

From Otto-Cycle Exergy to Engine Design: A Thermodynamic Principle for Renewable and Alternative Fuels in Spark-Ignition Engines

Juan Pablo Gómez Montoya, PhD.¹, Yoisdel Castillo Alvarez, MsC.², Hernando Alexander Yepes Tumay, PhD.³

^{1,2}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, jgomezmo@utp.edu.pe, ycastilloa@utp.edu.pe

³Universidad Francisco de Paula Santander, Colombia.

Abstract– *The design of spark-ignition (SI) engines for renewable and alternative fuels demands strategies that overcome knock constraints and the limited exergetic efficiency of conventional Otto-cycle operation. This research proposes a theoretical framework grounded in a thermodynamic principle that formalizes exergy in Otto cycles by integrating efficiency, entropy generation, fuel physicochemical properties, and combustion conditions as coupled design variables. The work consolidates more than a decade of theoretical and experimental studies, culminating in an integral exergetic balance equation that captures the dynamic evolution of exergetic efficiency across the cycle and yields a general principle applicable to real engines. The framework provides a rational basis for selecting high compression ratios, lean operation, and EGR-based dilution to enable stable operation near the knock threshold while preserving efficiency. Simulation results and experimental validations using biogas, methane, hydrogen, and representative blends are presented, showing measurable gains in thermal and exergetic performance relative to traditional configurations. Finally, the proposed “Fifth Law of Thermodynamics for engines” is introduced as a unifying foundation that links efficiency, irreversibilities, and fuel-adapted design, offering a new scientific pathway for high-efficiency, sustainable engine development—particularly relevant to Latin America. The maximum efficiency does not lie in the most energetic fuel or the fastest combustion, but in designing the system for the fuel that best resists knock; in this way, exergy is maximized and the Otto-cycle limit is approached.*

Key words: Exergy, Otto cycle, Spark-ignition engines, Renewable and alternative fuels, Knock control

De la exergía del ciclo Otto al diseño de motores: un principio termodinámico para combustibles renovables y alternativos en motores de encendido provocado

Juan Pablo Gómez Montoya, PhD.¹, Yoisdel Castillo Alvarez, MsC.², Hernando Alexander Yepes Tumay, PhD.³

^{1,2}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, jgomezmo@utp.edu.pe, ycastilloa@utp.edu.pe

³Universidad Francisco de Paula Santander, Colombia.

Abstract– El diseño de motores de encendido provocado (MEP) para combustibles renovables y alternativos requiere enfoques que superen las limitaciones impuestas por el knock y la baja eficiencia exergética de los ciclos Otto convencionales. Esta investigación propone un marco teórico sustentado en un principio termodinámico que define la exergía en ciclos Otto, integrando la eficiencia, la generación de entropía, las propiedades fisicoquímicas del combustible y las condiciones de combustión como parámetros acoplados para la optimización del diseño. El trabajo consolida más de una década de estudios teóricos y experimentales, culminando en la formulación de una ecuación integral de balance exergético que modela el comportamiento dinámico de la eficiencia exergética a lo largo del ciclo y establece un principio general aplicable a motores reales. Este marco habilita la selección racional de altas relaciones de compresión, mezclas pobres y estrategias de dilución basadas en EGR, permitiendo operar de forma estable y eficiente cerca del umbral de knock. Se presentan resultados de simulación y validaciones experimentales con biogás, metano, hidrógeno y mezclas alternativas, demostrando mejoras significativas en eficiencia térmica y exergética frente a configuraciones tradicionales. Finalmente, se presenta un principio exergético propuesto para el diseño de motores, la cual unifica el análisis de eficiencia, las irreversibilidades y el diseño adaptado al combustible, proporcionando una nueva base científica para el desarrollo de motores sostenibles de alta eficiencia, especialmente relevante para América Latina. La eficiencia máxima no está en el combustible más energético ni en la combustión más rápida, sino en diseñar el sistema para el combustible que mejor resiste el knock; así se maximiza la exergía y se acerca al límite del ciclo Otto.

Palabras claves: Exergía, Ciclo Otto, Motores de encendido provocado, Combustibles renovables y alternativos, Control de detonación.

I. INTRODUCCIÓN

La transición energética es una prioridad global para reducir emisiones de gases de efecto invernadero, diversificar matrices energéticas y alcanzar la neutralidad de carbono en las próximas décadas. En América Latina, esta necesidad se acentúa por la alta dependencia de combustibles fósiles líquidos, especialmente en el sector transporte. Un ejemplo es el caso de Perú, que a pesar de mantener una producción creciente de gas natural —alrededor de 14,7 BCM/año en 2023— [1], depende de la importación de derivados del petróleo para cubrir su demanda interna. Perú importa el 100% del diésel B5 que consume y más del 50% del diésel B2, además de volúmenes significativos de gasolina y GLP [2]. Una situación similar se observa en otros países latinoamericanos; en Argentina, por ejemplo, aunque la producción doméstica de gas natural es alta (48 BCM/año en

2023) [3], más del 90% de la energía consumida en el transporte sigue dependiendo de gasolina, gasóleo o gas natural fósil [4].

Los MEP han sido históricamente diseñados y optimizados para combustibles convencionales (gasolina), con tecnologías orientadas a reducir consumo y emisiones sin comprometer la operación estable. Entre estas se destacan la inyección directa con sobrealimentación (downsizing), los sistemas de variación de apertura y alzada de válvulas (VVT/VVA), la desactivación de cilindros, el uso de EGR enfriado y las estrategias de operación con mezclas pobres (lean-burn) [5], [6]. Dichas tecnologías permiten mejorar la eficiencia térmica de los motores, la cual alcanza típicamente el 30–36% en configuraciones convencionales y puede superar el 45% en arquitecturas avanzadas con combustión pobre y alta relación de compresión (RC) [7], [8]. Sin embargo, el fenómeno de detonación (knock) sigue limitando el incremento de la RC, impidiendo aprovechar plenamente el potencial termodinámico de los combustibles alternativos [9].

Desde el punto de vista científico, el diseño de motores debe regirse por las leyes de la termodinámica, particularmente considerando la generación de entropía y la conversión de energía química en trabajo útil. La exergía constituye una métrica unificadora que cuantifica la fracción de energía disponible para producir trabajo y permite evaluar de forma integral la irreversibilidad de los procesos en el ciclo Otto. Diversos estudios han demostrado que aplicar un análisis exergético al diseño de motores facilita identificar las configuraciones geométricas y de operación que maximizan el trabajo neto entregado y minimizan pérdidas irreversibles [10], [11]. La eficiencia exergética típica de los MEP convencionales es cercana al 40%, pero puede incrementarse significativamente mediante estrategias de mezcla pobre, EGR y uso de combustibles como hidrógeno en mezclas duales [12].

Este contexto evidencia la necesidad de un nuevo marco de diseño para motores de encendido provocado (MEP) que, a partir de un principio termodinámico basado en exergía aplicado al ciclo Otto, permita derivar de manera sistemática los parámetros críticos del motor: relación de compresión (RC), geometría de la cámara de combustión, nivel de turbulencia, estrategias de dilución mediante recirculación de gases de escape (EGR), y condiciones óptimas de mezcla e ignición para el uso de combustibles renovables y alternativos. Este enfoque es particularmente pertinente para América Latina, donde la vocación agropecuaria y la alta disponibilidad de residuos orgánicos otorgan a todos los países un elevado potencial para la producción de biogás y de hidrógeno verde [13]. En este sentido, un diseño de motores

*guiado por exergía no solo permitiría aprovechar dicho potencial, sino también **acelerar la transición energética regional**, reduciendo la dependencia de derivados del petróleo y fortaleciendo la sostenibilidad del transporte.*

II. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN

En este contexto, el objetivo principal de la presente investigación es **desarrollar y consolidar** un marco teórico para el diseño de motores de encendido provocado (MEP) orientado al uso de combustibles renovables y alternativos, tomando como fundamento un **principio termodinámico basado en la exergía aplicada a ciclos Otto**. Este manuscrito se concibe como un documento integrador —en continuidad con una serie de cinco contribuciones publicadas entre 2023 y 2025 en congresos LACCEI y LEIRD (LACCEI)— cuyo aporte central consiste en presentar **en un solo texto, en español**, la formalización completa del enfoque, su articulación metodológica y su traducción hacia decisiones de diseño reproducibles.

Alcance del estudio

El alcance comprende:

1. **Revisión y análisis** del estado del arte en motores MEP, combustión bajo restricción de detonación (knock) y análisis exergético aplicado a ciclos Otto.
2. **Formulación de un principio unificador** que relacione la eficiencia térmica y la eficiencia exergética con variables de diseño tales como la relación de compresión (RC), la geometría de la cámara de combustión, la intensidad de turbulencia, la dilución con gases inertes (incluida EGR) y la estrategia de ignición.
3. **Validación conceptual** del principio propuesto mediante la integración crítica de resultados experimentales y numéricos disponibles en la literatura internacional, así como de evidencia reportada previamente en la línea de investigación, sin reutilizar material gráfico previamente publicado.

Enfoque de la investigación

El enfoque adoptado es **teórico-experimental**, sustentado en la aplicación rigurosa de las leyes de la termodinámica y en la comparación conceptual con motores optimizados para combustibles convencionales. La investigación se orienta a establecer **criterios de diseño** para combustibles como biogás, metano e hidrógeno (y mezclas), donde la **resistencia a la detonación** constituye una restricción física dominante para alcanzar altas RC y máxima conversión de exergía útil.

Metodología

La metodología se desarrolla en cuatro etapas:

1. **Revisión sistemática de literatura científica.** Se recopilaron artículos indexados sobre diseño de MEP, modelos de combustión, exergía aplicada a ciclos Otto y uso de biogás e hidrógeno. A partir de esta revisión se identificaron correlaciones y criterios reportados en la

literatura asociados con detonación y estabilidad de combustión, incluyendo métricas relacionadas con RON, MN, velocidad de llama (SL) y densidad de energía (ED), entre otras propiedades relevantes del combustible.

2. **Análisis de datos históricos y modelación exergética.**

Se analizaron datos reportados de eficiencia térmica y eficiencia exergética en MEP operando con gasolina, biogás, hidrógeno y mezclas duales. Se aplicó un modelo fenomenológico-exergético integrando balance entrópico, eficiencia dinámica y exergía útil (X_{Si}), incorporando formulaciones **integral y diferencial** para representar condiciones transitorias y cambios en el desempeño del ciclo.

3. **Derivación del modelo integral orientado al diseño.**

Se desarrolló un modelo matemático generalizado para: (i) estimar la eficiencia exergética máxima alcanzable en función de propiedades fisicoquímicas del combustible; (ii) identificar configuraciones óptimas de diseño (RC y cámara de combustión) orientadas a minimizar irreversibilidades; y (iii) evaluar el impacto de la dilución con CO_2/EGR y de la adición controlada de H_2 sobre eficiencia, estabilidad y tendencia a detonación.

4. **Validación conceptual y análisis comparativo.**

El principio propuesto se contrastó con resultados experimentales reportados en motores CFR y en motores diésel convertidos a MEP, además de resultados numéricos representativos de la literatura. Se realizó un análisis comparativo frente a diseños para combustibles convencionales, evaluando el potencial de mejora exergética y los beneficios esperables en sostenibilidad para aplicaciones de generación eléctrica distribuida y movilidad sustentable.

5. **Validación en resultados previos**, obtenidos en motor

CFR para número de metano y relación de compresión crítica, y en un motor Lister Petter TR2 convertido a encendido provocado, operado a 1800 rpm bajo diferentes mezclas de biogás, metano, propano e hidrógeno. El umbral de knock se definió mediante presión pico de knock y estabilidad cíclica, considerando mediciones sobre 200 ciclos consecutivos.

En conjunto, esta metodología permite **traducir un marco exergético** en criterios prácticos para el diseño de MEP que operen con biogás, hidrógeno y mezclas alternativas, sentando bases para la optimización futura de máquinas térmicas bajo una propuesta de principio termodinámico unificador. Finalmente, esta investigación se presenta en español con el propósito de **facilitar la difusión en América Latina**, integrando de manera ordenada avances previos y aportes nuevos en un documento único, con estructura editorial clara y orientada a su uso por la comunidad académica e industrial.

III. ESTADO DEL ARTE

A. Estado del Arte internacional

La detonación o knock en inglés, en MEP se origina por la autoignición del gas final (end-gas) y condiciona los límites de

la RC, avance de ignición y sobrealimentación, afectando eficiencia, potencia, emisiones y durabilidad. La literatura coincide en que su aparición es función conjunta de las propiedades autoignitivas del combustible y de las condiciones termofluidodinámicas (presión, temperatura, turbulencia, dosado y dilución) del ciclo de admisión [14].

En combustibles líquidos (gasolinas y mezclas con alcoholes) la resistencia al *knock* se correlaciona con el número de octano; mayores octanajes retrasan la autoignición del end-gas y permiten operar con RC y avances más agresivos. En gaseosos, el análogo es el número de metano (MN): el metano ($MN \approx 100$) ofrece elevada resistencia a *knock*, mientras que componentes muy reactivos (p. ej., H_2 o CO) reducen el MN y el margen operativo [15,16]. En biogases, el CO_2 actúa como diluyente inerte que eleva el MN pero reduce el poder calorífico, modulando simultáneamente potencia y tolerancia a *knock* [15]. Con el dosado (relación de equivalencia), la mezcla estequiométrica tiende a producir las temperaturas de llama más altas, aumentando la reactividad del end-gas; desviaciones controladas hacia mezcla pobre o ligeramente rica atenúan el *knock* por efectos térmicos y cinéticos. En gases como el metano/biogás, la estrategia lean-burn amplía el margen anti-knock aunque la menor velocidad de llama del metano impone un límite práctico si no se incrementa la turbulencia o se asiste la ignición [16-19]. En mezclas con hidrógeno (HCNG), la mayor reactividad y velocidad de llama permiten extender la pobreza, pero requieren control fino para evitar pre-ignición [18-22].

Elevar la RC y/o la presión de admisión (boost) incrementa la presión y temperatura en el end-gas y reduce el tiempo de retraso a la ignición, intensificando la tendencia a *knock*; el enfriamiento de admisión (intercooling) y operar con aire más frío elevan el margen, mientras que aire caliente lo reduce [14, 16].

El aumento de turbulencia (tumble, swirl, chorros de pre-cámara) acelera la combustión y acorta el tiempo de residencia del end-gas, disminuyendo la probabilidad de autoignición. Correlaciones de velocidad de llama turbulenta confirman que su efecto inhibitorio del *knock* puede ser más determinante que la sola variación de la velocidad laminar, especialmente en gasolinas y a presión y temperaturas elevadas [17, 19].

La dilución inerte usando gases recirculados del escape (EGR) por sus siglas en inglés; los EGR y otros diluyentes (p. ej., vapor de agua, CO_2 en biogás) incrementan la capacidad calorífica efectiva de la mezcla y reducen la temperatura pico, suprimiendo *knock* y habilitando mayor RC y avances; su dosificación óptima evita penalizar estabilidad y emisiones [23].

Ignición por pre-cámara y operación ultra-pobre; los sistemas de ignición por pre-cámara (turbulent jet ignition) permiten mezclas muy pobres con RC elevadas y NO_x bajos, al generar múltiples chorros turbulentos que aceleran la combustión principal y reducen el riesgo de *knock*. En gasolina y en gas natural se ha mostrado la ampliación del límite de pobreza y la mejora de la eficiencia con menor sensibilidad a *knock* [20, 21, 24-29].

Número de metano (MN) por su sigla en inglés y aptitud de combustibles gaseosos; El MN clasifica la resistencia a *knock* de gases alternativos (GN, biogás, gas de síntesis, HCNG). Ensayos normalizados y correlaciones muestran relación casi lineal entre MN y la RC límite de *knock*: mezclas con CO_2 (biogás) pueden alcanzar $MN > 100$ y tolerar RC superiores a las del metano puro, mientras que la adición de H_2/CO reduce el MN y la RC admisible [15,27]. Este índice permite anticipar ajustes de diseño y calibración (RC, avance, boost, límite de mezcla pobre) al cambiar el gas.

Exergía en ciclo Otto y variables de diseño. Los análisis de segunda ley muestran que la exergía del combustible y las irreversibilidades del proceso de combustión gobiernan el máximo trabajo útil del ciclo. En MEP, la RC, la dilución (EGR/aire), la turbulencia y la estrategia de mezcla/encendido determinan la eficiencia exergética, usualmente inferior a la eficiencia térmica por pérdidas de combustión, transferencia de calor y disipaciones. La literatura reporta que estrategias de combustión pobre y turbulencia elevada reducen pérdidas de exergía al acortar la duración de combustión y bajar temperaturas pico, siempre que se controle el *knock*; por su parte, los EGR disminuyen irreversibilidades térmicas al costo de una ligera penalización si excede su ventana óptima [20, 24, 25]. En combustibles gaseosos de alto MN (biometano/biogás acondicionado), la posibilidad de operar con RC elevadas y mezclas pobres habilita eficiencias exergéticas superiores frente a gasolinas convencionales, condicionadas por el adecuado diseño geométrico (cámara, *squish*, *tumble*) y calibración (CA50, avance, fracción EGR). Estos hallazgos sustentan el diseño guiado por exergía como criterio unificador para seleccionar configuraciones geométricas y condiciones de operación compatibles con los límites de *knock* de combustibles renovables y alternativos [20,24,25].

B. Estado del Arte desarrollado en esta investigación

En esta sección se presenta un análisis detallado de los estudios realizados en diseño de motores y los resultados obtenidos en más de una década de investigación por el autor principal de esta investigación:

Este estudio tuvo como objetivo medir y predecir el MN y la relación de compresión crítica (CCR) de doce mezclas de biogás con metano, propano e hidrógeno utilizando un motor CFR F2. Se caracterizaron experimentalmente las mezclas variando la relación de equivalencia y la presión de admisión para evaluar su tendencia al *knock*, y se compararon con simulaciones en CHEMKIN empleando ocho mecanismos de cinética química. Los resultados mostraron que las mezclas de biogás con metano e hidrógeno presentan MN elevados (≈ 100) y mayor resistencia al *knock*, mientras que las mezclas con propano e hidrógeno reducen el MN hasta ≈ 65 , aumentando la probabilidad de detonación. Se encontró una correlación polinómica entre MN y CCR, útil para estimar el límite de compresión en condiciones no estándar. Tres mezclas específicas alcanzaron $MN = 100$, lo que permite operar a relaciones de compresión de hasta 15:1, favoreciendo la eficiencia térmica. En las simulaciones, el mecanismo USCII predijo mejor el CCR y el mecanismo San Diego el MN,

aunque en mezclas con propano el mecanismo Butane fue el más preciso. Finalmente, se observó que el empobrecimiento de la mezcla incrementa la resistencia al *knock*, permitiendo operar con mayores RC (hasta 18:1 en combustión pobre) y que presiones de admisión más altas reducen el CCR, mientras que a menor presión (altitud elevada) puede aumentarse la RC admisible. El aporte principal fue el desarrollo de una correlación validada experimentalmente entre MN y CCR para biogás y mezclas alternativas, ofreciendo una herramienta para diseñar motores SI de alta eficiencia con combustibles renovables [30].

Este estudio analizó experimentalmente el efecto del *knock* en el desempeño y la repetibilidad de un MEP de alta RC (15.1:1) convertido desde diésel, operando con una mezcla de 50% biogás y 50% gas natural a 7.5 kW y 1800 rpm. La investigación definió el umbral de detonación mediante la presión pico de knock (knock peak pressure) y comparó el funcionamiento justo por encima y por debajo de dicho límite. Se evaluaron tres intensidades de knock (despreciable, bajo y alto) variando el avance de encendido (ST) por sus siglas en inglés “spark timing” en 12°, 16° y 19° BTDC, con 18 ensayos de repetibilidad en cada condición. Los resultados mostraron que un knock peak pressure >0.5 bar caracteriza detonación, mientras que valores entre 0.3 y 0.5 bar corresponden al umbral seguro de operación. Se observó que el *knock* reduce la estabilidad de combustión, aumentando el COV de IMEP de 1.98% (sin knock) a 3.10% (con knock), adelanta la combustión (reducción de 2.66° en duración y de hasta 6.6° en el ángulo de 90% de masa quemada) y disminuye el rendimiento térmico en 0.97% con un aumento en el BSFC de 14 g/kWh respecto a operación libre de knock. Además, las emisiones de CO y THC se duplicaron en promedio bajo condiciones de knock debido a la mayor fracción de combustible no quemado. El aporte principal del estudio fue definir experimentalmente un criterio robusto de umbral de knock basado en la presión pico promediada en 200 ciclos, proporcionando un método aplicable a motores de alta RC alimentados con combustibles renovables gaseosos. Asimismo, se confirmó que operar cerca pero por debajo del umbral de knock maximiza la eficiencia y potencia sin comprometer la durabilidad del motor [31].

Este trabajo presentó estrategias para mejorar el desempeño de un MEP con alta RC (15.1:1) convertido desde diésel para operar con combustibles gaseosos. Se evaluaron mezclas de biogás con gas natural, propano e hidrógeno buscando maximizar potencia y eficiencia térmica operando cerca del umbral de *knock*. Se estableció como criterio de estabilidad un knock peak pressure promedio entre 0.3–0.5 bar y un COV de IMEP <4% medidos en 200 ciclos consecutivos. Los resultados mostraron que la mezcla 50% biogás–50% metano (50B50M) ofreció el mejor balance entre energía específica, velocidad de llama laminar (SL) y MN (120), alcanzando la mayor potencia de salida 8.66 kW @1800 rpm (8.25% superior a la operación diésel original) y una eficiencia generadora de 30.2%. En contraste, el uso de biogás puro (100B) resultó en una pérdida de potencia de 6.25% (7.5 kW), limitada por su baja densidad energética y SL. Las mezclas con

propano e hidrógeno, con MN ≈65, mostraron alta tendencia al *knock*, requiriendo menores ST y sacrificando el calado (fase) óptimo de combustión, lo que redujo potencia y eficiencia. Se observó que el parámetro de control más robusto para fijar la potencia máxima es el umbral de knock, más que el % de apertura de mariposa, y que la operación pobre ($\phi = 0.9$) con inyección de mezcla a 2 bar contribuye a mejorar la combustión. El aporte principal fue definir un método de operación estable en motores MEP de alta RC alimentados con mezclas renovables, destacando el potencial de 50B50M y de biogás enriquecido como combustibles que permiten aprovechar la alta RC sin comprometer durabilidad [32].

Este estudio evaluó experimentalmente el efecto de la relación de equivalencia (ϕ) en la tendencia al *knock* de MEP operando con mezclas de biogás, gas natural, propano e hidrógeno. Se utilizaron dos plataformas: un motor CFR para determinar el MN y la CCR, y un motor Lister Petter TR2 diésel convertido a MEP (RC=15.5:1) para evaluar desempeño en generación eléctrica. Los ensayos se realizaron al límite del *knock* definido. Los resultados mostraron que en el motor CFR las mezclas pobres ($\phi = 0.7$) reducen la tendencia al *knock* y permiten operar a CCR más altas, mientras que en el TR2 ocurre lo contrario: la operación con mezclas pobres incrementa el *knock* debido al mayor % de mariposa abierto, que reduce la caída de presión en la admisión, aumenta la densidad de la carga y eleva la presión al final de la compresión. Este fenómeno obliga a reducir la potencia para mantenerse por debajo del umbral de *knock*. Las mezclas con mayor MN, como 50B50M y 57B38M5H, mostraron mejor compromiso entre potencia (≈8.7 kW a 1800 rpm) y eficiencia generadora (≈30%), mientras que el biogás puro (100B) sufrió mayor pérdida de potencia (hasta 38%) por su baja densidad energética. El estudio concluyó que el MN es el mejor predictor del comportamiento antidetonante frente a parámetros como la SL o la velocidad de llama turbulenta (ST), ya que adiciones de hidrógeno aumentaron la SL pero redujeron el tiempo de ignición, incrementando la tendencia al *knock*. El aporte principal fue evidenciar que los MEP de alta RC deben analizarse con base en el umbral de knock, más que en la apertura de mariposa, y que la optimización de ϕ es crítica para mantener el balance entre eficiencia, potencia y durabilidad [33].

Este estudio evaluó el impacto de la intensidad de la turbulencia en la tendencia al knock en el MEP con alta CR para biogás y ocho mezclas con gas natural, propano e hidrógeno. Se implementó una modificación de la geometría de la cámara de combustión del pistón (GCPCC) basada en simulaciones CFD (Fluent 13) de 12 geometrías sugeridas por la literatura para aumentar la energía cinética turbulenta (TKE) y la ST. Las pruebas experimentales, realizadas a 1800 rpm y equivalencia $\phi=0.9$, en el umbral de knock de 0.3–0.5 bar en 200 ciclos. Los resultados mostraron que el aumento de la turbulencia elevó la tendencia al knock en casi todas las mezclas, reduciendo la potencia máxima alcanzable para permanecer dentro del umbral de seguridad. En promedio, la potencia se redujo hasta 40% en mezclas con bajo número de metano (MN < 70), mientras que el biogás puro (MN ≈ 140)

mantuvo su potencia y alcanzó la mayor eficiencia generadora (29%) gracias a su alta resistencia a la detonación y baja velocidad de llama laminar. Se observó que el incremento de la turbulencia al final de la compresión aumentó la presión y temperatura del *end-gas*, reduciendo el tiempo de autoignición y favoreciendo el *knock*, aunque acortó la duración total de combustión (−2.5 CAD promedio). El estudio confirmó que en MEP de alta CR el límite de operación está definido por el umbral de *knock* y no por el % de apertura de mariposa, y que el biogás es el combustible que mejor aprovecha condiciones extremas de presión y turbulencia. El aporte principal fue demostrar experimentalmente y con CFD que la turbulencia intensa, aunque mejora la velocidad de combustión, incrementa el riesgo de *knock* en motores de alta CR, lo que obliga a diseñar cuidadosamente la geometría de la cámara y la estrategia de chispa o usar combustibles con alto MN como los biogases [34].

Este estudio evaluó experimentalmente las condiciones óptimas de operación del MEP para biogás, con alta CR, utilizando biogás y mezclas con gas natural, propano e hidrógeno. El motor fue instrumentado para monitorear en tiempo real presión en cilindro, COV de IMEP, duración de combustión, eficiencia generadora y emisiones. El límite operativo se definió por el umbral de *knock*. Se analizaron ocho mezclas con dos relaciones de equivalencia ($\phi = 0.9$ y 0.7) y posteriormente se optimizó el funcionamiento de la mezcla 50B50M (50% biogás–50% metano) con cinco valores de ϕ . Los resultados mostraron que el biogás (100B, MN ≈ 140) presenta la mayor resistencia al *knock* y la mayor eficiencia generadora (29%) a costa de menor potencia (≈ 7.5 kW), mientras que mezclas con propano o hidrógeno reducen el MN (≈ 65 –96), incrementan la tendencia al *knock* y requieren retardar el encendido, disminuyendo eficiencia y potencia útil. Se encontró que operar con mezclas pobres ($\phi = 0.7$) incrementa la tendencia al *knock* en MEP con alta RC que usan mariposa, debido al aumento del % de apertura de válvula que eleva la presión del *end-gas* al final de la compresión, reduciendo el tiempo de autoignición y la velocidad de llama turbulenta. La mezcla 50B50M a $\phi = 0.85$ ofreció el mejor compromiso: potencia máxima de 8.7 kW, eficiencia generadora superior al 30%, emisiones reducidas de CO (−37%) y NO_x (−6.8%) respecto a $\phi = 0.9$, y combustión estable cercana al CA50 óptimo. Este artículo aportó una metodología integral de optimización basada en el umbral de *knock* y en la evaluación simultánea de eficiencia, potencia y emisiones, evidenciando que los combustibles renovables de alto MN permiten explotar RC elevadas en MEP para maximizar eficiencia térmica y exergética [35].

Este artículo presenta un análisis fenomenológico del *knock* en motores de encendido provocado (MEP) de alta relación de compresión (RC) y alta intensidad de turbulencia, evaluando biogás y ocho mezclas con metano, propano e hidrógeno en condiciones límite de *knock* (KT). El estudio empleó dos plataformas experimentales: un motor CFR para determinar el número de metano (MN) y la relación de compresión crítica (CCR), y un motor Lister Petter TR2 convertido a MEP para medir potencia, eficiencia generadora y

características de combustión. **De manera análoga al octanaje en combustibles líquidos, el MN indica la disponibilidad operativa del combustible para producir trabajo útil**, al reflejar su resistencia al *knock* y, por tanto, el margen para operar con mayor RC y mayor carga sin detonar. Se confirmó que el biogás puro (MN = 140) presenta la mayor resistencia al *knock*, permitiendo operar con CCR hasta 18:1 y alcanzando condiciones favorables para que, al optimizar el motor según sus propiedades fisicoquímicas, el biogás incrementara su potencia a 8.6 kW ($\approx 7\%$ por encima del diésel) y lograra la mayor eficiencia generadora (28.2%). Se observó que tanto la combustión pobre ($\phi = 0.7$) como el aumento de la turbulencia incrementan la tendencia al *knock* debido al alza de presión y temperatura del *end-gas*, reduciendo la potencia máxima alcanzable para mantenerse en el KT.

El trabajo desarrolló dos ecuaciones clave: (i) una para la eficiencia generadora cuántica, definida como la eficiencia máxima alcanzable en el KT para generación eléctrica a 60 Hz, y (ii) otra para estimar la energía eléctrica máxima generable en función de RC, MN, densidad de energía del combustible (ED), velocidad de llama laminar (SL) y temperatura adiabática de llama (Tad). Se encontró que MN y CCR se relacionan positivamente con la potencia y la eficiencia del motor, mientras que ED, SL y Tad muestran relación inversa. El aporte principal fue consolidar un marco teórico que vincula propiedades fenomenológicas de los combustibles con su capacidad real de producir trabajo, proponiendo al biogás como combustible óptimo para MEP de alta RC por su alto MN y menores Tad y ED, y planteando que dominar el *knock* es la clave para alcanzar eficiencias equivalentes o superiores a las del ciclo Otto clásico. De manera análoga al octanaje en combustibles líquidos, el número de metano (MN) indica la disponibilidad del combustible para producir trabajo útil, al expresar su resistencia al *knock* y el margen operativo para convertir energía en potencia sin detonar.

IV. MARCO TEORICO

A. Marco teórico para ciclos Otto.

En los diagramas P–V (presión–volumen) y T–S (temperatura–entropía) del ciclo Otto se ilustran los cuatro procesos termodinámicos ideales que gobiernan el funcionamiento de los MEP. En el diagrama P–V, el ciclo inicia con la compresión isentrópica (1→2), donde el volumen disminuye y la presión aumenta sin intercambio de calor. El proceso 2→3 representa la adición de calor a volumen constante, generando un incremento brusco de presión. A continuación, 3→4 corresponde a la expansión isentrópica, donde el volumen aumenta y la presión desciende, produciendo el trabajo útil. Finalmente, 4→1 implica la rechazo de calor a volumen constante, cerrando el ciclo. En el diagrama T–S, los procesos isentrópicos (1→2 y 3→4) aparecen como líneas verticales, mientras que los intercambios de calor (2→3 y 4→1) se representan como curvas donde la temperatura y la entropía varían simultáneamente. Estos diagramas permiten visualizar tanto el trabajo neto —el área encerrada en el P–V— como la variación de entropía asociada al intercambio de calor

en el T-S. En el ciclo Otto ideal, esta entropía corresponde a entropía reversible, pues se asume que el intercambio de calor ocurre sin irreversibilidades. Por ello, constituyen herramientas fundamentales para el diseño y análisis de motores térmicos, como se discute ampliamente en la literatura especializada [36].

La eficiencia térmica teórica del ciclo Otto se expresa como:

$$\eta_{\text{Otto}} = 1 - \frac{1}{RC^{(\gamma-1)}} \quad (1)$$

Este marco es esencial para comprender la interacción entre temperatura, presión, entropía, energía interna y exergía en MEP alimentados con combustibles gaseosos. A diferencia de los sistemas abiertos, el ciclo Otto trabaja principalmente con la energía interna (u) en lugar de la entalpía (h), ya que la combustión y el rechazo de calor ocurren a volumen constante.

Adición de calor a volumen constante (proceso 2 $\rightarrow$ 3):

$$Q_{in} = \Delta u_{2-3} = C_v \cdot (T_3 - T_2) \quad (2)$$

Rechazo de calor a volumen constante (proceso 4 $\rightarrow$ 1):

$$Q_{out} = \Delta u_{4-1} = C_v \cdot (T_4 - T_1) \quad (3)$$

Trabajo neto como diferencia calor absorbido y rechazado:

$$W_{net} = Q_{in} - Q_{out} = C_v \cdot [(T_3 - T_2) - (T_4 - T_1)] \quad (4)$$

La eficiencia térmica también se define como el trabajo neto dividido entre el calor suministrado:

$$\eta_{\text{Otto}} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \quad (5)$$

Usando las relaciones isentrópicas y el comportamiento de gas ideal, esta expresión puede reescribirse en función de la $RC=V_1/V_2$ y del índice adiabático $\gamma=C_p/C_v$, como se presentó en la ecuación (1). Esta ecuación también puede expresarse en términos de temperatura y presión de la siguiente manera:

$$\eta_{\text{Otto}} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \left[\frac{P_1}{P_2} \right]^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (6)$$

Esta formulación es muy útil en aplicaciones prácticas porque: En los ensayos experimentales, lo que realmente se mide de forma confiable es la presión interna mediante sensores piezoeléctricos, mientras que volúmenes y temperaturas exactas son más difíciles de obtener. Facilita la comparación entre combustibles al reflejar cómo sus propiedades termodinámicas, en particular el γ , influyen en el potencial de eficiencia.

Para elevar la eficiencia teórica del ciclo Otto, la estrategia se basa en modificar las condiciones de compresión y combustión: Reducir la temperatura y presión iniciales (T_1 y P_1) disminuye las pérdidas y acerca al motor al ciclo ideal. Esto puede lograrse enfriando el aire de admisión (*intercooling*), precalentando mínimamente la mezcla, usando mariposa parcial para reducir la presión de entrada o introduciendo gases inertes como CO_2 , que bajan la energía térmica inicial sin afectar demasiado la reactividad. Aumentar la temperatura y presión finales (T_2 y P_2) tras la compresión isentrópica mejora el rendimiento, y esto se logra aumentando la CR, empleando combustibles con mayor γ , optimizando la cámara de combustión para inducir turbulencia y operando cerca del límite de knock con combustibles de alto MN. Además, los

EGR juegan un papel clave: al introducir CO_2 , H_2O y N_2 en la mezcla, se reduce la reactividad de la combustión y se incrementa la resistencia al knock, lo que permite aprovechar compresiones más altas sin detonación. En conjunto, estas acciones permiten que un MEP funcione más cerca de los límites ideales del ciclo Otto, logrando mayor eficiencia térmica y, cuando se analiza desde la segunda ley, una mejor eficiencia exergética, especialmente si el diseño del motor se adapta a las propiedades reales de los combustibles gaseosos renovables como el biogás.

B. Marco teórico para ciclos Otto propuesta.

El siguiente artículo del autor presenta una metodología novedosa para evaluar el desempeño de combustibles gaseosos en MEP con alta RC, denominado motor biogás BSI. La metodología para medir la calidad energética de los combustibles empleó pistones intercambiables para generar niveles de turbulencia alta, analizando combustibles con MN entre 37 y 140, y comparando sus propiedades fisicoquímicas. Se midieron la eficiencia de generación y la energía eléctrica máxima. Los resultados muestran que los biogases con MN > 120 alcanzaron eficiencias térmicas cercanas al 30%, mejores que el diésel (28%), con presiones pico de 47-48 bar y alta resistencia al knocking debido a su contenido de CO_2 . Por contraste, combustibles como el propano (MN37) exhibieron mayor tendencia al knocking, con menor eficiencia y presión pico (36 bar). La alta turbulencia mejoró la combustión, pero requirió combustibles con alto MN para evitar pérdidas de potencia. La comparación basada en “calidad energética”—más que en poder calorífico—permite predecir el desempeño bajo restricciones reales. En síntesis, el artículo ofrece un marco práctico de diseño y operación que conecta propiedades del combustible con variables de motor para optimizar eficiencia y potencia en aplicaciones con combustibles renovables [37].

El siguiente artículo propone una teoría innovadora para el diseño de MEP basada en la eficiencia exergética, la entropía, el índice de octano y las propiedades fisicoquímicas de los combustibles dentro del marco de los ciclos Otto. La investigación se fundamenta en tres MEP, tres metodologías científicas y la aplicación de las leyes de la termodinámica, estableciendo correlaciones entre exergía, energía recuperada y propiedades del combustible. Elementos clave del análisis: Fundamentos teóricos, la eficiencia de un MEP depende de su capacidad real de transformarse en trabajo útil, evaluada mediante exergía y entropía. Se incorpora el knock y el MN como variables centrales para determinar el límite práctico de operación y la eficiencia máxima. Metodología y modelo matemático, se realizaron ensayos en un motor CFR y dos motores diésel convertidos a MEP para biogás y mezclas con GNV+EGR, validando correlaciones entre MN, CCR, H/C, γ , SL y Tad. Se propusieron ecuaciones para calcular eficiencia exergética total (η_{qT}), combinando los efectos del índice de octano y la exergía química de los combustibles. Resultados principales: Biogás y GNV demostraron mayor eficiencia exergética y mayor energía recuperada que combustibles líquidos como gasolina o diésel, gracias a su alta resistencia al knock. El GNV con EGR y el biogás con alto contenido de

CO₂ permiten operar a altas RC y turbulencia, logrando potencias superiores al diésel con menores emisiones. Se definió un diseño conceptual que integra propiedades del combustible (ED, SL, Tad, γ , H/C, MN) con condiciones de motor (CR, turbulencia, avance de chispa, EGR) para maximizar eficiencia. Aportes al campo: Introduce una teoría de diseño reproducible que une termodinámica, exergía y propiedades del combustible, aplicable a motores de energía distribuida y transición energética. Ofrece un marco de comparación entre combustibles gaseosos y líquidos, mostrando que los gases renovables no solo son más limpios, sino también más eficientes bajo diseños óptimos [38].

La exergía se define como el máximo trabajo útil que un sistema puede entregar al alcanzar el equilibrio con su entorno. A diferencia de la energía, que se conserva, la exergía considera tanto la cantidad como la calidad de la energía, por lo que constituye un indicador clave del desempeño de los sistemas termodinámicos. En los procesos reales, la exergía se destruye debido a irreversibilidades, como fricción, expansiones no controladas, transferencia de calor con diferencias finitas de temperatura y cinética de las reacciones químicas. En cambio, en un sistema ideal que opera en condiciones reversibles, como el ciclo Otto ideal, la destrucción de exergía es nula. En este escenario, la eficiencia exergética, definida como la razón entre el trabajo útil obtenido y la exergía suministrada, se vuelve equivalente a la eficiencia térmica máxima del ciclo. En este contexto, la exergía química del combustible (E) representa el aporte máximo teórico, mientras que la exergía del ciclo Otto (X_{Otto}) corresponde al trabajo neto producido durante el ciclo. De esta manera, para un ciclo Otto ideal, puede establecerse la relación fundamental entre estas magnitudes como [38]:

$$X_{\text{Otto}} = \eta_{\text{Otto}} \cdot E \quad (7)$$

Esta ecuación resalta que, bajo condiciones ideales, toda la exergía suministrada puede transformarse en trabajo útil, con una eficiencia determinada únicamente por los límites termodinámicos del ciclo. A partir de este principio, para generalizar la ecuación de balance de exergía en condiciones de estado estacionario, se aplica la regla del producto, diferenciando ambos lados de la expresión original:

$$dX_{\text{Otto}} = \eta_{\text{Otto}} \cdot dE + E \cdot d\eta_{\text{Otto}} \quad (8)$$

En un ciclo reversible, el cambio neto de entropía del sistema es nulo; sin embargo, se produce una variación de entropía asociada a la transferencia de calor con el entorno, la cual contribuye al balance total de entropía. Si se asume que todo el calor intercambiado durante el ciclo proviene de la exergía química del combustible, y que el sistema es ideal y termodinámicamente reversible, entonces la entropía reversible del ciclo Otto puede expresarse como:

$$S_{\text{Otto}} = \int_1^4 \frac{dQ_{\text{rev}}}{T} = \int_1^4 \frac{dE}{T} \quad (9)$$

Posteriormente, al normalizar la ecuación (8) —dividiendo toda la expresión entre la temperatura T — y al sustituir la ecuación (9) en la ecuación (8), se obtiene:

$$\frac{dX_{\text{Otto}}}{T} = \eta_{\text{Otto}} \cdot dS_{\text{Otto}} + \frac{E \cdot d\eta_{\text{Otto}}}{T} \quad (10)$$

Al integrar sobre todo el ciclo, desde el estado 1 hasta el estado 4, se obtiene la forma integral del balance exergético:

$$\int_1^4 \frac{dX_{\text{Otto}}}{T} = \eta_{\text{Otto}} \cdot S_{\text{Otto}} + \int_1^4 \frac{E \cdot d\eta_{\text{Otto}}}{T} \quad (11)$$

Esta ecuación fue derivada por primera vez en un estudio previo del autor [38], la expresión muestra cómo la variación de exergía a lo largo del ciclo Otto, cuando se normaliza con respecto a la temperatura instantánea, se descompone en dos términos diferenciados. El primer término refleja la contribución de la entropía intercambiada, asociada con la conversión reversible de energía, escalada por la eficiencia ideal del ciclo. El segundo término representa la exergía adicional obtenida por las variaciones de eficiencia durante el ciclo, modulada por el contenido energético del combustible y el perfil térmico del sistema. Al integrar simultáneamente la generación de entropía y la evolución de la eficiencia, esta formulación extiende el análisis clásico del ciclo Otto, convirtiéndolo en un marco termodinámico más completo y dinámico. Su utilidad es notable para la optimización del desempeño de motores en condiciones idealizadas, pues captura la interdependencia entre entropía, exergía y transformaciones de energía.

V. PRINCIPIO TERMODINAMICO PROPUESTO PARA MEP USANDO LAS PROPIEDADES COMBUSTIBLES

A. Deducción matemática del principio de la exergía

Esta sección presenta la derivación formal de tres ecuaciones generales de exergía —basadas en entropía, energía y en una forma diferencial transitoria—, las cuales se originan a partir de una expresión idealizada de exergía derivada del ciclo Otto. Estas formulaciones tienen como propósito establecer un marco termodinámico coherente, orientado a explorar y fundamentar lo que podría considerarse el Quinto Principio de la Termodinámica. La Fig. 1. Presenta el procedimiento para alcanzar la ecuación del principio termodinámico de exergía para diseño de MEP, donde se presentan los siguientes términos. Estos términos representan la exergía útil añadida al sistema. El primer componente refleja el flujo de exergía asociado al aporte energético del combustible. El segundo componente representa la variación en la eficiencia exergética, influenciada por control adaptativo, calidad del combustible u optimización de la combustión. En conjunto, constituyen el constructor activo de exergía, capturando cómo las mejoras en desempeño y tecnología incrementan directamente la producción de trabajo útil.

Generación y aumento de exergía:

$$\eta_{x,SI} \cdot \frac{dE_{x,in}}{dt} + E_{x,in} \cdot \frac{d\eta_{x,SI}}{dt}$$

Contribución termodinámica ideal:

$$S_{\text{rev}} \cdot \frac{dT_0}{dt} + T_0 \cdot \frac{dS_{\text{rev}}}{dt}$$

Al transformar la ecuación en una forma explícita de exergía, y relacionar el flujo exergético con la temperatura de referencia constante ($T_0 = T_{OT0}$) —comúnmente denominada estado muerto o temperatura ambiente—, la ecuación (11) puede integrarse para obtener la exergía total disponible en forma explícita:

$$X_{Otto} = \eta_{Otto} \cdot S_{Otto} \cdot T_0 + T_0 \int_1^4 \frac{E \cdot d\eta_{Otto}}{T} \quad (12)$$

Para simplificar la expresión, se definió la entropía reversible generada durante el ciclo ideal:

$$S_{rev} = \int_1^4 \frac{E \cdot d\eta_{Otto}}{T} \quad (13)$$

Dado que el ciclo Otto es reversible, no existen términos de generación de entropía ($S_{irr}=0$). Por lo tanto, la entropía reversible del ciclo es equivalente a la entropía total: $S_{rev} = S_{Otto}$. Al sustituir la ecuación (13) en la ecuación (12), se obtiene:

$$X_{Otto} = \eta_{Otto} \cdot S_{rev} \cdot T_0 + S_{rev} \cdot T_0 = S_{rev} \cdot T_0 \cdot (\eta_{Otto} + 1) \quad (14)$$

Formulación basada en exergía para motores SI reales: Para extender este resultado a motores SI reales que operan en estado estacionario, pero en condiciones no ideales, la ecuación se generaliza de la siguiente manera: Se reemplaza el término $\eta_{Otto} \cdot S_{rev} \cdot T_0 \rightarrow \eta_{x,SI} \cdot E_{x,in}$, donde $\eta_{x,SI}$ es la eficiencia exergética del MEP y $E_{x,in}$ es la exergía total de entrada (química, térmica o mecánica), permitiendo que la eficiencia varíe dinámicamente durante el proceso de admisión–combustión–escape. La eficiencia evoluciona a lo largo del ciclo, de $\eta_{Otto} \rightarrow \eta_{x,SI}$. Se incluye el efecto de las irreversibilidades (S_{irr}), que destruyen exergía útil, mediante el término $-T_0 \cdot S_{irr}$. De este modo, la ecuación general de exergía (12) se transforma en:

$$X_{SI} = \eta_{x,SI} \cdot E_{x,SI} + T_0 \cdot \int_{Admission}^{Exhaust} \frac{E_{x,in} \cdot d\eta_{x,SI}}{T} - T_0 \cdot S_{irr} \quad (15)$$

Donde X_{SI} representa la exergía útil del MEP. Esta formulación describe la exergía disponible en un sistema real considerando su eficiencia exergética, el comportamiento dinámico del ciclo y las irreversibilidades presentes. A partir de este punto, se define explícitamente como la eficiencia exergética del motor.

Formulación diferencial para sistemas transitorios: Para considerar la operación dependiente del tiempo —por ejemplo, cambios de carga, arranque en frío o respuesta dinámica— se toma la derivada temporal total de la ecuación (15):

$$\frac{dX_{SI}}{dt} = \frac{d}{dt}(\eta_{x,SI} \cdot E_{x,in}) + \frac{d}{dt} \left(T_0 \cdot \int_{Admission}^{Exhaust} \frac{E_{x,in} \cdot d\eta_{x,SI}}{T} \right) - \frac{d}{dt}(T_0 \cdot S_{irr}) \quad (16)$$

Desglosando la expresión, al aplicar la derivada a cada término y considerando la ecuación correspondiente, se obtiene:

$$\frac{d}{dt}(\eta_{x,SI} \cdot E_{x,in}) = \eta_{x,SI} \cdot \frac{dE_{x,in}}{dt} + E_{x,in} \cdot \frac{d\eta_{x,SI}}{dt} \quad (17)$$

$$\frac{d}{dt} \left(T_0 \cdot \int_{Admission}^{Exhaust} \frac{E_{x,in} \cdot d\eta_{x,SI}}{T} \right) = \frac{d}{dt}(T_0 \cdot S_{rev}) = \frac{dT_0}{dt} \cdot S_{rev} + T_0 \cdot \frac{dS_{rev}}{dt} \quad (18)$$

$$\frac{d}{dt}(T_0 \cdot S_{irr}) = S_{irr} \cdot \frac{dT_0}{dt} + T_0 \cdot \frac{dS_{irr}}{dt} \quad (19)$$

Al realizar la sustitución correspondiente, se obtiene la **forma diferencial transitoria de la ecuación generalizada de exergía**:

$$\frac{dX_{SI}}{dt} = \eta_{x,SI} \cdot \frac{dE_{x,in}}{dt} + E_{x,in} \cdot \frac{d\eta_{x,SI}}{dt} + S_{rev} \cdot \frac{dT_0}{dt} + T_0 \cdot \frac{dS_{rev}}{dt} - S_{irr} \cdot \frac{dT_0}{dt} - T_0 \cdot \frac{dS_{irr}}{dt} \quad (20)$$

Fig. 1. Procedimiento para alcanzar la ecuación del principio termodinámico de exergía para diseño de MEP

Estos términos describen los cambios de exergía bajo condiciones reversibles, afectados por variaciones de la temperatura de referencia T_0 y por la evolución de la entropía reversible del ciclo. Vinculan el sistema con el paisaje termodinámico ideal, ofreciendo información sobre cómo las condiciones ambientales y la estructura del sistema definen el potencial máximo de eficiencia.

Degradación irreversible:

$$-S_{irr} \cdot \frac{dT_0}{dt} - T_0 \cdot \frac{dS_{irr}}{dt}$$

Estos términos cuantifican la pérdida de exergía debida a irreversibilidades, que incluyen fricción mecánica, disipación térmica, mezcla imperfecta y otras ineficiencias inherentes. Representan la energía no recuperable que no puede transformarse en trabajo útil, definiendo el costo entrópico de la realidad y la penalización termodinámica de la imperfección.

B. Principios termodinámicos para MEP

1. Principio de Equilibrio Térmico (Ley Cero aplicada a motores). Un motor solo puede medir y controlar su temperatura interna si todas las partes críticas —cámara de combustión, refrigeración, lubricación— tienden a un equilibrio térmico relativo. Caso especial: Para arranque en frío, el motor está fuera de equilibrio térmico; por eso, el consumo y la fricción son mayores hasta alcanzar temperatura de operación estable.

2. Principio de Conservación de Energía (Primera Ley)

La energía química del combustible se transforma en trabajo mecánico, calor a los gases de escape y pérdidas al sistema de enfriamiento, pero nunca se crea energía nueva. Caso especial: En un motor ideal, todo el poder calorífico se convertiría en trabajo útil; en un motor real, solo una fracción se aprovecha como potencia al cigüeñal, y el resto se disipa.

3. Principio de Entropía y Degradación de Energía (Segunda Ley).

Cada combustión produce entropía, lo que significa que parte de la energía se degrada irreversiblemente en calor no útil. Caso especial: Knock o detonación: Aumenta la entropía y reduce la eficiencia, porque la combustión se vuelve desordenada. Optimización por exergía: Al operar cerca del límite de knock con control de mezcla y chispa, se minimiza la generación de entropía, mejorando el aprovechamiento del combustible.

4. Principio del Cero Absoluto y Límite Inferior de Entropía (Tercera Ley).

Si un motor pudiera operar cerca de temperaturas criogénicas, sus pérdidas térmicas y entropía interna serían mínimas, pero el combustible no podría encenderse sin aporte energético. Caso especial: En motores de alta eficiencia se busca enfriar la admisión (intercooling o EGR frío) para aumentar la densidad del aire y mejorar la eficiencia, sin llegar a condiciones donde la combustión sea imposible.

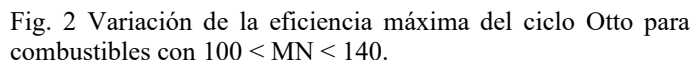
5. El Quinto Principio de la Termodinámica basado en exergía se puede enunciar así: “En un motor de combustión

elevado), lo que potencia la eficiencia exergética a pesar de menores densidades energéticas volumétricas.

La Fig. 2 presenta la variación de la eficiencia máxima del ciclo Otto para combustibles con $100 < MN < 140$. La eficiencia máxima del ciclo Otto aumenta de 64,55 % para metano puro (CH_4) a 67,22 % para un biogás típico (60 % CH_4 / 40 % CO_2). Este incremento se produce a pesar de que el coeficiente γ (C_p/C_v) disminuye ligeramente debido a la dilución con CO_2 . La razón es que la presencia de CO_2 eleva el MN y, con ello, la resistencia al knock, lo que permite operar el motor con RC más altas. En la ecuación de eficiencia del ciclo Otto, el efecto exponencial de la compresión domina sobre la reducción moderada de γ , de modo que el motor puede extraer más trabajo útil por ciclo. En términos físicos, el CO_2 actúa como un amortiguador térmico que reduce la temperatura de combustión, evita la detonación y permite un aprovechamiento superior de la energía del combustible, lo que explica el aumento neto de la eficiencia mostrado en la figura.



Interpretación termodinámica. La eficiencia final es el resultado de dos efectos contrapuestos: Aumento de RON $\rightarrow$ mayor CR $\rightarrow$ mayor exergía útil. Dilución con CO₂ $\rightarrow$ menor H/C y $\gamma \rightarrow$ menor temperatura de combustión y propagación de llama (SL). Para que estos biogases diluidos alcancen su potencial, deben operar en MEP con alta turbulencia, CR elevadas y estrategias de chispa optimizadas para compensar su baja ED y SL. Estos resultados son consistentes con la literatura internacional que señala que los combustibles gaseosos de alta resistencia a la detonación permiten operar con mayores relaciones de compresión. En este sentido, el biogás, debido a su contenido de CO₂, reduce la temperatura de combustión y aumenta el margen antidetonante, aunque penaliza la densidad energética y la velocidad de llama. Por tanto, su ventaja no radica únicamente en su poder calorífico, sino en su capacidad para permitir diseños de motor con mayor RC y mejor aprovechamiento exergético. Una limitación del presente trabajo es que la formulación propuesta integra resultados experimentales y numéricos provenientes de estudios previos, por lo que su validación completa en una única plataforma experimental bajo condiciones controladas debe abordarse en investigaciones futuras.



VII. CONCLUSIONES

El presente trabajo consolida un marco teórico basado en la exergía para el diseño de motores de encendido provocado (MEP) orientados al uso de combustibles renovables y alternativos. A partir de un análisis fenomenológico del ciclo Otto, se establecen principios de diseño para maximizar la eficiencia exergética bajo restricciones reales de combustión, *knock* e irreversibilidades, integrando explícitamente el efecto de las condiciones ambientales. En conjunto, los resultados soportan la formulación del **Quinto** La formulación integral y diferencial de la exergía en ciclos Otto demuestra que el desempeño útil del motor depende dinámicamente de la exergía del combustible y de la eficiencia exergética, pero también de la entropía generada y de las irreversibilidades internas, todas moduladas por el ambiente. Este enfoque permite anticipar el comportamiento ideal y real del motor, cuantificar pérdidas internas y establecer una base formal para el Quinto Principio aplicado a MEP.

- El presente trabajo consolida un marco teórico basado en exergía para el diseño de motores de encendido provocado orientados al uso de combustibles renovables y alternativos. La formulación integral y diferencial propuesta permite relacionar la exergía química del combustible, la eficiencia exergética, la entropía generada y las irreversibilidades internas, ofreciendo una base conceptual para optimizar el diseño del motor bajo restricciones reales de combustión y knock.
- Los combustibles gaseosos con alta resistencia al *knock* (alto RON/MN) constituyen los candidatos más favorables para maximizar la eficiencia exergética. La adición controlada de hidrógeno o el uso de biogases moderadamente diluidos permite combinar sostenibilidad y desempeño, bajo una condición esencial: **un diseño de motor optimizado para altas compresiones y mezcla turbulenta eficiente**, operando cerca del umbral de *knock* como criterio de máximo aprovechamiento. Así, la teoría exergética propuesta no solo jerarquiza combustibles por su capacidad de producir trabajo útil, sino que define un camino tecnológico para MEP de nueva generación: operar al borde del *knock*, emplear dilución inteligente con CO₂ y modular la eficiencia dinámica del ciclo Otto para maximizar conversión de exergía en trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Prociencia Perú por el financiamiento del proyecto titulado: “Diseño e implementación de un paquete tecnológico de una biorrefinería usando estiércol de cerdo y materia orgánica municipal para la producción de bioabonos, biogás, electricidad y biohidrógeno para la comunidad de Ventanilla”, bajo el Contrato N.º PE501091701-2024, el cual sirvió como base para el presente estudio.

REFERENCIAS

[1] CEIC Data, “Peru NG Production: Marketed Production (Dec 2023).”
 [2] Osinergmin, *Reporte de importaciones de combustibles líquidos en Perú*, Lima, 2023.
 [3] Instituto Argentino de Energía, “Producción de GN en Argentina” 2023.
 [4] Plataforma Escenarios Energéticos, *Diagnóstico del sector transporte y consumo de combustibles fósiles en Argentina*, 2023.
 [5] National Academies of Sciences, *Cost, Effectiveness, and Deployment of Fuel Economy Technologies for Light-Duty Vehicles*, Cap. 2, 2015.
 [6] A. Tomatore et al., “Optimization of a Spark Ignition Engine Knock and Performance by an EIVC Strategy,” *Energies*, vol. 15, no. 18, 2022.

[7] M. Xu et al., “Knocking combustion in spark-ignition engines,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 54, pp. 1–27, 2017.
 [8] J. Luijten et al., “Pre-chamber jet ignition for ultra-lean SI engines: efficiency and emission impacts,” *SAE Technical Paper*, 2021.
 [9] H. Zhao, *Advanced Direct Injection Combustion Engine Technologies and Development*, Woodhead Publishing, 2010.
 [10] A. Calamia et al., “An exergy analysis methodology for internal combustion engines,” *Applied Energy*, vol. 260, pp. 114–125, 2020.
 [11] J. P. Gómez-Montoya and A. Amell, “Methodology to estimate fuel’s exergy in SI engines using Otto cycle principles,” in *Proc. LACCEI*, 2023.
 [12] L. Zhu et al., “Hydrogen enrichment effects on exergy efficiency in ultra-lean SI engines,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 15, pp. 8502–8512, 2022.
 [13] International Energy Agency, *Latin America Energy Outlook 2023*, Paris, Francia, 2023.
 [14] M. Xu, R. et al., “Knocking combustion in spark-ignition engines,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 61, pp. 78–112, 2017.
 [15] A. Malenshek and D. B. Olsen, “Methane number testing of alternative gaseous fuels,” *Fuel*, vol. 88, no. 4, pp. 650–656, 2009.
 [16] G. T. Kalghatgi, “Developments in internal combustion engines and implications for combustion science and future transport fuels,” *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 35, no. 1, pp. 101–115, 2015.
 [17] D. Bradley, et al., “Measurements and correlations of turbulent burning velocities over wide ranges of fuels and elevated pressures,” *Combustion and Flame*, vol. 159, no. 4, pp. 1236–1250, 2012.
 [18] S. Verhelst and T. Wallner, “Hydrogen-fueled internal combustion engines,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 35, no. 6, pp. 490–527, 2009.
 [19] H. Tian, Z. Li, and M. Pan, “Effects of flame propagation speed on knocking and knock-limited spark advance,” *Fuel*, vol. 299, 120869, 2021.
 [20] C. D. Rakopoulos and E. G. Giakoumis, “Second-law analyses applied to internal combustion engines: A critical review,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 32, no. 1, pp. 2–47, 2006.
 [21] G. Toulson, H. Schock, and T. Attard, “A review of pre-chamber ignition systems and their application to spark-ignition engines,” *SAE Technical Paper 2010-01-2263*, 2010.
 [22] A. Costamagna, A. Marelli, and S. Onorati, “Hydrogen addition to natural gas in cogeneration engines: A numerical study,” *Frontiers in Mechanical Engineering*, vol. 7, 680193, 2021.
 [23] M. B. Bahri and A. A. Rashid, “Effects of exhaust gas recirculation on knock intensity of a spark-ignition engine,” *Journal of Energy Resources Technology (ASME)*, vol. 141, no. 9, 092302, 2019.
 [24] L. Zhu, Y. Zhang, and H. Zhao, “Exergy-based assessment of ultra-lean combustion strategies in SI engines,” *Energy Conversion and Management*, vol. 245, 114566, 2021.
 [25] E. G. Giakoumis and C. D. Rakopoulos, “Comparative exergetic evaluation of spark-ignition engines under various dilution and mixture strategies,” *Energy*, vol. 36, no. 1, pp. 262–274, 2011.
 [26] Z. Sun, H. Liu, and Z. Wang, “Effects of pre-chamber jet ignition on knock and combustion of a gasoline engine,” *Fuel*, vol. 293, 120438, 2021.
 [27] G. Chiaramonti, A. T. Pannocchia, and S. Rocco, “Effect of fuel composition and EGR on spark-ignited engine performance and knock,” *Fuel*, vol. 332, 126028, 2023.
 [28] X. Han, B. He, and D. Li, “Extending ultra-lean burn performance of a high CR pre-chamber SI engine,” *Energy*, vol. 279, 127873, 2023.
 [29] M. Farhan and T. Chen, “Comparative knock analysis of HCNG-fueled SI engines,” *Energy*, vol. 284, 131150, 2024.
 [30] J. P. Gomez Montoya, A. Amell, D. Olsen. Prediction and measurement of the critical CR and methane number for blends of biogas with methane, propane, and hydrogen. *Fuel* 186, (2016). pp168.
 [31] J. P. Gomez Montoya, A.A. Amell, D.B. Olsen. Engine operation just above and below the KT using a blend of biogas and natural gas. *Energy* vol. 153 (2018) pp. 719–25.
 [32] J. P. Gomez Montoya, G. Amador, A.A. Amell, D.B. 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* vol. 43 (2018)
 [33] J. P. Gomez Montoya, G. Amador, A.A. Amell. 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* vol. 43 (2018) (51) pp.23041.
 [34] J. P. Gomez Montoya, A.A. Amell. Effect of the turbulence intensity on knocking tendency in an SI engine with high compression ratio using biogas and blends with natural gas, propane, and hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy* vol. 44. (2019).
 [35] J. P. Gomez Montoya, A. Amell, D. Olsen. Operation of an SI engine with high CR using biogas blended with natural gas, propane, and H2. *Journal of Eng. Gas Turbines Power* vol.141(5) (2019) pp. 051006.
 [36] J.B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, 2nd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2018.
 [37] J.P Gomez Montoya, A. Amell. Phenomenological analysis of the combustion of gaseous fuels to measure energy quality and capacity to produce work in SI engines. *J Eng Gas Turbines and Power* 144(5), (2022)
 [38] J. P. Gomez Montoya and D. B. Olsen, “A novel theory for designing SI engines based on exergy efficiency, entropy, octane rating, and fuels’ physicochemical properties for Otto cycles,” *Energy Conversion and Management*, vol. 322, (2024) p. 119144.