y gas natural, el motor tiene la posibilidad de activar el sistema de EGR para combustibles muy reactivos con el propósito de aumentar la resistencia a la detonación. La línea base con diésel permitió alcanzar la potencia nominal de 37.5 kW@1800 rpm para generación de electricidad, la potencia de máxima de emergencia fue de 39.4

kW con alerta de temperatura del aceite. La máxima potencia con gas natural fue 32.9 kW limitada por el golpeteo. La máxima potencia con gas natural y EGR fue 39.5 kW limitado por el golpeteo y gracias a la mayor resistencia del EGR. La máxima potencia con biogás fue 40.7 kW limitada por el golpeteo gracias al mayor octanaje. Estos datos experimentales validan el diseño propuesto en esta investigación con el RON.

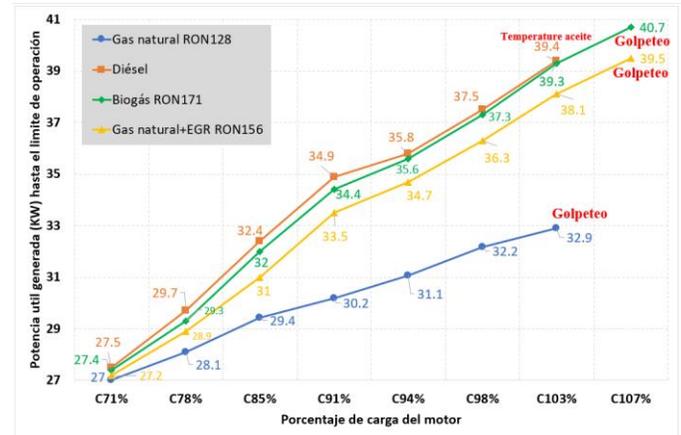


Figura 8 Resultados de potencia en el MEP bicomcombustible biogás y gas natural

IV. CONCLUSIONES

La investigación presenta un diseño conceptual de MEP para combustibles gaseosos renovables y alternativos; se presenta el modelo matemático basado en los principios termodinámicos de los ciclos Otto para MEP y en los resultados de pruebas experimentales en dos MEP; un motor de investigación de octanaje y un motor optimizado para biogás, la validación del diseño se hizo con un tercer MEP para biogás. Las principales conclusiones de la investigación son:

- Se presenta una expresión que representa como estimar la energía recuperada en el ciclo Otto, esta depende de la relación entre la entropía generada y la máxima eficiencia del ciclo, y de la exergía disponible en el ciclo y como la eficiencia térmica se desarrolla a través del ciclo por la construcción del motor.
- La expresión para la energía útil recuperada representa los límites del diseño del motor, divididos en dos aspectos: primero, la relación de la máxima eficiencia térmica de la máquina (teniendo presente las propiedades fisicoquímicas del combustible) con respecto a la entropía producida durante el proceso de combustión; y segundo, la relación entre la exergía gastada, considerando la naturaleza de la mezcla de combustible y aire, y su uso eficiente durante el ciclo Otto.
- De acuerdo con los resultados, la calidad energética de los combustibles aumenta con el incremento de la resistencia al golpeteo medido con el MN, es decir, las propiedades fisicoquímicas en conjunto (E_D , S_L , T_{ad} , H/C y γ) mejoran con respecto a las propiedades del metano puro, solo que a medida que el MN aumenta, se requiere mayor RC y mayor turbulencia durante la combustión.

AGRADECIMIENTOS

Alhamdulillah, agradecimiento por el apoyo otorgado por: 1. PROCENCIA-Perú por financiar el proyecto "Investigación teórica y experimental para el diseño y escalamiento de un grupo electrógeno

diesel de 8 kW a 50 kW utilizando un motor híbrido MEP para biogás y gas natural en operación bicomcombustible con EGR, en la UTP-Perú” (2022-2024), Contrato: PE501080113-2022. 2. Al Grupo GASURE de la Universidad de Antioquia, Colombia, por las pruebas realizadas durante la investigación de maestría, doctorado y posdoctorado. 3. A la Universidad Estatal del Colorado por las pruebas realizadas en el laboratorio de Ingeniería Mecánica durante la pasantía doctoral.

REFERENCIAS

- [1] IPCC. (2021). Sixth Assessment Report. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- [2] FAO. (2018). The State of Food Security and Nutrition in the World 2018. Retrieved from <http://www.fao.org/3/9553EN/i9553en.pdf>
- [3] NASA. (2020). Global Climate Change: Vital Signs of the Planet. Retrieved from <https://climate.nasa.gov/>
- [4] Hoegh-Guldberg, O., et al. (2007). Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science*, 318(5857), 1737-1742.
- [5] WWF. (2020). Living Planet Report 2020. Retrieved from <https://www.worldwildlife.org/publications/living-planet-report-2020>
- [6] UNHCR. (2020). Climate Change and Disaster Displacement. Retrieved from <https://www.unhcr.org/climate-change-and-disasters.html>
- [7] IRENA. (2021). Renewable Capacity Statistics 2021. Retrieved from <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Technologies>
- [8] IEA. (2020). Renewable Energy Market Update. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/renewable-energy-market-update-2020>
- [9] Fthenakis, V. M., & Kim, H. C. (2009). Land use and electricity generation: A life-cycle analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7), 1465-1474.
- [10] NREL. (2012). Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Solar Photovoltaics. Retrieved from <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/56487.pdf>
- [11] IRENA. (2016). End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels. Retrieved from <https://www.irena.org/publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels>
- [12] NREL. (2013). Wind Energy and Wildlife Impacts. Retrieved from <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/56304.pdf>
- [13] IPCC. (2011). Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- [14] Kuvlesky, W. P., et al. (2007). Wind energy development and wildlife conservation: Challenges and opportunities. *The Journal of Wildlife Management*, 71(8), 2487-2498.
- [15] IEA. (2019). Wind Energy: A Resource for the Future. Retrieved from <https://www.iea.org/topics/renewables/wind/>
- [16] IEA. (2020). Bioenergy. Retrieved from <https://www.iea.org/topics/renewables/bioenergy/>
- [17] Kampman, B., et al. (2017). Optimal use of biogas from waste streams: An assessment of the potential of biogas from digestion in the EU beyond 2020. European Commission.
- [18] Kparaju, P., et al. (2009). Biogas production in sustainable development. In *Sustainable Bioenergy Production*. Springer, Dordrecht.
- [19] Weiland, P. (2010). Biogas production: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(4), 849-860.
- [20] Barker, J. C., & Stuckey, D. C. (1999). A review of pre-treatments for improving anaerobic digestion of lignocellulosic feedstocks. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 74(8), 817-834.
- [21] Kparaju, P., et al. (2009). Biogas production in sustainable development. In *Sustainable Bioenergy Production*. Springer, Dordrecht.
- [22] J.P Gomez Montoya et al. Phenomenological analysis of the combustion of gaseous fuels to measure energy quality and capacity to produce work in SI engines, part 2. *Journal of Eng. for Gas Turbines and Power*, (2022), 144(5): 051002.
- [23] J.P Gomez Montoya et al. Effect of the turbulence intensity on knocking tendency in a SI engine with high compression ratio using biogas and blends with natural gas, propane, and hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44:18532-18544.
- [24] IEA. (2020). Natural Gas. Retrieved from <https://www.iea.org/topics/natural-gas>
- [25] EPA. (2021). Natural Gas and the Environment. Retrieved from <https://www.epa.gov/natural-gas>
- [26] EPA. (2020). Greenhouse Gas Emissions from a Typical Passenger Vehicle. Retrieved from <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-emissions-typical-passenger-vehicle>
- [27] IEA. (2021). Global Energy Review 2021. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021>
- [28] J.P Gomez Montoya et al. Conference paper: Methodology to estimate fuel's exergy in SI engines using Otto cycles principles limited by the knock. LACCEI 2023-OAS, Buenos Aires-Argentina, July 19-21 2023, <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2023.1.1.1559> . <https://laccei.org/LACCEI2023-BuenosAires/meta/FP1217.html>.
- [29] Heywood, J. B. (2018). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill Education.
- [30] Stone, R. (2012). *Introduction to Internal Combustion Engines*. Palgrave Macmillan.
- [31] Watson, N., & Janota, M. S. (1982). *Turbocharging the Internal Combustion Engine*. Macmillan Education.
- [32] Turner, J. W. G. (2014). *Automotive Engines: Theory and Servicing*. Pearson.
- [33] Zhu, G., et al. (2011). Advanced materials and designs for high-performance internal combustion engines. *Materials Science Forum*, 675-677, 949-954.
- [34] Yamamoto, K., et al. (2001). A study on the improvement of thermal efficiency in gasoline engine. SAE Technical Paper 2001-01-3589.
- [35] U.S. Department of Energy. (2020). Diverging Trends of Engine Compression Ratio and Gasoline Octane Rating. Recuperado de energy.gov
- [36] JP Gómez Montoya, AA Amell, and DB Olsen. Prediction and measurement of the critical compression ratio and methane number for blends of biogas with methane, propane, and hydrogen. *Fuel* 2016, 186.
- [37] JP Gómez Montoya, AA Amell, and DB Olsen. Engine operation just above and below the KT using a blend of biogas and natural gas. *Energy* 2018, 153, pp: 719-725.
- [38] JP Gómez Montoya, G. Amador, AA Amell, and DB Olsen. Strategies to improve the performance of a spark-ignition engine using fuel blends of biogas with natural gas, propane, and hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy* 2018, 43, pp: 21592 - 21602.
- [39] JP Gómez Montoya et al. Effect of equivalence ratio on knocking tendency in SI engines fueled with fuel blends of biogas, natural gas, propane, and H2. *International Journal of Hydrogen Energy* 2018, 43 (51), pp: 23041.
- [40] JP Gómez Montoya, AA Amell, and DB Olsen. Operation of an SI engine with high CR using biogas blended with natural gas, propane, and hydrogen. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 2019, 141(5), pp: 051006-051016.
- [41] JP Gómez Montoya, and AA Amell. Phenomenological Analysis of the Combustion of Gaseous Fuels to Measure the Energy Quality and the Capacity to Produce Work in Spark Ignition Engines. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 2021, 143 (1), pp: 0510161-05101612.
- [42] JP Gómez Montoya, AA Amell. Conference paper: Methodology to estimate fuel exergy in SI engines using Otto cycles principles limited by the knock. LACCEI 2023-OAS, Buenos Aires-Argentina, July 19-21 2023, <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2023.1.1.1559> . <https://laccei.org/LACCEI2023-BuenosAires/meta/FP1217.html>
- [43] C. Rakopoulos and E.G. Giakoumis. Second-law analyzes applied to internal combustion engines operation. *Progress in Energy and Combustion Science* 2006, 32, pp: 2-47.
- [44] L. Rodriguez, Gaggioli RA Calculation of available-energy quantities. *Thermodynamics: second law analysis*. Washington, DC: American Chemical Society Symposium; 1980. p. 39-59.
- [45] Y. Cengel and M. Boles. *Thermodynamics. An Engineering Approach*, eight edition. Mc. Graw Hill Education. New York, United States, 2015.
- [46] J. Kubesh, and S. King. Effect of gas composition on octane number of natural gas fuels. SAE Technical paper series 922359. *International Fuels and Lubricants Meeting and Exposition S. F., California*, October 19-22, 1992. ISSN 01 48-71 91.