



EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA ADICIÓN DE PUNTOS CUÁNTICOS DE CARBONO EN COMBUSTIBLE DIÉSEL EN PARÁMETROS DE COMBUSTIÓN DUAL CON GAS NATURAL

Brayan Branz Martínez Villa

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA, DEPARTAMENTO DE MECÁNICA
MEDELLÍN - COLOMBIA**

2025

Tradición - Transformación - Innovación



SC 7134-1



Resolución 012512 del MEN. 29 de junio de 2022 - 6 años.
Calle 73 No. 73A - 226, Vía El Volador
Apartado aéreo: 6564 / Línea única de atención: 604 448 0520 / Medellín - Colombia



Alcaldía de Medellín
Distrito de
Ciencia, Tecnología e Innovación



EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA ADICIÓN DE PUNTOS CUÁNTICOS DE CARBONO EN COMBUSTIBLE DIÉSEL EN PARÁMETROS DE COMBUSTIÓN DUAL CON GAS NATURAL

Brayan Branz Martínez Villa

Trabajo de grado en modalidad investigación, presentado como requisito parcial para optar
al título de:

Ingeniero Mecánico

Director (a):

MEng. Anderson Gallego Montoya

Línea de Investigación:

Energía

Grupo de Investigación:

Semillero S-GIEN

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA, DEPARTAMENTO DE MECÁNICA
MEDELLÍN - COLOMBIA

2025

Tradición - Transformación - Innovación



SC 7134-1



Resolución 012512 del MEN. 29 de junio de 2022 - 6 años.
Calle 73 No. 73A - 226, Vía El Volador
Apartado aéreo: 6564 / Línea única de atención: 604 448 0520 / Medellín - Colombia



Alcaldía de Medellín
Distrito de
Ciencia, Tecnología e Innovación



Dedicatoria

Este trabajo de grado representa mucho más que el cumplimiento de un requisito académico. Es el reflejo de años de esfuerzo, aprendizajes, desafíos superados y crecimiento personal. A través de estas páginas se resume no solo un proyecto, sino también un sueño construido con dedicación y perseverancia. Con gratitud en el corazón, presento este trabajo como testimonio de lo que se puede lograr cuando se mezcla el conocimiento con la pasión y la constancia.

"La ciencia no solo se aprende, también se construye
paso a paso."

Tradición - Transformación - Innovación



SC 7134-1



Resolución 012512 del MEN. 29 de junio de 2022 - 6 años.
Calle 73 No. 73A - 226, Vía El Volador
Apartado aéreo: 6564 / Línea única de atención: 604 448 0520 / Medellín - Colombia



Alcaldía de Medellín
Distrito de
Ciencia, Tecnología e Innovación



Agradecimientos

Dedico este trabajo de grado, ante todo, a Dios, por darme la fuerza, la sabiduría y la paciencia necesarias para no rendirme, incluso en los momentos más difíciles.

A mi familia, por su apoyo incondicional, sus palabras de ánimo y por ser siempre mi mayor motivación. En especial a mi madre, tías, hermanos, a Yordanis, a la hermosa Taliana, también al niño lindo de Emiliano, a la bonita de Natalia y al profesor Anderson Gallego, quienes, con esfuerzo, amor, sacrificio y motivación me dieron la oportunidad de alcanzar este logro. Sin ustedes, nada de esto hubiera sido posible.

A mis amigos verdaderos, quienes estuvieron a mi lado en este camino lleno de aprendizajes, y compartieron conmigo tanto los retos como las alegrías.

Finalmente, me dedico este logro a mí mismo, por no abandonar mis metas, por confiar en mis capacidades y por demostrarme que, con disciplina y perseverancia, todo es posible.

Tradición - Transformación - Innovación



SC 7134-1



Resolución 012512 del MEN. 29 de junio de 2022 - 6 años.

Calle 73 No. 73A - 226, Vía El Volador

Apartado aéreo: 6564 / Línea única de atención: 604 448 0520 / Medellín - Colombia

**Alcaldía de Medellín**
Distrito de
Ciencia, Tecnología e Innovación

Resumen

Dada la creciente preocupación por el aumento significativo de la demanda energética, las emisiones contaminantes de los motores diésel, el uso de combustibles fósiles y la liberación de óxidos de nitrógeno (NO_x) y material particulado (PM) a la atmósfera —que plantean graves problemas ambientales y de salud pública a nivel mundial—, este estudio explora el uso de combustibles alternativos y sistemas de combustible dual con gas natural, que han demostrado ser una solución atractiva para la combustión de motores diésel. Sin embargo, los avances recientes en el diseño de motores y la formulación de combustibles sugieren que los efectos multicomponente serán cada vez más importantes en el uso de combustibles líquidos. Los procesos de combustión en los motores se controlarán más estrictamente para mejorar aún más la eficiencia y reducir las emisiones.

En comparación con el modo diésel convencional, la aplicación del modo de combustible dual reduce significativamente las emisiones de NO_x, dióxido de carbono (CO₂) y PM. Sin embargo, las emisiones de hidrocarburos (HC) y monóxido de carbono (CO) pueden aumentar varias veces, o incluso más de 100 veces, en comparación con la combustión diésel normal. También parece existir una relación de compensación entre las emisiones de NO_x y HC en la operación de combustible dual.

El objetivo de este trabajo es identificar el potencial del uso del modo de combustible dual gas natural/diésel en motores diésel mediante la adición de puntos cuánticos de carbono, con el fin de lograr resultados positivos en el retardo de encendido, la velocidad de combustión y la temperatura. Esto se investiga mediante la combustión de una sola gota utilizando el método óptico Shadowgraph en una atmósfera reactiva con gas natural.

Palabras clave: Gas natural, aditivos, modo de combustible dual, método óptico de Shadowgraph.

Abstract

Given the growing concern about the significant increase in energy demand, the pollutant emissions from diesel engines, the use of fossil-based fuels, and the release of nitrogen oxides (NO_x) and particulate matter (PM) into the atmosphere—which pose serious global environmental and public health issues—this study explores the use of alternative fuels and dual-fuel systems with natural gas, which have proven to be an attractive solution in diesel engine combustion.

However, recent advances in engine design and fuel formulation suggest that multicomponent effects will become increasingly important in the use of liquid fuels. Combustion processes in engines will be more tightly controlled to further improve efficiency and reduce emissions.

Compared to conventional diesel mode, applying the dual-fuel mode significantly reduces NO_x, carbon dioxide (CO₂), and PM emissions. However, hydrocarbon (HC) and carbon monoxide (CO) emissions can increase several times, or even more than 100 times, compared to normal diesel combustion. There also appears to be a trade-off relationship between NO_x and HC emissions in dual-fuel operation.

The objective of this work is to identify the potential of using the natural gas/diesel dual-fuel mode in diesel engines by adding carbon quantum dots, aiming to achieve positive results in ignition delay, combustion speed, and temperature. This is investigated through single droplet combustion using the optical Shadowgraph method in a reactive atmosphere with natural gas.

Keywords: Natural gas, additives, dual-fuel mode, Shadowgraph optical method.

	Pág.
Contenido	
Introducción	1
Objetivos	3
Objetivo general	3
Objetivos específicos	3
1. Marco teórico.....	4
1.1 La ley del d^2 : fórmula base para entender la combustión de gotas	5
1.1.1 Área normalizada de la gota	5
1.1.2 Método óptico Shadowgraph	7
1.1.3 Butanol.....	8
1.1.4 Puntos cuánticos de carbono.....	9
1.1.5 Procesos transitorios: el calentamiento de la gota y aplicaciones prácticas del estudio de gotas.....	10
2. Metodología	12
2.1 Técnica óptica de Shadowgraph	12
2.2 Procesos de combustión de gotas.....	13
2.3 Preparación y dispersión de nanomateriales en combustibles	14
2.4 Efecto del uso de gas natural y adición de nanomateriales a diésel comercial... ..	18
2.5 Área de la gota	19
3. Análisis de resultados	21
Tiempo de Retardo de Ignición (Ignition Delay).....	22
4. Análisis de resultados para la mezcla con gas natural.....	25

Tiempo de Retardo de Ignición con gas natural (Ignition Delay)	27
5. Conclusiones y recomendaciones	29
Bibliografía	31

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1 Comportamiento del área de una gota de combustible en proceso de quemado	6
Ilustración 2 Relación A/A_0	6
Ilustración 3 Método Shadowgraph.	8
Ilustración 4 Diagrama experimental de la Técnica de Shadowgraph.....	12
Ilustración 6 Diagrama del montaje experimental.....	13
Ilustración 7 Combustión de gota posicionada	14
Ilustración 8 Preparación y concentración del combustible.....	15
Ilustración 9 Dispersión de (CQDs) y + n- butanol.....	15
Ilustración 10 Dispersión de puntos cuánticos de carbono en concentración de 50mg/L.....	15
Ilustración 11 Cámara de combustión para pruebas	16
Ilustración 12 Visual interna de la cámara de combustión	16
Ilustración 13 Arreglo interior y posicionamiento de las gotas de combustible.....	17
Ilustración 14 Cámara CHRONOS de alta velocidad	17
Ilustración 15 Montaje real de prueba de gotas en el laboratorio de ciencias térmicas	18
Ilustración 15 Gota posicionada	19
Ilustración 19 Proceso de quemado y reducción de área de la gota de combustible	20

Lista de gráficas

Gráfica 1 Reducción de área Vs Tiempo(s)	21
Gráfica 2 Retraso en la ignición	23
Gráfica 3 Reducción de área Vs tiempo(s) con gas natural	26
Gráfica 4 Tiempo de Retardo de Ignición con gas natural	27

Introducción

Actualmente, una de las grandes problemáticas a nivel mundial es la contaminación ambiental, el deterioro continuo de nuestro planeta y, con esto, la salud humana, ya que, se ven cada vez más comprometida por el creciente avance en la tecnología y el constante incremento en el consumo energético. Una de las actividades que más aporta a esta preocupación es la quema de combustibles fósiles, en especial, con el uso de los motores de combustión interna, ya que generan emisiones de gases contaminantes como el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NO_x), los hidrocarburos sin quemar (HC) y material particulado (PM), entre otros.

En este orden de ideas, para mitigar los efectos negativos de las emisiones de gases contaminantes de motores de combustión, se han propuesto diferentes alternativas que incluyen los sistemas postratamiento, el control electrónico y el uso de combustibles alternativos. Dentro de estos últimos, se encuentra el uso de combustión dual con gas natural, dado que es un combustible compuesto principalmente por cadenas cortas de hidrocarburos y por ende emite menos contaminantes que el diésel. De hecho, hay algunos investigadores que comparativamente lo llaman ecológico. (Motalebi, 2016).

Sin embargo, este es un combustible de baja reactividad y que desplaza el aire durante el proceso de admisión, dado que, típicamente se inyecta en el ducto de admisión. Por esta razón, se proponen otras alternativas como los aditivos para combustible, entre ellos se encuentran los alcoholes como el etanol, butanol, entre otros. Así mismo, se han propuesto alternativas como el uso de nanomateriales carbonosos dispersos en diésel comercial, esto en procura de aportar soluciones viables al uso y la quema del diésel comercial. (Lijiang, 2016). Así mismo, existen investigaciones recientes que se han centrado en el desarrollo de soluciones para probar el impacto de estas alternativas en los procesos de combustión, por

ejemplo, (C. Zapata-Hernandez, 2024) sintetizaron puntos cuánticos de carbono (CQDs) proveniente de borra de café, los cuales fueron obtenidos en n-butanol y posteriormente dispersados en diésel comercial colombiano. Con esto, hicieron un estudio fundamental en la combustión de gotas con lo que obtuvieron parámetros como el retraso en la ignición, la generación de microexplosiones, entre otros. Así mismo, existen otros experimentos que han trabajado en pro de ser cada día más asertivo con el uso del diésel comercial y nanomateriales dispersos en él y/o aditivos, ya que día tras día, la demanda energética, la salud pública y el medio ambiente nos obliga a buscar soluciones en pro de mantener un equilibrio de vida entre todos, por ejemplo, (Rentería, Gallego, Cagua, & Herrera, 2023), quienes, con el objetivo de evaluar el efecto de nanotubos de carbono funcionalizados con grupos amida (amide-functionalized/CNTs), mezclaron con diésel y biodiésel de palma en una concentración de 50ppm y 100 ppm, como aditivos.

Este parámetro es clave para entender el comportamiento de estos combustibles en motores de combustión interna y su impacto en eficiencia y emisiones contaminantes. (Rentería, 2023), El estudio demuestra que los nanocombustibles con CNTs funcionalizados con amidas pueden reducir el retraso de ignición, especialmente en biodiésel, mejorando potencialmente la eficiencia de combustión y reduciendo emisiones nocivas.

Así mismo, profesores e investigadores como Gallego, et al. (2023), Analizaron cómo afecta la adición de nanotubos de carbono (CNTs) estabilizados con surfactante (SDBS) a la demora de ignición y la velocidad de combustión en gotas de diésel comercial colombiano. La motivación principal fue mejorar la eficiencia de combustión y reducir emisiones contaminantes usando nanocombustibles. Los resultados arrojaron que, la adición de (CNTs a 100 ppm estabilizados con SDBS) mejora significativamente la combustión de gotas de diésel al aumentar la tasa de combustión y reducir el retraso en la ignición, gracias a una mayor conductividad térmica y mejor estabilidad del nanocombustible. Esto sugiere un alto potencial para mejorar la eficiencia energética y reducir emisiones en motores diésel sin modificar la arquitectura del motor. Sin embargo, según pudieron notar que en concentraciones inadecuadas como 50 ppm pueden ser contraproducentes.

A pesar de lo descrito, aún no se halla en literatura trabajos experimentales que usen el gas natural en para generar atmósferas duales en estudios fundamentales de combustión de la gota, así como sucede en motores de combustión. Un trabajo de este tipo, puede dar información valiosa en el campo de la combustión en modo dual, esto con el fin de estimar efectos cuando se usan estas alternativas en conjunto en motores de combustión interna diésel. Es por esto por lo que en este trabajo se realizaron dispersiones de puntos cuánticos de carbono (CQDs) en una mezcla de n-butanol y combustible diésel comercial colombiano y se llevaron a procesos de combustión de gotas. Esto se realizó en una cámara de combustión la cual tiene un sistema óptico instalado para trabajar bajo en fenómeno Shadowgraph, esto aprovechando un arreglo de lentes y una cámara de alta velocidad. Así pues, las mezclas de combustible con CQDs fueron sometidos a un proceso de combustión controlada con una atmósfera reactiva de gas natural y así se obtuvo propiedades de combustión como el retraso en la ignición y la velocidad de combustión. De esta manera, con este trabajo se dio respuesta a los siguientes objetivos.

Objetivos

Objetivo general

- Analizar el tiempo de retraso en la ignición y la velocidad de combustión de gotas individuales de combustible diésel con dispersión de nanomateriales carbonosos y atmósferas duales.

Objetivos específicos

- Determinar el tiempo de retraso en la ignición de gotas de combustible diésel en atmósferas duales
- Evaluar experimentalmente el efecto del gas natural en la tasa de quemado de gotas de combustible diésel.
- Analizar la generación de microexplosiones de mezclas de diésel y nanomateriales carbonosos en atmósferas duales con gas natural.

1. Marco teórico

La vaporización y combustión de gotas de combustible representan fenómenos fundamentales en la ciencia de la combustión. Estos procesos son particularmente relevantes en aplicaciones prácticas como motores de combustión interna, turbinas de gas, calderas industriales y sistemas de propulsión aeroespacial, donde los combustibles líquidos se introducen comúnmente como aerosoles compuestos por millones de gotas. La comprensión detallada del comportamiento individual de las gotas en cuanto a su calentamiento, vaporización e ignición permite predecir y optimizar el desempeño global del sistema de combustión, así mismo, reducir contaminantes y mejorar la eficiencia energética (Law, 1982).

Desde una perspectiva práctica, las gotas de combustible, al gasificarse y quemarse, determinan las tasas de liberación de calor y eficiencia del sistema. Desde un punto de vista fundamental, la combustión de gotas involucra flujos multifásicos, transferencia de calor y masa, reacciones químicas y fenómenos de cambio de fase, lo que convierte a este proceso en un modelo valioso para estudiar sistemas de combustión complejos.

Además, en ciertas configuraciones idealizadas, como una gota aislada en un ambiente estancado y simétrico, el campo de flujo es suficientemente simple como para permitir un análisis teórico detallado, lo que facilita el desarrollo y validación de modelos fundamentales.

1.1 La ley del d^2 : fórmula base para entender la combustión de gotas

Uno de los modelos más conocidos para estudiar este fenómeno es la **Ley del d^2** , que básicamente plantea que el tamaño de una gota de combustible disminuye proporcionalmente al cuadrado de su diámetro con el paso del tiempo. Esta teoría fue propuesta por Godsave, Spalding y otros en la década de 1950 y, aunque es una simplificación, ha sido muy utilizada para analizar el tiempo de evaporación de gotas individuales (Law, 1982)

La fórmula general que representa esta ley es:

$$d^2(t) = d_0^2 - Kt$$

Dónde d_0 es el diámetro inicial de la gota, K es una constante que depende de las condiciones de combustión, y t es el tiempo.

Sin embargo, esta ley no siempre se cumple perfectamente, ya que en condiciones reales hay muchos factores que la afectan, como la temperatura, la presión, el tipo de combustible y el entorno donde ocurre la combustión. Por ejemplo, se asume que la gota es perfectamente esférica, que se encuentra en un ambiente completamente uniforme y estático, que sus propiedades físicas no cambian con la temperatura, y que no hay interacción con otras gotas cercanas. Estas simplificaciones hacen que la Ley del d^2 sea más útil como punto de partida teórico que como una representación precisa del comportamiento real de las gotas de combustible en aplicaciones prácticas (Turns, 2000)

1.1.1 Área normalizada de la gota

El área normalizada de la gota (A/A_0), tiene como propósito el de mostrar la relación entre el área de la gota en un momento dado con respecto al área inicial.

En el estudio de (Law, 1982), se analiza cómo cambia el tamaño de una gota de combustible mientras se calienta, se evapora y finalmente se quema. Para entender ese comportamiento, se utiliza lo que se llama el área normalizada de la gota, que básicamente compara el tamaño actual de la gota con el tamaño que tenía al comienzo. A medida que pasa el tiempo y la gota se va consumiendo por el calor, su tamaño va disminuyendo, y esta área normalizada también baja. Se explica el modelo d^2 (ley del cuadrado del diámetro).

En términos prácticos, se refiere a la relación entre el área instantánea de la superficie de la gota y su área inicial, es decir:

$$\text{Área normalizada} = \left(\frac{dt}{d_0}\right)^2 = \frac{A(t)}{A_0}$$

Donde:

- dt es el diámetro de la gota en un instante de tiempo (t)
- d_0 es el diámetro inicial de la gota
- $A(t)$ es el área superficial de la gota en (t)
- A_0 es el área inicial



Ilustración 1 Comportamiento del área de una gota de combustible en proceso de quemado

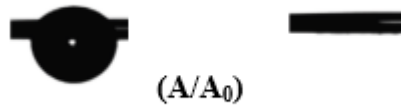


Ilustración 2 Relación A/A_0

Analizar el cambio en el área normalizada ayuda a ver con más claridad cómo se comporta el combustible a escala de gotas y cómo se podría hacer más eficiente o menos contaminante.

1.1.2 Método óptico Shadowgraph

El método Shadowgraph permite ver cómo se comporta un objeto, como una gota de combustible, cuando se calienta, evapora o quema, mediante las distorsiones que provoca en la luz.

También es una herramienta importante y clave que se utiliza para estudiar con precisión el comportamiento de gotas de combustible, la ignición, vaporización y combustión, esenciales para optimizar procesos en motores y reducir emisiones.

En investigaciones como la de Gallego, et al. (2023) y Law, (1982), el método Shadowgraph se aplica para observar la forma y evolución de una gota individual de diésel, también, para medir el diámetro de la gota en el tiempo, lo que permite calcular el área normalizada y analizar la ley d^2 .

1. Determinar el tiempo de ignición, identificando en qué momento exacto la gota comienza a arder.
2. Analizar la velocidad de combustión, viendo cómo la gota se reduce hasta desaparecer.

Para lograr esto, es necesario montar un sistema con:

- Cámara de alta velocidad
- Fuente de luz colimada
- Sistema de ignición
- Software (como MATLAB) para analizar las imágenes cuadro por cuadro

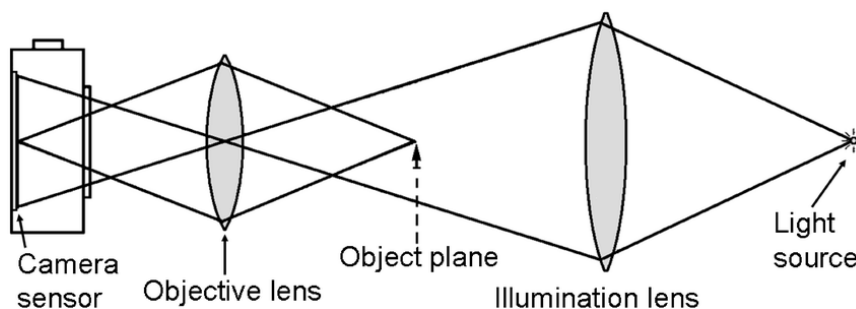


Ilustración 3 Método Shadowgraph.

1.1.3 Butanol

El butanol es un alcohol de cadena lineal con cuatro átomos de carbono (C_4H_9OH). Existen varios isómeros, pero el más común en aplicaciones energéticas es el n-butanol. Se presenta como un líquido incoloro, ligeramente soluble en agua, con un olor característico, y puede obtenerse tanto de manera sintética (a partir de derivados del petróleo) como biológica (a través de fermentación, llamado biobutanol).

El butanol se ha investigado principalmente como un biocombustible alternativo, ya sea puro o como aditivo mezclado con diésel, gasolina o biodiésel. Se usa para mejorar el desempeño de los combustibles líquidos convencionales debido a sus propiedades químicas favorables.

Aplicaciones del butanol:

- Aditivo en diésel y biodiésel: mejora la evaporación, reduce la viscosidad y facilita la mezcla homogénea.
- Biocombustible directo (butanol fuel): se puede usar en motores sin grandes modificaciones, a diferencia del etanol.
- Solvente industrial: en pinturas, lacas y productos químicos.
- Producción de plásticos, polímeros y cosméticos.

El butanol presenta varias ventajas cuando se usa como aditivo o combustible alternativo:

- Mayor poder calorífico que el etanol (cerca de 29 MJ/kg, más cercano a la gasolina).
- Mejora la atomización y vaporización del combustible, lo que favorece una combustión más completa.
- Disminuye la formación de hollín y contaminantes como CO y HC no quemados.
- Menor presión de vapor que el etanol, lo cual lo hace más seguro y menos volátil.
- Tiene mayor compatibilidad con motores diésel y gasolina sin modificaciones mayores. (Mohd Noor, 2018)

(C. Zapata-Hernandez, 2024) dispersaron puntos cuánticos de carbono (CQDs) en **n-butanol**, y luego los mezclaron con diésel para estudiar el comportamiento de la combustión de gotas. Observaron efectos positivos en reducción del retraso de ignición y generación de microexplosiones, que mejoran la eficiencia de la combustión. Además, (Rakopoulos, 2010) estudiaron mezclas de butanol-diésel en motores de encendido por compresión y encontraron reducciones en CO, HC y partículas, sin grandes pérdidas en rendimiento térmico.

1.1.4 Puntos cuánticos de carbono

Los puntos cuánticos de carbono, también conocidos como CQDs, son nanopartículas muy pequeñas hechas principalmente de carbono, con un tamaño menor a 10 nanómetros. Estos materiales tienen una estructura parecida al grafito o al carbón, pero a escala nanométrica, y tienen propiedades especiales debido a su tamaño tan reducido. Por ejemplo, pueden brillar o emitir luz cuando se les aplica energía (a esto se le llama *fluorescencia*), lo que los hace útiles en muchas áreas como sensores, medicina, energía y combustión. (Lim, 2015)

En el campo de la combustión y energía, los CQDs se están empezando a usar como aditivos en combustibles, por ejemplo, mezclados en diésel o biodiésel, porque:

- Ayudan a mejorar la evaporación del combustible
- Promueven una ignición más rápida

- Facilitan las microexplosiones (cuando una gota se fragmenta violentamente, lo cual mejora la atomización)
- Actúan como puentes térmicos, es decir, ayudan a transferir mejor el calor dentro de la gota

Además, lo bueno de los CQDs es que son más amigables con el medio ambiente que otros aditivos metálicos, ya que están hechos de carbono y, en muchos casos, se pueden fabricar a partir de residuos orgánicos, como cáscaras de frutas o incluso borra de café, como lo hicieron (C. Zapata-Hernandez, 2024).

Los CQDs son importantes por varias razones:

1. Son ecológicos y no tóxicos, a diferencia de nanopartículas metálicas como óxidos de titanio o cerio.
2. Se pueden producir de forma sostenible usando desechos orgánicos, reduciendo así residuos y aportando a la economía circular.
3. Mejoran el rendimiento de la combustión, lo cual significa menos emisiones contaminantes y mejor eficiencia energética.
4. Tienen múltiples aplicaciones: desde biomedicina, sensores, hasta energía limpia.

1.1.5 Procesos transitorios: el calentamiento de la gota y aplicaciones prácticas del estudio de gotas

Cuando una gota fría entra en un entorno caliente, como una cámara de combustión, primero debe calentarse antes de comenzar a evaporarse o quemarse. Este proceso inicial, conocido como calentamiento de la gota, es crucial, ya que durante este tiempo la tasa de vaporización es muy baja, sólo cuando la temperatura de la gota se acerca a su punto de ebullición, comienza una evaporación significativa. Este comportamiento ha sido confirmado experimentalmente por (Okajima, 1979), quienes observaron que el tamaño de la gota apenas cambia durante los primeros instantes posteriores a la ignición, así mismo, las investigaciones recientes de (Law, 1982) lo respaldan.

Así mismo, estudiar cómo se quema una sola gota puede parecer un poco sencillo, pero tiene implicaciones muy importantes. Por ejemplo, en sistemas como:

- **Motores de combustión interna**, donde el combustible líquido se pulveriza en pequeñas gotas dentro del cilindro.
- **Turbinas de gas**, que funcionan con combustibles líquidos atomizados.
- **Quemadores industriales**, que requieren una combustión limpia y completa para evitar contaminantes. (Enega, 2018)

Entender el comportamiento individual de una gota permite predecir cómo funcionará un conjunto más grande de gotas. Además, también ayuda a mejorar el diseño de inyectores y sistemas de combustión para que sean más eficientes, seguros y menos contaminantes.

2. Metodología

A continuación, se presenta la metodología para el cumplimiento de los objetivos de la investigación. Así mismo, se muestran los equipos de medición, materiales de prueba e insumos, teniendo en cuenta que este trabajo se realizó en las instalaciones del laboratorio de ciencias térmicas de la Institución Universitaria ITM y el laboratorio de investigación y diagnóstico automotriz de la Institución Universitaria Pascual Bravo.

2.1 Técnica óptica de Shadowgraph

La técnica óptica de Shadowgraph consiste en introducir un haz de luz a través de un objeto opaco con nula refracción, para extraer información de campo sin intervenir directamente con él. En particular, a partir de la técnica Shadowgraph es posible analizar los cambios en la fase de la luz, los cuales llevan información sobre el estado del flujo a un plano de registro y/o sistema computacional conectado. Así mismo, se busca resaltar la diferencia en el índice de refracción en la interfaz entre un cuerpo de estudio y su espacio circundante. Esta técnica se considera apropiada cuando la muestra y medio que se está estudiando poseen grandes diferencias en el índice de refracción como es el caso de aire y combustible diésel (Gary, 2017). En la ilustración 4, se puede apreciar el principio de operación de la técnica óptica (Rentería, et al., 2023).

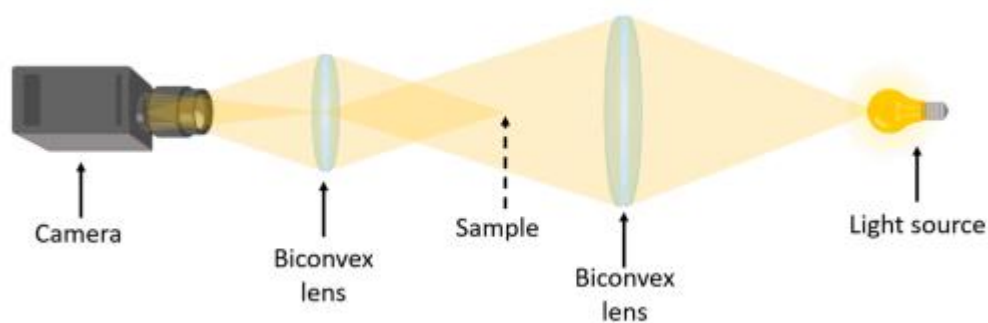


Ilustración 4 Diagrama experimental de la Técnica de Shadowgraph

2.2 Procesos de combustión de gotas

Dentro del sistema se ubicará una gota de combustible mediante el uso de una micropipeta. Además, se usará una resistencia eléctrica a cada lado para garantizar la ignición de la gota, la cual será acercada a la gota y luego retirada mediante un cilindro neumático con control electrónico. De la misma manera, en un extremo del sistema de combustión se dispondrá una lámpara LED que servirá como luz de fondo, y en el otro extremo se ubicará una cámara de alta velocidad (CHRONOS) y un par de lentes biconvexas los cuales buscan colimar los rayos de luz hacia la muestra y el lente, Con esta disposición se busca un fondo homogéneo para la cámara de alta velocidad, también, un enfoque directo a la gota de combustible y así, proporcionar la luz que es refractada por el objeto o medio en estudio para capturar las fotografías propias de la llama y de la reducción de tamaño de la gota durante el proceso de quemado. De la cámara de alta velocidad (CHRONOS) se extrajo la memoria para la adquisición y análisis de datos y evaluar experimentalmente el efecto del gas natural en la tasa de quemado de gotas de combustible diésel, la generación de microexplosiones y determinar el tiempo de retraso en la ignición y velocidad de combustión.

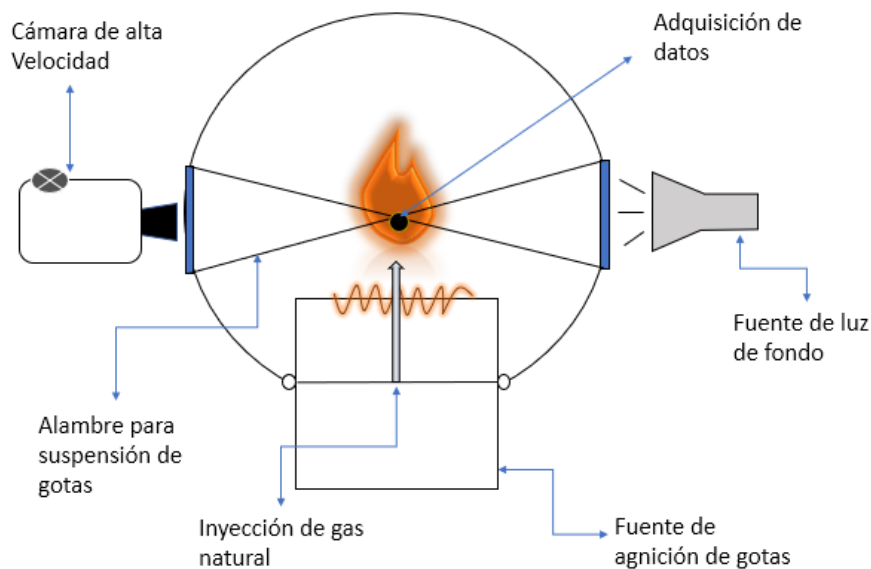


Ilustración 5 Diagrama del montaje experimental

Finalmente, en la siguiente ilustración se puede ver la posición final de gota suspendida en el alambre y así mismo, empieza la combustión de la gota.

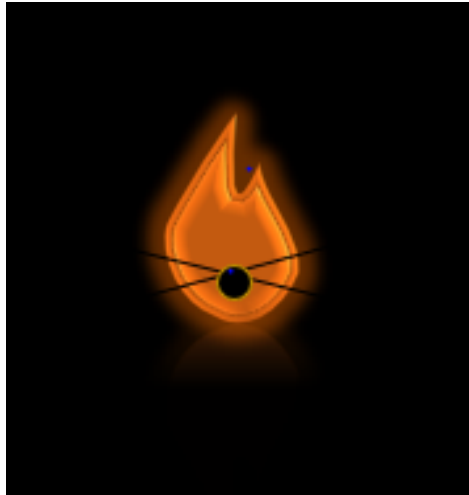


Ilustración 6 Combustión de gota posicionada

2.3 Preparación y dispersión de nanomateriales en combustibles

Primero, se realizó unas dispersiones de puntos cuánticos de carbono (CQDs) en concentraciones de 50 y 100 mg/L en combustible diésel comercial colombiano (B10, 10 %vol. Biodiesel de palma), así mismo, se mezcla n-butanol en una concentración de 10 %vol., así mismo, se midieron parámetros como el retraso en la ignición, la generación de microexplosiones y la tasa de quemado bajo una atmosfera reactiva con gas natural.

Para las siguientes ilustraciones teniendo en cuenta lo anterior se observa la preparación y concentración de nanomateriales en combustibles.

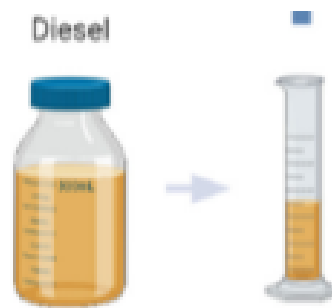


Ilustración 7 Preparación y concentración del combustible

La dispersión de puntos cuánticos de carbono (CQDs) en concentración de 50 y 100mg/L y n-butanol. Fotografías tomadas directamente del laboratorio de ciencias térmicas. Ver ilustración 9 y 10.



Ilustración 8 Dispersión de (CQDs) y + n- butanol

De la misma manera, para la ilustración siguiente, se hizo la dispersión de puntos cuánticos de carbono (CQDs) en concentración de 50mg/L.



Ilustración 9 Dispersión de puntos cuánticos de carbono en concentración de 50mg/L

Así mismo, y teniendo en cuenta lo anterior, se tomaron unas imágenes directamente en el laboratorio de ciencias térmicas con el objetivo de ilustrar ampliamente la atmosfera de trabajo. Ver Ilustración 11, 12 y 13.

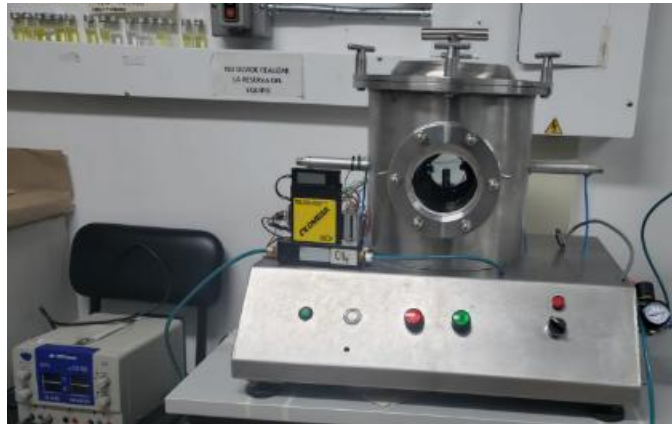


Ilustración 10 Cámara de combustión para pruebas

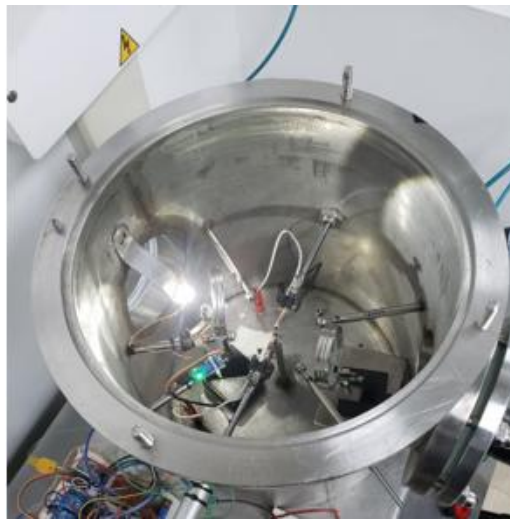


Ilustración 11 Visual interna de la cámara de combustión

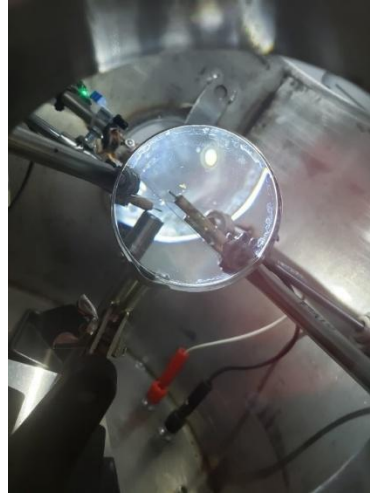


Ilustración 12 Arreglo interior y posicionamiento de las gotas de combustible

También, es importante destacar que, el sistema de adquisición de videos y/o capturas fotográficas de prueba se dio mediante una cámara de alta velocidad (CHRONOS), con memoria extraíble. Ver ilustración 14 y 15.



Ilustración 13 Cámara CHRONOS de alta velocidad



Ilustración 14 Montaje real de prueba de gotas en el laboratorio de ciencias térmicas

Dado lo anterior, fue necesario todo el montaje del sistema para optimizar el proceso de combustión y así mejorar los resultados propuestos en este trabajo.

2.4 Efecto del uso de gas natural y adición de nanomateriales a diésel comercial

Con el fin de estimar los efectos del uso de gas natural en los parámetros de combustión, se creará una atmósfera reactiva alrededor de la gota con el uso de gas. El gas natural se va a inyectar en el sistema de combustión a través de una tubería de acero inoxidable, las cuales serán ubicadas en la parte inferior de la gota de prueba. La cantidad de gas natural será controlada mediante una electroválvula, la cual a su vez se sincronizará con el encendido de las resistencias eléctricas y con el funcionamiento del cilindro neumático. Las pruebas experimentales estarán sujetas a los factores y niveles de intensidad de cambio en los instantes de captura fotográfica en experimentación, se pretende así mismo, agregar aditivos y mezclas con gas natural, a los nanomateriales, donde serán protagonista la técnica óptica de Shadowgraph, la dispersión de puntos cuánticos de carbono (CQDs), el gas natural, la atmósfera confinada, entre otros. El análisis general en cada instante/caso de cambio de estado del material en experimentación será de gran utilidad para lograr avanzar en el estudio correspondiente, dados los resultados de mejora en camino a la prosperidad en la forma de impactar positivamente los avances continuos y el consumo de energía en el mundo.

2.5 Área de la gota

El área de la gota se determinará contando los píxeles en la imagen tomada. Por lo tanto, este análisis se limita a la desviación estándar de las pruebas. Así mismo, se desarrollarán y quemarán réplicas de cada preparación de combustible cada semana, cada conjunto de pruebas consiste en la quema de diez gotas, es decir, diez videos individuales; de este modo, se obtiene la curva de área normalizada (A/A_0). Y posteriormente se calcula el retardo de ignición y la velocidad de combustión. Fórmula tomada del escrito de (Rentería, 2023)

$$A/A_0 = \frac{\text{Área de la imagen binaria seleccionada}}{\text{Área inicial de la gota}}$$

En la siguiente ilustración se muestra una fotografía de la gota de combustible colgando en los cables tensionados junto a la resistencia de calor y a punto de iniciar el proceso de quemado. La fotografía fue tomada directamente en el laboratorio térmico.

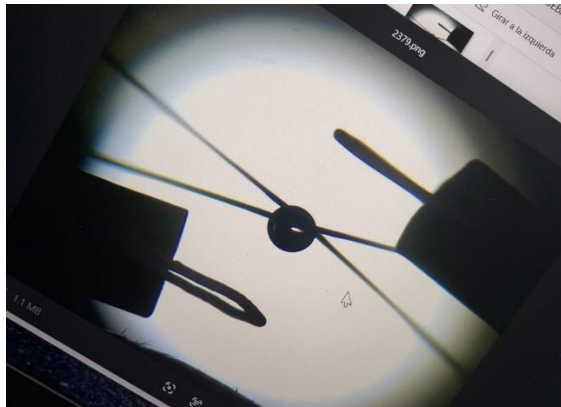


Ilustración 15 Gota posicionada

Proceso simultaneo de quemado de la gota se muestra en la ilustración 16, Se tiene que para el área normalizada de la gota (A/A_0), se debe mostrar la relación entre el área de la gota en un momento dado con respecto al área inicial.

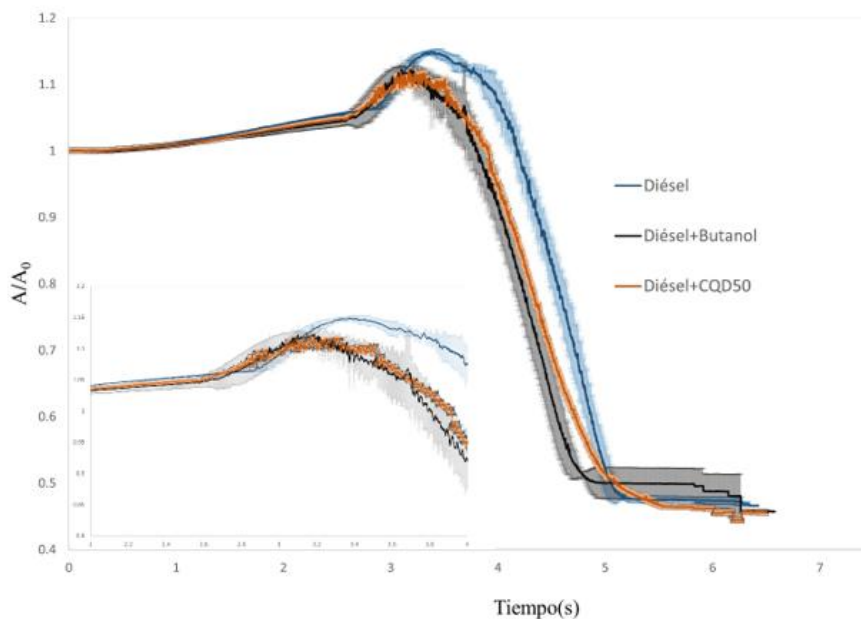


Ilustración 16 Proceso de quemado y reducción de área de la gota de combustible

3. Análisis de resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del experimento de combustión de gotas en condiciones controladas, utilizando diésel puro y mezclas con aditivos como butanol y puntos cuánticos de carbono (CQDs). Para ello, se analizó el cambio en el área normalizada de la gota a lo largo del tiempo y se midió el tiempo de ignición mediante el método óptico de Shadowgraph. Estos datos permiten observar cómo influyen los aditivos en el comportamiento de la combustión, especialmente en el retraso de ignición y la velocidad de reducción de la gota.

La siguiente gráfica representa la reducción de área normalizada de una gota de combustible Vs el tiempo(s).



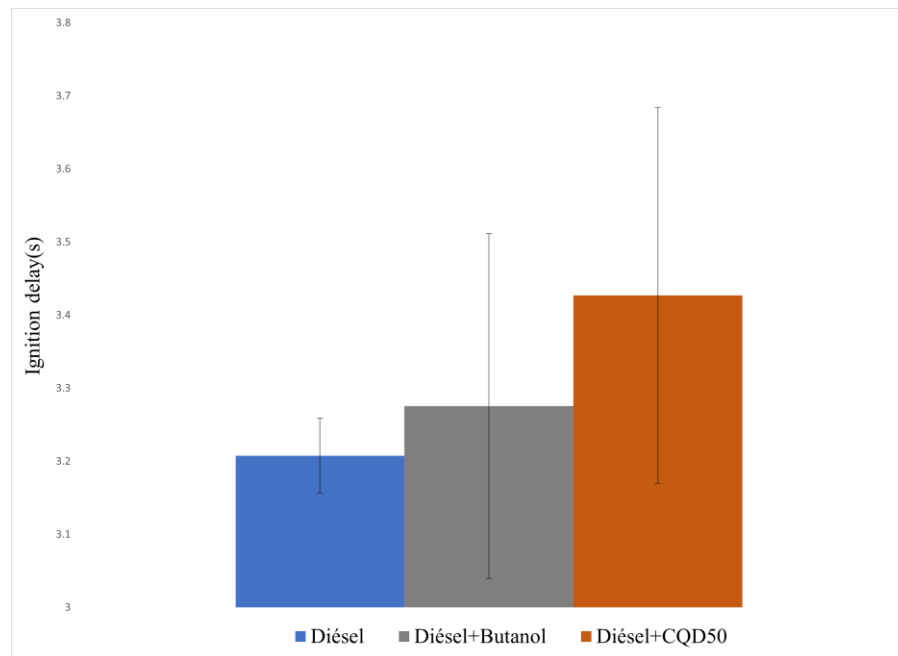
Gráfica 1 Reducción de área Vs Tiempo(s)

La gráfica muestra cómo cambia el área superficial de una gota de combustible a lo largo del tiempo durante su combustión. La variable A/A_0 representa el área de la gota en un instante determinado (A) dividida entre su área inicial (A_0). Este análisis está basado en el modelo clásico de la ley d^2 , descrita por (Law, 1982), donde la gota se evapora de forma casi lineal después del calentamiento inicial.

- **Etapa inicial plana (hasta ~3.2–3.4 s):** En todos los combustibles (diésel puro, diésel + butanol, diésel + CQD50), el área se mantiene relativamente constante. Esta es la fase de calentamiento, como lo explicó (Law, 1982), donde la gota absorbe calor, pero aún no se ha encendido.
 - **Pico o ligera expansión del área (entre 3.4 y 4.0 s):** Aquí se ve un leve aumento en el área normalizada, probablemente asociado con formación de evaporación parcial interna antes de la ignición. Esto es común en mezclas multicomponente como las que tienen butanol o CQDs, que tienden a acumular presión interna y causar microexpansión.
 - **Caída pronunciada del área (a partir de ~4.2 s):** Es el momento en que ocurre la **ignición de la gota**. La superficie se reduce rápidamente porque el combustible se está consumiendo por combustión.
- **Diésel puro (azul):** Tiene una caída más temprana, lo que indica menor tiempo de ignición (ignition delay).
 - **Diésel + Butanol (negro):** Se enciende un poco después.
 - **Diésel + CQD50 (naranja):** Tiene el mayor retraso en la ignición, encendiendo más tarde que los demás.

Tiempo de Retardo de Ignición (Ignition Delay)

Esta gráfica refuerza la observación anterior mostrando el tiempo promedio que tarda cada combustible en encenderse (más el error experimental):



Gráfica 2 Retraso en la ignición

Finalmente, esta gráfica nos muestra que:

- **Diésel puro:** Enciende más rápido (~3.22 s), como se esperaba.
- **Diésel + Butanol:** Tiene un pequeño retraso (~3.28 s), posiblemente por la evaporación previa del butanol que enfría la gota antes de encender.
- **Diésel + CQD50:** Presenta el **mayor tiempo de retardo (~3.4 s)**. Aunque los CQDs ayudan a generar microexplosiones y mejorar la combustión en etapas posteriores, en concentraciones bajas y sin buena dispersión, pueden actuar como barreras térmicas que ralentizan el calentamiento inicial, como también se ha reportado en estudios recientes.

El uso de aditivos puede ser beneficioso, pero es fundamental encontrar el equilibrio correcto en su formulación para no afectar negativamente el tiempo de ignición.

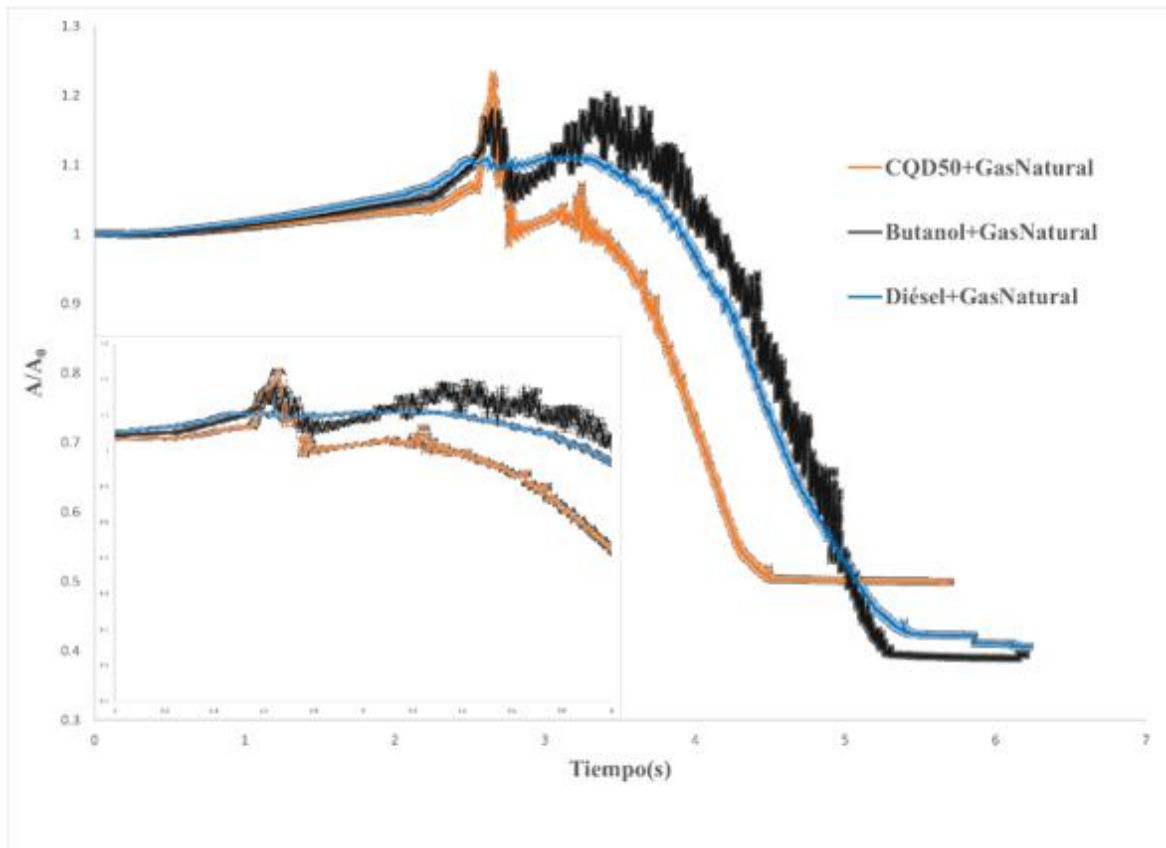
- El análisis de A/A_0 confirma que el proceso de calentamiento inicial es clave y que la ignición solo ocurre una vez que la gota alcanza una temperatura suficientemente alta, como lo describieron (Okajima, 1979) y lo cita (Law, 1982)

- Las mezclas con **butanol y CQDs** pueden mejorar la combustión después de la ignición, pero en algunos casos, como se ve en el CQD50, pueden aumentar el retraso inicial.
- Este comportamiento se debe a que los aditivos cambian las propiedades térmicas y de evaporación de la gota, y en el caso de los CQDs, pueden incluso estabilizar la superficie o generar fases líquidas intermedias que retardan la ignición.

4. Análisis de resultados para la mezcla con gas natural

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la combustión de gotas bajo una atmósfera con gas natural. En esta parte del estudio se analizaron mezclas de diésel con butanol y con puntos cuánticos de carbono (CQDs), y se compararon con diésel puro. El análisis se centró en tres aspectos clave: el tiempo de ignición, la reducción del área superficial de la gota y la velocidad de combustión. Para esto, se utilizó el método óptico de Shadowgraph, que permitió observar cómo varía el tamaño de la gota en el tiempo, lo que refleja qué tan rápido se consume el combustible una vez que inicia la combustión.

La siguiente gráfica representa cómo cambia la superficie de una gota de combustible (A/A_0) a lo largo del tiempo, bajo un ambiente de combustión con gas natural como oxidante adicional. Se comparan tres mezclas: Diésel + Gas Natural, Butanol + Gas Natural, y CQD50 + Gas Natural.



Gráfica 3 Reducción de área Vs tiempo(s) con gas natural

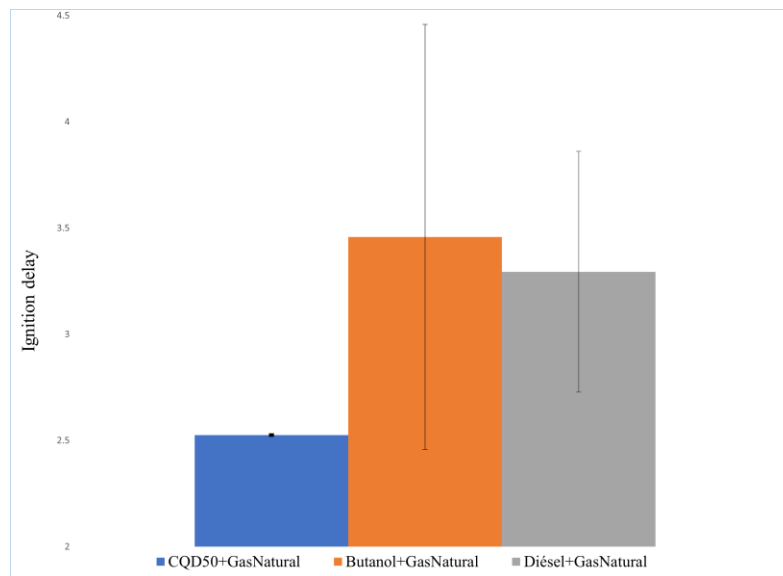
Se puede notar que

- Etapa inicial estable (hasta ~ 2.5 s): Las tres mezclas presentan una fase plana donde el tamaño de la gota apenas varía. Esta es la fase de calentamiento, descrita por (Law, 1982), donde la gota absorbe calor antes de comenzar la vaporización activa.
- Picos de área entre (2.5 y 3.5 s): Se observan fluctuaciones en el área normalizada, especialmente notables en la mezcla con butanol, lo cual puede asociarse a microexplosiones o expansión de burbujas internas debido a diferencias de volatilidad entre los componentes. Esto es consistente con investigaciones recientes que indican que el butanol puede generar inestabilidades internas que aumentan momentáneamente el tamaño aparente de la gota antes de encenderse.

- Descenso del área (ignición): La mezcla CQD50 + Gas Natural (naranja) muestra una caída más temprana y estable, indicando una ignición más rápida.
 - El Diésel + Gas Natural tiene una pendiente menos pronunciada, lo que sugiere una combustión más lenta.
 - El Butanol + Gas Natural tarda más en iniciar la combustión activa, posiblemente por una distribución no uniforme de calor dentro de la gota o una evaporación preferencial del butanol que retrasa el encendido de la mezcla principal.

Tiempo de Retardo de Ignición con gas natural (Ignition Delay)

Esta barra muestra el promedio del tiempo que tarda cada mezcla en encenderse, en presencia de gas natural:



Gráfica 4 Tiempo de Retardo de Ignición con gas natural

CQD50 + Gas Natural (azul) presenta el menor tiempo de ignición (~2.5 s). Esto sugiere que los puntos cuánticos de carbono mejoran la absorción y conducción de calor dentro de la gota, permitiendo alcanzar más rápido la temperatura crítica de ignición.

Diésel + Gas Natural tiene un tiempo intermedio, lo cual es esperable ya que no contiene aditivos que alteren significativamente las propiedades térmicas.

Butanol + Gas Natural Muestra el mayor tiempo de ignición (~ 3.4 s), lo cual coincide con lo visto en la primera gráfica. Aunque el butanol mejora la evaporación en fases posteriores, puede absorber calor rápidamente y enfriar la gota, provocando un retraso térmico en el encendido.

Finalmente se obtuvo que, en un ambiente con gas natural, la mezcla CQD50 + Diésel es la que enciende más rápido, posiblemente debido a que los puntos cuánticos de carbono facilitan la transferencia de calor en el interior de la gota. En cambio, el butanol, aunque es un aditivo oxigenado útil, puede generar un efecto contrario en la fase inicial, retrasando la ignición. Estos hallazgos concuerdan con la teoría de (Law, 1982), quien destaca la importancia del calentamiento previo y el comportamiento multicomponente en la dinámica de combustión de gotas.

5. Conclusiones y recomendaciones

El uso de aditivos como butanol y CQDs modifica claramente el comportamiento de la combustión de gotas. En los ensayos sin gas natural, el diésel puro encendió más rápido, mientras que el butanol y los CQDs aumentaron ligeramente el tiempo de ignición. Sin embargo, con gas natural, los CQDs mostraron el efecto contrario, logrando el encendido más rápido entre todas las mezclas, lo que demuestra que su desempeño depende del entorno de combustión.

Los CQDs mejoran la eficiencia de la combustión en presencia de gas natural. En la segunda parte del experimento (con gas natural), la mezcla con CQD50 fue la que presentó menor retardo de ignición y una reducción de área más rápida, lo que indica una mayor velocidad de combustión. Esto sugiere que los CQDs ayudan a conducir el calor dentro de la gota y aceleran el proceso cuando hay un oxidante adicional como el gas natural.

El butanol mostró un comportamiento variable según el ambiente de combustión. Aunque es un aditivo oxigenado, en ambos casos (con y sin gas natural), el butanol presentó mayores tiempos de ignición, probablemente por su efecto de enfriamiento inicial debido a su rápida evaporación. A pesar de eso, se observó que contribuye a la formación de microexplosiones, lo que puede ser útil para mejorar la atomización en fases posteriores.

El análisis conjunto confirma que la combinación de aditivos con gas natural puede ser clave para mejorar la combustión dual. Comparando todas las gráficas, se puede concluir que los mejores resultados se obtuvieron con la mezcla Diésel + CQD50 + Gas Natural, ya que encendió más rápido y su gota se consumió más rápido, lo que significa mayor eficiencia térmica. Esto apoya la idea de que los nanoaditivos como los CQDs pueden ser una alternativa efectiva y ecológica para optimizar combustibles en modo dual.

Por otro lado, se recomienda probar diferentes concentraciones de CQDs y butanol. Sería útil evaluar otras concentraciones (por ejemplo, 25 ppm, 75 ppm o 100 ppm) para determinar cuál ofrece el mejor equilibrio entre tiempo de ignición, estabilidad y velocidad de combustión. Esto permitiría optimizar su efecto sin generar resistencia térmica o problemas de dispersión.

Estudiar el efecto de otras atmósferas reactivas. Además del gas natural, se podrían hacer ensayos en presencia de otros gases como oxígeno puro o mezclas sintéticas para entender cómo varía la combustión en diferentes condiciones. Analizar los residuos y emisiones generadas. Aunque el enfoque fue la ignición y la velocidad de combustión, en futuras investigaciones sería útil analizar también la cantidad y tipo de emisiones (CO, NO_x, partículas) generadas por cada mezcla para evaluar su impacto ambiental real.

Bibliografía

- Anderson Gallego, K. C. (2023). Ignition Delay and Burning Rate Analysis of Diesel–Carbon Nanotube Blends Stabilized by a Surfactant:. *Energies*, 2 - 12.
- C. Zapata-Hernandez, G. D.-G.-E. (2024). El impacto de los puntos cuánticos de carbono derivados de los posos de café usados en la combustión de gotas de una mezcla de diésel y n-butanol. *HELIYON*, 1-15.
- Cummins. (21 de Septiembre de 2021). *cummins.com*. Obtenido de <https://www.cummins.com/es/news/2021/09/29/what-dual-fuel-engine-and-its-benefits-oil-and-gas-applications>
- ELSEVIER. (1975). Teoría de la combustión de gotas en estado no estacionario. *SCIENCEDIRECT*.
- Enega. (2018). *Fluidos y combustión*. Obtenido de <https://www.enegas.es/blog/analisis-de-quemadores-tarea-crucial-para-la-sostenibilidad-en-la-industria/>
- Geng, P. (2016). *combustión dual de gas natural/diésel, las emisiones y el rendimiento*. Shanghai: Elsevier.
- Jorge Rentería, A. G. (2023). Effect of amide-functionalized carbon nanotubes as commercial diesel and. *Elsevier*.
- Jorge Rentería, A. G. (2023). Effect of amide-functionalized carbon nanotubes as commercial diesel and palm-oil biodiesel additives on the ignition delay: A study on droplet scale. *Fuel*, 7-14.
- Law, C. (1982). AVANCES RECIENTES EN VAPORIZACIÓN Y COMBUSTIÓN DE GOTAS. 180.
- LAW, C. (1982). AVANCES RECIENTES EN VAPORIZACIÓN Y COMBUSTIÓN DE GOTAS.
- Lijiang. (2016). A review on natural gas/diesel dual fuel combustion, emissions and performance. *ScienceDirect*.
- Lim, S. Y. (2015). Carbon quantum dots and their applications. *Chemical Society Reviews*, 44. 362-381.
- Mohd Noor, C. W. (2018). Potential of biofuel as fuel substitute in diesel engines. *Renewable and Sustainable Energy*, 80.

- Motalebi, A. &. (2016). Performance and emission analysis of a dual fuel engine using natural gas and diesel. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 31, 617-626.
- Okajima, S. &. (1979). Ignition of a liquid droplet in a hot ambient. Proceedings of the Combustion. *Institute 17*, 1123-1131.
- Planas, O. (21 de Noviembre de 2024). *demotor.net*. Obtenido de <https://demotor.net/motores-termicos/combustible/gasoil/propiedades-fisicas-y-quimicas>
- Rakopoulos, D. C. (2010). Effects of butanol–diesel fuel blends on the performance and emissions of a high-speed DI diesel engine. *Energy Conversion and Management*.
- Turns, S. R. (2000). An Introduction to Combustion. *McGraw-Hill*.