



Revista UIS ingenierías

ISSN: 1657-4583

ISSN: 2145-8456

Universidad Industrial de Santander

Menaca, Rafael; Bedoya-Caro, Iván Darío
Una revisión del uso del hidrógeno en motores de encendido por compresión
(diésel) y un análisis de su posible uso en motores duales en Colombia
Revista UIS ingenierías, vol. 21, núm. 3, 2022, Julio-Septiembre, pp. 33-54
Universidad Industrial de Santander

DOI: <https://doi.org/10.18273/revuin.v21n3-2022004>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=553773616004>

- ▶ [Cómo citar el artículo](#)
- ▶ [Número completo](#)
- ▶ [Más información del artículo](#)
- ▶ [Página de la revista en redalyc.org](#)



Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

Una revisión del uso del hidrógeno en motores de encendido por compresión (diésel) y un análisis de su posible uso en motores duales en Colombia

A review of the use of hydrogen in CI engines (diesel) and an analysis of its potential use in dual-fuel engines in Colombia

Rafael Menaca ^{1a}, Iván Darío Bedoya-Caro ^{1b}

¹ Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Eficiente y Racional de la Energía - GASURE, Universidad de Antioquia, Colombia. Correo electrónico: ^a rafael.menaca@udea.edu.co, ^b ivan.bedoya@udea.edu.co.
Orcid: ^b [0000-0001-6909-9131](https://orcid.org/0000-0001-6909-9131).

Recibido: 12 mayo, 2022. Aceptado: 11 junio, 2022. Versión final: 22 junio, 2022.

Resumen

Las emisiones de los motores de encendido por compresión (MEC) están siendo fuertemente reguladas. Abandonar los motores diésel no es una solución a las regulaciones establecidas, debido a su alto desempeño respecto a similares tecnologías. El uso de combustibles más limpios y alternativos en motores diésel actuales es una propuesta bastante atractiva, puesto que aprovecharía su alta eficiencia y las características verdes de los combustibles no convencionales. El hidrógeno es el combustible más prometedor debido a que es limpio y puede ser producido a partir de energías alternativas como la solar o la eólica. El uso de motores duales diésel-hidrógeno promueve la reducción de agentes contaminantes atmosféricos (CO_x y hollín) y puede aumentar la eficiencia térmica del motor. En este trabajo se analizan los MEC en modo dual diésel-hidrógeno en una amplia gama de aspectos. Se revisa el efecto de la adición de hidrógeno a los MEC sobre el rendimiento del motor y las emisiones contaminantes. Se describe la legislación de Colombia y su matriz energética, y se analizan los compromisos que se tienen en los procesos energéticos. Se analizan los estudios en Colombia de los motores utilizando hidrógeno, y se establecen los límites de enriquecimiento recomendados expuestos en la literatura.

Palabras clave: desempeño; combustión y emisiones; límites de knock; motores duales diésel-hidrógeno; transición energética; motores de combustión interna; matriz energética colombiana.

Abstract

Emissions from compression ignition (CI) engines are being heavily regulated. Renouncing to diesel engines is not a solution to the established regulations due to their good performance. The coupling of cleaner and alternative fuels to current diesel engines is a remarkable proposal because it would take advantage of its high efficiency and the green characteristics of unconventional fuels. Hydrogen is the most promising fuel because is clean, alternative and renewable (from alternative energy sources). The use of dual-fuel diesel-hydrogen engines promotes the reduction of pollutants (CO_x and soot) and increases the thermal efficiency of the engine. In this work, the CI engines in dual-fuel

ISSN impreso: 1657 - 4583. ISSN en línea: 2145 – 8456.

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia [CC BY-ND 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/)



Como citar: R. Menaca, I. D. Bedoya-Caro, “Una revisión del uso del hidrógeno en motores de encendido por compresión (diésel) y un análisis de su posible uso en motores duales en Colombia,” *Rev. UIS Ing.*, vol. 21, no. 3, pp. 33-54, 2022, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v21n3-2022004>.

mode diesel-hydrogen is evaluated about many concerns. The effect of adding hydrogen to the CI engines on engine performance and pollutant emissions was reviewed. Furthermore, Colombian legislation and Colombian energy matrix were described, analyzing the commitments that are proposed in energy processes. The studies in Colombia of the engines using hydrogen were reviewed and the recommended enrichment limits set forth in the literature were established.

Keywords: dual-fuel diesel engines; energy transition; hydrogen; knock limits; performance, combustion and emissions characteristics; internal combustion engines; Colombia energy matrix.

1. Introducción

El motor diésel es el más eficiente disponible hoy en día, sin embargo, se están estableciendo fuertes regulaciones a estos motores. En una propuesta del futuro de estos dispositivos (motores diésel) [1], se asegura que su preservación a largo plazo está supeditada al uso del hidrógeno como combustible para su operación. El hidrógeno ha sido probado como combustible alternativo en motores de combustión interna (MCI), con una participación secundaria para reducir el uso de combustibles fósiles [2].

En el contexto internacional, el hidrógeno está tomando un rol importante; una muestra de esto es que el Departamento de Energía de los Estados Unidos, el Ministerio Japonés de Economía, Comercio e Industria y muchos otros agentes gubernamentales de gran importancia a nivel mundial están haciendo un llamado a la inclusión de programas de hidrógeno en los escenarios de sus países [3]. Por ejemplo, la Agencia Internacional de Energía Renovable plantea un escenario en el cual, para el 2050, el mundo hará un consumo del 5 % de la energía total final a través del hidrógeno producido a partir de fuentes renovables [4].

Rudolf Diesel fue inspirado por las lecturas del ciclo de Carnot, y quiso mejorar la eficiencia de los motores existentes en su época [5]. Tal cometido fue logrado, ya que actualmente los motores diésel mueven una gran cantidad de productos por los mares y las carreteras, proporcionan potencia a muchos equipos alrededor del mundo y, además, generan electricidad con la viabilidad económica más alta de todo este conjunto de máquinas [6].

Por otra parte, el motor diésel tiene efectos negativos sobre el medioambiente, debido a sus emisiones, las cuales, en el contexto internacional están siendo reguladas de forma estricta. Muchas técnicas para la reducción y control de las emisiones han sido revisadas por algunos autores [7], [8], aunque, sin duda, para alcanzar los objetivos ambientales propuestos a nivel global, el hidrógeno debe ser incluido en las matrices energéticas de los países.

El hidrógeno es uno de los más prometedores combustibles porque es limpio, renovable y alternativo (bajo su producción por fuentes de energía no convencionales). El hidrógeno tiene unas características diferenciadoras respecto a los combustibles fósiles (no emisiones de hollín y CO_x) y puede ser utilizado en MCI [9]. Si se busca un medioambiente libre de CO_x , es imperativo que el hidrógeno sea incluido como fuente de energía en la matriz energética, en el mediano-largo plazo. En un análisis de las problemáticas y las proyecciones de los motores diésel que funcionan en modo dual con hidrógeno como combustible principal, se concluye que este concepto de funcionamiento del motor diésel es muy factible y alcanzable, pues es respetuoso con el medioambiente, y, además, los desafíos que vayan surgiendo en su implementación pueden ser resueltos exitosamente [10]. El uso del hidrógeno en la industria del transporte lo posiciona como el combustible del futuro, y, en los últimos años, el concepto de motores duales diésel-hidrógeno está ganando una fuerte tracción [11].

Como se verá en el apartado 7, Colombia se comprometió a reducir considerablemente sus emisiones contaminantes, y, por ello, es de esperarse que el hidrógeno sea incluido en la matriz energética del país en los próximos años. Adicionalmente, la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), en conjunto con el Ministerio de Energías (Minenergía), ha elaborado un conglomerado de posibles escenarios para el uso de combustibles en el sector transporte, donde, para el escenario de máxima disrupción, se espera una fuerte acogida del hidrógeno en el contexto energético nacional colombiano [12] para el año 2050. Como se aprecia en la figura 1, el mayor consumo final de energía del país corresponde al sector transporte (40 %), donde el consumo del diésel representa un 40 % sobre el sector transporte. Además, como se puede apreciar en la figura 2, los vehículos con motores de carga mediana y pesada (diésel) tienen una participación importante en la energía final consumida. De igual forma, se menciona que el sector transporte, comparado con los diferentes sectores de consumo, tiene el mayor potencial para el progreso en la eficiencia energética, por lo cual se proyecta que este sector será uno de los que adhiera el hidrógeno dentro de sus planes energéticos (y más si Colombia apunta a la

proyección más disruptiva en términos de eficiencia energética).

Cuando surge la pregunta “¿por qué implementar hidrógeno en la matriz energética de un país?”, esta puede ser respondida como sigue: porque el hidrógeno ofrece un gran beneficio como vector energético (si obviamente primero se solucionan los problemas actuales en términos de almacenamiento) y, además, resuelve problemas de contaminación cuando es utilizado como combustible (su combustión completa tiene agua como producto) [13]. El uso del hidrógeno, bien sea en fase líquida o gaseosa en MCI, se ramifica en 3 tipologías conceptuales [10]:

- Motores tradicionales (motores Otto y diésel) adicionando pequeñas cantidades de hidrógeno como aditivo al combustible piloto.
- Motor de hidrógeno con un mezclado externo y una ignición forzada de la mezcla hidrógeno-aire.
- Motor dual con inyección directa del hidrógeno.

Es importante destacar que existen motores de hidrógeno, diseñados para que funcionen únicamente con este combustible. Debido a la alta resistencia a la autoignición del hidrógeno, para este modo de operación, se necesita agregar una chispa que sea el detonante de la combustión. Otro tipo de concepto es el primero de los mencionados en la lista anterior, donde se presentan las tipologías conceptuales de los motores duales (foco de este artículo); los motores tradicionales son modificados para posibilitar la adición de hidrógeno dentro del motor.

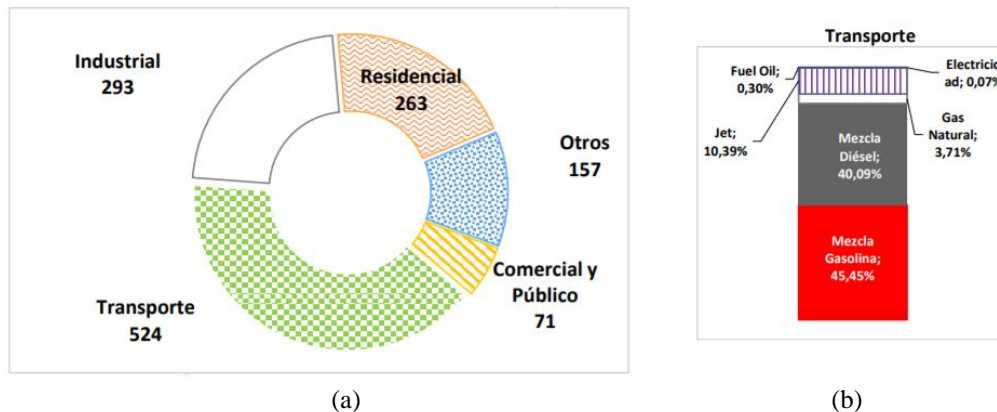


Figura 1. (a) Consumo final de energía en Colombia del año 2018 y (b) matriz energética del sector transporte Fuente: [14].

	Energía Final (KJ)	Energía útil (KJ)
Automóvil	40.757	11.805
Bus	61.242	4.767
Buseta	22.231	2.395
Camión	95.640	33.721
Camioneta	26.083	5.033
Microbús	28.096	5.435
Motocicleta	63.603	14.375
Taxi	48.252	17.476
Tractocamión	70.526	17.207

Figura 2. Energía final y útil en el sector transporte colombiano. Fuente: [12].

En este trabajo, se revisarán investigaciones en las cuales se han utilizado los distintos modos conceptuales de hidrógeno en MCI, pero se hará hincapié en la estrategia de los motores tradicionales, en los cuales se adiciona una pequeña cantidad de hidrógeno al diésel, que actúa como combustible piloto, ya que este modo de operación (modo dual) puede ser ejecutado con las menores intervenciones en los motores convencionales, y se necesitan mínimas modificaciones para su uso, motivo por el cual es muy factible poder acoplar esta tecnología a los motores que se tienen actualmente en Colombia.

Para modificar un motor convencional y llevarlo a funcionamiento en modo dual con un combustible gaseoso, es necesario disponer de un mezclador que agregue el combustible gaseoso al aire de admisión y que se sitúe entre el filtro y la tubería de admisión [15]. El hidrógeno también puede ser inyectado en el ducto de admisión (PFI por sus siglas en inglés), y se han explorado estrategias de inyección criogénica de hidrógeno en el puerto de admisión [16]. De estas estrategias de uso del hidrógeno en MCI, están en estado de investigación la inyección directa y la inyección criogénica en puerto. La sustitución de energía de combustibles líquidos convencionales, suministrada por hidrógeno en MCI, es conocida como enriquecimiento, y este generalmente se reporta en forma volumétrica (mezcla diésel+hidrógeno (% vol)) o en forma energética, por lo cual da cuenta del porcentaje de energía que antes del enriquecimiento se suministraba a través del diésel y que, al enriquecerse la mezcla, es aportado por el hidrógeno. Complementariamente, en el medio, los autores, al hablar de combustión dual en un motor que funciona con un combustible líquido y uno gaseoso, se refieren al combustible gaseoso como combustible principal, mientras que el combustible diésel inyectado es el combustible “piloto” [17].

En Colombia, se han realizado revisiones literarias concernientes a temáticas de interés en el área de las energías, dentro de las cuales se ha revisado la extracción de combustibles fósiles; se concluye que los escenarios futuros siempre incluyen el carbón y los combustibles convencionales en los recursos energéticos del país [18], así que, para hablar de un futuro verde con cero emisiones contaminantes, es indispensable que se recorra la transición energética.

También se ha revisado el potencial de la región colombiana respecto a la producción y almacenamiento del hidrógeno. Se dice que es un medio prometedor de almacenamiento de energía, y se enmarcan los mecanismos para la producción de hidrógeno y los retos que debe afrontar el país para poder incluir este combustible en la matriz energética [19].

El actual trabajo tiene como objetivo ofrecer una revisión del estado actual del uso del hidrógeno en MCI, especialmente en MEC, debido a su gran participación en la matriz energética del país. Dado que se espera que el hidrógeno penetre como un importante combustible dentro del contexto nacional energético, y como se espera que el sector transporte sea el sector que más progreso realice en eficiencia energética, el uso de hidrógeno como combustible en motores diésel es un hecho inevitable. Los aportes de investigación más cercanos al presente trabajo de revisión enfocado en MEC recorren una múltiple gama de temas.

Primero, se hizo una revisión de la investigación en MCI y qué colaboraciones y aportes científicos se están haciendo desde las diferentes instituciones académicas y no académicas en Colombia. Además, en este trabajo se ramifica y estipula la experticia de cada uno de los investigadores, y se exponen los diferentes intereses de investigación (simulación numérica, estudios experimentales, motores duales, etc.) [20]. Segundo, fue elaborada una revisión del estado del arte de los modelos de combustión en motores diésel, donde se establecen los principales códigos CFD comerciales utilizados en dicho modelado; finalmente, se exponen varios trabajos que han utilizado modelos de combustión en motores diésel con biocombustibles [21]. Por último, se realizó un análisis exploratorio para entender el efecto de la adición de biogás a MCI sobre el cambio climático y la mitigación de la producción de agentes contaminantes como productos de la combustión [15].

Adicionalmente, el nivel de enriquecimiento al cual se puede someter un MEC tiene un límite, debido a la combustión inestable o anormal, la cual promueve el *knocking*, picos de presión anormales, temperaturas más altas al interior del cilindro y la autoignición de la mezcla hidrógeno-aire, donde esta combustión inestable es más severa cuando se tiene un mayor enriquecimiento. Por este motivo, para preservar la seguridad y el estado de los motores, es necesario tener muy claro cuáles son los límites de enriquecimiento con hidrógeno (los cuales serán presentados en el presente trabajo) y hasta qué punto los investigadores han logrado dicha sustitución, mejorando las condiciones de operación del motor, mientras se protege el motor de daños considerables [22].

En este sentido, se evidencia una notable necesidad de entablar un estudio en el cual se revise de forma literaria el estado en el cual se encuentran los MEC en modo dual que usan hidrógeno como combustible principal y se discierna el escenario en el cual este modo de combustión dual pueda ser acoplado a las tecnologías actuales colombianas, ya que, próximamente, será una realidad la participación del hidrógeno en el escenario energético del

país; por tal razón, se espera dar contexto a los investigadores en Colombia respecto a los métodos de enriquecimiento de MEC con hidrógeno y acerca de los escenarios más viables para el uso de este combustible en este modelo conceptual de motores.

En este trabajo se hará un recorrido de análisis literario con la finalidad de comprender las posibilidades que tiene el hidrógeno como combustible para su uso en MCI. Después, se profundizará en la operación de los MEC en modo dual diésel-hidrógeno, y se continuará con la revisión del efecto de la adición de hidrógeno a los MEC sobre el rendimiento del motor y sobre las emisiones contaminantes. Posteriormente, se revisará el estado del arte de las técnicas utilizadas mundialmente para mejorar la combustión de los motores duales diésel-hidrógeno. Seguidamente, se hará una breve descripción de los estudios multipropósito que se han realizado en los últimos años en el campo de motores. Para complementar, se describirán la legislación colombiana y la matriz energética del país para entender los retos y los compromisos que tiene Colombia frente a la mejora en los procesos energéticos. Finalmente, se revisarán los estudios en Colombia de MCI con hidrógeno y se hará una recomendación final sobre los límites de enriquecimiento que se reportan a nivel mundial; por último, como conclusión, se presentan los aspectos más relevantes encontrados en la revisión literaria.

2. ¿Qué es el hidrógeno?

El hidrógeno es el elemento más abundante en el universo. En su forma molecular (H_2), es incoloro, inodoro y, al reaccionar con oxígeno en el proceso de combustión, emite cero emisiones contaminantes [23].

El hidrógeno puede ser producido por varios recursos, tales como recursos de energía fósiles, biomasa, agua, etc. Existen diversas tecnologías para la producción de hidrógeno, entre las cuales se pueden destacar la gasificación del carbón (Colombia tiene la mayor reserva de este mineral en América Latina [24] y se reporta un déficit inquietante sobre el valor agregado que se le da al carbón [25]), gasificación de biomasa, electrólisis del agua, etc. El hidrógeno puede suplir altas demandas energéticas requeridas por el sector transporte de la matriz energética colombiana. En términos calóricos, el hidrógeno proporciona el mayor poder calorífico de todos los combustibles, exceptuando la energía nuclear [26]; estas medidas se encuentran en términos gravimétricos (por unidad de masa). En términos volumétricos, esta tendencia es invertida y, en la Actualidad, un tema de interés es cómo mejorar el almacenamiento y la distribución de este gas. Algunas de las propiedades del hidrógeno son presentadas en la [tabla](#)

1, así como las del diésel y el metano, como referencia de comparación con el hidrógeno.

De estas propiedades, es posible destacar que el poder calorífico inferior del hidrógeno es el mayor de los combustibles presentados. También es posible apreciar una baja densidad en el hidrógeno, ya que la molécula de hidrógeno es pequeña, ligera y muy móvil (por esto su alta difusividad másica) [27].

Esto se traduce en una necesidad de avances científicos en términos de un desarrollo de métodos más eficientes y menos costosos en el suministro de este combustible, en el diseño de sistemas de almacenamiento de hidrógeno de mayor densidad de energía, específicamente, en el almacenamiento a bordo del sistema vehicular [28].

Otra propiedad de interés es la distancia mínima del *quenching*. Como se aprecia en la [tabla 1](#), esta propiedad para el hidrógeno tiene un valor menor que para los otros combustibles fósiles. En términos físicos, esto implicaría que la llama de hidrógeno se extingue mucho más cerca de las paredes en comparación con los combustibles fósiles. Dicho fenómeno promueve un mayor calentamiento (se aumenta la transferencia de calor) del pistón, el cilindro y la culata, lo cual puede recortar la vida del motor [29]. Expandiendo el análisis, se presentaría posiblemente un fenómeno indeseado en el motor dual: la ignición de la mezcla.

Al aumentarse el calentamiento de las paredes, es posible que, al agregar hidrógeno mezclado con aire a través del ducto de admisión, cuando este ingrese al cilindro en la carrera de admisión, la mezcla se encienda por puntos calientes en las paredes del motor.

3. Hidrógeno en MEC

3.1. Operación con solo hidrógeno

La idea de implementar hidrógeno, un combustible limpio, eficiente y renovable, para la operación de MEC de alta eficiencia fue, y es, muy prometedora.

En una revisión realizada al hidrógeno como combustible para MEC [23], se muestra que desde hace muchos años se ha probado esta técnica del uso de hidrógeno como único combustible en MEC. En esta revisión, los autores indican que el rango de operación es muy limitado debido a la alta resistencia del hidrógeno a la autoignición.

Tabla 1. Propiedades del hidrógeno comparadas con las propiedades del metano y el diésel

Propiedad	Hidrógeno ^a	Metano ^a	diésel ^b
Peso molecular (<i>g/mol</i>)	2,016	0,65	≈167.204
Densidad (<i>kg/m</i> ³)	0,08	16,043	820-950 ^c
Difusividad másica en aire (<i>cm</i> ² / <i>s</i>)	0,61	0,16	-
Energía mínima de ignición (<i>mJ</i>)	0,02	0,28	-
Distancia mínima de <i>quenching</i> (<i>mm</i>)	0,64	2,03	-
Límite de inflamabilidad en aire (<i>%vol</i>)	4-75	5-15	0,6-7,5
Poder calórico inferior (<i>MJ/kg</i>)	120	50	48
Temperatura de autoignición (<i>K</i>)	858	≈813	473

^a: datos dados a 300 K y 1 atm.

^b: combustible líquido.

^c: a condiciones de presión y temperatura normales: P=1 bar, T=293,15 K.

Fuente: ajustado de [3] y [23].

Este limitado rango de operaciones no puede ser resuelto incluso en relaciones de compresión (RC) de 29:1. Se especifica también que se estudió la conversión de un motor diésel a un motor que opera solamente con hidrógeno como combustible, y se exploró el uso de fuentes de encendido (bujías) para provocar chispas y, consecuentemente, la ignición del hidrógeno (lo que en realidad convertiría este motor no en MEC sino en MEP). Con las anteriores metodologías, se tuvieron muchos inconvenientes debido a las variaciones ciclo-a-ciclo del retraso a la ignición. Además, las concentraciones de NO_x se elevaron significativamente respecto a las emisiones del modo diésel original.

Estas problemáticas han estado en la mira de muchos investigadores, y algunos han encontrado soluciones muy prometedoras, como un estudio que utilizó diésel como fuente de ignición del hidrógeno [30], es decir, se inyectaron pequeñas cantidades de diésel piloto con la única finalidad de que fuesen el detonador de la combustión al interior del cilindro. En este estudio se comparó el desempeño de un motor que opera solamente con hidrógeno y uno que opera con hidrógeno diluido en N_2 ; se obtuvo la IMEP más alta para diluciones del hidrógeno del 40 al 50 %, cercana a 1013 kPa, la cual fue cerca de 13 % más alta que el modo de operación del motor con solo hidrógeno. Además, con una dilución de 60 % de N_2 , se logró una reducción del 100 % en las emisiones de NO_x , sin grandes sacrificios en el rendimiento del motor.

Es posible apreciar que las barreras que se van presentando en las mejoras de las tecnologías, a medida que se estudian, se van derrumbando. Como siguen existiendo tantos inconvenientes con el transporte y la manipulación del hidrógeno, es necesario hacer una revisión de las herramientas disponibles en el contexto colombiano, es decir, el modo de operación dual de un

MEC en el cual se utilice diésel como combustible piloto e hidrógeno como combustible principal. Al hacer uso de estas tecnologías, las modificaciones por realizar en los motores serían mínimas.

3.2. Operación en modo dual diésel-mezcla hidrógeno-gas natural

Es posible utilizar mezclas de hidrógeno con gas natural como combustible principal en motores duales. El uso de estas mezclas ha sido estudiado en profundidad [2]. El gas natural se promueve fuertemente en el contexto actual colombiano para desplazar los combustibles fósiles convencionales (ver apartado 7), por lo cual se espera que este tipo de mezclas (hidrógeno-gas natural) sea integrado a la matriz energética del país. Tecnologías como las desarrolladas por la empresa Hardstaff pueden ser un punto de referencia para abordar similares modos de combustión en el sector transporte colombiano. Se reportan niveles de sustitución de diésel en los motores que utilizan la tecnología de la mencionada empresa de hasta 97 %, con un posible uso de hidrógeno de hasta 20 % en la mezcla hidrógeno-gas natural [31].

Como término general, la adición de hidrógeno al gas natural (mezcla gaseosa) para luego utilizarse como combustible principal (con piloto de diésel) tiene los mismos efectos que los que genera la adición de hidrógeno al diésel. En términos de emisiones, aquellas que dependen de enlaces de carbono son reducidas debido al desplazamiento de hidrocarburos por hidrógeno, se aumenta la eficiencia térmica por los efectos termodinámicos del hidrógeno y se aumentan las emisiones de NO_x por las altas temperaturas alcanzadas en la combustión del hidrógeno (fenómenos que serán discutidos uno a uno en profundidad en los próximos apartados) [32].

En la **tabla 1**, se presentan los valores de C , L_c y F (los datos son multiplicados por un factor de 10^{-4}) para los algoritmos de prueba aplicados al mismo conjunto de imágenes; se resaltan los valores de F para quien ocupa el primer lugar (azul) y quien ocupa el segundo (rojo). La selección de F como punto de análisis se debe a la falta de preferencia de una métrica sobre otra.

3.3. Operación en modo dual diésel-hidrógeno

Es posible agregar combustibles limpios y verdes a combustibles fósiles, en aras de disminuir las emisiones contaminantes, mientras se usan motores existentes tradicionales y sin modificaciones de diseño [33]. Este punto es muy importante, ya que en Colombia es necesario establecer el modo de operación de los motores duales diésel-hidrógeno de forma que implique las menores modificaciones, ya que así se tendrá un fácil recibimiento en el sector transporte.

En una revisión realizada para analizar el efecto de enriquecer combustible diésel con hidrógeno en el uso de MEC [34], se llega a la conclusión de que es posible utilizar un motor diésel en modo dual sin modificaciones en el motor diésel convencional, haciendo uso de combustible gaseoso, hidrógeno, como combustible principal, y diésel como combustible piloto. Por tanto, es posible concluir que, en el contexto colombiano, el ingreso del hidrógeno a la matriz energética en los MCI es muy factible.

El concepto de combustión dual diésel-hidrógeno es presentado en la **figura 3**; es posible apreciar el progreso de su combustión y cada etapa de su desarrollo para los distintos modos de combustión. La premezcla deriva de la inducción de aire y de hidrógeno, gases que al interior del cilindro pueden considerarse como mezclados de forma homogénea [35]. Debido a la alta resistencia a la autoignición del hidrógeno, la fuente que propaga la llama se crea cuando el diésel se auto enciende, momentos posteriores a su inyección, rompimiento y evaporación. La combustión del diésel sigue el convencional modelo conceptual para su combustión [36], agregando interacciones químicas y térmicas complicadas debido a la adición del combustible gaseoso (en este caso hidrógeno) [37]. Luego de la autoignición (**figura 3** (3)), se crean puntos propicios para el encendido del hidrógeno; en los mismos momentos, la llama de difusión inicia su expansión, con las características típicas de una llama de diésel (frente de llama en la zona de la combustión por difusión y una zona de quemados). Instantes después se da el inicio de la combustión controlada por premezcla, donde también se pueden generar condiciones de *knock*.

La llama de hidrógeno se propaga y, cuando la mezcla es consumida en su totalidad (o se extingue la llama), se da el final de la combustión y se presencian dos zonas: una zona de inquemados y otra zona de quemados. Ahora, cabe analizar qué implicaciones se tienen respecto a los diferentes parámetros de funcionamiento al usar motores duales diésel-hidrógeno.

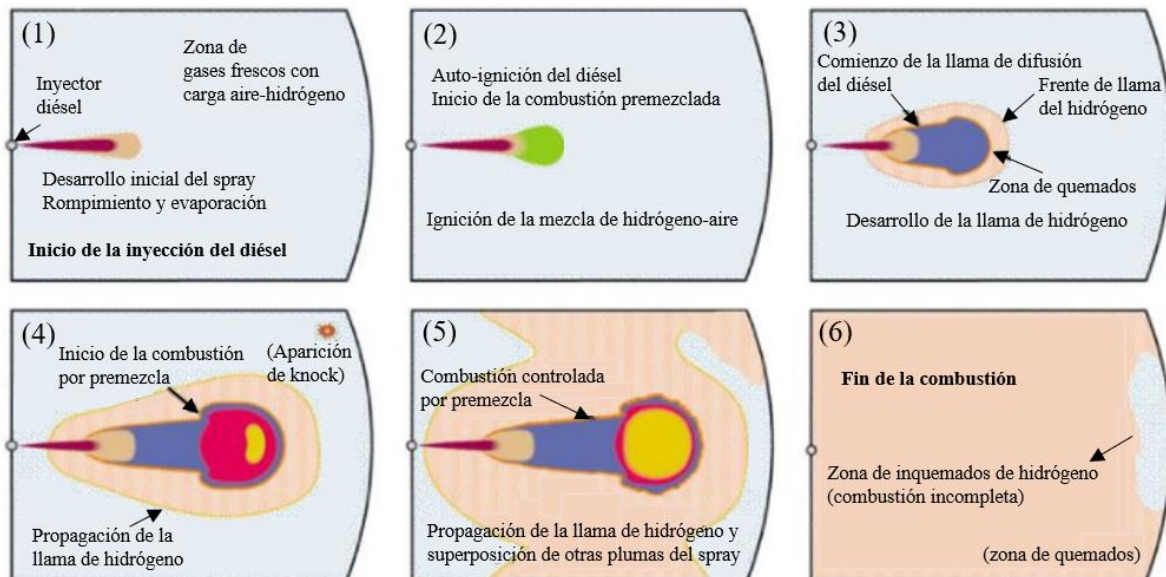


Figura 3. Desarrollo de la combustión dual de hidrógeno-diésel. Fuente: ajustado de [37].

3.3.1. Rendimiento del motor

Altas tasas de hidrógeno tienen un impacto sobre el proceso de la combustión. Dicho impacto se ve reflejado en fuertes aumentos en la tasa de liberación de calor y en la eficiencia térmica al freno del motor [23]. Estudios han mostrado significativos aumentos en la potencia del motor, por ejemplo, uno en el cual la potencia del motor fue incrementada desde 56 kW a 65,63 kW a plena carga [38].

En una revisión realizada sobre la utilización de hidrógeno en MEC bajo el modo de combustión dual diésel-hidrógeno [39], se llegó a la conclusión de que la eficiencia térmica del motor aumenta significativamente a altas y moderadas cargas, mientras que decrece a baja carga. En este estudio también se comentó la importancia de conocer la cantidad adecuada de sustitución en forma de hidrógeno, debido a la posible autoignición de la mezcla de aire-hidrógeno, que se podría traducir en una combustión con *knocking*. Este mismo hecho es comentado en una revisión realizada al efecto de la adición de hidrógeno sobre el rendimiento y las emisiones de los MEC [40], donde se plantea la problemática de no tener un límite de adición de hidrógeno dentro del cilindro. Esta ocurrencia puede generar daños en el motor, ya que la duración de la combustión se reduce cuando se agrega hidrógeno al cilindro, mientras que la presión al interior del cilindro y la tasa de liberación de calor aumentan. Además, se comenta que estos efectos se producen por el incremento de la velocidad de la llama del hidrógeno, lo que derivaría en una mejora del rendimiento del motor.

En la figura 4 se muestra la variación de la eficiencia térmica al freno a plena carga con distintas velocidades del motor y diferentes valores de enriquecimiento de hidrógeno, donde se evidencia que la eficiencia térmica aumenta, para todos los casos en los que se tiene adición de hidrógeno. La razón del aumento en la eficiencia térmica al freno puede entenderse como una mejora de la combustión, bien sea porque es más completa o porque es más uniforme. También se debe al aumento en el poder calorífico inferior (PCI) del hidrógeno respecto al diésel (con base másica). Otra de las razones es que la velocidad de llama del hidrógeno es nueve veces más rápida que la del diésel, por lo que la combustión del diésel en presencia de hidrógeno va a resultar en una combustión más rápida y más completa, contribuyendo de esa forma a la eficiencia térmica del motor. Una de las dudas que se pueden producir al analizar la gráfica es la de ver que la eficiencia térmica al freno en modo dual H 2.5 es mayor que la del modo H 7.5, donde se tiene más adición de hidrógeno. La razón por la cual la estrategia del modo de combustión dual H 7.5 tiene una menor eficiencia térmica al freno es porque al reemplazar aire con hidrógeno, la salida de potencia se ve reducida por unidad de energía introducida en forma de combustible a la cámara de combustión.

3.3.2. Emisiones contaminantes

La finalidad misma de la inclusión del hidrógeno en la matriz energética es cumplir con las normativas que se han venido estableciendo acerca de las emisiones contaminantes producidas por los MCI.

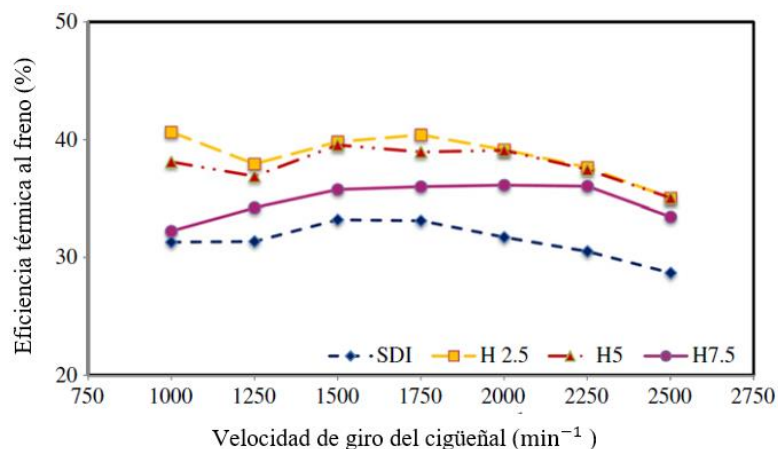


Figura 4. Eficiencia térmica al freno para diferentes valores de enriquecimiento de hidrógeno a diferentes velocidades del motor. (H 2.5 = 2,5% en volumen de hidrógeno) SDI = motor diésel estándar con 100 % de combustible diésel. Fuente: ajustado de [38].

En un estudio experimental de un motor diésel, enfocado en el desempeño del motor y las emisiones contaminantes al llevar el motor a modo dual diésel-hidrógeno, se encontró una reducción considerable en las emisiones de CO_2 [41]. En la figura 5 se muestran las emisiones específicas indicadas de CO_2 al variar el contenido de hidrógeno que ingresa al cilindro y que sustituye el diésel en forma de energía. Con el aumento del hidrógeno, se observa una considerable disminución de emisiones de CO_2 debido al incremento de la razón H/C por el aumento de hidrógeno. Además, la velocidad de propagación de la

llama de hidrógeno es mucho más alta que la del diésel, como anteriormente ya se ha puntualizado.

La adición de hidrógeno resulta en una alta y más uniforme mezcla de combustible, lo cual facilita una mayor eficiencia de la combustión.

Los tres argumentos anteriores posibilitan la reducción de emisiones de CO_2 , resultado que también ha sido encontrado por múltiples investigadores [23], [38], [39], [40].

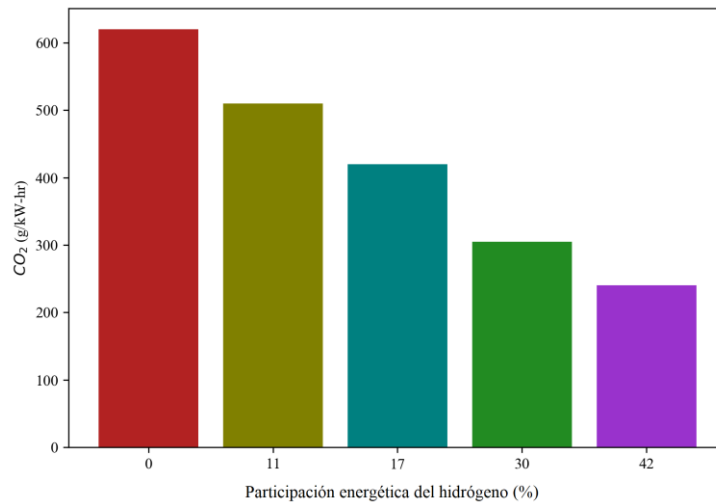


Figura 5. Emisiones de CO_2 vs. porcentaje de enriquecimiento de hidrógeno. Fuente: recreado de [41].

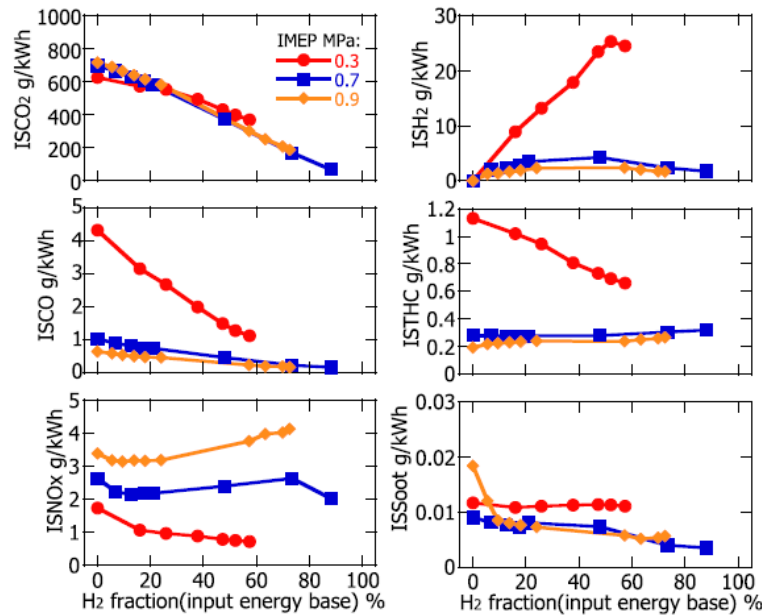


Figura 6. Emisiones gaseosas a la salida del motor bajo una velocidad angular de 1500 RPM y una condición de IMEP de 0,3, 0,7 y 0,9 MPa (parámetro variable: fracción de hidrógeno). Fuente: [42].

En un estudio realizado por [42], se expone un conglomerado de los resultados obtenidos para las emisiones de un motor que opera en modo dual diésel-hidrógeno a diferentes fracciones de adición de hidrógeno, el cual puede ser apreciado en la figura 6. En la figura se muestra una gran reducción de emisiones de CO_2 por el reemplazo de la contribución de energía al interior de la cámara de combustión del diésel en forma de hidrógeno. Todas las emisiones contaminantes que tienen enlaces de carbono son reducidas, sencillamente porque, como se argumenta en una revisión previamente citada [40], el hidrógeno no tiene carbono. El hollín también se ve disminuido con la adición de hidrógeno, por la razón anteriormente mencionada y también porque la adición de hidrógeno mejora la combustión por difusión del diésel, lo que hace que la llama del hidrógeno se extienda rápidamente para lograr reducción del hollín producido.

El nivel de NO_x aumenta con el aumento de la fracción de hidrógeno, pero no considerablemente, ya que, al aumentar el hidrógeno dentro del cilindro, la concentración de oxígeno decrece, promoviendo la combustión a menores temperaturas.

En uno de los primeros estudios realizados para analizar los efectos del uso de hidrógeno como combustible en MEC [43], se evidenció el aumento en las emisiones de NO_x al aumentar el contenido de hidrógeno que ingresa al cilindro, como se puede apreciar en la figura 7. En este estudio se introduce hidrógeno con una proporción del

10 % de la energía total ingresada al interior del cilindro en forma de combustibles. Debido a que con el hidrógeno se alcanzan tasas de liberación de calor superiores a las alcanzadas al usar solamente diésel como combustible, con temperaturas alcanzadas al interior del cilindro que son mucho más altas, este aumento en la temperatura promueve una mayor formación de NO_x , como lo muestran los resultados de varios autores [38], [40], aunque se comenta que esto ocurre a altas y moderadas cargas [39]. El aumento en las emisiones de NO_x debido a las altas temperaturas alcanzadas por la combustión del hidrógeno puede ser controlado con múltiples estrategias.

En una reciente revisión que se hizo sobre el uso del hidrógeno en MCI [44], se propone el uso de EGR a medianas cargas para reducir dichas emisiones. En esta revisión se muestra un estudio en el cual se retarda la inyección del diésel hasta después del punto muerto superior y se alcanza una reducción en las emisiones de NO_x . Esta estrategia fomenta un mayor aprovechamiento del trabajo, ya que la velocidad de combustión del hidrógeno es muy alta, y si no se retarda la inyección del diésel, se dará una rápida combustión antes del punto muerto superior, perdiendo entonces dicho trabajo útil.

Algunos de los métodos que se están utilizando en la actualidad para reducir las emisiones de NO_x en los MEC que operan en modo dual con hidrógeno se presentarán en el siguiente apartado.

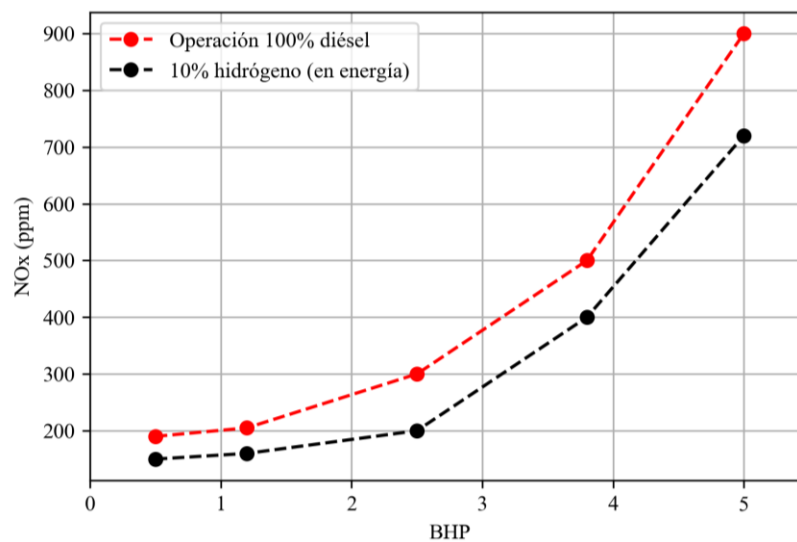


Figura 7. Efecto de introducir hidrógeno en el ducto de admisión de aire del motor sobre las emisiones de NO_x .

Fuente: recreado de [43].

4. Técnicas para mejorar la combustión con hidrógeno en MEC

4.1. EGR

El EGR es uno de los métodos utilizados para controlar las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x). Con este método, una fracción de gases de escape, que se tienen luego de un ciclo de potencia del motor, es introducida nuevamente al ducto de admisión y consecuentemente dentro del cilindro. Al adicionar diluyentes, tales como EGR o nitrógeno, la temperatura máxima que se genera en la combustión disminuye, por lo cual disminuyen también las emisiones de NO_x [45].

Se analizaron los efectos de la tasa de EGR sobre las emisiones en un motor de combustión avanzada de encendido por compresión de carga premezclada (PCCI por sus siglas en inglés) dual diésel-hidrógeno [46]; en la

figura 8 se muestran los resultados de dicho estudio en términos de los NO_x . En las abscisas se tiene fijo el CA50, que varía con los diferentes niveles de dilución debido al EGR, y en las ordenadas se tienen las emisiones de NO_x en ppm, además de tener en la leyenda el tiempo de inyección del diésel que se fijó porque en ese punto se encontró el modo PCCI del motor diésel.

También expone la leyenda los niveles de sustitución del hidrógeno sobre el diésel, donde se pueden apreciar las proporciones de cada una de las mezclas utilizadas con el respectivo rango de EGR. En esta figura es posible apreciar que, para todos los niveles de sustitución de hidrógeno, el aumento de la dilución con EGR disminuyó las emisiones de NO_x . El efecto de la tasa de EGR sobre la combustión ha sido similarmente estudiado y se han encontrado fenómenos adversos sobre la eficiencia del motor al aumentar las tasas de EGR [47].

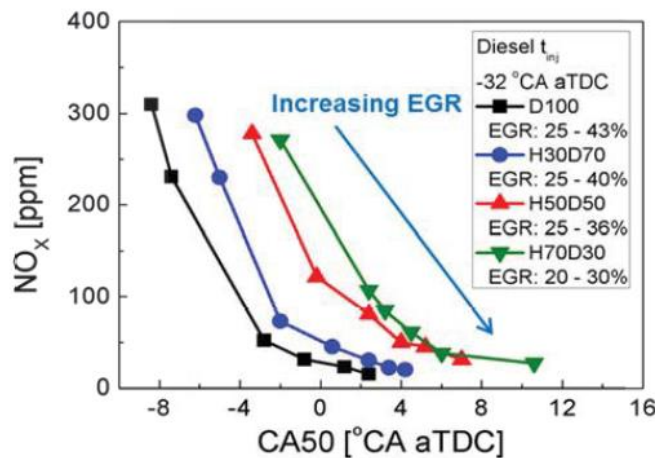


Figura 8. Emisiones de NO_x para cada tasa de enriquecimiento de hidrógeno de acuerdo al CA50. Fuente: [46].

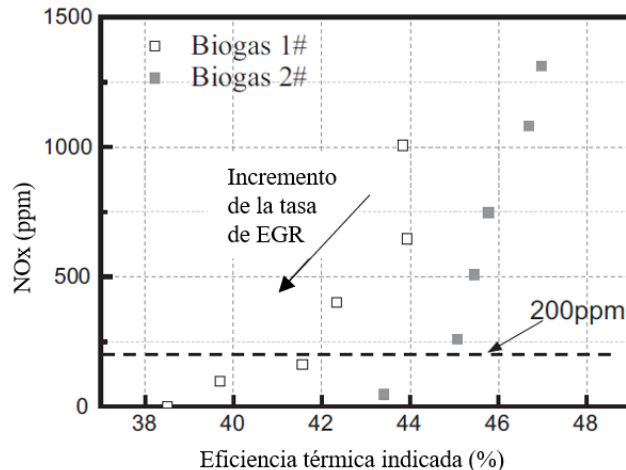


Figura 9. Relación entre la eficiencia térmica indicada y las emisiones de NO_x bajo diferentes tasas de EGR.

Fuente: ajustado de [47].

Como se puede apreciar en la **figura 9**, las emisiones de NO_x disminuyen a medida que se aumenta el EGR, aunque también es posible hacer otro planteamiento, y es que a medida que el EGR aumenta, la eficiencia térmica disminuye, y esto se debe a que, como se comentó previamente, la temperatura al interior del cilindro disminuye cuanto más diluida se encuentra la mezcla por una mayor tasa de EGR, motivo por el cual se tendrá también una combustión de menor calidad, lo cual se traduce en un incremento en las emisiones contaminantes, especialmente los hidrocarburos sin quemar y el CO .

4.2. Tiempos de inyección

El tiempo del ciclo del motor en el cual se inyecta el diésel tiene un importante efecto sobre los MEC. Un retraso en el tiempo de inyección del diésel incrementa el desempeño del motor a altas cargas.

Adelantando el tiempo de inyección, se reduce el consumo específico de combustible (BSFC), las emisiones de CO , HC y humos, y se aumenta la eficiencia térmica al freno (BTE por sus siglas en inglés), la presión pico, la tasa de liberación de calor, la temperatura al interior del cilindro, la formación de NO_x y las emisiones de hollín [48].

4.3. Inyección de agua

La inyección de agua es el medio más efectivo para resolver el conjunto de problemas compuesto de altas emisiones de NO_x y un bajo límite de enriquecimiento

con hidrógeno en el motor dual por los límites de la combustión anormal, donde la inyección de agua provocaría beneficios con una operación libre de *knocking* y retrollama, debido a que el agua enfría las fuentes térmicas de ignición y altera la velocidad de la reacción química [49].

En un estudio realizado [50], se inyectó agua y etanol para analizar cuál era el comportamiento y el desempeño del motor bajo estas condiciones; se encontró que la inyección de agua y etanol extendió la capacidad de energía que pudo ser compartida a través de hidrógeno. Esta energía se llevó más allá del 15 % (porcentaje máximo alcanzado sin inyección de agua dentro del rango seguro de operación libre de *knock*) hasta un máximo de 31 %, lo cual provocó un incremento en la BTE. Esta correlación ya se explicó, donde el incremento en la proporción de hidrógeno al interior del cilindro se traduce en incremento en la BTE. En [49] se ofrece un conglomerado de características que se ven afectadas debido al uso de hidrógeno en MEC y también a la inyección de agua. Estas características pueden ser aumentadas, disminuidas, retrazadas o avanzadas según el aumento de energía compartida en forma de hidrógeno y según el incremento en el consumo específico de agua (SWC), y puede ser apreciado en la **tabla 2**.

La información contenida en esta tabla representa un dilema que surge siempre en la implementación de técnicas que buscan mejorar las condiciones de operación del motor dual diésel-hidrógeno, ya que, al modificar una variable, inmediatamente otra se ve afectada con un efecto adverso.

Tabla 2. Resumen de los efectos de la adición de hidrógeno-agua sobre las características de desempeño, combustión y emisiones del motor dual diésel-hidrógeno testeado, comparado con una operación 100 % diésel

S. No.	Descripción del parámetro	Con una participación creciente en la energía compartida por el hidrógeno	Incrementando el SWC
1	Eficiencia energética	Incrementado	Disminuido
2	Emisiones de HC	Disminuido	Incrementado
3	Emisiones de CO	Disminuido	Incrementado
4	Emisiones de humo	Disminuido	Incrementado
5	Emisiones de NO_x	Incrementado	Disminuido
6	Presión al interior del cilindro y presión pico	Incrementado	Disminuido
7	Temperatura al interior del cilindro y temperatura pico	Incrementado	Disminuido
8	Retardo de la ignición	Disminuido	Incrementado
9	Tasa de liberación de calor	Incrementado	Disminuido
10	Inicio de la combustión	Avanzado	Retardado
11	Duración de la combustión	Disminuido	Incrementado

Fuente: ajustado de [49].

Para solucionar dicho dilema, se debe hacer un *trade-off* con la finalidad de tener simultáneamente un punto de equilibrio en el que todas las variables respondan de forma adecuada al sistema. Esto quiere decir que se debe buscar un punto específico de operación, con ciertas condiciones de sustitución de energía en forma de hidrógeno, con ciertos tiempos de inyección, con ciertos niveles de EGR, con ciertos porcentajes de inyección de agua, etc., donde el resultado en rendimiento y emisiones contaminantes sea tal que satisfaga todas o la mayoría de las obligaciones que surgen en los requerimientos gubernamentales acerca de las emisiones contaminantes, sin perjudicar el rendimiento del motor. Por ejemplo, en algunos casos podría ser posible sacrificar una baja cantidad de emisiones en búsqueda de mejores eficiencias, o viceversa, dicotomía que se tendrá que resolver por quien esté realizando la aplicación, dependiendo del “para qué” de sus necesidades. En estos términos son planteados los estudios multipropósito; estos estudios buscan modelos que predigan un punto de operación que se ajuste a todas las necesidades que se deben satisfacer. A continuación, se hará una breve revisión de dichos estudios multipropósito.

5. Estudios multipropósito como nuevas tendencias del hidrógeno en MCI

Como se pudo apreciar en los apartados anteriores, siempre existe un *trade-off* entre los parámetros de salida en un MEC que opera en modo dual diésel-hidrógeno. Generalmente, cuando se reducen las emisiones, se pierde eficiencia en el motor, y viceversa. Los resultados de la operación en este tipo de motores han establecido claramente que existe un amplio alcance para realizar estudios de optimización donde se traten de conseguir varios objetivos al mismo tiempo. En este camino, el foco de estos estudios de optimización es el resultado en el cual diversos parámetros de entrada pueden estar sintonizados precisa y adecuadamente para obtener el

máximo beneficio de la participación del hidrógeno [51]. Las relaciones entre la eficiencia, el hollín y las emisiones de NO_x , así como tres parámetros de operación como participación de hidrógeno, tasa de EGR y tiempo de inyección, fueron investigados de forma sistemática [52]; se determinaron los parámetros más significativos y cómo influía cada parámetro de entrada en las variables de respuesta. Con estos parámetros fue posible utilizar modelos de regresión y redes neuronales para optimizar la operación del motor dual diésel-hidrógeno. En este estudio se cuantificó que un tiempo de inyección avanzado (29,9 BTDC) con niveles medios de participación de hidrógeno y tasa de EGR (13,2 % -4,1 %) ofrece la mejor relación entre la eficiencia, las emisiones de NO_x y las emisiones de hollín (35-40 %, 1200-2700 ppm y 1-4 FSN, respectivamente).

6. Inclusión del hidrógeno alrededor del mundo

En Alemania, por ejemplo, la empresa Keyou está desarrollando tecnologías para la adaptación de motores diésel para ser operados en modo dual o solamente con hidrógeno. Esta empresa tiene la visión de tener en el mundo un verdadero ciclo de movilidad sostenible. Sostiene que hay muchas razones para combinar los MCI con el hidrógeno, debido a las propiedades del hidrógeno, como el amplio intervalo de inflamabilidad, que permite eficientes operaciones del motor, incluso a bajas cargas y con dosados relativos muy pobres. Ellos tienen precisamente el objetivo de mercado que se menciona en este estudio: articular tecnologías actuales de motores diésel al funcionamiento con hidrógeno [53].

En India y en los países del sur de Asia, así como en Colombia, se plantean fuertes medidas gubernamentales para introducir combustibles alternativos en sus matrices energéticas.

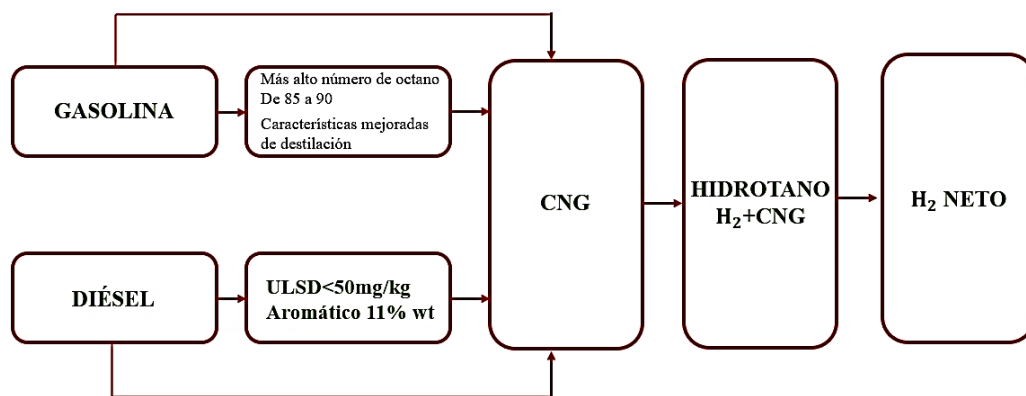


Figura 10. Progreso hacia un sistema completo de hidrógeno. Fuente: ajustado de [56].

Debido a los altos costos de producción y almacenamiento del hidrógeno, estos países se están enfocando más en el desarrollo de celdas de combustibles, debido a las críticas condiciones de operación en modo transitorio de los motores con almacenamiento de hidrógeno [54]. Hace más de 10 años se presentó el camino que debería recorrer la matriz energética de India para lograr cero emisiones en el futuro, donde el hidrógeno tomaría un papel importante. En un *workshop* del Departamento de Transporte y el Departamento de Energía de Estados Unidos, se puntualizó dicho camino (ver figura 10). En la situación colombiana, se espera una transición por todos los combustibles alternativos o más amigables con el medioambiente para tener como paso final una matriz energética compuesta por un 100 % de hidrógeno.

7. Legislación colombiana y los planes que se tienen para la inclusión del hidrógeno en la matriz energética de Colombia

Colombia se comprometió a reducir en un 20 % las emisiones de los 6 gases de efecto invernadero (GEI) reconocidos por el protocolo de Kioto (CO_2 , CH_4 , N_2O , HFC_s , PFC_s , $SF60$), proyectados a 2030.

En los objetivos de la COP21 se posiciona la promoción de la eficiencia energética en todos los sectores de producción, por medio de las energías renovables no convencionales y una gestión más eficiente de la energía [55].

El sector transporte representa el 40 % del consumo final de la energía en Colombia, y es el primero en el uso de energía donde las fuentes principales son la gasolina y el diésel [57]. Para abordar el sector transporte, en el Plan de Acción Indicativo de Eficiencia Energética se promueve, en Colombia, la masificación de combustibles más limpios como el GN. Se espera que el hidrógeno con la tendencia que presenta a nivel mundial, además de la prometedora solución a muchos de los problemas de emisiones, sea incluido muy pronto en las nuevas propuestas de este tipo de tratados. Colombia tiene una meta de ahorro en el consumo de energía en el sector transporte del 5,49 % [14]. Adicionalmente, en Colombia se ha trazado una hoja de ruta del hidrógeno [58], en la cual para 2030, entre otras metas, se tiene el desarrollo de entre 1 y 3 GW por electrólisis y la inclusión de una flota propulsada por hidrógeno de más de 1500 y 1000 vehículos ligeros y pesados, respectivamente.

Finalmente, se hace hincapié en el hecho de que el sector transporte necesita mejorar la eficiencia energética, y se postula al hidrógeno como el gran protagonista para el cambio energético y la mitigación del cambio climático

en los próximos 30 años [12]. Debido a los compromisos adquiridos por Colombia, se debe integrar el hidrógeno a la matriz energética nacional, y así lograr todos los objetivos de emisiones y de ahorro de energía estipulados. Colombia se encuentra en un periodo de transición energética y se espera que el país atraviese un momento en el cual el hidrógeno sea integrado a las fuentes de energía que son utilizadas. Por esta razón, es necesario un conocimiento previo en las técnicas de implementación del hidrógeno en MCI y, específicamente, en MEC.

8. Estudios del hidrógeno en Colombia y cómo acoplarlo a las tecnologías actuales del país

En Colombia se han realizado algunos trabajos en MCI con hidrógeno. Aunque no han sido demasiados, se ha logrado el funcionamiento de motores de encendido por chispa con mezclas de combustibles gaseosos que incluyen el hidrógeno. También se han hecho algunos estudios en motores duales diésel-hidrógeno. En un estudio experimental se logró adicionar hidrógeno a biogás y se obtuvo una mezcla de combustibles gaseosos para funcionar en un motor diésel en modo dual [59]. Se agregó hidrógeno para enriquecer el combustible principal (biogás) y analizar el efecto sobre el rendimiento y las emisiones del motor; se alcanzó una reducción del 30 % en las emisiones de CO . Este mismo autor ha estudiado el hidrógeno y el efecto que tiene la mezcla de este gas con otros combustibles gaseosos en el mejoramiento del desempeño de un motor de encendido por chispa [60], y ha encontrado que una mezcla de combustibles entre biogás y metano tiene la más alta entrega de potencia, cerca de 8 % más alta que la entregada por el modo de operación con 100 % diésel. En este camino, este autor estudió, en el mismo motor de encendido por chispa, el efecto del dosado relativo sobre la combustión con *knocking*, cuando se tenían mezclas de combustibles gaseosos como GN e hidrógeno [61]; concluyó que es posible utilizar, en motores diésel con altas RC, el biogás y el GN, debido a la alta resistencia al *knock* de estos gases.

En un estudio de maestría [62] se establecieron los rangos de operación, donde la combustión del hidrógeno se daba de forma segura en un motor diésel modificado a HCCI; el hidrógeno fue utilizado como combustible principal, además de hacer pruebas con mezclas de *syngas*. Fue posible realizar la combustión del hidrógeno como única fuente de energía, debido a los dosados relativos (-) pobres en los que opera este tipo de motores con tecnologías modernas de combustión avanzada [63]. En el trabajo de maestría [62], el máximo dosado relativo alcanzado fue de $\phi = 0,28$. Este estudio presentó varios

inconvenientes por las complicaciones de la modificación del motor diésel a modo HCCI. Por lo tanto, es importante resaltar que el modo de operación dual que funciona con hidrógeno como segunda fuente de energía debe establecerse principalmente en tecnologías de motores diésel existentes, sin someterlos a mayores modificaciones. Además, Colombia tiene gran potencial para entrar en la economía del hidrógeno en el futuro cercano, ya que es una opción viable en el sentido económico y ambiental. Para complementar, Colombia tiene todo lo requerido para la producción, almacenamiento y transporte de hidrógeno [64].

Cuando se presenta un enriquecimiento muy elevado en el motor (gran cantidad de hidrógeno suministrado), es posible que ocurra una combustión anormal. Esta combustión es un problema en términos de una anormal tasa de aumento en la presión, picos de presión excesivos, combustión muy avanzada, autoignición de la carga premezclada de aire-hidrógeno y una pérdida de trabajo disponible por dicho avance en la combustión [39], sin contar con los daños que se producen en el motor al presentarse estas situaciones. En una de las primeras revisiones realizadas a los motores duales diésel-hidrógeno, se recomienda una gran precaución a la hora del enriquecimiento por la reactividad de la preignición del hidrógeno [39], [40], [65]. Por esta razón, tener una combustión normal es indispensable para lograr una tecnología segura de MEC duales diésel-hidrógeno. En Colombia, ningún estudio ha reportado rangos seguros de operación con las mezclas de diésel-hidrógeno, y, por la esperada inclusión de esta tecnología al mercado colombiano, es necesario hacer dicha distinción.

En la [tabla 3](#) se hace una recopilación literaria de estudios con motores duales diésel-hidrógeno y de los rangos de operación que presentaron combustión normal y no evidenciaron una operación con *knocking*, ruido o anomalías. Cabe destacar que todos los estudios que se presentan en la [tabla 3](#) evidenciaron combustión anormal con tasas de enriquecimiento mayores a las presentadas. Adicionalmente, se presentan los puntos máximos de enriquecimiento que lograron estos estudios sin presencia de las mencionadas anomalías. Complementariamente, se exponen las condiciones de operación del motor y los dosados relativos a los cuales se realizó el enriquecimiento y el nivel de carga al cual estaba sometido el motor. Además, se propone la estrategia utilizada para suministrar el hidrógeno en la cámara de combustión. Existen varias técnicas para el suministro del hidrógeno al cilindro, de las cuales se destacan la carburación, la inyección cronometrada en puerto/ducto de admisión (TMI por sus siglas en inglés), inyección directa (DHI por sus siglas en inglés) y la

inducción continua en el ducto de admisión (CMI por sus siglas en inglés).

Los sistemas de inyección del hidrógeno requieren inyectores activados electrónicamente por las unidades de control electrónico (ECU por sus siglas en inglés), lo que implica desafíos y altos conocimientos en diseño [66]. Por este motivo, se analizan estudios con varios tipos de suministro del combustible principal, pero se aclara que las mejores opciones para Colombia son las que implican acoplar el hidrógeno con tecnologías actuales colombianas, o sea, motores diésel convencionales con tecnologías que requieran mínimas intervenciones en el motor y con menos retos de diseño como la carburación y la inducción continua en puerto. Esto se propone como una primera etapa del hidrógeno en Colombia, que busca una amigable aparición de estas tecnologías, mientras se van conociendo y desarrollando más alternativas tecnológicas en el país.

Respecto a los niveles de carga, se ha reportado que a medida que el nivel de carga aumenta, se reduce la capacidad de enriquecimiento, debido a los límites por *knocking* [39]. De la [tabla 3](#) es posible observar que algunos investigadores lograron una tasa de sustitución de diésel (enriquecimiento) muy alta; esto se debe a que utilizaron estrategias para extender el rango de operación del motor libre de *knocking*. Existen varias técnicas para lograr este objetivo, por ejemplo: uso de diluyentes como el agua, el nitrógeno o el helio o la reducción de la RC [30], [39]. Es posible extender los límites de operación segura del motor con los anteriores métodos expuestos, pero, como se busca el menor grado de modificación en los motores para que sea más factible la incursión del hidrógeno en la matriz energética, es mejor analizar otras investigaciones que hayan obtenido medios o altos grados de sustitución (cerca del 50 %) con las menores modificaciones en el motor.

Por ejemplo, en dos estudios se lograron satisfactorias tasas de enriquecimiento (40 y 30 %) con una estrategia sencilla de suministro del hidrógeno, operando con una RC habitual para los motores diésel [66], [67]. Los niveles de carga en los cuales se operó el motor utilizado en la investigación también fueron altos, por lo cual se sabía que el motor funcionaría de forma segura sin *knock*, bajo todos los puntos de operación, con un nivel de carga menor al reportado en la [tabla 3](#). Esto sugiere que los puntos de operación obtenidos por estos autores pueden ser una importante referencia para la inclusión de esta tecnología en Colombia.

Tabla 3. Resumen literario de los máximos niveles de enriquecimiento alcanzados en motores duales diésel-hidrógeno sin la ocurrencia de combustión anormal (knock, picos de presión, ruido, etc.)

Estudio	Máxima tasa de enriquecimiento alcanzado sin combustión anormal	Estrategia utilizada para el suministro del hidrógeno	Condiciones de operación	Dosado Relativo (ϕ)	Nivel de carga (%)	Tipo de motor
[30]	90 % hidrógeno (en energía)	Inducción continua en el ducto de admisión	RC = 16:1, 1000 RPM	0,3 (sin dilución) 0,8 (con dilución)	-	4-tiempos, cilindro único, refrigerado por agua
[66]	40 % hidrógeno (en vol)	Inducción continua en el ducto de admisión	RC = 17,5:1, 1500 RPM	-	80	Ashok Leyland ALU WO4CT Turbocargado, intercooler, Gen-Set
[67]	30 % hidrógeno (en vol)	Inducción continua en el ducto de admisión	RC = 16,5:1, 1500 RPM	0,4	100	4-tiempos, refrigerado por agua, cilindro diésel único estacionario potencia entregada por el motor de 3,78 kW
[68]	19 % hidrógeno-69 % NG (en energía)	Inducción continua en el ducto de admisión	RC = 17:1, 1500 RPM	0,55	IMEP = 0,7 MPa	1CA90 Andoria 4 tiempos encendido por compresión
[69]	40 % hidrógeno (en vol)	La misma utilizada por Lata <i>et al.</i>	RC = 17,5:1, 1000-4000 RPM	15-20 (A/F en masa)	100	Modelo validado bajo los resultados obtenidos por Lata <i>et al.</i> haciendo uso del mismo motor
[41]	42 % hidrógeno (en energía)	Inyección en puerto de admisión	RC=17,5:1, 1500 RPM	-	100	KirloskarTV1-cilindro único, 4-tiempos, refrigerado por agua
[42]	50 % hidrógeno (en energía)	Inyección en puerto de admisión	RC = 17,5:1, 1500 RPM	0,35	100	Único cilindro
[62]	100 % hidrógeno (en vol)	Inducción continua en el ducto de admisión	RC = 15,6:1, 1800 RPM	0,21-0,28	-	Lombardini modificado a HCCI

En otro estudio se logró un impactante enriquecimiento del 90 % en energía [30]. Estos valores se lograron gracias a una novedosa técnica para extender los límites del *knocking*, que es la inyección de diluyentes para mitigar la carga térmica que produce la liberación de calor en la combustión del hidrógeno. En dos estudios [41], [42], se alcanzaron altos niveles de enriquecimiento debido a las técnicas de suministro del hidrógeno (inyección en puerto de admisión). Este método de suministro hace que el proceso de combustión sea mucho más controlado, y se destaca que en algunas investigaciones se presentaron distintos puntos de

operación a los mostrados en la tabla 3, con mejores cualidades en el proceso, bien sea en términos de desempeño del motor o de emisiones contaminantes. Para ver estos puntos de operación y para más detalles geométricos del motor o de montajes experimentales, dirigirse a las referencias de los estudios presentados.

9. Conclusiones

Para cumplir con las normativas presentes a nivel mundial en términos de emisiones, es necesaria la incorporación de nuevas tecnologías alternativas en toda

la matriz energética colombiana, especialmente en el sector transporte, que representa una gran porción de la totalidad del consumo energético de Colombia. Buscando lograr este objetivo, se necesita un mayor interés sobre novedosas tecnologías en el país.

Es necesario que dentro de los planes energéticos colombianos sea acoplado el hidrógeno como fuente de energía y como combustible para los MCI. Se destacan a continuación las características más importantes de los motores duales diésel-hidrógeno, en términos del desempeño, emisiones contaminantes, alternativas para una mejor combustión, límites de enriquecimiento del motor y una guía a seguir para que sea posible el acople de esta tecnología a la matriz energética del país.

Pasar de modo de combustión con 100 % combustible diésel a modo dual diésel-hidrógeno mejora la eficiencia del motor. Este aumento en el rendimiento del motor se debe principalmente a las características del hidrógeno, ya que este combustible mejora la combustión debido a su alta velocidad de llama, lo que provoca una alta tasa de liberación de calor, y a la uniformidad en la mezcla que logra con el aire en el proceso de inducción. La eficiencia térmica y la potencia a la salida del motor se ven aumentadas con la adición de hidrógeno, debido a que el PCI (con base másica) de este combustible es mucho mayor al del diésel. Sin embargo, cabe resaltar que hay un punto máximo de enriquecimiento convencional por ducto, ya que el enriquecimiento disminuye la cantidad de aire que puede ingresar al cilindro, teniendo así un punto de inflexión en el cual más cantidad de hidrógeno fomenta la combustión incompleta por falta de oxígeno en la reacción de combustión.

Los motores duales diésel-hidrógeno consiguen disminuir significativamente las emisiones de CO_x y hollín respecto al motor diésel convencional. Esto se debe a que el hidrógeno no posee cadenas carbonadas, como sí las posee el diésel. La combustión del hidrógeno reduce las emisiones contaminantes, ya que el producto de este proceso de combustión es agua. Sin embargo, las emisiones de NO_x se ven aumentadas con el aumento de enriquecimiento con hidrógeno por las altas tasas de liberación de calor producidas por el hidrógeno, donde se evidencian altas temperaturas al interior del cilindro, lo cual promueve la formación de NO_x .

Existen varias técnicas para mejorar la combustión con hidrógeno en los MEC. Dentro de estas técnicas se destaca el EGR que contribuye a la reducción de NO_x , la modificación del tiempo de inyección para tener una combustión más centrada y controlada y la inyección de agua para aumentar el límite de enriquecimiento y reducir

los NO_x debido al enfriamiento de las fuentes térmicas de ignición. Finalmente, los estudios multipropósito se realizan con la meta de conseguir puntos de operación con resultados específicos (cierta cantidad de emisiones contaminantes y cierto desempeño del motor), lo cual da como resultado unos puntos de operación especiales que satisfacen dichas condiciones deseadas.

El motor dual diésel-hidrógeno tiene una tasa de liberación de calor muy alta, por lo cual puede producirse una combustión anormal por picos de presión excesivos, combustión muy avanzada, ruido o *knocking*. Cuanto mayor sea el enriquecimiento con hidrógeno, mayor es la probabilidad de que ocurran estas irregularidades en la combustión. Por este motivo, es necesario extender el rango de operación seguro del motor, ya que la combustión anormal puede provocar daños en el mismo. Varios autores han reportado este mismo hecho, y recomiendan ciertos límites de enriquecimiento en el motor dual. Como punto de referencia, se recomienda tener como base los estudios que consiguieron rangos de operación seguros, a altas cargas, con un nivel de enriquecimiento intermedio [66], [67], y así se promovería una mejoría en las características del motor, mientras se conserva su seguridad.

Para una primera etapa del uso de hidrógeno en MCI en Colombia, es necesario que se acople este combustible a los motores diésel convencionales, de manera que su modo de operación sea dual diésel-hidrógeno. Además, se recomienda que el motor diésel convencional sea modificado levemente, con las mínimas intervenciones, para que sea más afable su incorporación en el sector transporte de la matriz energética del país; para ello, se sugiere que el tipo de técnica para suministrar el hidrógeno en el cilindro sea la de carburación o la inducción continua en el ducto de admisión, ya que estas técnicas requieren ordinarias capacidades de diseño.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Comité Técnico del Centro de Investigaciones Ambientales y de Ingeniería – CIA, en su aval CTCIA125-21 del Fondo de Apoyo a Trabajos de Pregrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia, por aportar el apoyo económico suficiente para llevar a cabo el trabajo de grado del autor. Además, los autores agradecen al Programa Colombia Científica como fuente de financiación, en el marco de las convocatorias Ecosistema Científico, contrato n.º FP44842- 218-2018. Finalmente, los autores agradecen a Sebastián Heredia Quintana, por sus recomendaciones en la estructuración de este trabajo.

Referencias

- [1] A. Boretti, “The future of the internal combustion engine after diesel-gate,” *SAE Technical Paper*, Tech. Rep., 2017.
- [2] S. O. Akansu, Z. Dulger, N. Kahraman, T. N. Veziroglu, “Internal combustion engines fueled by natural gas—hydrogen mixtures,” *International journal of hydrogen energy*, vol. 29, no. 14, pp. 1527-1539, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.01.018>
- [3] S. Verhelst, T. Wallner, “Hydrogenfueled internal combustion engines,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 35, no. 6, pp. 490-527, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2009.08.001>
- [4] IRENA, “Hydrogen: A renewable energy perspective—report prepared for the 2nd hydrogen energy ministerial meeting in tokyo,” 2019, [Online]. Available: <https://www.irena.org/publications/2019/Sep/Hydrogen-A-renewable-energy-perspective>
- [5] V. Smil, “The two prime movers of globalization: history and impact of diesel engines and gas turbines,” *Journal of Global History*, vol. 2, no. 3, p. 373, 2007.
- [6] A. C. Lloyd, T. A. Cackette, “Diesel engines: environmental impact and control,” *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 51, no. 6, pp. 809-847, 2001, doi: <https://doi.org/10.1080/10473289.2001.10464315>
- [7] T. V. Johnson, “Review of diesel emissions and control,” *International Journal of Engine Research*, vol. 10, no. 5, pp. 275-285, 2009, doi: <https://doi.org/10.4271/2010-01-0301>
- [8] T. Johnson, “Diesel emissions in review,” *SAE International Journal of Engines*, vol. 4, no. 1, pp. 143-157, 2011, doi: <https://doi.org/10.4271/2011-01-0304>
- [9] H. Nazir, N. Muthuswamy, C. Louis, S. Jose, J. Prakash, M. E. Buan, C. Flox, S. Chavan, X. Shi, P. Kauranen *et al.*, “Is the h2 economy realizable in the foreseeable future? part iii: H2 usage technologies, applications, and challenges and opportunities,” *International journal of hydrogen energy*, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.256>
- [10] R. Kavtaradze, T. Natriashvili, S. Gladyshev, “Hydrogen-diesel engine: Problems and prospects of improving the working process,” *SAE Technical Paper, Tech. Rep.*, 2019, doi: <https://doi.org/10.4271/2019-01-0541>
- [11] Y. Karagöz, T. Sandalcı, L. Yüksek, A. S. Dalkılıç, S. Wongwises, “Effect of hydrogen– diesel dual-fuel usage on performance, emissions and diesel combustion in diesel engines,” *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 8, no. 8, 2016, doi: <https://doi.org/10.1177/1687814016664458>
- [12] Minciencias, “Plan energético nacional 2020-2050: la transformación energética que habilita el desarrollo sostenible,” Bogotá D. C., 2021.
- [13] M. Ball, M. Wietschel, “The future of hydrogen—opportunities and challenges,” *International journal of hydrogen energy*, vol. 34, no. 2, pp. 615-627, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.11.014>
- [14] G. Arce, “Plan de acción indicativo de eficiencia energética 2017-2022,” Una Realidad y Oportunidad para Colombia. Ministerio de Minas y Energía. Unidad de Planeación Minero Energética UPME, 2017.
- [15] J. E. A. Gómez, F. E. S. Vargas, V. S. Leal, “Análisis exploratorio de investigaciones sobre los motores de combustión interna que trabajan con biogás,” *Tecnura*, vol. 18, no. 39, pp. 152-164, 2014, doi: <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.1.a.11>
- [16] S. Verhelst, J. Demuyne, R. Sierens, R. Scarcelli, N. S. Matthias, T. Wallner, “Update on the progress of hydrogen-fueled internal combustion engines,” *Renewable hydrogen technologies*, pp. 381-400, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-56352-1.00016-7>
- [17] B. Sahoo, N. Sahoo, U. Saha, “Effect of engine parameters and type of gaseous fuel on the performance of dual-fuel gas diesel engines—a critical review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 6-7, pp. 1151-1184, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.003>
- [18] C. Strambo, A. C. González Espinosa, “Extraction and development: fossil fuel production narratives and counternarratives in Colombia,” *Climate Policy*, vol. 20, no. 8, pp. 931-948, 2020, doi: <https://doi.org/10.1080/14693062.2020.1719810>

- [19] A. R. Montenegro, M. Sanjuan, M. Carmona, "Energy Storage Development using Hydrogen and its Potential Application in Colombia", *IJEEP*, vol. 9, no. 6, pp. 254-268, 2019, doi: <https://doi.org/10.32479/ijeep.8294>
- [20] E. de Jesús Henao, C. R. Piedrahita, J. A. Gómez, "Revisión de la investigación en motores de combustión interna en Colombia," *Ingenio Magno*, vol. 9, no. 2, pp. 74-93, 2019.
- [21] G. F. G. Sánchez, J. L. C. Velasco, A. C. Guerrero, "Modelado de la combustión en motores diésel: revisión del estado del arte," *Revista ION*, vol. 26, no. 1, pp. 41-54, 2013.
- [22] S. Karthic, P. Pradeep, S. V. Kumar *et al.*, "Assessment of hydrogen-based dual fuel engine on extending knock limiting combustion," *Fuel*, vol. 260, p. 116342, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116342>
- [23] P. Dimitriou, T. Tsujimura, "A review of hydrogen as a compression ignition engine fuel," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 38, pp. 24 470-24 486, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.232>
- [24] D. Duque, O. Medina, M. Saade Hazin, "Infraestructura logística para una mejor gobernanza de la cadena del carbón en Colombia," Naciones Unidas, 2017.
- [25] C. A. Mesa Salamanca, A. Cancino Cadena, J. A. Páez Méndez, G. Meneses Montes, J. Cuéllar Escobar, F. Vásquez Ochoa, "Desarrollo sostenible de la minería de socavón del carbón en Colombia," *Documentos de Investigación*, vol. 20, 2017.
- [26] Z.-y. Sun, F.-S. Liu, X.-h. Liu, B.-g. Sun, D.-W. Sun, "Research and development of hydrogen fuelled engines in china," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 1, pp. 664-681, 2012.
- [27] C. White, R. Steeper, A. Lutz, "The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review," *International journal of hydrogen energy*, vol. 31, no. 10, pp. 1292-1305, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.12.001>
- [28] W. Lubitz, W. Tumas, "Hydrogen: an overview," *Chemical reviews*, vol. 107, no. 10, pp. 3900-3903, 2007, doi: <https://doi.org/10.1021/cr050200z>
- [29] A. G. Young, A. W. Costall, D. Coren, J. W. Turner, "The effect of crankshaft phasing and port timing asymmetry on opposed-piston engine thermal efficiency," *Energies*, vol. 14, no. 20, p. 6696, 2021.
- [30] M. M. Roy, E. Tomita, N. Kawahara, Y. Harada, A. Sakane, "An experimental investigation on engine performance and emissions of a supercharged h2-diesel dual-fuel engine," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 2, pp. 844-853, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.11.009>
- [31] P. Stålhammar, Demonstration och utvärdering av dual-fuel-tekniken. Svenskt gastekniskt center, 2011.
- [32] C. Bauer and T. Forest, "Effect of hydrogen addition on the performance of methane-fueled vehicles. part i: effect on si engine performance," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 26, no. 1, pp. 55-70, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(00\)00067-7](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(00)00067-7)
- [33] A. I. Jabbr, W. S. Vaz, H. A. Khairallah, U. O. Koylu, "Multi-objective optimization of operating parameters for hydrogen-fueled sparkignition engines," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 40, pp. 18 291-18 299, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.016>
- [34] S. Premkattikumar, "Enhancing diesel engine combustion using hydrogen enriched fuels– a review," *International Journal of ChemTech Research*, vol. 9, no. 1, pp. 1-6, 2016.
- [35] G. Decan, B. De Buyzerie, T. Lucchini, G. D'Errico, S. Verhelst, "Cold flow simulation of a dual-fuel engine for diesel natural gas and diesel-methanol fueling conditions," *SAE Technical Paper, Tech. Rep.*, 2021, doi: <https://doi.org/10.4271/2021-01-0411>
- [36] J. E. Dec, "A conceptual model of dl diesel combustion based on laser-sheet imaging," *SAE transactions*, pp. 1319-1348, 1997.
- [37] E. Monemian, A. Cairns, "Hydrogen fumigation on hd diesel engine: An experimental and numerical study," *Diesel and Gasoline Engines*, p. 65, 2020, doi: <https://doi.org/10.5772/intechopen.89425>

- [38] H. Köse, M. Ciniviz, "An experimental investigation of effect on diesel engine performance and exhaust emissions of addition at dual fuel mode of hydrogen," *Fuel processing technology*, vol. 114, pp. 26-34, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2013.03.023>
- [39] V. Chintala, K. Subramanian, "A comprehensive review on utilization of hydrogen in a compression ignition engine under dual fuel mode," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, pp. 472-491, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.247>
- [40] H. A. Alrazen, A. A. Talib, R. Adnan, K. Ahmad, "A review of the effect of hydrogen addition on the performance and emissions of the compression-ignition engine," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 54, pp. 785-796, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.088>
- [41] M. Deb, G. Sastry, P. Bose, R. Banerjee, "An experimental study on combustion, performance and emission analysis of a single cylinder, 4stroke di-diesel engine using hydrogen in dual fuel mode of operation," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 27, pp. 8586-8598, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.04.125>
- [42] T. Tsujimura, Y. Suzuki, "The utilization of hydrogen in hydrogen/diesel dual fuel engine," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 19, pp. 14 019-14 029, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.152>
- [43] B. H. Rao, K. Shrivastava, H. Bhakta, "Hydrogen for dual fuel engine operation," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 8, no. 5, pp. 381-384, 1983.
- [44] D. Akal, S. Öztuna, M. K. Büyükakın, "A review of hydrogen usage in internal combustion engines (gasoline-lpg-diesel) from combustion performance aspect," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 60, pp. 35 257-35 268, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.02.001>
- [45] J. B. Heywood, *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill Education, 2018.
- [46] H. Park, J. Kim, C. Bae, "Effects of hydrogen ratio and EGR on combustion and emissions in a hydrogen/diesel dual-fuel PCCI engine," *SAE Technical Paper, Tech. Rep.*, 2015, doi: <https://doi.org/10.4271/2015-01-1815>
- [47] X. Shan, Y. Qian, L. Zhu, X. Lu, "Effects of egr rate and hydrogen/carbon monoxide ratio on combustion and emission characteristics of biogas/diesel dual fuel combustion engine," *Fuel*, vol. 181, pp. 1050-1057, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.04.132>
- [48] G. Tripathi, P. Sharma, A. Dhar, A. Sadiki, "Computational investigation of diesel injection strategies in hydrogen-diesel dual fuel engine," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 36, p. 100543, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100543>
- [49] V. Chintala, K. Subramanian, "Hydrogen energy share improvement along with nox (oxides of nitrogen) emission reduction in a hydrogen dual-fuel compression ignition engine using water injection," *Energy conversion and management*, vol. 83, pp. 249-259, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.075>
- [50] M. S. Kumar, S. Karthic, P. Pradeep, "Investigations on the influence of ethanol and water injection techniques on engine's behavior of a hydrogen-biofuel based dual fuel engine," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 45, pp. 21 090-21 101, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.09.145>
- [51] M. Deb, R. Banerjee, A. Majumder, G. Sastry, "Multi objective optimization of performance parameters of a single cylinder diesel engine with hydrogen as a dual fuel using pareto-based genetic algorithm," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 15, pp. 8063-8077, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.03.045>
- [52] A. I. Jabbr, H. Gaja, U. O. Koylu, "Multiobjective optimization of operating parameters for a h2/diesel dual-fuel compressionignition engine," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 38, pp. 19 965-19 975, 2020.
- [53] Keyou, 2021. [Online]. Available: <https://www.keyou.de/>
- [54] V. M. Medisetty, R. Kumar, M. H. Ahmadi, D. V. N. Vo, A. Ochoa, R. Solanki, "Overview on the current status of hydrogen energy research and development in India," *Chemical Engineering & Technology*, vol. 43, no. 4, pp. 613-624, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.071>

- [55] C. García Arbeláez, X. Barrera, R. Gómez, R. Suárez Castaño, “El abc de los compromisos de Colombia para la COP 21,” 2015. [Online]. Available: <https://www.wwf.org.co/?248415/El-ABC-de-los-compromisos-de-Colombia-para-la-COP-21>
- [56] Hydrogen Vehicles and Refueling Infrastructure in India, Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office, 2009. [Online]. Available: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f10/cn_g_h2_workshop_11_das.pdf
- [57] M. Antonio, C. Camargo, “Plan Energético Nacional Colombia: ideario energético 2050,” Bogotá, 2015.
- [58] Minenergía, “Hoja de ruta del hidrógeno en Colombia,” 2021.
- [59] J. P. Gómez-Montoya, K. P. Cacua-Madero, L. Iral-Galeano, A. A. Amell-Arrieta, “Effect of biogas enriched with hydrogen on the operation and performance of diesel-biogas dualengine,” *CT&F-Ciencia, Tecnología y Futuro*, vol. 5, no. 2, pp. 61-71, 2013.
- [60] J. P. Gómez Montoya, A. Amella, D. B. Olsen, G. Amador Díaz, “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, no. 46, pp. 21 592-21 602, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.009>
- [61] J. P. Gómez Montoya, G. J. Amador Díaz, A. A. Amell Arrieta, “Effect of equivalence ratio on knocking tendency in spark ignition engines fueled with fuel blends of biogas, natural gas, propane and hydrogen,” *International journal of hydrogen energy*, vol. 43, no. 51, pp. 23 041-23 049, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.117>
- [62] A. D. Morales Rojas, “Estudio numérico y experimental de la combustión hcci del hidrógeno y el gas de síntesis en un motor estacionario para la generación de energía eléctrica a condiciones de Medellín,” 2020.
- [63] J. C. Prince, M. Díaz, G. Ovando, A. Rodríguez, “Análisis de motores tipo HCCI y su modelado con biocombustibles,” *Memorias del XXIV Congreso Internacional Anual de la SOMIM*, 2018.
- [64] N. D. Forero, D. A. Barrios, J. D. Forero *et al.*, “Overview of potential use of hydroxyl and hydrogen as an alternative fuel in Colombia,” *International Journal of Energy Economics and Policy*, vol. 9, no. 6, pp. 525-534, 2019, doi: <https://doi.org/10.32479/ijeep.8395>
- [65] Z. Liu, G. Karim, “Knock characteristics of dual-fuel engines fuelled with hydrogen fuel,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 20, no. 11, pp. 919-924, 1995.
- [66] D. Lata, A. Misra, S. Medhekar, “Effect of hydrogen and lpg addition on the efficiency and emissions of a dual fuel diesel engine,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 7, pp. 6084–6096, 2012.
- [67] N. Saravanan, G. Nagarajan, “An experimental investigation of hydrogen-enriched air induction in a diesel engine system,” *International journal of hydrogen energy*, vol. 33, no. 6, pp. 1769–1775, 2008.
- [68] W. Tutak, A. Jamrozik, K. Grab-Rogaliński, “Effect of natural gas enrichment with hydrogen on combustion process and emission characteristic of a dual fuel diesel engine,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 15, pp. 9088–9097, 2020.
- [69] O. H. Ghazal, “Performance and combustion characteristic of ci engine fueled with hydrogen enriched diesel,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 35, pp. 15 469–15 476, 2013.