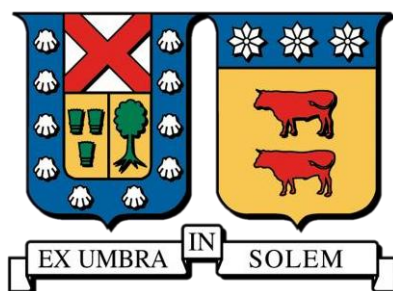


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAISO-CHILE



**Evaluación del desempeño y emisiones del motor
Mercedes-Benz OM 366LA durante la inyección de una
suspensión acuosa de nanopartículas de cobre**

FRANCISCO MILENKO LARA ARAYA

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA:

Dr. German Amador Diaz

PROFESOR COOREFERENTE:

Dr. Roberto Leiva Illanes

Julio 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Evaluación de desempeño y emisiones del motor Mercedes-Benz OM 366 LA durante la inyección excesiva de nanopartículas de cobre.

Nombre del candidato(a): Franco Milenka Lator Araya.

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Mecánica

Campus: Casa Central Departamento: Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, _____, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (marcar una opción):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Powered by
 Firma electrónica avanzada
GERMAN JAVIER AMADOR
DIAZ
2026.08.20 10:12:59 -0400

Fecha: _____ Firma: _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 20/08/26 Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la disposición y el apoyo de los profesores Daniel Galleguillos, Rodrigo Morales, Pugazhenthiran Nalandhiran y Claudia Orellana durante las distintas etapas del proyecto, facilitando el acceso a los equipos experimentales y contribuyendo con sus conocimientos en los procedimientos de laboratorio.

A su vez, se agradece al profesor Germán Amador por asumir la dirección de este trabajo de titulación y por las observaciones realizadas durante su desarrollo.

Finalmente, agradezco a mi familia por su apoyo y comprensión durante el desarrollo de este trabajo, así como a todas las personas que, de una u otra forma, contribuyeron a la realización de esta investigación.

RESUMEN

El presente trabajo evalúa el efecto de inyectar una suspensión acuosa de nanopartículas de cobre metálico (nCu) en el conducto de admisión de aire (posterior al intercooler) sobre el desempeño, las emisiones y las características de combustión de un motor diésel Mercedes-Benz OM366LA. Tras comprobar que las nanopartículas presentaban mayor estabilidad en agua destilada que en diésel, se seleccionó este medio como fluido portador.

Se diseñó e implementó un sistema de inyección con regulación de caudal y se realizaron ensayos a 2000 rpm bajo dos condiciones de carga (60 % y 100 %). Se evaluaron tres niveles de concentración equivalente de nCu en diésel mediante un diseño completamente aleatorizado.

A plena carga (relación agua/combustible ≈ 13 %), la concentración de nCu mostró efectos estadísticamente significativos sobre la presión máxima en el cilindro (P_{max}), su ángulo de ocurrencia ($\theta_{P_{max}}$), la tasa máxima de liberación de calor (HRR_{max}), la duración de la combustión (CA10-90) y el centro de combustión (CA50). Se evidenció además una tendencia a la reducción del consumo específico de combustible (BSFC) con el aumento de la dosificación. En cambio, a 60 % de carga (relación agua/combustible ≈ 40 %) no se detectaron efectos significativos, probablemente porque el mayor caudal de agua intensificó el efecto refrigerante y opacó el posible rol catalítico de las nanopartículas.

ABSTRACT

This thesis evaluates the effect of injecting an aqueous suspension of metallic copper nanoparticles (nCu) into the intake air duct (downstream of the intercooler) on the performance, emissions, and combustion characteristics of a Mercedes-Benz OM366LA diesel engine. Water was selected as the carrier fluid after confirming greater stability of the nanoparticles compared to diesel.

Tests were conducted at 2000 rpm under 60 % and 100 % load conditions using a completely randomized design with three equivalent nCu concentration levels. At full load (water/fuel ratio ≈ 13 %), nCu concentration had statistically significant effects on maximum in-cylinder pressure (P_{max}), its crank angle ($\theta_{P_{max}}$), maximum heat release rate (HRR_{max}), combustion duration (CA10-90), and combustion phasing (CA50). A decreasing trend in brake specific fuel consumption (BSFC) was also observed with increasing nanoparticle dosage. At 60 % load (water/fuel ratio ≈ 40 %), no significant effects were detected, likely due to the stronger cooling effect of the higher water flow rate overshadowing the potential catalytic action of the nanoparticles.

Contenido

AGRADECIMIENTOS	2
RESUMEN.....	3
ABSTRACT	4
ÍNDICE DE FIGURAS	8
ÍNDICE DE TABLAS.....	10
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	14
1.1. Motivación del proyecto	14
1.2. Estado del arte.....	15
1.2.1. Antecedentes de nCu en motores diésel	15
NCuO en diésel.....	15
NCuO en biodiésel.....	16
NCu en diésel.....	17
1.2.3. Síntesis del estado del arte	19
1.3. Objetivo general.....	20
1.3.1. Objetivos específicos.....	20
1.4. Hipótesis.....	20
2.1. Propiedades de funcionamiento de MCI.....	21
2.1.1. Consumo específico de combustible al freno (BSFC)	21
2.1.2. Presión media efectiva (BMEP)	21
2.1.3. Emisiones y temperatura de gases de escape	22
2.1.4. Volumen instantáneo del cilindro	22
2.1.5. Presión en el cilindro.....	23
2.1.6. Tasa de liberación de calor (HRR)	23
2.1.7. Fracción de masa quemada (MFB).....	24
2.2. Toxicidad y riesgos asociados al uso de nCu	24
2.2.1. Toxicidad y riesgos asociados al uso de nCu	25
2.2.2. Mecanismos de toxicidad	25
2.2.3. Vías de ingreso	26
2.2.4. Implicancias para aplicaciones en motores de combustión interna.....	26
2.3. Marco normativo para NP.....	27
2.3.1. REACH.	27
2.3.2. CLP.....	27

2.3.3.	OSHA	27
2.3.4.	DS 594 (Chile).....	28
2.3.5.	DS 148 (Chile).....	28
2.4.	Nanopartículas de cobre aplicadas a motores diésel	28
2.4.1.	Propiedades relevantes para procesos de combustión.	28
2.5.	Producto utilizado	29
2.6.	Concentración de nCu equivalente en diésel	31
2.7.	Inyección de agua en motores diésel.....	32
2.7.1.	Emulsión.....	33
2.7.2.	Inyección directa en el cilindro (DWI).....	34
2.7.3.	Inyección directa en la admisión de aire (WI).....	34
2.8.	Problemas de inyección de Agua en MCI.....	35
2.8.1.	Problema de misfire.....	36
2.8.2.	Límite de humidificación del aire.....	37
2.8.3.	Cantidad de agua evaporada en la admisión.....	37
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA		39
3.1.	Descripción del diseño experimental	39
3.1.1.	Caracterización de la estabilidad de la suspensión.	40
	Ensayo de decantación visual	40
	Ensayo de transmitancia óptica.	42
3.1.2.	Estimación del caudal máximo de inyección de agua.....	42
3.1.3.	Pruebas de caracterización del ensayo	43
3.1.4.	Determinación de concentraciones para suspensión nCu-agua.	46
3.1.5.	Procesamiento y obtención de parámetros de combustión.	47
3.1.6.	Análisis estadístico.....	48
3.2.	Metodología para pruebas en motor Mercedes Benz.....	49
3.2.1.	Configuración de banco de pruebas experimental.....	49
3.2.2.	Banco de pruebas.....	51
3.2.3.	Instrumentación	52
3.2.5.	Procedimiento experimental y protocolo de medición.	56
CAPÍTULO 4: RESULTADOS.....		58
4.1.	Resultados de estabilidad.....	58
4.1.1.	Emulsión nCu- diésel	58
4.1.2.	Suspensión nCu-agua	59

4.1.3.	Transmitancia	60
4.2.	Resultados de pruebas de caracterización	61
4.3.	Metodología de análisis estadístico global.....	62
4.4.	Resultados ensayo motor Mercedes-Benz	64
4.4.1.	Desempeño	65
4.4.2.	Perfil de emisiones gaseosas	69
4.4.3.	Diagnóstico y parámetros cinéticos de la combustión	73
4.4.4.	Evolución temporal de quemado (CA10-90 y CA50).....	78
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....		81
5.1.	Conclusiones	81
5.2.	Recomendaciones para trabajos futuros.....	83
5.2.1.	Estabilidad y conservación nCu	83
5.2.2.	Modificaciones del sistema de inyección	84
Referencias		86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Métodos de adición de agua en MCI [14].	32
Figura 2. Método de emulsión agua/combustible [14].	33
Figura 3. Geometría clásica del cilindro de un motor [23].	22
Figura 4. Gráfico de presión vs ángulo de cigüeñal.	23
Figura 5. Gráfico de MFB vs ángulo de cigüeñal.	24
Figura 6. Formato de producto Cu-9 Schultz.	30
Figura 7. Probetas de 250 y 10 ml.	41
Figura 8. Pipeta graduada.	41
Figura 9. Espectrofotómetro.	42
Figura 10. Celdas de vidrio.	42
Figura 11. Esquema del banco de pruebas experimental.	50
Figura 12. Motor Mercedes-Benz OM366LA.	51
Figura 13. Freno dinamométrico Schenk.	51
Figura 14. Termocupla tipo K.	52
Figura 15. Sensor K6052CU20 [54].	52
Figura 16. Encoder KISTLER 2614D11 [55].	52
Figura 17. Kitorq [56].	53
Figura 18. Sistema de adquisición de datos [57].	53
Figura 19. Analizador de gases de escape.	53
Figura 20. Multímetro digital.	54
Figura 21. Balanza digital.	54
Figura 22. Bomba hidráulica.	54
Figura 23. Inyector de agua.	55
Figura 24. Manómetro.	55
Figura 25. Válvula de paso.	55
Figura 26. Diagrama del procedimiento experimental.	56
Figura 27. Muestra tras agitación.	58
Figura 28. Muestra precipitada.	58
Figura 29. Muestra previa agitación.	58
Figura 30. Gotas de aditivo en diésel.	58
Figura 31. Resultados para pruebas de decantación visual agua-nCu a 40 ppm de 0 a 60 minutos.	59
Figura 32. Resultados para pruebas de decantación visual agua-nCu a 40 ppm de 60 a 120 minutos.	59
Figura 33. Resultados de transmitancia para muestras de suspensión madre.	60
Figura 34. Resultados de BSFC para modos de carga de 100 % y 60 %.	65
Figura 35. Resultados de EGT para modos de carga de 100 % y 60 %.	66
Figura 36. Resultados de BMEP para modos de carga de 100 % y 60 %.	67
Figura 37. Resultados de NO para modos de carga de 100 % y 60 %.	69
Figura 38. Resultados de HC para modos de carga de 100 % y 60 %.	70
Figura 39. Resultados de CO para modos de carga de 100 % y 60 %.	71

Figura 40.Resultados de CO ₂ para modos de carga de 100 % y 60 %.	71
Figura 41.Resultados de O ₂ para modos de carga de 100 % y 60 %.	72
Figura 42.Curva de presión en función del ángulo de cigüeñal.	73
Figura 43. Resultados para presión máxima a modos de 100 % y 60 % de carga.	74
Figura 44.Resultados para posición de presión máxima a 100 % y 60 % de carga.	75
Figura 45.Curva de HRR en función del ángulo de cigüeñal a 100 % de carga.	75
Figura 46. Resultados para HRR máxima a 100 % y 60 % de carga.	76
Figura 47.Resultados para posición de HRR máxima a 100 % y 60 % de carga.	77
Figura 48.Resultados para duración de la combustión a 100 % y 60 % de carga.	78
Figura 49. Resultados para punto medio de la combustión a 100 % y 60 % de carga.	79
Figura 50. frascos con residuos de nCu tras almacenamiento.	83
Figura 51.Frasco precipitado con residuos de nCu.	84
Figura 52. Sistema de inyección de agua.	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Antecedentes experimentales de nCuO en diésel.	16
Tabla 2. Antecedentes experimentales de nCuO y nCu en biodiésel.	17
Tabla 3. Antecedentes experimentales de nCu metálico en diésel.	18
Tabla 4. Antecedentes experimentales inyección WI.	19
Tabla 5. Estudios generales sobre distribución y genotoxicidad de nanopartículas de cobre.	25
Tabla 6. Especificaciones producto Cu-9 Schultz.	30
Tabla 7. Datos para el cálculo de caudal de inyección de agua	43
Tabla 8. Resultados de caudal de inyección de agua de diseño.	43
Tabla 9. Resultados de caudal de agua medido para presiones de 8 y 4 bares.	44
Tabla 10. Resumen del diseño experimental para la caracterización del sistema de inyección.	44
Tabla 11. Condiciones de reacondicionamiento del ensayo experimental.	45
Tabla 12. Valores de temperatura de aire post- intercooler para ambos modos de carga.	45
Tabla 13. Datos de caudales promedio obtenidos.	61
Tabla 14. Resumen resultados ANOVA para ensayo de caracterización.	61
Tabla 15. Resultados de caudales masicos y concentración de nCu a 100% de carga.	62
Tabla 16. Resultados de caudales masicos y concentración de nCu a 60% de carga.	63
Tabla 17. Resultados para coeficiente de variabilidad de las concentraciones de nCu en diésel.	63
Tabla 18. Resultados de análisis de regresión lineal para modo de operación a 100% de carga.	63
Tabla 19. Resultados de análisis de regresión lineal para modo de operación a 60% de carga.	64
Tabla 21. Resultados para el cálculo de variaciones porcentuales a 100% de carga.	92
Tabla 22. Resultados para el cálculo de variaciones porcentuales a 60% de carga.	92
Tabla 23. Regulaciones sobre la exposición laboral a nanopartícula NIOSH.	1
Tabla 24. Regulaciones para exposición laboral de nanopartículas OSHA.	1
Tabla 25. Límites Permisibles Ponderados (LPP) de agentes químicos en el ambiente de trabajo.	2

LISTA DE ABREVIACIONES Y SIGLAS

Sigla	Significado	Unidad
MCI	Motor de Combustión Interna	
NP	Nanopartículas	
nCu	Nanopartículas de cobre metálico	
nCuO	Nanopartículas de óxido de cobre	
CuO	Óxido de cobre	
Cu ₂ O	Óxido cuproso	
WED	Water-Emulsion Diesel (emulsión agua-diésel)	
DWI	Direct Water Injection (inyección directa al cilindro)	
WI	Water Injection in intake (inyección de agua en la admisión)	
DI	Direct Injection	
ROS / ERO	Radicales o especies reactivas de oxígeno	
RES	Sistema reticuloendotelial	
PM	Material Particulado	
ISO	International Organization for Standardization	
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals	
CLP	Classification, Labelling and Packaging Regulation	
BSFC	Brake Specific Fuel Consumption	g/kWh
P_b	Potencia al freno	kW
BMEP	Brake Mean Effective Pressure	bar
n_R	Numero de ciclos del motor	
V_d	Densidad del aire	m ³
N	Velocidad de rotación del motor	rps
V	Volumen instantáneo del cilindro	m ³
V_C	Volumen del cilindro	m ³
r_c	Relación de compresión	
R	Relación biela-manivela	
HRR	Heat Release Rate (tasa de liberación de calor)	J/°CA

Sigla	Significado	Unidad
MFB	Fracción de masa quemada	[%]
P	Presión en el cilindro	Pa
γ	Coefficiente adiabático	
EGT	Exhaust Gas Temperature	°C
CA10	Instante en que se quema el 10% del combustible.	°CA
CA50	Instante en que se quema el 50% del combustible.	°CA
CA90	Instante en que se quema el 90% del combustible.	°CA
CA10 – 90	Duración de la combustión	°CA
P_{max}	Presión máxima en el cilindro	bar
θ_{Pmax}	Ángulo cuando se alcanza a presión máxima en el cilindro.	°CA
HRR_{max}	Tasa máxima de liberación de calor	J/°CA
θ_{HRRmax}	Ángulo cuando se alcanza a la tasa máxima de liberación de calor.	°CA
$\dot{Q}_c$	Flujo de calor de combustión del combustible	J
$\dot{m}_a$	Caudal másico de aire	kg
$\dot{m}_d$	Caudal másico de combustible diésel	kg
L_v	Calor latente de vaporización del agua	J/kg
$\dot{m}_{w,cr}$	Caudal masico de agua crítico, problema de misfire	kg/s
$C_{p,prod}$	Capacidad calorífica a presión constante de los productos de combustión	J/kg K
T_0	Temperatura inicial de la mezcla	K
T_{id}	Temperatura de autoignición del combustible	K
LHV	Poder calorífico inferior del diésel	J/kg
η_c	Eficiencia de la combustión	[%]
AFR	Relación de masa de aire y combustible	-
ω	Humedad absoluta	[%]
$P_{v,sat}$	Presión de vapor de saturación del agua	Pa
P_t	Presión absoluta de aire	Pa
$\dot{m}_{w,max}$	Caudal máximo de agua para saturación del aire	g/s
$\dot{m}_{w,ev}$	Caudal másico de agua evaporada	g/s

Sigla	Significado	Unidad
Δh_{fg}	Calor latente de evaporación del agua	J/kg
ΔT_c	Enfriamiento provocado por la evaporación de agua.	K
C_p	Capacidad calorífica a presión constante del aire	J/kg K
C_{nCu}	Concentración de nanopartículas de cobre metálico	ppm
$C_{nCu,w}$	Concentración de nanopartículas de cobre metálico en agua	ppm
$C_{nCu,d}$	Concentración de nanopartículas de cobre metálico en diésel	ppm
$\dot{m}_{nCu,w}$	Caudal másico de nCu en agua	g/s
$\dot{m}_{nCu,d}$	Caudal másico de nCu en diésel	g/s
$T_{a,post-dint}$	Temperatura del aire post-intercooler	°C
ρ_a	Densidad del aire	kg/m ³
v_a	Velocidad del aire de admisión.	m/s
D_d	Diámetro del ducto de admisión	mm

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Motivación del proyecto

Uno de los principales desafíos actuales del sector energético es reducir al mismo tiempo el impacto ambiental y el consumo de combustibles fósiles en aplicaciones industriales. El diésel sigue siendo la principal fuente de energía para el transporte de carga, la minería, la generación eléctrica y la industria pesada, gracias a su alta eficiencia energética y confiabilidad. Sin embargo, su consumo representa una parte importante de los costos operativos, sobre todo en Chile, donde el precio depende en gran medida de las variaciones del mercado internacional del petróleo. En este escenario, incluso pequeñas mejoras en el consumo específico de combustible (BSFC) pueden generar ahorros significativos en equipos de alta potencia o en flotas que trabajan miles de horas al año. Por eso existe interés en desarrollar tecnologías que mejoren la eficiencia de la combustión y bajen las emisiones sin tener que modificar el diseño de los motores. Entre estas alternativas destacan los nanoaditivos. La mayoría de los estudios se ha centrado en nanopartículas de óxido de cobre (nCuO) dispersas directamente en el combustible, un método que presenta problemas serios de aglomeración, sedimentación y baja estabilidad, y que suele requerir surfactantes y equipos especializados. Además, hay muy poca información sobre nanopartículas de cobre metálico (nCu) y prácticamente ningún antecedente sobre su uso mediante inyección acuosa en la admisión. Este trabajo busca cubrir esa brecha evaluando el efecto de inyectar una suspensión acuosa de nanopartículas de cobre metálico (nCu) en el conducto de admisión de aire (después del intercooler) de un motor diésel Mercedes-Benz OM366LA. La idea es superar los problemas de estabilidad que aparecen al mezclar las nanopartículas directamente con el diésel, usando el agua como medio de transporte, y analizar su influencia sobre el desempeño, las emisiones y las características de la combustión.

1.2. Estado del arte

Esta revisión busca identificar las tendencias, beneficios, limitaciones y brechas de conocimiento relacionadas con el uso de nanopartículas de cobre en motores diésel y con las tecnologías de inyección de agua.

1.2.1. Antecedentes de nCu en motores diésel

La revisión bibliográfica mostró que la mayoría de las investigaciones han utilizado nanopartículas de óxido de cobre (nCuO), mientras que los estudios sobre nanopartículas de cobre metálico (nCu) son escasos y no se identificaron antecedentes que evaluaran su incorporación mediante inyección acuosa en la admisión de aire. Esta limitada evidencia se atribuye principalmente a las dificultades asociadas a su manipulación y estabilización, ya que su elevada densidad favorece la sedimentación y su alta reactividad dificulta la obtención de suspensiones estables, favoreciendo el uso de nCuO en la mayoría de las investigaciones. En este contexto, la ausencia de estudios que empleen esta estrategia de alimentación constituye la principal brecha identificada y motiva el desarrollo del presente trabajo, el cual propone una metodología alternativa para incorporar las nanopartículas utilizando el agua como medio de transporte.

NCuO en diésel

Entre los estudios revisados sobre la adición de nanopartículas de óxido de cobre (nCuO) en diésel destaca el de Ağbulut et al. (2021) [1]. Evaluaron concentraciones de 1000 y 2000 ppm en un motor monocilíndrico de inyección directa refrigerado por aire y reportaron mejoras claras en la eficiencia térmica al freno (BTE), bajadas en el consumo específico de combustible (BSFC) y menores emisiones de CO, HC y NOx, junto con una reducción en la temperatura de los gases de escape. Sherry Khulief y Aboul-Fotouh (2017) [2] probaron 100, 200 y 300 ppm en un motor monocilíndrico diésel-gas natural y concluyeron que 300 ppm daba el mejor equilibrio entre rendimiento y emisiones, aunque observaron un aumento en la temperatura de los gases de escape (alrededor de 450 °C), al contrario de lo que reportaron Ağbulut et al. Otro antecedente importante es el de Hasannuddin et al. [3], que incorporaron distintas nanopartículas metálicas, entre ellas nCuO a 50 ppm, en una emulsión agua-diésel al 10 % (E10). La adición de nCuO mejoró el retardo de ignición y bajó el BSFC respecto a la emulsión sola, aunque este seguía siendo más alto que el del diésel puro. También

se vieron reducciones en HC y un comportamiento mixto en CO y NO_x. Al subir a concentraciones de 100-200 ppm aparecieron vibraciones intensas en el motor, lo que apunta a un límite práctico en la dosificación. Aunque este estudio dispersó el nCuO directamente en la emulsión y no usó un sistema de inyección acuosa independiente, sus resultados son de los más cercanos al presente trabajo, al combinar agua y nanopartículas de cobre.

Tabla 1. Antecedentes experimentales de nCuO en diésel.

Combustible	Tamaño NP [nm]	BTE	BSFC	ID	HC	NO _x	CO	EGT	Ref.
1000 ppm nCuO	<77	↑	↓	-	↓	↓	↓	↓	[1]
2000 ppm nCuO	<77	↑↑	↓↓	-	↓↓	↓	↓↓	↓↓	[1]
100 ppm nCuO	35 ± 6	↑	↓	-	—	—	—	↑	[2]
200 ppm nCuO	35 ± 6	↑↑	↓↓	-	—	—	—	↑	[2]
300 ppm nCuO	35 ± 6	↑↑↑	↓↓↓	-	—	—	—	↑	[2]
E10	-	↓	↑	-	↑	↓	↓	↓	[3]
E10 + 50 ppm nCuO	-	↑ E10	↓ E10, pero > D	↓	↓	↓ D ↑ E10	↑ D ↓ E10	↑	[3]

En general, la incorporación de nCuO en diésel tiende a mejorar la eficiencia de combustión, aumentando la BTE y reduciendo el BSFC. La mayoría de los estudios también reporta disminuciones en CO y HC, atribuibles al efecto catalítico de las nanopartículas. Sin embargo, los resultados en NO_x y temperatura de gases de escape son menos consistentes y dependen fuertemente de la concentración, las condiciones de operación y el tipo de motor.

NCuO en biodiésel

En mezclas diésel-biodiésel los resultados siguen patrones parecidos. Garugubilli et al. (2024) [4] probaron 75 ppm de nCuO en una mezcla B20 de Azadirachta indica con distintos dispersantes y resaltaron que la estabilidad de la suspensión es clave para el buen desempeño del aditivo. El dispersante QPAN80 fue el más efectivo y la formulación B20 + CuO 75 + QPAN80 dio los mejores resultados: mayores subidas en eficiencia térmica y las menores emisiones de CO, HC, NO_x y humo. Rastogi et al. (2021) [5] ensayaron 25, 50 y 75 ppm de nCuO en una mezcla JB20 de jojoba y observaron mejoras en eficiencia térmica, presión máxima de combustión y tasa de liberación de calor, junto con bajadas de BSFC, CO, HC y humo, aunque con un ligero aumento de NO_x y CO₂. Surendrababu et al. (2022) [6] y Karthikeyan (2019) [7] también reportaron incrementos en eficiencia térmica y reducciones de CO y HC al

añadir nCuO en mezclas PSME20 y B20, respectivamente, con subidas de NOx en algunos casos. Un caso especial es el de Muniyappan y Krishnaiah (2024) [8], uno de los pocos que usó nanopartículas de cobre metálico (nCu) en lugar de CuO. Evaluaron 25, 50 y 75 ppm en una mezcla M20 de biodiésel de mahua y encontraron que 50 ppm ofrecía el mejor equilibrio: mejoras en eficiencia térmica, reducciones de BSFC, HC, CO y humo, aunque con un aumento moderado de NOx. Por último, Kalaimurugan et al. (2023) [9] incorporaron nCuO₂ (<50 nm) a 25, 50 y 75 ppm en una mezcla B20 de biodiésel de *Neochloris oleoabundans*. Obtuvieron una ligera mejora en eficiencia térmica, menor consumo específico y bajadas de CO, HC y humo, pero acompañadas de incrementos en NOx y en la temperatura de los gases de escape.

Tabla 2. Antecedentes experimentales de nCuO y nCu en biodiesel.

Mezcla	Concentración [ppm]	BTE	BSFC	PC	HRR	HC	NOx	CO	Humo	EGT	Ref.
B20 + CuO	75	↑↑	↓↓	↑	↑	↓↓	↓	↓↓	↓↓↓	–	[4]
JB20 + CuO	25-75	↑	↓	↑	↑	↓	↑	↓	↓	↑	[5]
PSME20 + CuO	50-100	↑	↓	↑	↑	↓↓	↑	↓↓	↓	↑	[6]
B20 + CuO	50	↑	↓	–	–	↓	–	↓	–	–	[7]
M20 + nCu	25-75	↑	↓↓	–	↑	↓↓	↑	↓↓	↓↓	–	[8]
B20 + CuO ₂	25-75	↑	↓	↑	↑	↓	↑	↓	↓	↑	[9]

En conjunto, los estudios en mezclas diésel-biodiésel muestran que las nanopartículas a base de cobre (nCuO y nCu) tienden a mejorar la eficiencia de combustión y reducir CO, HC y humo, gracias al efecto catalítico y a una combustión más completa. Sin embargo, existe una tendencia al aumento de las emisiones de NOx y, en algunos casos, de la temperatura de los gases de escape.

NCu en diésel

El único antecedente identificado con nanopartículas de cobre metálico (nCu) en diésel es el estudio de Pascual (2024) [10], realizado en la Universidad Técnica Federico Santa María. En este, se evaluaron concentraciones entre 10 y 40 ppm con diferentes dispersantes y a cargas de 60, 80 y 100 %. Los mejores resultados se obtuvieron con 40 ppm y dispersante ABS: incrementos en BTE, reducciones en BSFC e importantes disminuciones de HC y CO, con comportamiento variable en NOx según la carga.

Tabla 3. Antecedentes experimentales de nCu metálico en diésel.

Carga [%]	nCu [ppm]	BTE	BSFC	HC	NO _x	CO ₂	CO	O ₂	Ref.
60	10–40	↑	↓	↓↓	Variable	↑	Variable	Variable	[10]
80	10–40	↑	~	↓↓	↑	↑	Variable	Variable	[10]
100	10–40	↑	~	↓↓↓	↑	↑	↑	↑	[10]

De acuerdo con la literatura revisada, las nanopartículas de cobre muestran un potencial interesante como aditivos: suelen mejorar la eficiencia térmica y reducir el consumo específico de combustible y las emisiones de HC y CO. Sin embargo, los efectos sobre NO_x y la temperatura de escape son variables y dependen fuertemente de la concentración, el tipo de nanopartícula y las condiciones de operación. Además, la estabilidad de la suspensión sigue siendo uno de los principales desafíos para su aplicación práctica. La mayoría de los estudios utiliza tamaños inferiores a 50 nm y concentraciones en el orden de ppm, destacando la importancia de un buen control de las características fisicoquímicas del aditivo.

1.2.2. Antecedentes experimentales WI.

Varios estudios han evaluado los efectos de la inyección de agua en la admisión bajo distintas condiciones. Şahin et al. (2014) [15] analizaron relaciones agua/diésel entre 2 % y 12 % en volumen en un motor Renault K9K, a diferentes cargas y velocidades. Observaron una bajada clara de las emisiones de NO_x y del índice de humo a medida que aumentaba la fracción de agua inyectada. El consumo específico de combustible (BSFC) y la potencia variaron poco, con una reducción máxima cercana al 4 % en BSFC y un leve aumento de eficiencia en algunas condiciones. Kettner et al. (2016) [16] probaron relaciones agua/diésel desde 0 % hasta 100 % en carga parcial (BMEP de 2 a 5 bar). Registraron una fuerte caída de la temperatura de combustión y de las emisiones de NO_x (hasta 63 % a BMEP de 5 bar con 100 % de agua). Sin embargo, el material particulado aumentó cuando la relación superaba el 40 %. El BSFC casi no cambió. En un estudio hecho en la Universidad Técnica Federico Santa María, Ortega (2021) [17] ensayó relaciones agua/diésel de 27 %, 54 % y 143 % a plena carga y 3000 rpm en un motor Perkins. La relación más alta (143 %) dio el mejor resultado general, con bajadas en NO_x, HC y CO, aunque subió el PM_{2.5}. No se vieron cambios importantes en potencia ni en BSFC, pero sí disminuciones notables en las temperaturas de admisión y de gases de escape (hasta 56 % en algunas variables). Subramanian [18] comparó emulsión e inyección directa y reportó reducciones de NO_x (37,6 %) y humo (11,1 %) con la inyección, junto con menores aumentos en HC y CO que con la emulsión. Por último, Tauzia et al. [19] estudiaron la

inyección post-intercooler con relaciones agua/diésel de hasta 400 %. Concluyeron que una relación masa agua/combustible entre 0,60 y 0,65 permite bajar los NO_x cerca del 50 % gracias al enfriamiento de la carga. La técnica generó poco o ningún aumento de PM en comparación con el EGR, aunque alargó el retardo de ignición y produjo una ligera penalización en BSFC y eficiencia térmica a altas tasas de inyección.

Tabla 4. Antecedentes experimentales inyección WI.

Motor	W/F [%]	Punto de inyección	NO _x	HC	CO	PM	BSFC	ID	Ref.
Renault K9K	2,4–14,4	Antes del turbo	↓	–	–	↓	≈	↑	[15]
Kirloskar TV1	0–100	Antes del intercooler	↓↓	–	–	↑	≈		[16]
Perkins Prima M80T	27–143	Antes del colector	↓	↓	↓	↑	≈		[17]
Kirloskar, TV1	40-100	Colector de admisión	↓	-	-	-	-	-	[18]
PSA (Peugeot/Citroën) de 2.0 litros (DW10 ATED),	0-400	Colector de admisión	↓	-	-	↑	↑	↑	[19]

Los estudios revisados cubren un rango muy amplio de relaciones agua/combustible, desde valores bajos (~2 %) hasta proporciones que superan la unidad. La mayoría de los investigadores coloca el punto de inyección antes del intercooler o del turbocompresor, aprovechando las altas temperaturas de esas zonas para facilitar la evaporación del agua. Sin embargo, la inyección post-intercooler se ha estudiado mucho menos, sobre todo por la menor temperatura del aire de admisión y el poco tiempo disponible para que el agua se evapore antes de entrar al cilindro. Aun así, esta configuración resulta más atractiva para el presente trabajo por su mayor simplicidad de implementación y porque permite usar el agua como medio de transporte de las nanopartículas de cobre, al mismo tiempo que reduce el riesgo de dañar los componentes del turbocompresor que existiría si se inyectara en puntos anteriores.

1.2.3. Síntesis del estado del arte

La revisión bibliográfica permite identificar cuatro conclusiones principales:

- Las nanopartículas de cobre poseen propiedades catalíticas que pueden mejorar el proceso de combustión.
- La mayoría de los estudios disponibles han utilizado nanopartículas de óxido de cobre dispersas directamente en combustibles líquidos.

- La estabilidad de las mezclas combustible–nanopartículas sigue siendo una limitación importante.
- No se encontraron investigaciones que evalúen la incorporación de nanopartículas de cobre metálico mediante inyección acuosa en la admisión de motores diésel.

En resumen, las nanopartículas de cobre tienen potencial para mejorar la combustión y reducir emisiones, pero los problemas de estabilidad siguen siendo un obstáculo. Entre los sistemas de inyección de agua, la inyección en la admisión destaca por su simplicidad. La falta de estudios que combinen inyección acuosa con nCu metálico es la principal brecha que motiva este trabajo.

1.3. Objetivo general

Evaluar el desempeño y emisiones del motor Mercedes-Benz OM 366LA durante la inyección acuosa de nanopartículas de cobre.

1.3.1. Objetivos específicos

- Adaptar e instrumentar el banco de pruebas del motor Mercedes-Benz OM 366LA para la inyección de suspensión acuosa de nanopartículas de cobre en la admisión de aire.
- Medir experimentalmente el consumo específico de combustible, las emisiones y los parámetros indicados del motor durante la inyección de suspensión acuosa de nanopartículas de cobre.
- Determinar el efecto combinado de la inyección directa de agua en la admisión de aire, las y de la adición de nanopartículas de cobre metálico sobre el desempeño, las emisiones y parámetros indicados del motor.

1.4. Hipótesis

La incorporación de nanopartículas de cobre metálico mediante una suspensión acuosa inyectada en la admisión de aire permitirá mejorar la combustión del motor Mercedes-Benz OM366LA, logrando una reducción en el consumo específico de combustible y en las emisiones contaminantes en comparación con la inyección de agua sin nanopartículas.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. Propiedades de funcionamiento de MCI

A continuación, se definen los principales parámetros de desempeño, emisiones y características de la combustión utilizados para evaluar el motor diésel.

2.1.1. Consumo específico de combustible al freno (BSFC)

El consumo específico de combustible al freno (BSFC) es uno de los principales indicadores utilizados para evaluar la eficiencia de un motor, ya que representa la cantidad de combustible consumida por cada unidad de trabajo útil producido, expresándose habitualmente en g/kWh. El término *al freno* indica que la medición se realiza directamente sobre el eje de salida del motor mediante un dinamómetro, registrando simultáneamente el consumo de combustible y la potencia efectiva entregada [20-21]. De esta manera, el BSFC permite comparar objetivamente la eficiencia energética entre distintos motores o condiciones de operación, independientemente de su tamaño o potencia nominal.

$$BSFC[kg/kWh] = \frac{\dot{m}_d[\frac{kg}{h}]}{P_b[kW]} \quad (1)$$

2.1.2. Presión media efectiva (BMEP)

La presión media efectiva al freno (BMEP) es un parámetro teórico que representa la presión constante que, si actuara uniformemente sobre el pistón durante todo el ciclo, produciría el mismo par motor que el desarrollado realmente en el eje de salida. Este parámetro constituye un indicador útil del desempeño del motor, ya que permite comparar su capacidad para generar par independientemente de la cilindrada o del número de cilindros. Asimismo, facilita la evaluación del nivel real de carga bajo el cual opera el motor [22].

$$BMEP[kPa] = \frac{10^3 \cdot P_b \cdot n_R}{V_d[dm^3]N[rev/s]} \quad (2)$$

2.1.3. Emisiones y temperatura de gases de escape

Las emisiones contaminantes constituyen uno de los aspectos más relevantes en la evaluación de motores diésel. Entre las principales emisiones reguladas se encuentran los óxidos de nitrógeno (NO_x), el monóxido de carbono (CO), el dióxido de carbono (CO₂), los hidrocarburos no quemados (HC) y el oxígeno residual (O₂). La formación de estos compuestos depende principalmente de la temperatura alcanzada durante la combustión, de la relación aire-combustible y del instante en que se desarrolla el proceso de combustión. Por esta razón, también se registra la temperatura de los gases de escape (TEG), ya que constituye un indicador del estado térmico del motor e influye directamente en la formación de emisiones: temperaturas elevadas favorecen la generación de NO_x, mientras que también promueven la oxidación de CO y HC cuando existe suficiente disponibilidad de oxígeno y tiempo de residencia. En conjunto, el análisis de las emisiones y de la temperatura de escape permite evaluar los compromisos existentes entre desempeño, consumo de combustible e impacto ambiental.

2.1.4. Volumen instantáneo del cilindro

El volumen instantáneo del cilindro corresponde al volumen ocupado por la cámara de combustión para cada posición del pistón durante el ciclo del motor. Este se determina a partir del ángulo de giro del cigüeñal y de la geometría del mecanismo biela-manivela. Su cálculo es indispensable para la determinación de la tasa de liberación de calor (HRR), ya que permite conocer la evolución del volumen y su variación durante el proceso de combustión, parámetros necesarios para el análisis termodinámico del cilindro.

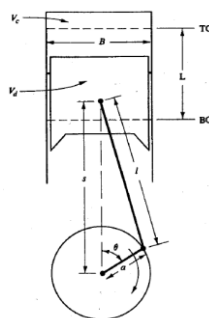


Figura 1. Geometría clásica del cilindro de un motor [23].

$$V(\theta) = V_c \left[1 + \frac{1}{2} (r_c - 1) \left[R + 1 - \cos\theta - (R^2 \sin^2\theta)^{\frac{1}{2}} \right] \right] \quad (3)$$

2.1.5. Presión en el cilindro

La presión dentro del cilindro es uno de los parámetros más importantes para analizar la combustión en motores diésel. Refleja la evolución de la liberación de energía a lo largo del ciclo termodinámico y resulta de la interacción entre la compresión del aire, la inyección y combustión del combustible, la expansión de los gases y el movimiento del pistón.

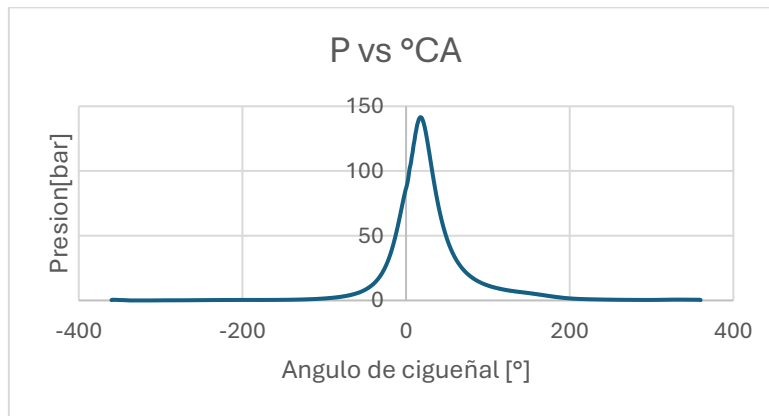


Figura 2. Gráfico de presión vs ángulo de cigüeñal.

Del análisis de la curva de presión se obtienen indicadores clave como la presión máxima y el ángulo en que esta ocurre. Estos valores permiten evaluar la intensidad de la combustión y su correcta sincronización respecto al Punto Muerto Superior (PMS), aspectos que influyen directamente en el rendimiento y las emisiones del motor.

2.1.6. Tasa de liberación de calor (HRR)

La tasa de liberación de calor (Heat Release Rate, HRR) expresa la velocidad a la que se libera la energía química del combustible dentro del cilindro. Se calcula a partir de los registros de presión en el cilindro y la variación del volumen con el ángulo de cigüeñal [24].

$$\frac{\delta Q_{HRR}}{d\theta} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{\gamma - 1} V \frac{dP}{d\theta} \quad (4)$$

A partir de la curva de HRR es posible determinar el valor máximo de la tasa de liberación de calor y el ángulo en que este ocurre. Estos parámetros permiten caracterizar la intensidad y el instante de mayor liberación de energía durante la combustión.

2.1.7. Fracción de masa quemada (MFB)

La fracción de masa quemada (Mass Fraction Burned, MFB) representa la proporción acumulada del calor liberado respecto al calor total liberado al final de la combustión. Se obtiene integrando la tasa de liberación de calor aparente y normalizándola [25].

$$MFB(\theta) = \frac{\int_{\theta_{SOC}}^{\theta} \frac{dQ_{HRR}}{d\theta} d\theta}{\int_{\theta_{SOC}}^{\theta_{EOC}} \frac{dQ_{HRR}}{d\theta} d\theta} \quad (5)$$

De esta curva se definen los parámetros CA10, CA50 y CA90, que corresponden a los ángulos de cigüeñal donde se ha quemado el 10 %, 50 % y 90 % de la masa de combustible, respectivamente. Estos indicadores permiten caracterizar las diferentes etapas de la combustión y evaluar el efecto de cambios en el combustible o en las condiciones de operación.

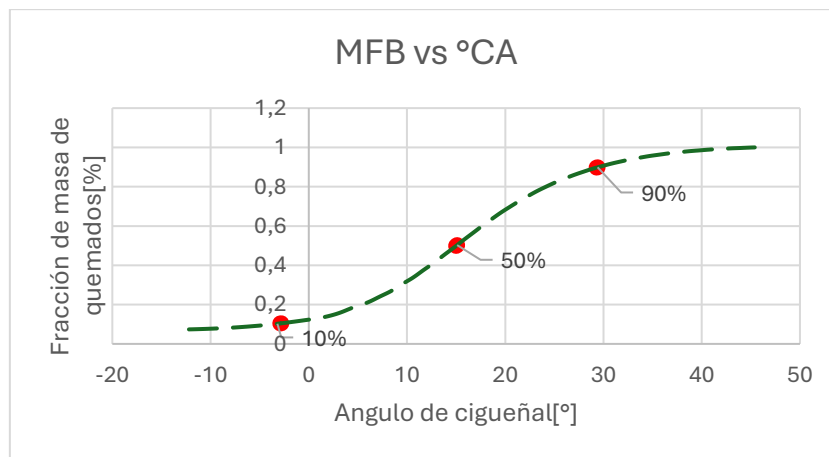


Figura 3. Gráfico de MFB vs ángulo de cigüeñal.

2.2. Toxicidad y riesgos asociados al uso de nCu

Uno de los aspectos fundamentales al considerar la aplicación de nanomateriales es evaluar su potencial toxicológico y los riesgos asociados para la salud humana. Este análisis permite establecer medidas de manipulación seguras y determinar la viabilidad técnica y ambiental de su implementación. Aunque las concentraciones empleadas en aplicaciones energéticas son considerablemente inferiores a las utilizadas en estudios toxicológicos, resulta necesario comprender los principales mecanismos de toxicidad para definir criterios de manejo y almacenamiento adecuados.

2.2.1. Toxicidad y riesgos asociados al uso de nCu

La toxicidad de las nanopartículas depende sobre todo de su tamaño. Cuanto más pequeñas son, mayor es la relación superficie/volumen, lo que aumenta su reactividad química, la liberación de iones y la interacción con las células. También influyen la concentración, el tiempo de exposición, el estado de agregación, la estabilidad coloidal y las propiedades del medio, además de la composición química y los recubrimientos superficiales [26-38]. Estudios como los de Prabhu et al. [26], Na y Kennedy [38] y Wongrakpanich et al. [27] confirman que las partículas más pequeñas y las concentraciones más altas producen mayor toxicidad y más especies reactivas de oxígeno (ROS).

Tabla 5. Estudios generales sobre distribución y genotoxicidad de nanopartículas de cobre.

Tamaño de nCu [nm]	Sistema evaluado	Principales hallazgos	Referencia
40–80 nm	Cultivos celulares	Mayor citotoxicidad al disminuir el tamaño de partícula.	[26]
25–80 nm	Células humanas	Producción de ROS dependiente del tamaño y la concentración.	[27]
20–60 nm	<i>Escherichia coli</i>	Estrés oxidativo y daño de la membrana celular.	[28]
<50 nm	Modelos animales	Potencial distribución sistémica y bioacumulación.	[29]

En general, la evidencia muestra que la toxicidad depende principalmente del tamaño, la concentración y las condiciones del medio. Sin embargo, la mayoría de estos estudios se realizaron con exposiciones directas y concentraciones mucho más altas que las usadas en este trabajo. Por eso, estos antecedentes se utilizan principalmente como referencia para establecer medidas de manipulación segura y gestión de residuos.

2.2.2. Mecanismos de toxicidad

La toxicidad de las nanopartículas de cobre se atribuye principalmente a la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) y a la liberación de iones Cu^{2+} , procesos que inducen estrés oxidativo y pueden provocar daños en membranas celulares, proteínas y material genético [28]–[31]. La magnitud de estos efectos depende de factores como la dosis, el tiempo

de exposición y las características fisicoquímicas de las partículas. No obstante, es importante señalar que la mayoría de estos estudios se realizó bajo condiciones de exposición directa y utilizando concentraciones considerablemente superiores a las empleadas en aplicaciones energéticas, por lo que la extrapolación de sus resultados a sistemas de combustión debe realizarse con cautela.

2.2.3. Vías de ingreso

Las principales vías de exposición a nanopartículas de cobre corresponden a la inhalación, la ingestión y la absorción dérmica, siendo la inhalación la de mayor relevancia en aplicaciones experimentales. Diversos estudios han demostrado que exposiciones prolongadas a concentraciones significativamente superiores de nCu pueden provocar procesos inflamatorios y estrés oxidativo [32]–[34]. Sin embargo, en el presente trabajo se emplearon concentraciones del orden de ppm y un sistema de alimentación cerrado, por lo que estos antecedentes se utilizaron principalmente como base para definir las medidas de seguridad durante la preparación y manipulación de las suspensiones.

2.2.4. Implicancias para aplicaciones en motores de combustión interna.

Aunque la literatura reporta efectos adversos asociados al uso de nanopartículas de cobre, la mayoría de los estudios se realizó bajo condiciones muy distintas a las presentes en un motor diésel, considerando exposiciones directas y concentraciones significativamente superiores a las empleadas en este trabajo. Durante la combustión, las nanopartículas quedan sometidas a elevadas temperaturas y presiones, condiciones que pueden favorecer su oxidación o incorporación al material particulado generado durante el proceso [39]–[44]. En consecuencia, el principal riesgo potencial se concentra en las etapas de preparación y manipulación de las suspensiones, más que durante la operación normal del motor. En este contexto, la inyección acuosa en la admisión constituye una alternativa favorable, ya que evita la dispersión directa de nanopartículas en el combustible y facilita el control de la dosis suministrada. Además, en el presente estudio se emplearon concentraciones del orden de ppm y un sistema de alimentación cerrado, con el propósito de minimizar la exposición del operador durante el desarrollo de los ensayos.

2.3. Marco normativo para NP

Actualmente no existe un marco regulatorio internacional único y específico para la nanotecnología. Sin embargo, diversos países y organismos han desarrollado normas y directrices para la producción, manipulación, comercialización y gestión de materiales nanométricos. Dado que este trabajo propone el uso de nanopartículas de cobre metálico con posible aplicación futura, resulta pertinente revisar los principales marcos regulatorios de Chile, Estados Unidos y la Unión Europea.

Es importante aclarar que la estrategia estudiada no consiste en desarrollar un nuevo combustible diésel con aditivo, sino en inyectar de forma independiente una suspensión acuosa de nanopartículas en el conducto de admisión. A diferencia de las emulsiones agua-diésel (donde el agua forma parte del combustible y debe cumplir sus especificaciones), en este caso el combustible inyectado por el sistema original sigue siendo diésel comercial. El agua se evapora progresivamente durante la admisión y compresión, incorporando las nanopartículas a la mezcla aire-diésel. Por esta razón, el análisis normativo se centra en los aspectos relacionados con la manipulación y uso seguro de nanopartículas, más que en las regulaciones del combustible diésel.

2.3.1. REACH.

El Reglamento REACH de la Unión Europea establece los procedimientos de registro, evaluación, autorización y restricción de sustancias químicas comercializadas en su territorio. Su objetivo es garantizar un alto nivel de protección de la salud humana y del medio ambiente, incluyendo aquellas sustancias comercializadas en forma nanométrica [45].

2.3.2. CLP

El Reglamento CLP define criterios normalizados para la clasificación, etiquetado y envasado de sustancias químicas peligrosas en la Unión Europea. Esto permite comunicar de manera clara los riesgos asociados a su manipulación y almacenamiento, aspecto especialmente relevante si se considera una eventual comercialización de aditivos que contengan nanopartículas metálicas [46].

2.3.3. OSHA

En Estados Unidos, la Occupational Safety and Health Administration (OSHA) ha emitido directrices para la manipulación segura de materiales particulados potencialmente peligrosos, recomendando medidas de protección respiratoria y control de exposición ocupacional aplicables al manejo de nanomateriales [47].

2.3.4. DS 594 (Chile)

En materia de seguridad laboral, el Decreto Supremo N° 594 del Ministerio de Salud establece las condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo, regulando la exposición a agentes químicos peligrosos. [48].

2.3.5. DS 148 (Chile)

El manejo de residuos peligrosos generados en los ensayos se rige por el Decreto Supremo N° 148. Los residuos de las suspensiones de nanopartículas fueron gestionados considerando los criterios para residuos potencialmente peligrosos, dada la incertidumbre existente sobre sus posibles efectos ambientales y toxicológicos [49].

En resumen, los marcos regulatorios revisados destacan la necesidad de adoptar medidas específicas para la manipulación segura de nanopartículas de cobre, tanto en la protección de las personas como en la gestión de residuos. Estas consideraciones fueron incorporadas desde el diseño y a lo largo de toda la metodología experimental del presente trabajo.

2.4. Nanopartículas de cobre aplicadas a motores diésel

De acuerdo con la norma ISO 8004-2:2015 [50], las nanopartículas se definen como objetos cuyas tres dimensiones se encuentran entre 1 y 100 nm. A esta escala desarrollan un comportamiento diferente al de sus materiales en estado macroscópico, principalmente debido a su elevada relación superficie/volumen, la cual incrementa su reactividad química y modifica de manera importante sus características fisicoquímicas. Estas particularidades han despertado un creciente interés en áreas como la tecnología, la medicina y la agricultura. En este contexto, las nanopartículas a base de cobre destacan por sus propiedades catalíticas, su amplia disponibilidad y su menor costo de producción en comparación con otros nanomateriales metálicos.

2.4.1. Propiedades relevantes para procesos de combustión.

- **Elevada área superficial:** Debido a su reducido tamaño, las nanopartículas tienen una gran relación superficie/volumen, lo que aumenta considerablemente la cantidad de átomos expuestos (sitios activos). Esto incrementa el área de contacto con el medio circundante.

- **Actividad catalítica:** Las nanopartículas de cobre presentan una elevada actividad catalítica, principalmente gracias a su gran superficie específica. Los sitios activos en su superficie favorecen la adsorción temporal de moléculas de combustible, oxígeno y especies intermedias generadas durante la combustión. Esto facilita rutas de reacción alternativas con menor energía de activación, acelerando la cinética de las reacciones de oxidación.

Además, durante el proceso de combustión las nanopartículas pueden participar en ciclos redox, alternando entre los estados de oxidación Cu^0 , Cu^+ y Cu^{2+} . Este intercambio electrónico ayuda a generar y regenerar especies reactivas, promoviendo una oxidación más completa del combustible hacia CO_2 y H_2O , y reduciendo la formación de productos de combustión incompleta (CO e HC). En motores diésel, estos mecanismos pueden acortar el retardo de ignición, aumentar la velocidad de las reacciones y lograr una liberación de calor más eficiente, lo que se traduce en menor consumo específico de combustible y menores emisiones de CO e hidrocarburos.

- **Conductividad térmica:** El cobre mantiene una elevada conductividad térmica incluso a escala nanométrica. Las nanopartículas pueden absorber y transferir calor rápidamente, favoreciendo una distribución más uniforme de la energía térmica durante las etapas iniciales de la combustión. Esto puede acelerar el calentamiento local de la mezcla aire-combustible y mejorar los procesos de evaporación y oxidación del combustible.

2.5. Producto utilizado

En este trabajo se eligieron nanopartículas de cobre metálico (nCu) disueltas en agua e inyectadas en la admisión de aire. De esta forma se aprovechan las propiedades catalíticas y de transferencia de calor del cobre, al tiempo que se reducen problemas como la oxidación prematura, la sedimentación y la necesidad de surfactantes que suelen aparecer cuando se dispersan directamente en el diésel. El producto usado es el aditivo “Cu-9 Schultz” de Industrial Nano. Se trata de una suspensión acuosa con nanopartículas de cobre metálico de 7,5 nm de diámetro promedio. Aunque originalmente se diseñó como agente antimicrobiano, actúa liberando de forma controlada iones Cu^+ y Cu^{2+} , que generan radicales hidroxilos ($\text{OH}^\bullet$) muy reactivos. El pequeño tamaño (7,5 nm) implica una mayor reactividad superficial y la posible generación de especies reactivas de oxígeno (ROS), lo que suele asociarse a mayor toxicidad. En este enfoque se busca reducir esos riesgos con dos medidas principales: dispersarlas en agua en lugar de diésel, lo que mejora la estabilidad y limita la oxidación

prematura, y usar concentraciones muy bajas (del orden de ppm). Además, al inyectarse en la admisión, las nanopartículas quedan expuestas a altas temperaturas y presiones durante la combustión, lo que favorece su oxidación o su incorporación al material particulado y reduce la probabilidad de que se liberen al ambiente en forma metálica libre. Este aditivo tiene buena compatibilidad en medios acuosos y forma suspensiones estables sin necesidad de surfactantes adicionales. Su tamaño reducido (7,5 nm), menor que el rango habitual en estudios experimentales (20–50 nm), resulta especialmente útil porque aumenta la relación superficie/volumen y potencia su posible efecto catalítico durante la combustión.



Figura 4. Formato de producto Cu-9 Schultz.

Tabla 6. Especificaciones producto Cu-9 Schultz.

Apariencia	Líquido marrón oscuro.
Composición	Coloide acuoso de cobre metálico.
Tamaño hidrodinámico medio de partícula	<10 nm
Concentración	6500-8500 ppm
Densidad relativa	1.0-1.2 g/cm ³
Solubilidad	Altamente soluble en medio acuoso

2.6. Concentración de nCu equivalente en diésel

La concentración de nanopartículas en el combustible diésel está determinada por la cantidad de nCu dispersa en el agua inyectada, que actúa como medio de transporte de las nanopartículas hasta la cámara de combustión. Una vez allí, el agua se evapora y las nanopartículas quedan incorporadas a la mezcla combustible-aire.

$$C_{nCu} = \frac{\dot{m}_{nCu}}{\dot{m}_{solución}} \times 10^6 [ppm] \quad (6)$$

Las concentraciones de nCu en agua y en diésel se calculan mediante las siguientes expresiones:

$$C_{nCu,w} = \frac{\dot{m}_{nCu,w}}{\dot{m}_w} \times 10^6 [ppm] \quad (7)$$

$$C_{nCu,d} = \frac{\dot{m}_{nCu,d}}{\dot{m}_d} \times 10^6 [ppm] \quad (8)$$

Considerando que la masa de nCu transportada por el agua es equivalente a la masa que finalmente se incorpora al combustible, se puede despejar la siguiente relación:

$$\dot{m}_{nCu,d} = C_{nCu,d} \cdot \dot{m}_d \quad (9)$$

Finalmente, la concentración de nCu en el agua se obtiene con la expresión:

$$C_{nCu,w} = C_{nCu,d} \cdot \left(\frac{\dot{m}_d}{\dot{m}_w} \right) [ppm] \quad (10)$$

La expresión anterior asume que la totalidad de las nanopartículas suspendidas en el agua llega efectivamente a la cámara de combustión, sin considerar posibles pérdidas por deposición en el sistema de admisión.

2.7. Inyección de agua en motores diésel

La inyección de agua en motores diésel ha sido ampliamente estudiada por su capacidad para reducir emisiones contaminantes, especialmente óxidos de nitrógeno (NOx), hollín y material particulado (PM). También se han reportado beneficios en el rendimiento del motor, tales como la mitigación de detonación y, en algunos casos, una ligera disminución del consumo de combustible.

El principio fundamental de esta técnica radica en la reducción de la temperatura máxima de combustión. Gracias a su elevado calor latente de vaporización, el agua absorbe una cantidad considerable de energía al evaporarse, actuando como un refrigerante efectivo dentro del cilindro. Esta disminución de temperatura, junto con la dilución de la mezcla aire-combustible, provoca un aumento del retardo de ignición y reduce la velocidad de las reacciones de combustión. Además, desde un punto de vista químico, el vapor de agua favorece la formación de radicales OH, H y O, que pueden modificar los mecanismos de formación de contaminantes y contribuir a la reducción de NOx. Sin embargo, la implementación de la inyección de agua debe realizarse con cuidado. Un exceso de agua puede generar problemas importantes, como la formación de una película líquida sobre las paredes del cilindro (*wall wetting*), lo que favorece la combustión incompleta, incrementa las emisiones de HC y PM, y genera variabilidad cíclica en el proceso. Desde el punto de vista mecánico, cantidades excesivas de agua pueden degradar la película de aceite lubricante, acelerar el desgaste de los componentes y aumentar el riesgo de corrosión por condensación de especies ácidas [11–13]. En general, existen tres estrategias principales para incorporar agua en motores diésel, cada una con sus ventajas y limitaciones:

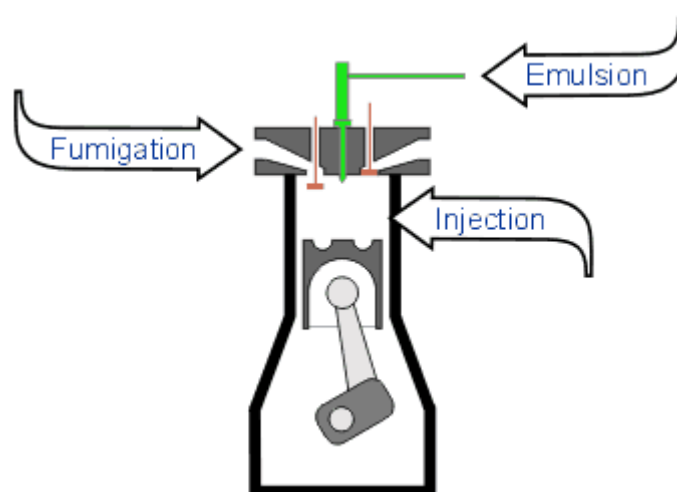


Figura 5. Métodos de adición de agua en MCI [14].

2.7.1. Emulsión

En este método, pequeñas gotas de agua se dispersan dentro del diésel mediante el uso de surfactantes que estabilizan la mezcla y evitan la separación de fases. El agua se inyecta junto con el combustible directamente hacia la cámara de combustión. Durante la combustión, el agua se evapora rápidamente debido a las altas temperaturas y genera el fenómeno conocido como “micro-explosión”. Esta expansión súbita del vapor rompe las gotas de combustible, produciendo una atomización secundaria que mejora la mezcla aire-combustible y promueve una combustión más homogénea y eficiente.

Entre sus principales ventajas destacan la capacidad de reducir simultáneamente las emisiones de NOx y material particulado (PM), y el hecho de que puede implementarse sin grandes modificaciones en el sistema de inyección del motor. Además, varios estudios reportan reducciones o variaciones menores en el consumo específico de combustible respecto al diésel convencional. Sin embargo, este método también presenta limitaciones importantes. Su preparación requiere surfactantes y equipos de mezclado especializado, lo que aumenta la complejidad y el costo. Además, la incorporación de agua modifica las propiedades fisicoquímicas del combustible (densidad, viscosidad, estabilidad y poder calorífico), pudiendo afectar el rendimiento del motor y el cumplimiento de ciertas normas. Finalmente, una vez preparada la emulsión, la relación agua/combustible queda fija, lo que limita la posibilidad de ajustar la dosificación según las condiciones de operación.

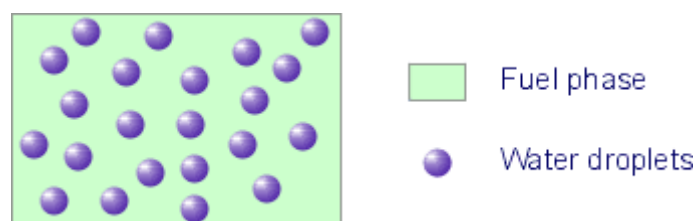


Figura 6. Método de emulsión agua/combustible [14].

2.7.2. Inyección directa en el cilindro (DWI)

Este método consiste en inyectar agua directamente dentro de la cámara de combustión con un inyector independiente. Por lo general incluye control electrónico que permite regular con precisión la cantidad, el momento y la duración de la inyección. Ofrece buena flexibilidad y potencial de optimización, ya que se puede ajustar la relación agua/combustible según la carga y la velocidad del motor. Sin embargo, su implementación es más compleja y costosa: necesita componentes adicionales, modificaciones en el motor y sistemas de alta presión, lo que eleva de forma importante los costos de instalación y mantenimiento.

2.7.3. Inyección directa en la admisión de aire (WI)

La inyección de agua en la admisión de aire (Water Injection, WI) consiste en introducir agua atomizada en forma de fina niebla al flujo de aire antes de que ingrese al cilindro. A diferencia de la inyección directa, este método ofrece menor control sobre el momento exacto en que el agua participa en la combustión, ya que la evaporación y el transporte dependen de las condiciones de operación (carga, velocidad y ubicación del punto de inyección). Por ello, la reducción de NO_x suele ser más moderada que con DWI, alcanzando en algunos estudios alrededor del 10 % para relaciones agua/combustible cercanas al 20 %. Sin embargo, esta técnica tiene ventajas importantes: es más simple y económica de implementar y requiere modificaciones mínimas en el motor.

En motores turboalimentados, la ubicación del punto de inyección es uno de los parámetros más importantes. Las posiciones más comunes son:

- **Antes del turbocompresor:** Reduce el trabajo de compresión y aumenta la densidad de carga, pero implica riesgo de daño en los álabes del compresor por gotas grandes.
- **Después del turbocompresor (antes del intercooler):** Aprovecha la alta temperatura del aire comprimido para una mejor evaporación. Sin embargo, al estar tan cerca del compresor, exige un control muy estricto del tamaño de las gotas para evitar daños mecánicos o pérdidas de rendimiento.
- **Antes del intercooler:** Esta opción aprovecha tanto el enfriamiento por la evaporación del agua como la propia capacidad del intercooler para bajar la temperatura, lo que ayuda a meter más aire al motor. No obstante, si el agua no se atomiza perfectamente, se puede acumular y condensar dentro del intercooler, lo que reduce su eficiencia y puede causar fallas mecánicas.

- **Post-intercooler:** En este punto, el aire ya está más frío y a mayor presión, por lo que tiene menos capacidad para evaporar el agua de forma natural. Además, como la inyección queda muy cerca de las válvulas de admisión, el agua tiene muy poco tiempo para evaporarse antes de entrar al cilindro.
- **En el colector de admisión cerca del puerto:** Muy próximo a la cámara de combustión, por lo que el tiempo para evaporación es limitado.

En el presente trabajo se seleccionó la inyección post-intercooler por su simplicidad de implementación y por permitir usar el agua como vehículo para las nanopartículas de cobre. Esta ubicación, sin embargo, impone limitaciones importantes relacionadas con la menor temperatura del aire y el tiempo reducido para la evaporación, por lo que fue necesario determinar experimentalmente el caudal máximo de agua inyectable.

2.8. Problemas de inyección de Agua en MCI

Uno de los aspectos más críticos en la implementación de la inyección de agua en la admisión de aire es la selección adecuada del caudal suministrado. Una cantidad excesiva de agua puede generar efectos adversos sobre el rendimiento del motor, las emisiones y la durabilidad de sus componentes. La literatura identifica dos mecanismos principales asociados a esta condición. El primero corresponde al fenómeno denominado *misfire* (fallo de encendido), originado por un enfriamiento excesivo de la mezcla que impide el inicio o la propagación adecuada de la combustión. El segundo está relacionado con el deterioro de la película de aceite lubricante, debido a la presencia de agua líquida que no alcanza a evaporarse completamente y termina mezclándose con el lubricante dentro del cilindro. Asimismo, diversos estudios reportan que relaciones másicas de agua/diésel mayores al 40 % tienden a incrementar las emisiones de material particulado (PM). En consecuencia, la cantidad de agua inyectada debe determinarse mediante criterios que permitan maximizar su efecto de enfriamiento sin comprometer la estabilidad de la combustión ni la integridad del motor. Entre los más utilizados se encuentran la verificación del nivel de saturación del aire de admisión y la estimación del caudal de agua que logra evaporarse antes de ingresar a la cámara de combustión.

2.8.1. Problema de misfire

Uno de los aspectos más importantes al implementar la inyección de agua es evitar el fenómeno conocido como *misfire* (fallo de encendido), el cual ocurre cuando la mezcla aire-combustible no se inflama o lo hace de manera incompleta, impidiendo que el cilindro desarrolle la presión de combustión esperada y reduciendo el trabajo útil generado. Este fenómeno suele producirse cuando se inyecta una cantidad excesiva de agua, provocando un enfriamiento que disminuye la temperatura de la mezcla por debajo del valor necesario para la autoignición del combustible. Por esta razón, la masa de agua suministrada debe mantenerse por debajo del límite que garantice condiciones adecuadas para la combustión. Dicho límite puede estimarse mediante el siguiente balance energético aplicado a la cámara de combustión:

$$\dot{Q}_c - \dot{m}_w L_v = (\dot{m}_a + \dot{m}_{w,cr} + \dot{m}_d) C_{p,prod} (T_{id} - T_0) \quad (11)$$

Esta ecuación asume una combustión completa, propiedades termodinámicas promedio y que toda el agua inyectada participa en el proceso de vaporización y calentamiento de los productos. El calor liberado durante la combustión se calcula mediante la ecuación:

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_d \cdot LHV \cdot \eta_c \quad (12)$$

Además, para facilitar los cálculos se emplea la relación aire-combustible dada por:

$$AFR = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_d} \quad (13)$$

Finalmente, reemplazando las ecuaciones anteriores y despejando el flujo de agua, se obtiene la siguiente expresión:

$$\dot{m}_{w,cr} = \frac{\dot{m}_d [LHV \cdot \eta_c - (AFR + 1) C_{p,prod} (T_{id} - T_0)]}{L_v + C_{p,prod} (T_{id} - T_0)} \quad (14)$$

2.8.2. Límite de humidificación del aire

Otro aspecto que limita la cantidad de agua inyectada corresponde al denominado límite de humidificación del aire (ω), el cual representa la máxima cantidad de vapor de agua que el aire puede contener antes de alcanzar la saturación y producir condensación. Considerando que uno de los objetivos de la inyección de agua es maximizar la reducción de la temperatura de combustión y, con ello, disminuir la formación de Nox, resulta conveniente operar lo más próximo posible a esta condición de saturación en el punto de inyección. La humedad absoluta del aire puede determinarse mediante la siguiente expresión:

$$\omega = 0,622 \frac{p_{v,sat}(T)}{P_t - p_{v,sat}(T)} \quad (15)$$

Donde 0,622 corresponde a la relación entre las masas molares del vapor de agua y del aire seco. En este estudio, el valor de P representa la presión absoluta en el colector de admisión inmediatamente post-intercooler. Posteriormente, la masa máxima de agua inyectable se determina con la expresión:

$$\dot{m}_{w,max} = \omega \cdot \dot{m}_a \quad (16)$$

Finalmente, la masa máxima de agua que puede inyectarse se expresa como:

$$\dot{m}_{w,max} = 0,622 \frac{p_{v,sat}(T)}{P_t - p_{v,sat}(T)} \dot{m}_a \quad (17)$$

2.8.3. Cantidad de agua evaporada en la admisión

La inyección de agua en el conducto de admisión favorece la evaporación parcial o total de las gotas antes de su ingreso al cilindro. Durante este proceso, el agua absorbe energía del aire en forma de calor latente de vaporización, provocando el enfriamiento de la mezcla aire-vapor. La cantidad de agua que logra evaporarse depende principalmente de la temperatura del aire, del tiempo disponible para la transferencia de calor y de la masa de agua inyectada. Bajo el supuesto de que el calor necesario para la evaporación proviene exclusivamente del aire de admisión, despreciando las pérdidas térmicas hacia las paredes del conducto, el balance energético puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{w,ev} \cdot \Delta h_{fg} = \dot{m}_a \cdot c_p \cdot \Delta T_c \quad (18)$$

Donde $\dot{m}_{w,ev}$ corresponde al caudal másico de agua evaporada, Δh_{fg} al calor latente de vaporización del agua y ΔT_c es la disminución de temperatura del aire de admisión ocasionada por la evaporación. Despejando el caudal de agua evaporada se obtiene:

$$\dot{m}_{w,ev} = \frac{\dot{m}_a \cdot c_p \cdot \Delta T_c}{\Delta h_{fg}} \quad (19)$$

Esta expresión permite estimar el caudal máximo de agua que puede evaporarse para una determinada disminución de la temperatura del aire de admisión. En sistemas de inyección post-intercooler, el tiempo disponible para la evaporación es reducido debido a la corta distancia entre el punto de inyección y la válvula de admisión. Además, el aire presenta una temperatura relativamente baja, disminuyendo la energía disponible para el cambio de fase y limitando la cantidad de agua que logra evaporarse antes de ingresar al cilindro.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

3.1. Descripción del diseño experimental

La viabilidad técnica del aditivo comercial **Cu-9 Schultz**, basado en nanopartículas metálicas de cobre (nCu), se evaluó durante las etapas iniciales del proyecto. Debido a su elevada densidad y alta energía superficial, estas nanopartículas presentan una marcada tendencia a la aglomeración, dificultando la obtención de suspensiones homogéneas y estables. Aunque la literatura recomienda incorporar surfactantes adicionales para mejorar su dispersión, el producto comercial ya contiene un agente estabilizante. Por este motivo, se realizaron ensayos visuales de decantación en diésel y agua destilada, observándose una rápida sedimentación en el combustible y una estabilidad considerablemente mayor en el medio acuoso. A partir de estos resultados se seleccionó el agua como fluido portador para transportar las nCu hacia el motor mediante inyección en la admisión de aire.

Definida esta estrategia, el banco de ensayos fue modificado mediante la incorporación de una línea de derivación (*by-pass*) regulada por una válvula de globo. Posteriormente se efectuó la caracterización del sistema de inyección, el cálculo de los parámetros críticos de operación, la determinación de las concentraciones de trabajo y, finalmente, los ensayos experimentales en el motor.

Para evaluar el efecto de las nanopartículas se utilizó un diseño experimental completamente aleatorizado de un solo factor, donde la variable independiente correspondió a la concentración equivalente de nCu en el diésel, evaluada en tres niveles: 0, 20 y 40 ppm. Los ensayos se realizaron a 2000 rpm bajo dos condiciones de carga (60 % y 100 %), considerando tres réplicas independientes para cada combinación de factores. Con el propósito de reducir la influencia de variables no controladas, como la deriva térmica del motor o las variaciones ambientales, el orden de ejecución de las pruebas se estableció de forma aleatoria.

La velocidad de 2000 rpm se seleccionó por su cercanía al punto de mínimo consumo específico informado por el fabricante (197 g/kWh a 1950 rpm), permitiendo evaluar el efecto de las nanopartículas en un régimen próximo a la máxima eficiencia energética del motor. Por su parte, las cargas del 60 % y 100 % fueron escogidas para representar condiciones de operación parcial y de plena carga, respectivamente.

3.1.1. Caracterización de la estabilidad de la suspensión.

Se realizaron ensayos de caracterización de la estabilidad de las suspensiones de nCu tanto en agua destilada como en diésel. En una primera etapa se utilizaron pruebas de decantación visual para determinar la viabilidad del aditivo. Posteriormente, una vez definida la metodología experimental, se realizaron ensayos de transmitancia óptica en las suspensiones utilizadas en los ensayos con el motor.

Ensayo de decantación visual

El ensayo de decantación visual comparó una muestra de referencia consistente en una emulsión de nCu en diésel estabilizada con surfactante ABS de estudios previos con las suspensiones preparadas a partir del aditivo comercial Cu-9 Schultz. Estas últimas, se prepararon tanto en matriz de diésel como en agua destilada, replicando las condiciones de la muestra de referencia: frascos de vidrio de 50 ml tipo *shot* y una concentración de 40 ppm de nCu.

Para la preparación de las muestras, en primer lugar, se determinó la masa de nCu contenida en el producto Cu-9 Schultz (**Figura.6**). Esto se realizó de forma indirecta mediante el cálculo según la **Ecuación 21** a partir del volumen medido del aditivo y la concentración nominal de 7500 ppm. A partir de este resultado, se calculó el volumen requerido para alcanzar la concentración de 40 ppm, se preparó la muestra para finalmente completar el volumen de la disolución con diésel o agua destilada según correspondiera. El cálculo de la masa de nCu emplearon concentraciones expresadas en base masa/volumen (mg/L), obtenidas mediante la siguiente expresión:

$$C_{nCu} = \frac{m_{nCu}(mg)}{V_{disolvente}(ml)} \times 1000 \quad (20)$$

A su vez, el volumen de aditivo con nCu se obtuvo a partir de la siguiente relación.

$$V_{necesario,aditivo} = \frac{V_{disponible,aditivo}}{m_{disponible,nCu}} \times V_{necesario,aditivo} \quad (21)$$

El procedimiento y las cantidades utilizadas se resumen en los siguientes pasos:

- Se determinó la relación de 0,675 g de nCu por cada 90 ml del aditivo Cu-9 Schultz a 7500 [ppm].
- Se calculó una cantidad de 0.164 mg de nCu y 0.2 ml del aditivo para preparar un volumen de 41 ml de suspensión a 40 [ppm].
- Se completó el volumen de la muestra con la cantidad “x” de diésel o agua destilada, donde x corresponde a la diferencia entre el volumen final deseado y el volumen de aditivo añadido.

Una vez preparadas, las muestras fueron agitadas manualmente durante 5 minutos con el fin de homogenizar el sistema. Posteriormente, se realizó el monitoreo del proceso de decantación, documentando el comportamiento de las muestras mediante fotografías tomadas a intervalos de 10 minutos durante un período total de 2 horas.



Figura 7. Probetas de 250 y 10 ml.

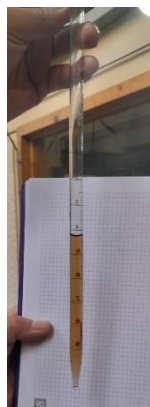


Figura 8. Pipeta graduada.

Ensayo de transmitancia óptica.

Este ensayo consiste en medir la fracción de radiación incidente que atraviesa la muestra sin ser absorbida ni dispersada, utilizando un espectrofotómetro con rango de 200 a 800 nm. Un aumento en los valores de transmitancia indica una menor concentración de nanopartículas en suspensión debido a su sedimentación.



Figura 9. Espectrofotómetro.



Figura 10. Celdas de vidrio.

3.1.2. Estimación del caudal máximo de inyección de agua

La determinación teórica del caudal máximo de agua inyectable se apoyó en tres criterios básicos que aseguran un funcionamiento seguro del motor: el riesgo de misfire (fallo de encendido), el límite de humidificación del aire de admisión y la cantidad real de agua que consigue evaporarse en el conducto. Para los cálculos se usaron datos experimentales de ensayos previos a 2000 rpm y 100 % de carga, resumidos en la **Tabla 7**. Como punto de partida se tomó una temperatura del aire después del intercooler de 30 °C, un valor habitual en motores diésel turboalimentados a cargas medias-altas y que coincide con los rangos que aparecen en la literatura (30–70 °C) [51–53].

Tabla 7. Datos para el cálculo de caudal de inyección de agua

Parámetro	Valor	Unidad
T_{id}	250	[°C]
$T_{a,dint}$	30	[°C]
LHV	43,1	[MJ/kg]
L_v	2358	[kJ/kg]
$c_{p,prod}$	1,005	[kJ/kgK]
D_d	105	[mm]
v_a	19,5	[m/s]
ρ_a	1,164	[kg/m³]
$P_{v,sat}(T_{adm})$	0,0424	[bar]
P_t	0,6	[bar]
Δh_{fg}	2400	[J/g]

Debido a que el sistema experimental carece de la instrumentación para registrar la temperatura del aire en la admisión aguas abajo del punto de inyección, la determinación del caudal de diseño prescindió de la tasa de evaporación y se restringió únicamente por los criterios de *misfire* y límite de humidificación.

Tabla 8. Resultados de caudal de inyección de agua de diseño.

Parámetro	Valor	Unidad
$\dot{m}_{w,cr}$	94,31	[g/s]
$\dot{m}_a$	196,34	[g/s]
ω	0,5	[%]
$\dot{m}_{w,max}$	3,55	[g/s]

El criterio más restrictivo resultó ser el límite de humidificación del aire, que dio un caudal máximo de inyección de agua de 3,55 g/s. Este valor corresponde a la situación en la que el aire de admisión puede llevar aproximadamente un 0,5 % de su caudal másico como vapor de agua sin llegar a saturarse. Hay que tener en cuenta que se trata de estimaciones teóricas basadas en condiciones de operación nominales y en algunas simplificaciones, por lo que el caudal elegido apunta a asegurar un funcionamiento conservador del sistema de inyección de agua.

3.1.3. Pruebas de caracterización del ensayo

Para mejorar la repetibilidad de las pruebas y controlar más fácil el caudal de agua inyectada, se modificó el sistema agregando un *by-pass* con una válvula de globo. Esto permitió cambiar el caudal desviando parte del flujo sin tener que ajustar la presión de la bomba ni desmontar el inyector. Antes de probar con las nCu, se hicieron ensayos preliminares para estandarizar el método de trabajo, reducir errores sistemáticos y fijar los caudales reales de diésel y agua.

Estas pruebas incluyeron elegir el inyector y definir los pasos de arranque, operación y limpieza del motor.

Las mediciones de caudal se hicieron en un banco de medición externo al motor, trabajando con presiones de alimentación de 4 y 8 bar reguladas por el *by-pass*. Con esto, se eligió el inyector con el caudal más cercano al valor de diseño calculado. La elección de las presiones de 4 y 8 bar se debió a que 8 bar es el límite máximo de la bomba del sistema, y ambos valores entran en el rango recomendado por el fabricante del inyector. Así se aseguró que las pruebas se hicieran en condiciones operativas seguras y reales.

Tabla 9. Resultados de caudal de agua medido para presiones de 8 y 4 bares.

Diámetro del inyector[mm]	Q8bar [g/s]	Q4bar[g/s]
0.2	0,70	0,48
0.3	1,34	0,88
0.4	1,60	1,10

Las pruebas de caracterización usaron un diseño completamente aleatorizado de un factor: la presión de alimentación del sistema de inyección, evaluada en 4 y 8 bar. Para determinar si las diferencias en el caudal de agua eran estadísticamente significativas y evaluar la dispersión de los datos, los resultados se analizaron mediante un análisis de varianza de una vía (ANOVA). El esquema experimental empleado se resume en la **Tabla 10**.

Tabla 10. Resumen del diseño experimental para la caracterización del sistema de inyección.

Parámetro	Descripción
Diseño experimental	Completamente aleatorizado (DCA)
Factor	Presión de alimentación del sistema de inyección
Niveles	4 y 8 bar
Variable respuesta	Caudal de agua inyectado (g/s)
Réplicas	n = 3
Método estadístico	ANOVA de una vía
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$
Objetivo	Evaluar la dispersión de los datos y determinar si las diferencias de caudal entre presiones son estadísticamente significativas

Al principio se usó la temperatura del aceite para controlar la estabilización térmica del motor. No obstante, se detectó una alta variabilidad entre los ensayos debido a una contaminación del lubricante, advertida por la presencia anormal de vapor de agua en el cárter. Luego de cambiar el aceite y sus filtros, se fijó un criterio de estabilización cuasi estacionaria más estricto: una variación térmica menor o igual a 1 °C durante uno o dos minutos. Para esto se tomaron como indicadores principales la temperatura del aire post-intercooler y las emisiones de NO_x.

El procedimiento experimental definitivo consistió en una etapa de reacondicionamiento del sistema, durante la cual se enfrió el motor hasta alcanzar valores aproximados de 81 °C en el aceite lubricante, 22 °C en el agua de alimentación, 24 °C en el aire post- intercooler y 73 °C en el refrigerante. Una vez alcanzadas estas condiciones, el motor se llevó a la carga y velocidad establecidas operando únicamente con diésel, con el fin de registrar el estado inicial de referencia. Posteriormente, se activó la inyección de la suspensión acuosa y se mantuvo el funcionamiento hasta alcanzar nuevamente un estado cuasi-estacionario, el cual se consideró como el punto final de la medición.

En todas las pruebas se cuidó que el agua de alimentación no superara los 30 °C, ya que pasar ese límite causaba un alza repentina en varios parámetros evaluados. Para asegurar la repetibilidad, antes de cada ensayo se comprobó que el motor y los sistemas auxiliares cumplieran las condiciones térmicas cuasi estacionarias. Los parámetros principales de estabilización se resumen en la **Tabla 11**, mientras que las condiciones de inicio y término para las cargas de 100 % y 60 % se muestran en la **Tabla 12**.

Tabla 11. Condiciones de reacondicionamiento del ensayo experimental.

Parámetro medido	Valor aproximado
T_{aceite}	81°C
$T_{w,retorno}$	22°C
$T_{a,post-intercooler}$	24°C
$T_{refrigerante}$	73°C

Tabla 12. Valores de temperatura de aire post- intercooler para ambos modos de carga.

Parámetro	100% de carga	60% de carga
$T_{a,post-inter,inicio}$	52°C	32°C
$T_{a,post-inter,fin}$	54°C	34°C

Los cálculos para seleccionar el inyector se contrastaron con las condiciones promedio medidas en los experimentos. Así, se obtuvieron caudales máximos teóricos de agua de 9,08 g/s y 4,04 g/s para las cargas de 100 % y 60 % respectivamente; ambos valores fueron muy superiores a los caudales máximos usados en los ensayos (1,07 g/s y 2,01 g/s). Esto indica que el sistema operó con un amplio margen respecto al límite de humidificación del aire de admisión, sin llegar a la saturación. Por lo tanto, el criterio para definir el caudal máximo de inyección de agua quedó validado para el desarrollo experimental.

3.1.4. Determinación de concentraciones para suspensión nCu-agua.

Con los caudales reales del sistema de inyección definidos en las caracterizaciones, se calcularon las concentraciones de trabajo de nCu usando la **Ecuación (10)** y los flujos medidos de agua y diésel. Al principio se evaluó un rango de concentraciones equivalentes en diésel de entre 10 y 100 ppm, buscando seleccionar niveles de operación factibles y compatibles con la capacidad del sistema. Los cálculos se realizaron de la siguiente manera:

- **Masa total de nCu en la suspensión madre:** 1,48 g contenidos en 317 ml de suspensión comercial, equivalentes a una concentración cercana a 4660 ppm.
- **Criterio de caudal:** Se usaron los caudales mínimos medidos de agua (0,8 g/s) y diésel (8,3 g/s) para mantener un criterio conservador, asegurando no sobreestimar las concentraciones equivalentes de nCu en diésel bajo condiciones reales de operación.
- **Volumen mínimo estimado:** Se calculó el volumen de suspensión requerido para hacer nueve ensayos, considerando un caudal máximo de agua de 1,1 g/s y un tiempo de inyección de cinco minutos por cada prueba.
- **Margen operacional:** El volumen de suministro se aumentó hasta 2,2 L para tener un margen suficiente ante variaciones en el tiempo de ensayo, el caudal de inyección o pérdidas en el sistema.
- **Concentraciones seleccionadas:** Se fijaron concentraciones de 208 ppm y 415 ppm en la suspensión nCu-agua, equivalentes a 20 ppm y 40 ppm de nCu en diésel, respectivamente. El nivel de 40 ppm fue el máximo que se pudo preparar con el aditivo comercial disponible y el volumen total requerido para los ensayos. El valor de 20 ppm se eligió un nivel intermedio para evaluar el efecto de la dosis de nanopartículas en el motor. Estos valores pueden variar levemente según el desempeño real de la bomba y del motor, afectando solo la concentración final en el diésel.

3.1.5. Procesamiento y obtención de parámetros de combustión.

Los parámetros de combustión se obtuvieron a partir de las mediciones experimentales de presión instantánea en el cilindro y del ángulo del cigüeñal. Con estos registros se calculó el volumen instantáneo del cilindro, la tasa de liberación de calor (HRR) y la fracción de masa quemada (MFB), aplicando las **Ecuaciones (3), (4) y (5)**, respectivamente. Para el cálculo de la HRR se utilizó un esquema de diferencias finitas hacia atrás (*backward finite difference*), definido por la siguiente expresión:

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \right|_i \approx \frac{\phi_i - \phi_{i-1}}{\Delta \theta} \quad (22)$$

A partir de la curva de fracción de masa quemada (MFB) se determinaron los parámetros CA10, CA50 y CA90. Los ángulos de inicio (SOC) y fin de combustión (EOC) se fijaron de forma previa a través del gráfico de HRR en función del ángulo del cigüeñal (°CA). Ambos puntos se establecieron aplicando un criterio de umbral sobre la tasa de liberación de calor, resuelto mediante la siguiente expresión:

$$HRR_{umbral} = (\overline{HRR} + 3\sigma_{HRR})|_i^n \quad (23)$$

El valor umbral se estableció considerando un rango libre de combustión, ubicado específicamente entre los -150° y -60° del cigüeñal. A partir de esta referencia, una función lógica identificó los registros de HRR superiores al límite definido, donde el primer y último punto en cumplir dicha condición se asignaron como el SOC y el EOC, respectivamente. La delimitación de estos extremos permitió normalizar la curva de MFB y determinar los ángulos CA10, CA50 y CA90.

3.1.6. Análisis estadístico

El tratamiento estadístico de los datos inició con la evaluación del coeficiente de variación (CV) de la concentración equivalente de nCu en el combustible. El propósito de esta medición fue cuantificar la variabilidad experimental causada por las fluctuaciones en los caudales máscicos de agua inyectada y de diésel, que son las variables base para calcular la concentración efectiva de las nanopartículas. La evaluación de este parámetro se rigió bajo el siguiente criterio:

Tabla 15. Criterio para coeficiente de variabilidad utilizado.

CV	Interpretación
<5%	Muy baja variabilidad
5-10%	Baja variabilidad
10-20%	Variabilidad moderada

Los valores del coeficiente de variación se muestran en la Sección 4.3.1. Allí se comprueba que la concentración efectiva de nCu tiene una variabilidad moderada respecto a los niveles nominales de diseño. Aunque en los ensayos se fijaron concentraciones nominales de 0, 20 y 40 ppm, la concentración real de nCu en el combustible cambió de una prueba a otra por las variaciones en los caudales de agua y diésel. Por eso la variable independiente no se comporta como niveles discretos fijos, sino como una variable continua calculada a partir de los flujos medidos. En esta situación se optó por un modelo de regresión lineal continua en lugar de un análisis de varianza (ANOVA), ya que permite evaluar si existen relaciones lineales entre la concentración real de nanopartículas y las variables de respuesta del motor. El modelo de regresión lineal continua empleado para analizar el efecto de la concentración de nCu sobre los parámetros estudiados tiene la siguiente forma:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon \quad (24)$$

Donde :

- Y corresponde a la variable de respuesta;
- X , a la concentración equivalente de nCu en combustible;
- β_0 , al intercepto;
- β_1 , a la pendiente del modelo;
- ε , al término de error.

La significancia estadística del efecto se evaluó mediante el p -valor asociado a la pendiente del modelo (β_1). Se fijó un nivel de significancia $\alpha = 0,05$ asumiendo un efecto estadísticamente significativo cuando el p -valor sea menor o igual a α . El signo y la magnitud de la pendiente se usaron para determinar la dirección e intensidad del impacto de la concentración de nCu sobre cada variable analizada; un valor positivo indica una tendencia creciente, mientras que uno negativo refleja un comportamiento decreciente. Por su parte, el coeficiente de determinación (R^2) se utilizó como medida de la capacidad explicativa del modelo, mostrando qué proporción de la variabilidad observada es explicada por la concentración equivalente de nCu.

3.2. Metodología para pruebas en motor Mercedes Benz

Con el procedimiento experimental y las concentraciones de nCu definidos, se establecieron las condiciones para ejecutar los ensayos en el motor Mercedes-Benz OM 366LA. En esta sección se detalla el protocolo de trabajo, la configuración del banco de pruebas y el equipamiento técnico utilizado.

3.2.1. Configuración de banco de pruebas experimental

Los ensayos se realizaron en el banco de pruebas del Laboratorio de Termo fluidos de la Universidad Técnica Federico Santa María, que cuenta con una cabina aislada térmica y acústicamente para el motor (**Figura 12**). La instalación incluye la planta motriz acoplada a un freno dinamométrico y a un panel de control que regulan la carga y las revoluciones de trabajo. Para registrar las variables de interés se usaron distintos instrumentos. Las emisiones de CO_2 , O_2 , HC , NO_x y CO y, junto con la temperatura del aceite lubricante, se midieron al mismo tiempo con un analizador de gases de escape BOSCH. Las temperaturas del aire post-intercooler, del refrigerante, del agua de retorno y de los gases de escape, además de la presión del aire de admisión, se registraron con el sistema de adquisición de datos OMB-DAQ-55 conectado a termocuplas y sensores de presión. Los parámetros de torque, potencia y velocidad de giro se obtuvieron con la unidad de medición de torque kiTorq, mientras que la posición angular y la velocidad de rotación del cigüeñal se controlaron con un encoder incremental. La presión instantánea en la cámara de combustión se midió con un sensor piezoeléctrico KISTLER K6052CU20. Tanto este sensor como el encoder se conectaron a sus

sistemas de acondicionamiento de señal, usando una interfaz NI cDAQ-9174 como plataforma de adquisición y sincronización para registrar ambas variables en el tiempo. Los caudales de diésel y agua se determinaron por método gravimétrico, con balanzas digitales que registraron la variación de masa de ambos fluidos durante el consumo; a partir de esos datos se calcularon los caudales máscos según el intervalo de tiempo correspondiente. Como complemento se usaron dos multímetros para medir el voltaje y la corriente eléctrica de la bomba hidráulica. La **Figura 11** muestra el esquema del banco de pruebas experimental y la distribución de los equipos utilizados:

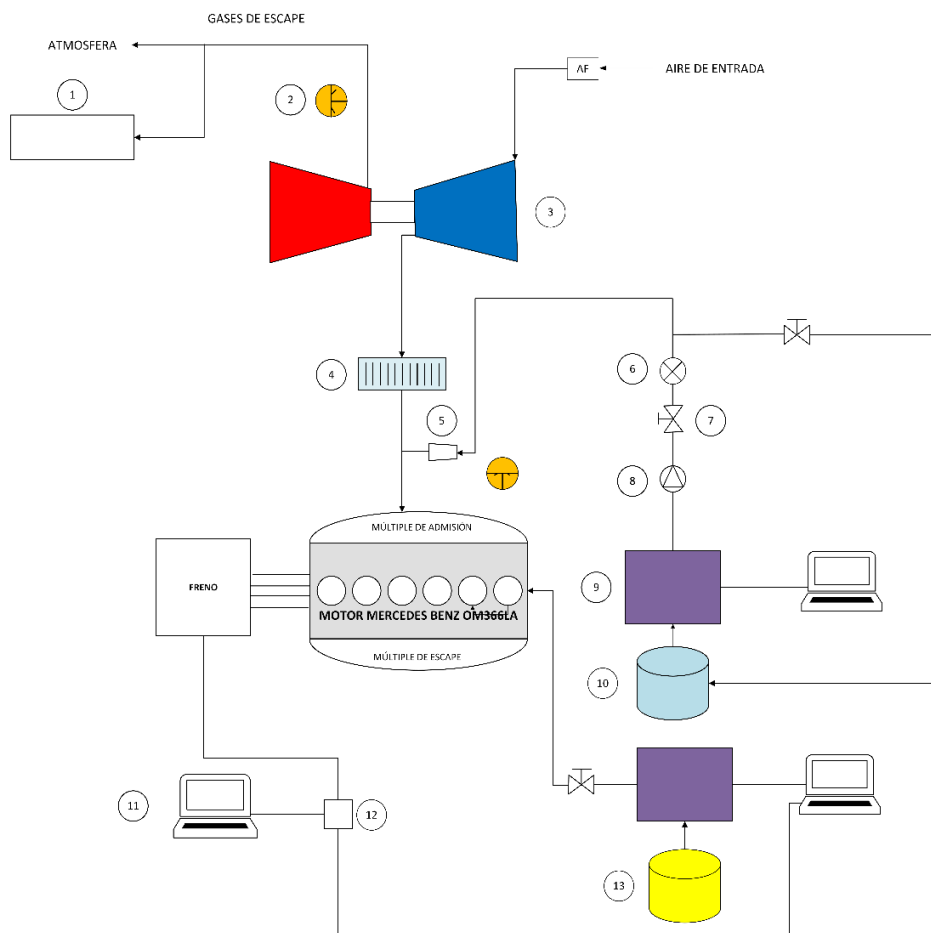


Figura 11. Esquema del banco de pruebas experimental.

Donde:

1-Analizador de gases ;2-Termocupla; 3-Turbocompresor ;4-Intercooler;5- Inyector de agua;6- Manómetro;7-Válvula de paso;8-Bomba hidráulica; 9-Balanza digital;10- Estanque de agua;11- Sistema de adquisición de datos;12- Encoder de ángulo de cigüeñal;13- Estanque de diésel.

3.2.2. Banco de pruebas

Motor diésel industrial

- Marca: Mercedes Benz.
- Modelo: OM366LA.
- Potencia neta máxima: 155 kW a 2600 rpm.
- Par máximo: 660 N·m a 1400 rpm.
- Consumo específico mínimo: 197 g/kWh a 1950 rpm
- Número de cilindros: 6 en línea.
- Sistema de sobrealimentación: Turbocooler
- Diámetro del cilindro: 97.5 mm
- Carrera: 133 mm.
- Cilindrada: 5958 cm³.
- Relación de compresión: 18:1.
- Presión de inyección de combustible: 260 bar.



Figura 12. Motor Mercedes-Benz OM366LA.

Freno dinamométrico hidráulico

- Marca: SCHENK.
- Modelo: U125
- Tipo: Hidráulico.
- Rango: 0-150[kg].
- Resolución: 10[g]
- Velocidad máxima: 5000 rpm



Figura 13. Freno dinamométrico Schenk.

Termocuplas tipo K

- Rango de temperatura: -200-1100°C.
- Rango de medición: -200 a 1100 °C
- Sensibilidad: aproximadamente 41 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
- Precisión estándar: $\pm 2,2\text{ }^\circ\text{C}$ o $\pm 0,75\%$ de la lectura.



Figura 14. Termocupla tipo K.

3.2.3. Instrumentación

Sensor de presión en el cilindro

- Marca: KISTLER.
- Modelo: K6052CU20.
- Rango: 0-300 bar.



Figura 15. Sensor K6052CU20 [54].

Conjunto codificador de ángulo de manivela (ENCODER)

- Marca: KISTLER.
- Modelo: 2614D11.
- Señal del ángulo del cigüeñal: 720x0.5°.
- Frecuencia máxima de muestreo: 12 kHz.
- Temperatura de operación: -40-85°C.



Figura 16. Encoder KISTLER 2614D11 [55].

Unidad de medición de torque (KiTorq)

- Marca: KISTLER.
- Serie: 455xA
- Rango: 50-5000 Nm.
- Velocidad nominal: 20000-9000 Hz.



Figura 17. Kitorq [56].

Sistema de adquisición de datos

- Marca: Omega.
- Modelo: OMB-DAQ-55.
- Puertos: 10 entradas análogas, 16 entradas digitales I/O, conexión de salida USB.



Figura 18. Sistema de adquisición de datos [57].

Analizador de gases de escape

- Marca: BOSH.
- CO: 0–10 % vol (resolución: 0,001 % vol)
- CO₂: 0–18 % vol (resolución: 0,01 % vol)
- O₂: 0–22 % vol (resolución: 0,01 % vol)
- HC: 0–9999 ppm vol (resolución: 1 ppm vol)
- NO_x: 0–5000 ppm vol (resolución: 1 ppm vol)
- Factor λ : 0,5–9,999 (resolución: 0,001)
- Temperatura de aceite: resolución de 1 °C



Figura 19. Analizador de gases de escape.

Multímetro digital

- Marca: Kleim tools.
- Modelo: MM720.
- Voltaje AC/DC:0-1000V.
- Corriente AC/DC:0-10 A.
- Resistencia:60M Ω .
- Temperatura: -40-1000°C.
- Capacitancia: 6000 μ F.
- Frecuencia: 1-500kHz.



Figura 20. Multímetro digital.

Balanza analítica digital

- Marca: Snowrex.
- Modelo: NHV-30.
- Rango: 0-30 kg.
- Resolución: 0.001 g.

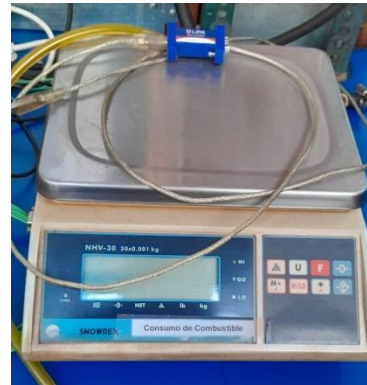


Figura 21. Balanza digital.

3.2.4. Sistema de inyección de suspensión

Bomba de inyección

- Marca: GOODPUMPS.
- Potencia: 70W.
- Corriente maxima:6A.
- Voltaje: 9-14.4V
- Caudal máximo: 4-6 L/min.
- Presión máxima: 9 bar.



Figura 22. Bomba hidráulica.

inyector de agua

- Marca: Adhere To Fly.
- Modelo: Low powered Sprinklers.
- Tipo de conexión: Conexión de 6 mm diámetro.
- Material del inyector: acero inoxidable.
- Diámetro de atomización: 0.4 mm.



Figura 23. Inyector de agua.

Manómetro

- Marca: BTU controls.
 - Rango: 0-12 bar.
- Resolución: 1 bar.



Figura 24. Manómetro.

By-pass

- Tipo: Válvula de globo mini de 2 vías.
 - Accionamiento: Manual, palanca de ¼ de vuelta (90°).
- Conexión: Push-fit o racor para tubo plástico.



Figura 25. Válvula de paso.

3.2.5. Procedimiento experimental y protocolo de medición.

Las pruebas experimentales consistieron en evaluar el impacto de la concentración de la suspensión nCu-agua inyectada en el colector de admisión, variando la concentración equivalente de nCu en el diésel en tres niveles. El estudio se dividió en dos bloques independientes a una velocidad constante de 2000 rpm, evaluando condiciones de carga del 100 % y 60 %. Para cada nivel de concentración y estado de carga se efectuaron tres réplicas independientes. Con el fin de evitar la contaminación cruzada entre los tratamientos, el cambio de concentración se ejecutó mediante el reemplazo completo de los estanques de suministro que contenían las suspensiones previamente preparadas. El procedimiento experimental se resume en la **Figura 26**.

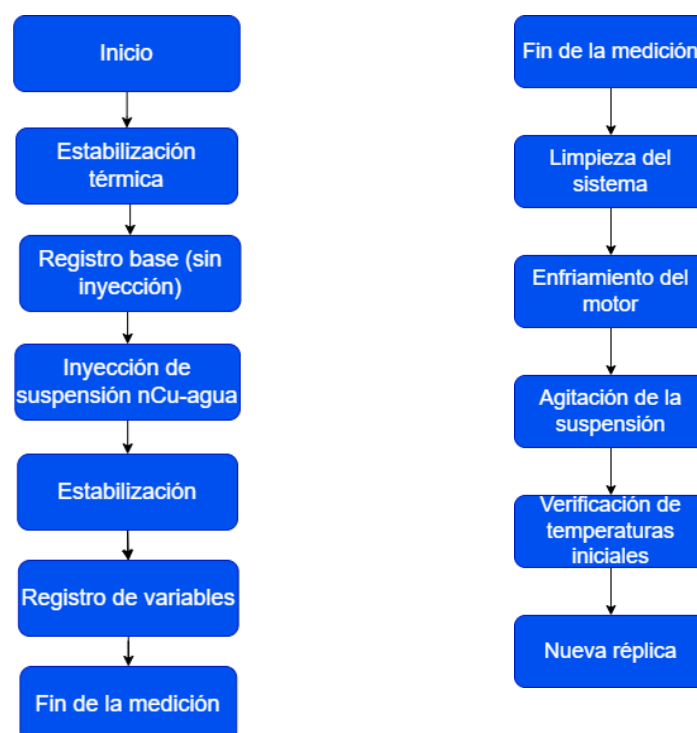


Figura 26. Diagrama del procedimiento experimental.

Para cada medición se siguió el siguiente protocolo:

- Se llevó el motor al punto de operación fijado (2000 rpm y la carga correspondiente) hasta alcanzar el estado térmico cuasi-estacionario bajo el criterio definido.
- Se registraron los datos base sin inyección de suspensión nCu-agua, recopilando el caudal de diésel, presión en la cámara de combustión, temperaturas y emisiones gaseosas.
- Se encendió la bomba de inyección de la suspensión nCu-agua, ajustando la presión de trabajo a 4 bar, valor seleccionado a partir de las pruebas de caracterización y el análisis de repetibilidad.
- Se operó el sistema hasta recuperar el criterio de estabilización térmica.
- Se repitió el registro completo de todos los parámetros operativos y de emisiones.
- Se apagó la bomba y se finalizó el registro de caudales.
- Se limpió el ducto de succión de la bomba inyectando agua destilada durante 2 minutos, evitando la acumulación de nanopartículas y la contaminación entre tratamientos.
- Se realizó un enfriamiento controlado del motor abriendo la válvula del circuito de refrigeración hasta retornar a las condiciones térmicas iniciales, proceso que tomó cerca de 10 minutos.

Entre cada medición se agitó manualmente las suspensiones durante dos minutos para mantener la homogeneidad de la dispersión y reducir la sedimentación de las nanopartículas de cobre. Por último, las variables que no se registraban de forma automática se tomaron fotografiando las pantallas de los equipos, de modo que luego pudieran digitalizarse y procesarse.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1. Resultados de estabilidad

4.1.1. Emulsión nCu- diésel

En la muestra compuesta por diésel y aditivo se obtuvo una clara separación de fases. Durante la preparación de la mezcla se evidenció la formación de burbujas en la superficie del aditivo; posteriormente, tras la agitación, el fluido tomó un color amarillo turbio con gotas dispersas de aditivo, para finalmente precipitar de forma súbita.

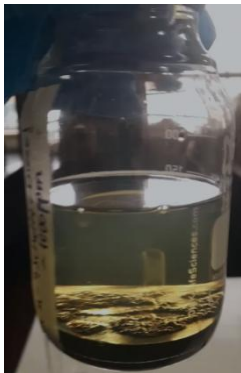


Figura 29. Muestra previa agitación.



Figura 27. Muestra tras agitación.



Figura 28. Muestra precipitada.

Como comprobación adicional, el aditivo se incorporó al combustible mediante goteo para evaluar con mayor precisión la interacción visual entre ambas sustancias.



Figura 30. Gotas de aditivo en diésel.

A partir de estos resultados, se verificó que el aditivo a base de nCu es inmisible en el combustible diésel; por lo tanto, se avanzó con la verificación de su estabilidad al mezclarse con agua destilada.

4.1.2. Suspensión nCu-agua

Los resultados de estabilidad de la suspensión de nCu en agua fueron favorables. Se obtuvo una mezcla homogénea que se mantuvo estable, sin precipitación aparente de las nanopartículas durante el tiempo que duró el análisis. En cambio, la muestra base de nCu-diésel mostró separación de fases a los 30 minutos. El análisis confirmó que el aditivo de nCu es altamente miscible en agua destilada y logra una dispersión estable y homogénea a 40 ppm. Frente a la emulsión base, esta opción ofrece, a simple vista, una estabilidad bastante mayor para las nanopartículas.

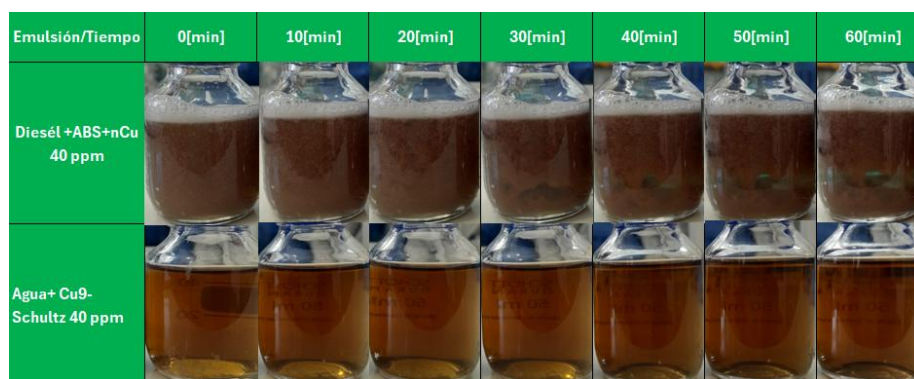


Figura 31. Resultados para pruebas de decantación visual agua-nCu a 40 ppm de 0 a 60 minutos.

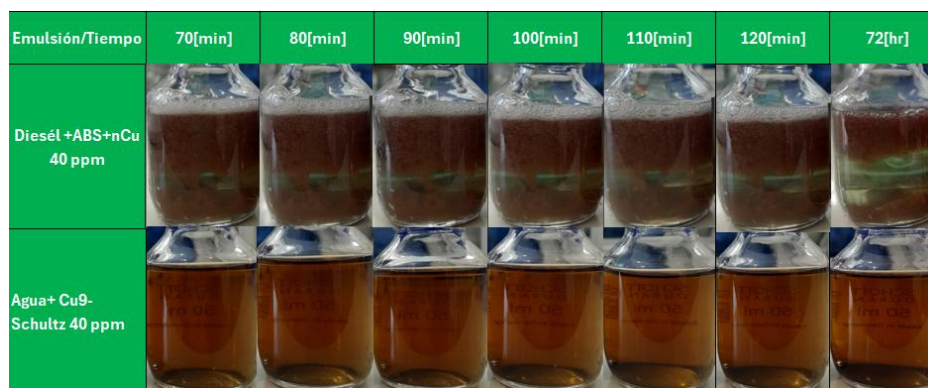


Figura 32. Resultados para pruebas de decantación visual agua-nCu a 40 ppm de 60 a 120 minutos.

4.1.3. Transmitancia

A continuación, se muestran los resultados para las pruebas de transmitancia óptica para las concentraciones de 208 y 415 ppm de las suspensiones madre consideradas en el ensayo experimental.

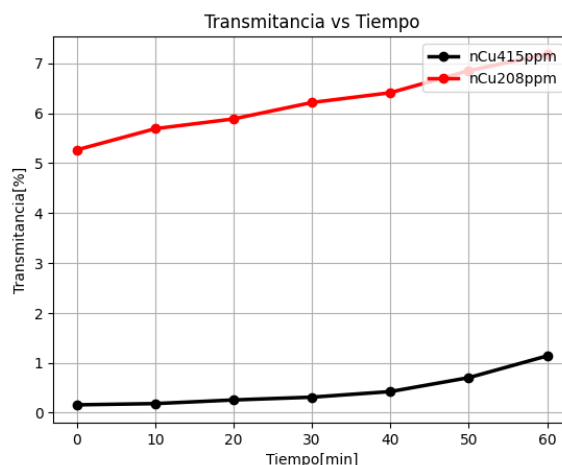


Figura 33. Resultados de transmitancia para muestras de suspensión madre.

La **Figura 33** detalla la evolución de la transmitancia para las suspensiones de 208 y 415 ppm durante un intervalo de 60 minutos. En ambos perfiles se aprecia un incremento progresivo de la transmitancia, lo que se traduce en un mayor paso de luz a través de las celdas y, por ende, en la decantación del nCu suspendido en el agua. Es importante señalar que los valores absolutos de transmitancia se mantuvieron bajos, siendo inferiores al 1% en la muestra de 415 ppm, debido a la coloración marrón oscura del aditivo que restringe el paso de los haces de luz. Por esta razón, la muestra de 415 ppm no exhibe variaciones apreciables antes de los 30 minutos, ya que la alta concentración inicial satura los sensores del equipo óptico.

Al analizar la última media hora del ensayo, la muestra de 415 ppm registró un alza del 266% en su transmitancia, en comparación con el leve 16% observado en la de 208 ppm. Este comportamiento demuestra que la masa de nCu en suspensión y el grado de dilución influyen directamente en la velocidad de sedimentación. El fenómeno se explica porque, al diluir el aditivo comercial en agua destilada, se debilita el efecto del agente estabilizador original; simultáneamente, una mayor densidad de partículas por unidad de volumen (en la muestra de 415 ppm) eleva la probabilidad de colisión entre ellas, acelerando los procesos de aglomeración y posterior caída por gravedad. En contraparte, aunque la suspensión de 208 ppm posee una menor capa protectora por estar más diluida, la distancia intermolecular entre las nCu es mayor, disminuyendo la tasa de colisión y aglomeración.

Estos hallazgos evidencian que la estabilidad coloidal de las diluciones depende estrictamente de la presencia del surfactante protector original. Como recomendación para futuros desarrollos experimentales, cuando se preparen suspensiones de baja concentración a partir del aditivo madre, se sugiere evitar la dilución con agua destilada pura. En su lugar, es preferible emplear un medio de dilución que incorpore una fracción controlada del agente tensioactivo original y resguarde el mismo nivel de pH, asegurando que la distancia espacial entre las nanopartículas sea la única variable evaluada y no la degradación de la estabilidad química del sistema.

4.2. Resultados de pruebas de caracterización

En esta sección se analizan los resultados de la etapa de caracterización del sistema de inyección. A través de estos ensayos se determinaron los caudales máxicos de agua suministrados a presiones de alimentación de 4 y 8 bar, además del caudal de diésel base; registros esenciales para el cálculo posterior de la concentración equivalente de nCu en el combustible.

Tabla 13. Datos de caudales promedio obtenidos.

Caudal	Promedio	Desviación
Q4bar[g/s]	0,85	0,06
Q8bar[g/s]	1,21	0,12
Qd[g/s]	8,26	0,05

Como complemento, se ejecutó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor para evaluar el impacto de la presión de alimentación del sistema de inyección (4 y 8 bar). Con esto se determinó si las variaciones en el caudal de agua suministrado producían cambios estadísticamente significativos en los parámetros de desempeño y emisiones del motor. Los *p*-valores obtenidos para cada variable evaluada se detallan en la **Tabla 14**.

Tabla 14. Resumen resultados ANOVA para ensayo de caracterización.

Variable	Valor p	Conclusión
NOx	0,948	No significativo
CO	1,00	No significativo
HC	0,681	No significativo
O ₂	0,889	No significativo
CO ₂	0,863	No significativo
TEG	0,616	No significativo

Como se observa en la **Tabla 14**, todas las variables evaluadas presentaron p -valores superiores al nivel de significancia adoptado ($\alpha = 0,05$). Por lo tanto, se constató la ausencia de diferencias estadísticamente significativas entre las condiciones de operación con caudales de 0,85 y 1,21 g/s. Al registrar el caudal obtenido a 4 bar una menor dispersión experimental, se seleccionó esta condición operativa para el desarrollo de los ensayos posteriores.

4.3. Metodología de análisis estadístico global

El impacto de la concentración equivalente de nanopartículas de cobre (nCu) en diésel sobre los parámetros de desempeño, emisiones y combustión del motor Mercedes-Benz OM 366LA se evaluó mediante un modelo de regresión lineal continua. Se utilizó como variable independiente la concentración de nCu calculada en cada ensayo, un enfoque que permitió analizar las tendencias experimentales integrando la variabilidad real de los caudales de inyección de la suspensión acuosa y del consumo de combustible registrados durante las pruebas.

En las **Tablas 15 y 16** se detallan los caudales máscicos de agua inyectada y de diésel medidos experimentalmente, junto con la concentración equivalente de nCu calculada. Por su parte, la **Tabla 17** resume los coeficientes de variación asociados a dichas concentraciones para los modos de operación al 100 % y 60 % de carga, cuantificando la variabilidad de la variable independiente en el análisis. Los parámetros obtenidos mediante el modelo de regresión para ambos modos de operación se presentan en las **Tablas 18 y 19**, incluyendo el intercepto (β_0), la pendiente (β_1), el coeficiente de determinación (R^2), el p -valor y la significancia estadística de cada variable evaluada.

Tabla 15. Resultados de caudales masicos y concentración de nCu a 100% de carga.

Corrida	$\dot{m}_{4bar} [g/s]$	$\dot{m}_d [g/s]$	$C_{nCu,d} [ppm]$
1	0,95	8,41	0,00
2	0,88	8,36	21,89
3	1,14	8,23	57,48
4	1,13	8,41	0,00
5	0,97	8,35	48,21
6	1,14	8,25	28,74
7	1,2	8,27	60,22
8	1,02	8,17	25,97
9	1,22	8,77	0,00

Tabla 16. Resultados de caudales masicos y concentración de nCu a 60% de carga.

Corrida	$\dot{m}_{4bar} [g/s]$	$\dot{m}_d [g/s]$	$C_{nCu,d} [ppm]$
1	1,93	5,05	0,00
2	2,03	5,04	83,78
3	2,13	5,1	173,32
4	2,14	5,09	0,00
5	2,12	5,13	171,50
6	2,14	5,11	87,11
7	2,05	5,1	166,81
8	1,93	5,23	76,76
9	2,04	5,25	0,00

El flujo másico de combustible fue obtenido mediante la pendiente de la variación de masa en un intervalo donde el consumo presentó un comportamiento lineal. La potencia al freno fue estimada a partir de los valores registrados al inicio y al final del período de medición. Debido a que los ensayos fueron realizados bajo condiciones cuasi estacionarias, se asumió que las variaciones de potencia durante dicho intervalo fueron pequeñas respecto a la incertidumbre experimental.

Tabla 17. Resultados para coeficiente de variabilidad de las concentraciones de nCu en diésel.

Carga del motor	Concentración promedio equivalente [ppm]	Desviación estándar [ppm]	Coeficiente de variación (CV) [%]
100%	25,54	3,44	13,49
	55,30	6,29	11,38
60%	82,55	5,28	6,40
	170,55	3,36	1,97

Tabla 18. Resultados de análisis de regresión lineal para modo de operación a 100% de carga.

Variable de respuesta	Unidad	Intercepto (β_0)	Pendiente (β_1)	Coeficiente R^2	p-valor	¿Significativo? ($\alpha=0.05$)
NOx	ppm	627,285	-0,4229	0,1516	0,3003	No
HC	ppm	1,7162	0,0476	0,2052	0,2208	No
CO	ppm	0,0373	-0,0001	0,0669	0,5015	No
CO2	% vol	6,9156	-0,0027	0,1232	0,3543	No
O2	% vol	11,6868	0,0018	0,0334	0,6381	No
BSFC	g/kWh	208,1935	-0,0311	0,1616	0,2835	No
EGT	°C	516,2768	0,0454	0,2695	0,1521	No
BMEP	bar	14,7369	-0,0009	0,0260	0,6788	No
CA1090	°	25,9572	0,0259	0,6492	0,0087	Sí
CA50	°	15,5843	0,0080	0,4707	0,0413	Sí
P_{max}	bar	142,6863	-0,0846	0,6983	0,005	Sí
θ_{Pmax}	°	17,6754	0,0054	0,5922	0,0153	Sí
HRR_{max}	J/°CA	186,2612	-0,1009	0,5064	0,0316	Sí
θ_{HRRmax}	°	13,8848	0,0150	0,0980	0,4121	No

Tabla 19. Resultados de análisis de regresión lineal para modo de operación a 60% de carga.

Variable Respuesta	Unidad	Intercepto (β_0)	Pendiente (β_1)	Coefficiente R^2	p-valor	¿Significativo? ($\alpha=0.05$)
NOx	ppm	313,6642	0,0277	0,0195	0,7199	No
HC	ppm	0,7697	0,008	0,1724	0,2664	No
CO	ppm	0,0024	0	0,0143	0,7597	No
CO ₂	% vol	3,8043	-0,0005	0,026	0,6787	No
O ₂	% vol	15,9256	0,0002	0,0043	0,8672	No
BSFC	g/kWh	207,608	-0,0033	0,0169	0,7388	No
EGT	°C	404,7751	0,0107	0,029	0,6614	No
BMEP	bar	8,9574	-0,0005	0,119	0,3632	No
CA1090	°	23,9946	-0,0001	0,0006	0,9509	No
CA50	°	14,8375	-0,0004	0,0479	0,5714	No
P_{max}	bar	103,7575	-0,0024	0,0707	0,4893	No
$\theta_{P_{max}}$	°	16,6095	-0,002	0,1266	0,3473	No
HRR_{max}	J/°CA	145,7713	-0,0028	0,0045	0,8642	No
$\theta_{HRR_{max}}$	°	10,9486	-0,0094	0,1008	0,4051	No

4.4. Resultados ensayo motor Mercedes-Benz

En esta sección se presentan y discuten los resultados experimentales obtenidos para los modos de operación al 100 % y 60 % de carga. El análisis comprende los parámetros de desempeño (BSFC, EGT y BMEP), las emisiones gaseosas (NOx, CO, HC, CO₂ y O₂), los indicadores de diagnóstico de la combustión (P_{max} y HRR_{max}), la evolución temporal de la combustión ($\theta_{P_{max}}$ y $\theta_{HRR_{max}}$) y los parámetros derivados de la fracción de masa quemada (CA10–90 y CA50). Para cada variable se muestran los valores absolutos, acompañados de su correspondiente error estándar de la media (SEM), así como la variación porcentual del valor promedio respecto de la condición base con diésel puro para ambos modos de carga.

Es importante señalar que las condiciones experimentales dependen del modo de operación del motor. Al modificar la carga varían parámetros como el caudal másico de combustible y la presión a la salida del inyector, lo que altera el caudal de agua inyectada y, en consecuencia, la concentración equivalente de nanopartículas de cobre en el diésel. Como resultado, las relaciones agua/combustible (W/F) empleadas fueron de 13 % para el modo de 100 % de carga y de 40 % para el modo de 60 % de carga, mientras que las concentraciones equivalentes de nCu variaron entre 26–55 ppm y 83–171 ppm, respectivamente. Por este motivo, las concentraciones equivalentes evaluadas en cada modo de carga no son directamente comparables entre sí, sino únicamente dentro de cada condición de operación.

4.4.1. Desempeño

En esta sección se presentan las variables de desempeño del motor a plena carga (100 %), correspondientes al consumo específico de combustible al freno (BSFC), la temperatura de gases de escape (EGT) y la presión media efectiva al freno (BMEP).

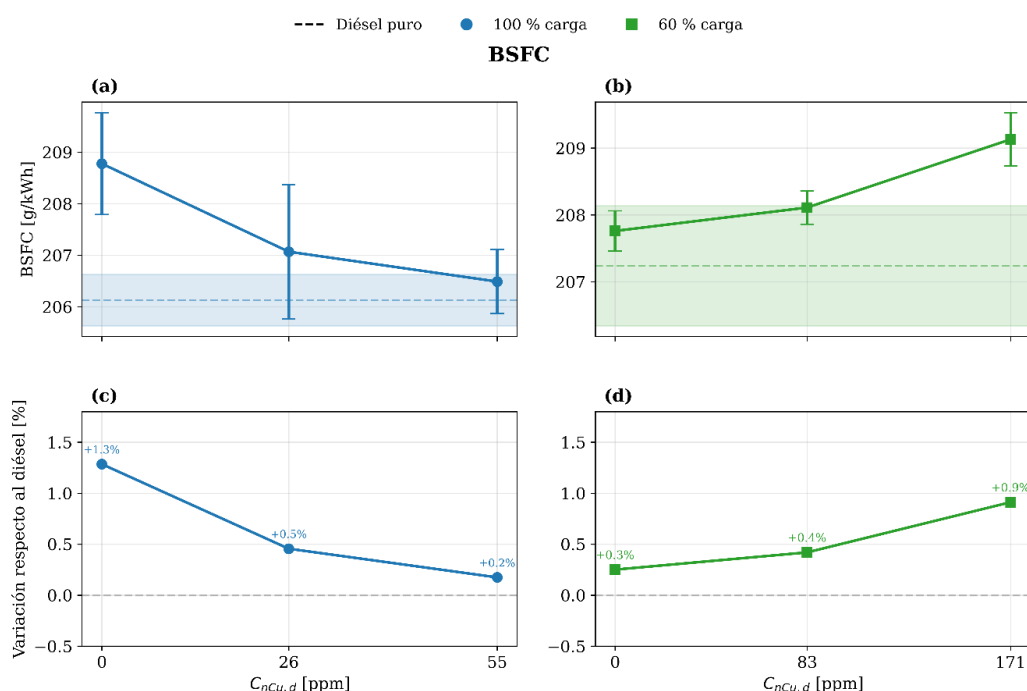


Figura 34. Resultados de BSFC para modos de carga de 100 % y 60 %.

- BSFC:** El consumo específico de combustible no presentó un efecto estadísticamente significativo en ninguno de los modos de operación evaluados ($p=0,28$ y $0,74$), obteniéndose además bajos coeficientes de determinación ($R^2=0,16$ y $0,02$), lo que evidencia la limitada capacidad del modelo para explicar la variabilidad observada. No obstante, los resultados muestran comportamientos distintos según la carga del motor. A 100 % de carga, el BSFC disminuye progresivamente al aumentar la concentración de nCu, aproximándose al valor registrado con diésel puro para la mayor concentración evaluada. En contraste, a 60 % de carga esta tendencia se invierte, observándose un incremento gradual del consumo específico conforme aumenta la concentración equivalente de nanopartículas. En ambos casos, la variación respecto a la condición base fue inferior al 2 %, aunque las suspensiones acuosas presentaron una mayor dispersión, reflejada en un incremento del error estándar de la media (SEM), especialmente a plena carga.

Aunque estas tendencias no alcanzaron significancia estadística, los resultados sugieren que, para una relación agua/combustible cercana al 13 % y concentraciones equivalentes

entre 26 y 55 ppm, la incorporación de nCu podría compensar parcialmente la penalización en el consumo asociada a la inyección de agua. En cambio, con una relación agua/combustible del 40 %, el mayor efecto de enfriamiento producido por la evaporación del agua parece predominar sobre el posible efecto catalítico de las nanopartículas, limitando su influencia sobre el BSFC. En este contexto, el menor valor de p y el mayor R^2 obtenidos a plena carga sugieren que esta tendencia podría confirmarse mediante un mayor número de réplicas o un diseño experimental con mayor potencia estadística.

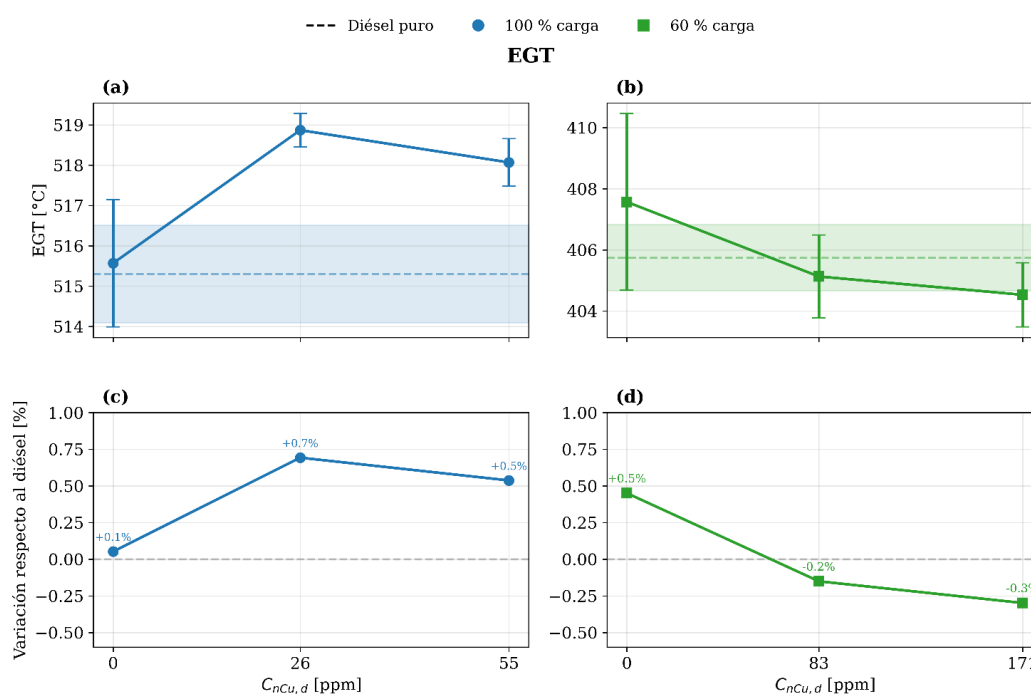


Figura 35. Resultados de EGT para modos de carga de 100 % y 60 %.

- **EGT:** En cuanto a la temperatura de los gases de escape (EGT), tampoco se observó un efecto estadísticamente significativo de la concentración de nCu ($p=0,15$ y $0,66$), obteniéndose además bajos coeficientes de determinación ($R^2=0,27$ y $0,03$), lo que confirma la limitada capacidad del modelo para explicar la variabilidad de esta respuesta. A 100 % de carga no se identificó una tendencia definida, ya que la EGT aumentó hasta la concentración de 26 ppm y posteriormente disminuyó a 55 ppm, manteniéndose en ambos casos ligeramente por sobre la condición base. En contraste, a 60 % de carga se observó una disminución gradual de la EGT al aumentar la concentración de nCu, alcanzando valores inferiores a los registrados con diésel puro. En ambos modos de operación las variaciones fueron inferiores al 1 %, siendo positivas a plena carga y negativas a carga parcial.

La reducida magnitud de estas variaciones sugiere que la EGT estuvo influenciada por distintos fenómenos que actuaron simultáneamente. Por una parte, el mayor caudal de agua inyectado a 60 % de carga favoreció un mayor enfriamiento asociado a la evaporación del agua. Por otra, las fluctuaciones en los caudales de combustible y agua, junto con la acumulación progresiva de calor en la cabina de ensayos, introdujeron una variabilidad adicional que dificultó identificar un efecto sistemático atribuible a las nanopartículas. En consecuencia, los resultados obtenidos indican que la concentración de nCu no modificó de forma apreciable la temperatura de los gases de escape dentro de las condiciones experimentales evaluadas.

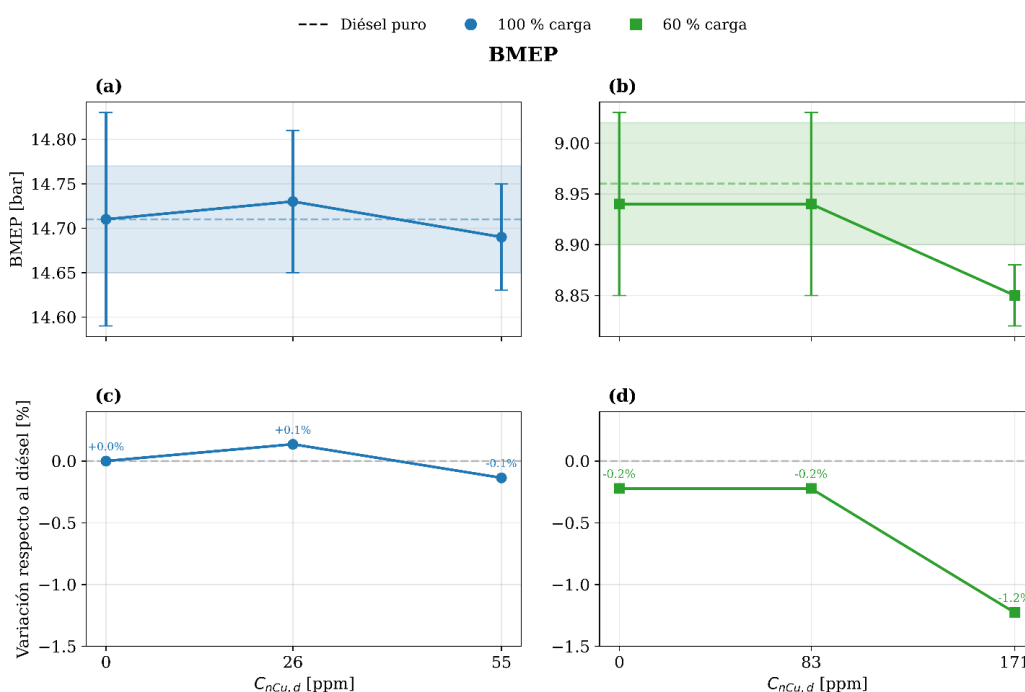


Figura 36. Resultados de BMEP para modos de carga de 100 % y 60 %.

- BMEP:** Por último, la presión media efectiva al freno (BMEP) no presentó un efecto estadísticamente significativo de la concentración de nCu ($p=0,68$ y $0,36$), obteniéndose además bajos coeficientes de determinación ($R^2=0,03$ y $0,10$), lo que confirma la limitada capacidad del modelo para explicar la variabilidad de esta respuesta. A 100 % de carga, la BMEP permaneció prácticamente constante respecto a la condición base, registrándose variaciones inferiores al 0,1 %. En contraste, a 60 % de carga se observó una disminución progresiva de la BMEP, alcanzando una reducción máxima del 1,2 % para la concentración equivalente de 171 ppm. Aunque esta tendencia no fue estadísticamente significativa, resulta consistente con el incremento del consumo específico de combustible observado bajo las mismas condiciones de operación, lo que sugiere que, para relaciones agua/combustible

elevadas, el efecto de enfriamiento asociado a la inyección de agua podría predominar sobre la posible contribución de las nanopartículas al proceso de combustión, afectando levemente el rendimiento efectivo del motor. No obstante, esta interpretación debe considerarse con cautela y requiere ser corroborada mediante un mayor número de réplicas o ensayos en un rango más amplio de condiciones de operación.

En conjunto, a 100 % de carga el incremento de la concentración de nCu estuvo acompañado por una disminución del BSFC, mientras que la EGT y el BMEP experimentaron variaciones de baja magnitud respecto a la condición con agua. En contraste, a 60 % de carga se observó un aumento del BSFC, acompañado de una disminución de la EGT y del BMEP, comportamiento que podría atribuirse al mayor caudal de agua inyectado bajo este modo de operación. Estos resultados son consistentes con los antecedentes sobre inyección de agua en motores diésel, donde generalmente se reportan reducciones de la temperatura de los gases de escape, una leve penalización del rendimiento y aumentos o variaciones poco significativas del BSFC respecto al funcionamiento con diésel puro. Por otra parte, concuerdan parcialmente con la literatura sobre nanopartículas de cobre revisada en la Sección 1.2.1, en la que la mayoría de los estudios informa reducciones del BSFC asociadas a una mejora de la eficiencia de la combustión, normalmente acompañadas por incrementos del rendimiento térmico y de la temperatura de los gases de escape. En particular, Hasannuddin et al. [3], utilizando una emulsión agua-diésel con nCuO, observaron una disminución del BSFC respecto a la condición con agua sola, aunque sin alcanzar los niveles obtenidos con diésel puro. En consecuencia, los resultados obtenidos sugieren que, bajo las condiciones evaluadas a 100 % de carga, la incorporación de nCu contribuyó a compensar parcialmente la penalización energética asociada a la inyección de agua, efecto que no fue observado bajo el régimen de 60 % de carga.

4.4.2. Perfil de emisiones gaseosas

En esta sección se presentan los resultados correspondientes a las emisiones gaseosas del motor para los modos de operación al 100 % y 60 % de carga. Se evaluaron las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos no quemados (HC), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2) y oxígeno (O_2). No obstante, la discusión se centra en los NO_x , ya que fue la única variable que mostró una respuesta consistente frente a la estrategia de inyección, mientras que el resto de las emisiones presentó variaciones de baja magnitud y sin una tendencia claramente definida.

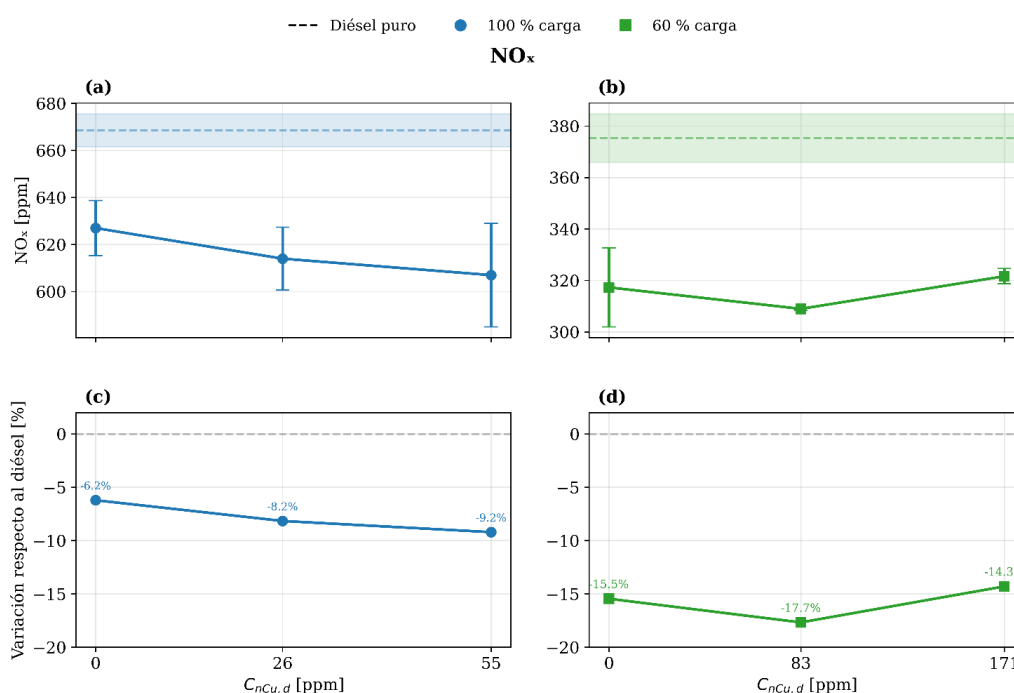


Figura 37. Resultados de NO_x para modos de carga de 100 % y 60 %.

- NO_x : Respecto a las emisiones, los óxidos de nitrógeno (NO_x) fueron la variable que presentó la mayor reducción respecto a la condición base con diésel puro. En ambos modos de operación se observó una disminución importante de las emisiones, alcanzando reducciones máximas del 9,2 % a plena carga y del 17,7 % a carga parcial. Sin embargo, el efecto de la concentración de nCu no resultó estadísticamente significativo ($p=0,30$ y $0,71$), obteniéndose además bajos coeficientes de determinación ($R^2=0,15$ y $0,02$). En concordancia con estos resultados, tampoco se observó una influencia sistemática de la concentración, ya que las variaciones entre niveles permanecieron dentro de la incertidumbre experimental y no mostraron una tendencia consistente, especialmente bajo carga parcial.

En consecuencia, los resultados sugieren que la reducción de NO_x estuvo gobernada principalmente por el efecto de la inyección de agua, cuyo enfriamiento por evaporación disminuye las temperaturas máximas alcanzadas durante la combustión y, por ende, limita la formación de NO_x térmico mediante el mecanismo de Zeldovich. Esta interpretación es consistente con la mayor reducción observada al 60 % de carga, condición en la que la relación agua/combustible fue aproximadamente el doble que a plena carga. Asimismo, estos resultados concuerdan con lo reportado en la literatura para sistemas de inyección de agua en motores diésel, donde la disminución de la temperatura máxima de combustión constituye el principal mecanismo responsable de la reducción de las emisiones de NO_x .

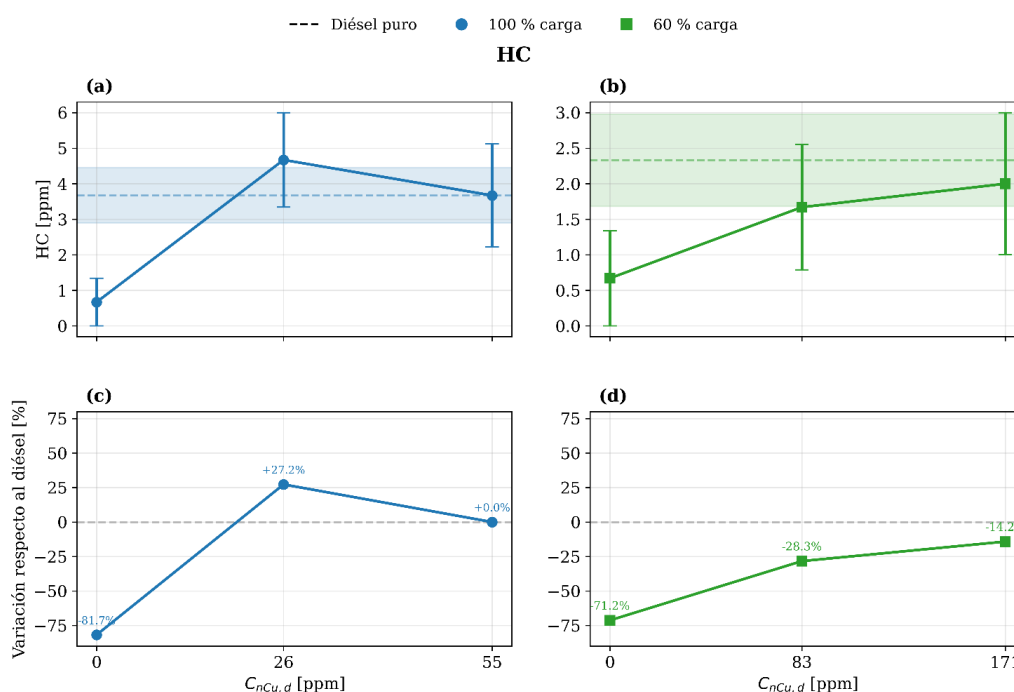


Figura 38. Resultados de HC para modos de carga de 100 % y 60 %.

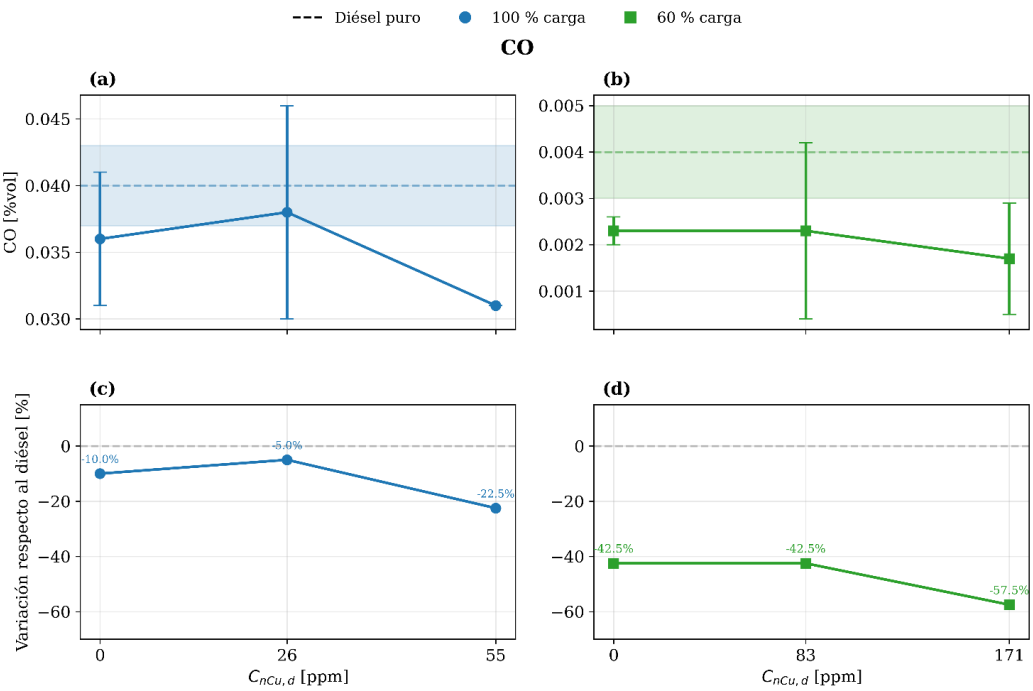


Figura 39.Resultados de CO para modos de carga de 100 % y 60 %.

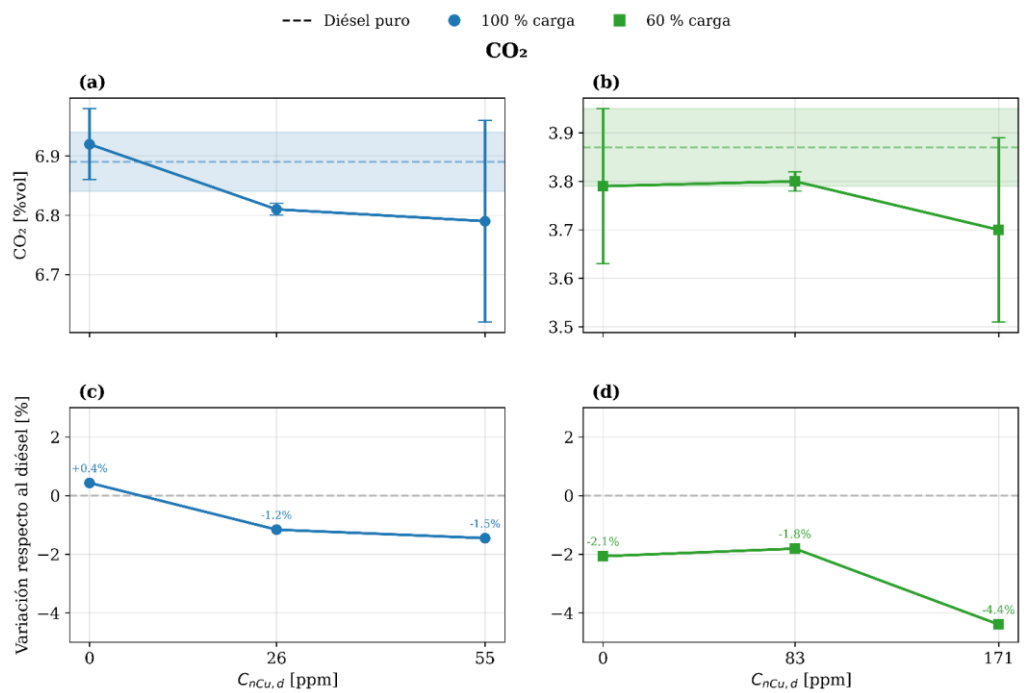


Figura 40.Resultados de CO₂ para modos de carga de 100 % y 60 %.

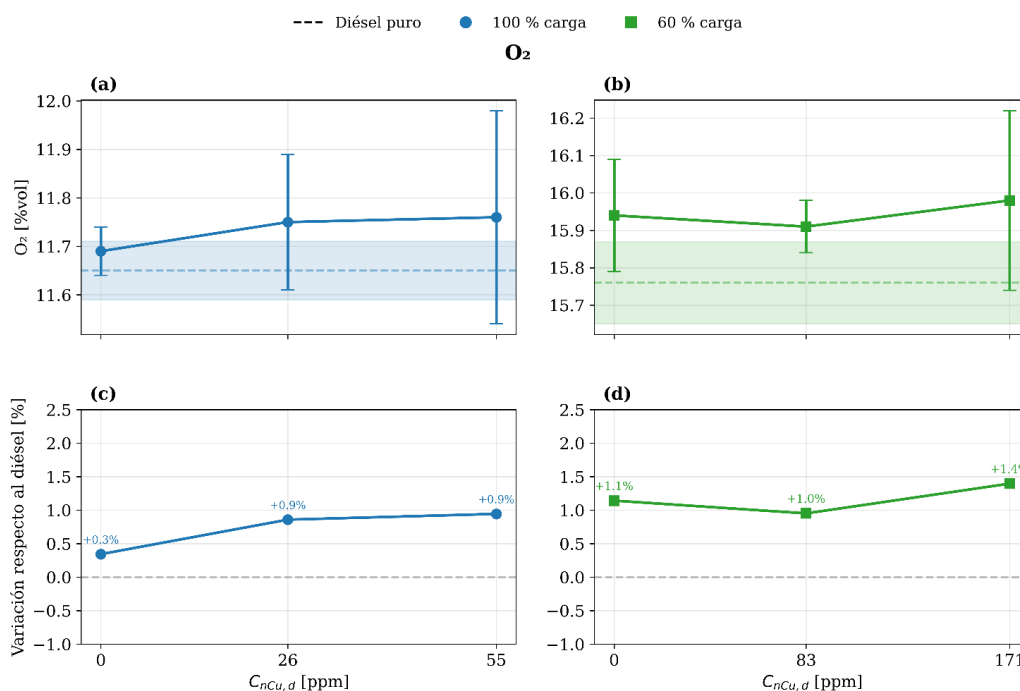


Figura 41. Resultados de O₂ para modos de carga de 100 % y 60 %.

En cuanto al resto de las emisiones gaseosas (Figuras 38 a 41), las concentraciones de CO, CO₂ y O₂ no mostraron variaciones apreciables respecto a la condición base ni entre los distintos niveles de adición de nCu. Por su parte, aunque las emisiones de HC presentaron ligeras fluctuaciones, estas no se consideran técnicamente representativas de una tendencia definida, debido a las bajas concentraciones características de los motores diésel y a la elevada dispersión experimental asociada a la medición de niveles tan reducidos.

En conjunto, las emisiones gaseosas no mostraron una respuesta sistemática frente al aumento de la concentración de nCu. Sin embargo, sí se observó una reducción consistente de las emisiones de NO_x respecto a la condición base con diésel puro, alcanzando disminuciones entre un 6 % y un 18 % según el modo de operación. Este comportamiento coincide con los antecedentes sobre inyección de agua en la admisión (WI) revisados en la Sección 1.2.3, donde se reportan reducciones de NO_x del orden de un 0,5 % por cada 1 % de incremento en la relación agua/combustible (W/F). En contraste, los estudios que emplean nanopartículas de cobre mediante emulsiones diésel (20–100 ppm) suelen informar incrementos de NO_x, atribuidos al efecto catalítico del metal, el cual acelera la liberación de calor y favorece temperaturas locales más elevadas durante la combustión.

Los resultados obtenidos sugieren que, bajo las condiciones evaluadas, la reducción de NO_x estuvo gobernada principalmente por el efecto de enfriamiento asociado a la evaporación del agua, el cual disminuye las temperaturas máximas locales de combustión y limita la formación

de NO_x térmico. En consecuencia, este mecanismo predominó sobre el posible efecto de las nanopartículas de cobre, lo que explica la ausencia de un incremento de NO_x al aumentar la concentración de nCu. Este comportamiento constituye una diferencia relevante respecto a los estudios basados en emulsiones con nanopartículas de cobre y sugiere que la incorporación mediante una suspensión acuosa inyectada en la admisión modifica el balance entre el enfriamiento producido por el agua y el posible efecto catalítico atribuido a las nCu.

4.4.3. Diagnóstico y parámetros cinéticos de la combustión

En esta sección se discuten los resultados de los parámetros de diagnóstico y cinéticos de la combustión, obtenidos a partir del análisis de los datos de presión instantánea en el cilindro.

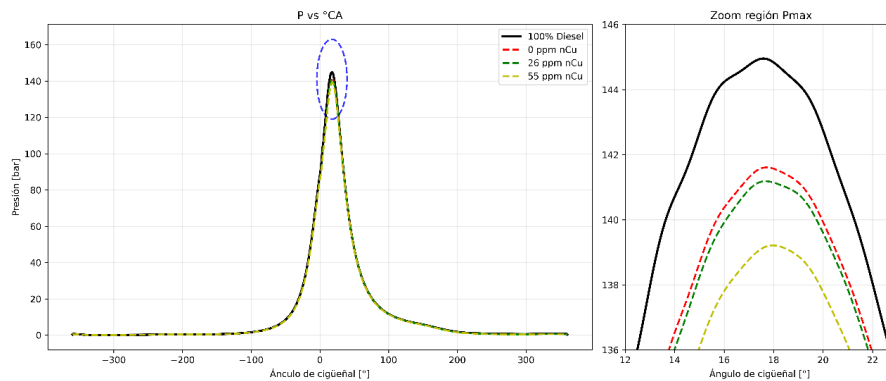


Figura 42. Curva de presión en función del ángulo de cigüeñal.

En la **Figura 42** se presenta la curva de presión en función del ángulo de cigüeñal junto con una imagen ampliada del punto máximo para las concentraciones evaluadas a plena carga, en donde se observa una disminución de la presión con el aumento de la concentración.

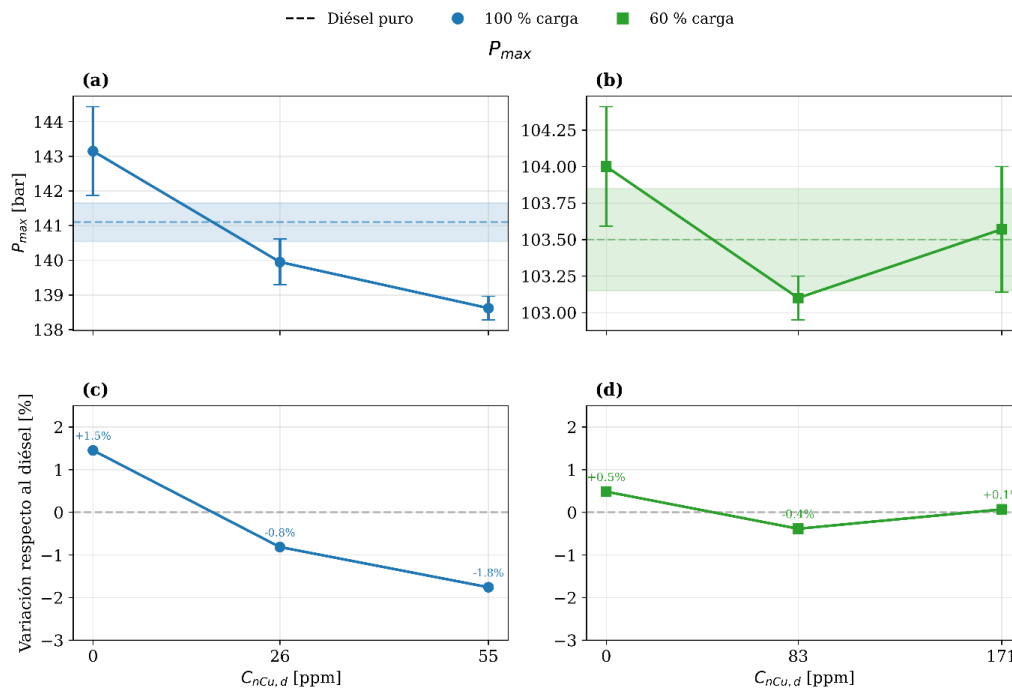


Figura 43. Resultados para presión máxima a modos de 100 % y 60 % de carga.

- P_{max} :** La presión máxima en el cilindro fue una de las pocas variables que presentó un efecto estadísticamente significativo de la concentración equivalente de nCu bajo el modo de operación al 100 % de carga ($p=0,05$), acompañado de un coeficiente de determinación relativamente alto ($R^2=0,70$). En contraste, a 60 % de carga no se observó una influencia significativa de la concentración ($p=0,49$; $R^2=0,07$). A plena carga, la presión máxima disminuyó progresivamente al aumentar la concentración de nCu, alcanzando una reducción máxima del 1,8 % respecto a la condición base. Por el contrario, a carga parcial los valores permanecieron dentro de la incertidumbre experimental, sin evidenciar una tendencia definida con la concentración.

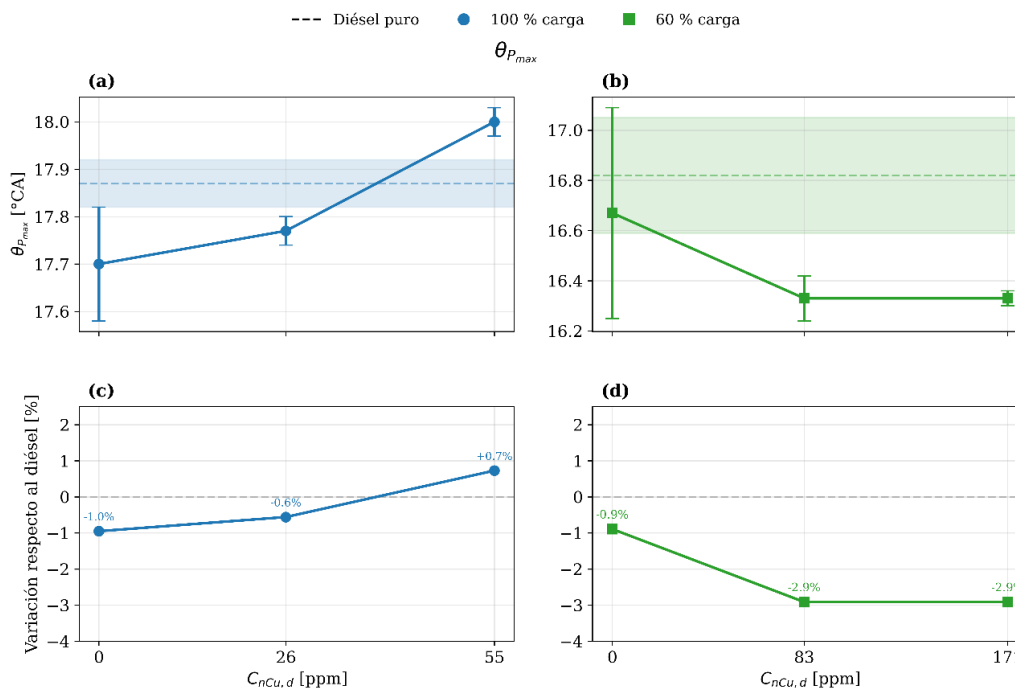


Figura 44. Resultados para posición de presión máxima a 100 % y 60 % de carga.

- $\theta_{P_{max}}$: La posición angular de la presión máxima también presentó un efecto estadísticamente significativo a 100 % de carga ($p=0,02$), acompañado de un coeficiente de determinación relativamente alto ($R^2=0,59$). En contraste, a 60 % de carga no se observó un efecto significativo de la concentración ($p=0,35$; $R^2=0,13$). A plena carga se aprecia un desplazamiento progresivo de la presión máxima hacia ángulos de cigüeñal más tardíos conforme aumenta la concentración de nCu. Por el contrario, a carga parcial la presión máxima se presentó, en general, en ángulos ligeramente más adelantados respecto a la condición base, aunque sin evidenciar una tendencia definida con la concentración.

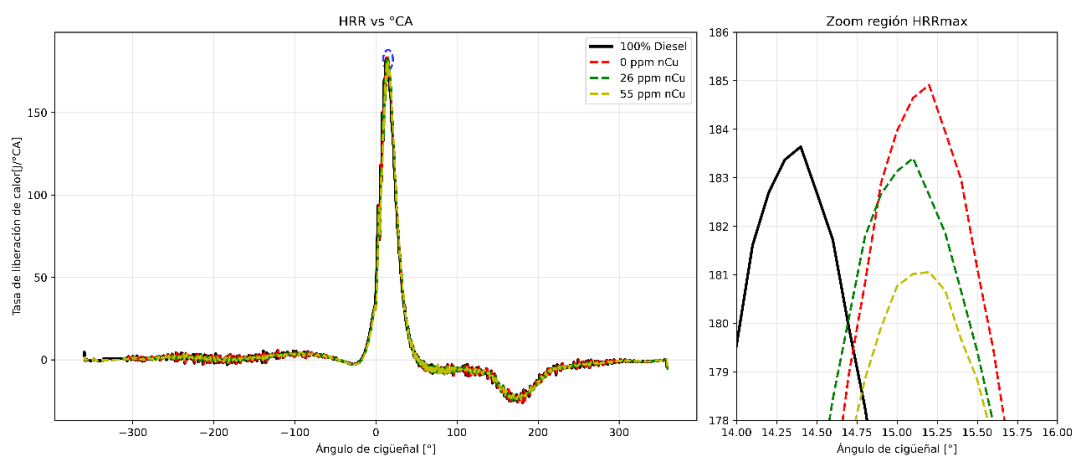


Figura 45. Curva de HRR en función del ángulo de cigüeñal a 100 % de carga.

La **Figura 45** muestra la curva de la tasa de liberación de calor en función del ángulo de cigüeñal para las concentraciones de nCu evaluadas a 100 % de carga. En esta se observa una reducción progresiva con el aumento de la concentración junto con su desplazamiento a ángulos posteriores.

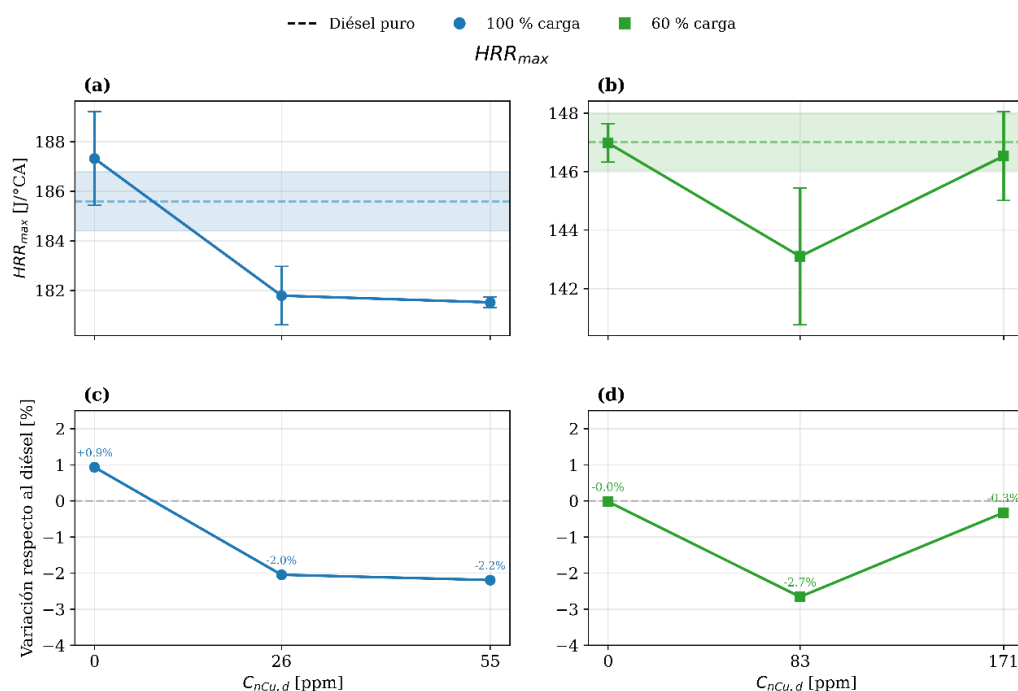


Figura 46. Resultados para HRR_{max} a 100 % y 60 % de carga.

- **HRR_{max} :** La máxima tasa de liberación de calor (HRR_{max}) también presentó un efecto estadísticamente significativo a 100 % de carga ($p=0,03$), acompañado de un coeficiente de determinación relativamente alto ($R^2=0,51$). En contraste, a 60 % de carga no se observó un efecto significativo de la concentración ($p=0,35$; $R^2=0,13$). A plena carga, la HRR_{max} disminuyó progresivamente al aumentar la concentración de nCu, alcanzando una reducción máxima del 2,2 % respecto a la condición base. Por el contrario, a 60 % de carga los valores permanecieron dentro de la incertidumbre experimental, sin evidenciar una tendencia definida con la concentración. Asimismo, la evolución de la HRR_{max} fue consistente con la observada para la presión máxima en el cilindro, registrándose la mayor variación entre la condición con agua (0 ppm) y 26 ppm, mientras que entre 26 y 55 ppm los cambios fueron considerablemente menores.

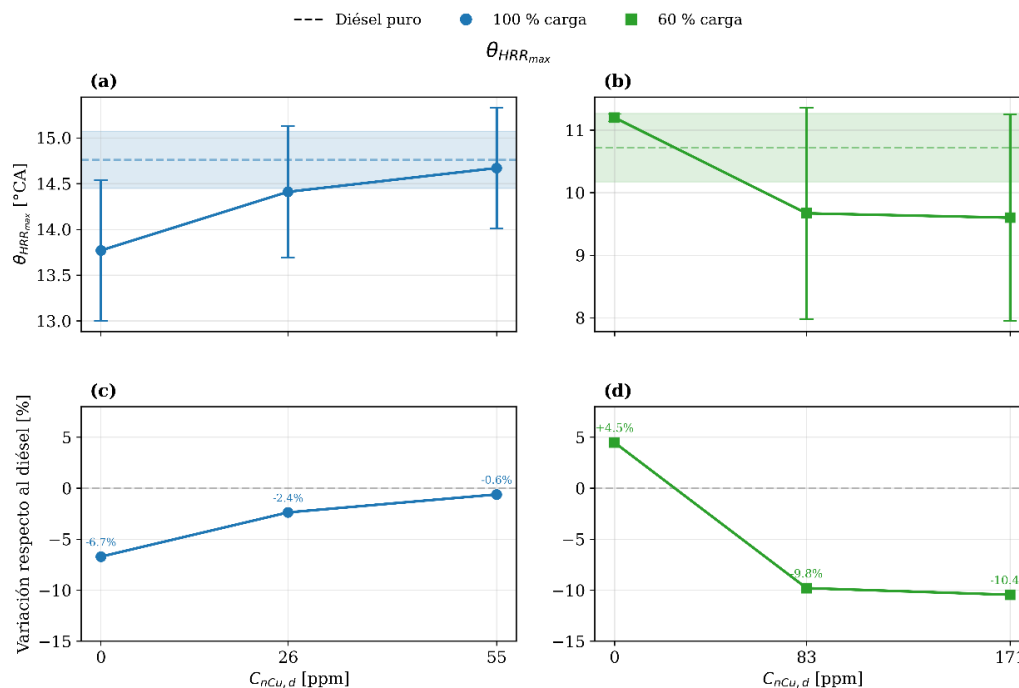


Figura 47. Resultados para posición de HRR máxima a 100 % y 60 % de carga.

- $\theta_{HRR_{max}}$: Por último, la ubicación angular de la máxima tasa de liberación de calor no presentó un efecto estadísticamente significativo de la concentración de nCu ($p=0,41$), obteniéndose además un bajo coeficiente de determinación ($R^2=0,10$), lo que evidencia la limitada capacidad del modelo para explicar la variabilidad de esta respuesta. A 100 % de carga, la inyección de agua sin nanopartículas (0 ppm) adelantó ligeramente la ocurrencia del máximo de liberación de calor respecto al funcionamiento con diésel puro. Sin embargo, al incorporar nCu, dicho máximo se desplazó gradualmente hacia ángulos de cigüeñal más tardíos, alcanzando valores similares a los registrados para la condición con diésel. En contraste, a 60 % de carga no fue posible identificar una tendencia definida, debido a la elevada dispersión experimental observada entre las réplicas.

4.4.4. Evolución temporal de quemado (CA10-90 y CA50)

En esta sección se discuten los resultados correspondientes a la duración de la combustión (CA10-90) y el punto medio de la combustión (CA50).

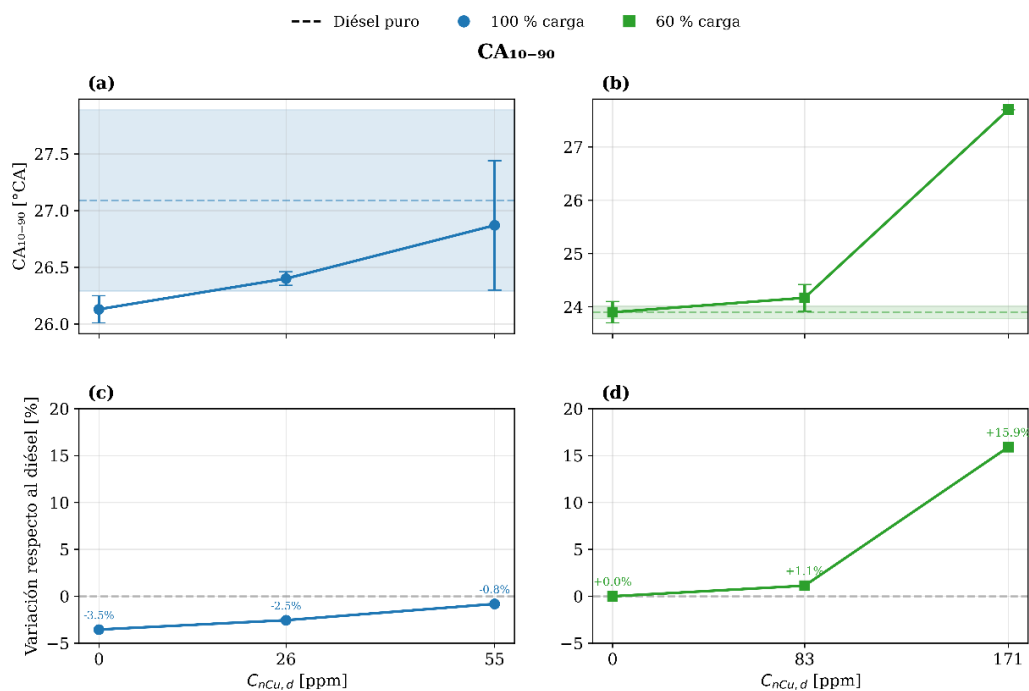


Figura 48. Resultados para duración de la combustión a 100 % y 60 % de carga.

- CA10-90:** La duración de la combustión (CA10-90) presentó un efecto estadísticamente significativo a 100 % de carga ($p=0,009$), acompañado de un coeficiente de determinación elevado ($R^2=0,65$). En contraste, a 60 % de carga no se observó un efecto significativo de la concentración ($p=0,95$; $R^2=0,006$). A plena carga, la condición con inyección de agua sin nanopartículas (0 ppm) registró la menor duración de la combustión. Sin embargo, al aumentar la concentración de nCu, el intervalo CA10-90 se incrementó progresivamente hasta aproximarse al valor obtenido para la condición de referencia con diésel puro. Por el contrario, a 60 % de carga la duración de la combustión permaneció prácticamente constante, sin evidenciar una tendencia asociada a la concentración de nCu.

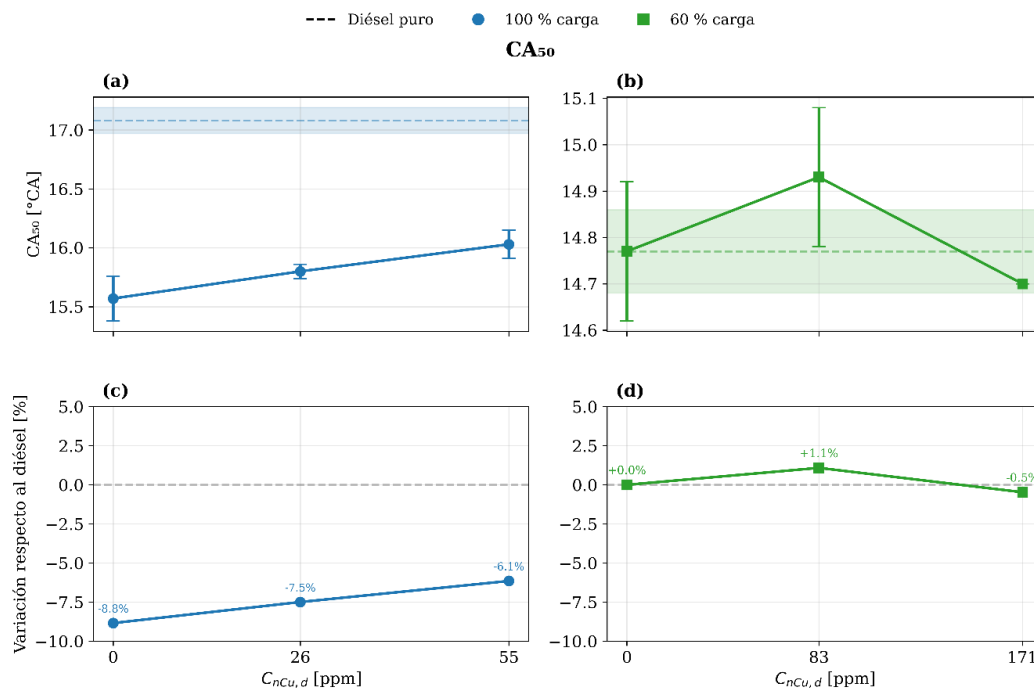


Figura 49. Resultados para punto medio de la combustión a 100 % y 60 % de carga.

- CA50:** El ángulo correspondiente al centro de la combustión (CA50) presentó un efecto estadísticamente significativo de la concentración de nCu a 100 % de carga ($p=0,04$), acompañado de un coeficiente de determinación de $R^2=0,47$, lo que indica que el modelo explica una fracción importante de la variabilidad observada. En contraste, a 60 % de carga no se evidenció un efecto significativo ($p=0,57$; $R^2=0,05$). A plena carga, todos los casos con inyección de agua presentaron un adelantamiento del CA50 respecto a la condición de referencia con diésel puro. Sin embargo, al aumentar la concentración de nCu, el centro de la combustión se desplazó gradualmente hacia ángulos de cigüeñal más tardíos, aunque permaneció adelantado respecto a la condición base.

Este comportamiento sugiere que la inyección de agua adelantó el desarrollo global de la combustión respecto al funcionamiento con diésel puro. No obstante, el incremento en la concentración de nCu atenuó parcialmente dicho efecto, desplazando progresivamente el CA50 hacia posiciones más cercanas a la condición de referencia.

En conjunto, los resultados obtenidos a 100 % de carga muestran que el aumento de la concentración de nCu estuvo acompañado por una disminución de la presión máxima (P_{max}) y de la tasa máxima de liberación de calor (HRR_{max}), además de un desplazamiento de ambos máximos hacia ángulos de cigüeñal más tardíos. Junto con el incremento de la duración de la combustión (CA10–90), estos resultados sugieren una liberación de energía más gradual durante el ciclo, reduciendo la intensidad de la combustión premezclada. Asimismo, el BSFC, la P_{max} y la HRR_{max} presentaron la mayor

variación entre la condición con agua (0 ppm) y 26 ppm, mientras que el cambio entre 26 y 55 ppm fue considerablemente menor, lo que sugiere una disminución del efecto marginal al incrementar la concentración de nCu dentro del rango evaluado. En este mismo modo de operación, el BMEP permaneció prácticamente constante, indicando que estas modificaciones en la combustión no se tradujeron en cambios apreciables en el rendimiento efectivo del motor.

Este comportamiento difiere parcialmente de lo reportado para emulsiones diésel con nanopartículas metálicas, donde el efecto catalítico suele incrementar la velocidad de combustión, elevando la presión máxima y la tasa de liberación de calor, además de favorecer un aumento de las emisiones de NO_x. En el presente estudio, las emisiones de NO_x permanecieron prácticamente constantes al aumentar la concentración de nCu, dentro de la incertidumbre experimental, mientras que la reducción observada respecto al diésel puro estuvo dominada por el efecto de la inyección de agua. Una posible explicación es que, bajo las condiciones evaluadas, el enfriamiento asociado a la evaporación del agua predominó sobre el posible efecto catalítico de las nanopartículas, favoreciendo una combustión más distribuida temporalmente. En este contexto, la ligera elevación de la temperatura de los gases de escape podría atribuirse a que una mayor fracción del calor se liberó durante etapas más tardías del ciclo, incrementando la energía transportada por los gases de escape sin implicar necesariamente un aumento de la temperatura máxima de combustión.

Por el contrario, a 60 % de carga no se observaron mejoras en el proceso de combustión asociadas al aumento de la concentración de nCu. Bajo este modo de operación, el mayor caudal de agua inyectado (W/F≈40 %) estuvo acompañado por un incremento del BSFC y una disminución del BMEP, lo que sugiere que el efecto refrigerante de la fase acuosa predominó sobre la posible contribución de las nanopartículas al proceso de combustión.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1. Conclusiones

El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar el efecto de suspensiones acuosas de nCu inyectadas post-intercooler sobre el desempeño, la combustión y las emisiones de un motor Mercedes-Benz OM 366LA. Para ello, se desarrolló un sistema de inyección de agua, se caracterizó la estabilidad de las suspensiones y se realizaron ensayos experimentales bajo condiciones de operación al 100 % y 60 % de carga.

- Los ensayos de estabilidad demostraron que el aditivo comercial Cu9-Schultz presenta un comportamiento significativamente más estable en agua destilada que en combustible diésel. Las evaluaciones de transmitancia y decantación confirmaron que las suspensiones acuosas mantuvieron una dispersión adecuada durante el tiempo requerido para los ensayos, validando la utilización del agua como medio de transporte para la incorporación de nanopartículas metálicas de cobre mediante inyección en la admisión.
- El sistema de inyección post-intercooler desarrollado permitió suministrar de forma controlada suspensiones acuosas con nanopartículas de cobre bajo diferentes condiciones de operación del motor. Asimismo, la metodología experimental permitió obtener condiciones de ensayo reproducibles y un nivel de repetibilidad adecuado para evaluar el efecto de la concentración equivalente de nCu.
- A plena carga (100 %), la concentración equivalente de nCu produjo modificaciones estadísticamente significativas en el desarrollo de la combustión, evidenciadas por cambios en la presión máxima (P_{max}), la posición angular de la presión máxima ($\theta_{P_{max}}$), la tasa máxima de liberación de calor (HRR_{max}), la duración de la combustión (CA10–90) y el centro de la combustión (CA50). En conjunto, estos resultados indican que la incorporación de nCu favoreció una liberación de energía más gradual y distribuida temporalmente respecto a la condición con agua sola.
- En el rango de concentraciones evaluado no se identificaron efectos estadísticamente significativos de la concentración de nCu sobre las variables de desempeño ni sobre las emisiones gaseosas. En particular, aunque a plena carga se observó una tendencia a la reducción del BSFC, esta no fue suficiente para demostrar una mejora concluyente del rendimiento del motor. Asimismo, la disminución de las emisiones de NO_x observada

respecto al diésel puro estuvo asociada principalmente al efecto de la inyección de agua y no al incremento de la concentración de nanopartículas

- Durante la operación al 60 % de carga no se observaron relaciones estadísticamente significativas entre la concentración equivalente de nCu y ninguna de las variables evaluadas. Los resultados sugieren que la mayor relación agua/combustible utilizada bajo esta condición (≈ 40 %) incrementó el efecto de enfriamiento asociado a la evaporación del agua, predominando sobre el posible efecto catalítico de las nanopartículas e impidiendo que el aumento de la concentración generara cambios apreciables en el proceso de combustión o en el desempeño del motor.

Los resultados obtenidos muestran que la respuesta de las nanopartículas de cobre no depende únicamente de su concentración, sino también de la relación agua/combustible utilizada como medio de transporte. Bajo las condiciones evaluadas, una relación agua/combustible cercana al 13 % permitió evidenciar modificaciones estadísticamente significativas en la cinética de la combustión, mientras que una relación cercana al 40 % tendió a enmascararlas debido al mayor efecto de enfriamiento asociado a la evaporación del agua. En consecuencia, el comportamiento de las suspensiones acuosas de nanopartículas estuvo fuertemente condicionado por el modo de operación del motor y por la cantidad de agua inyectada. La principal influencia de las nCu se observó sobre el desarrollo temporal de la combustión a plena carga, sin encontrarse evidencias estadísticamente significativas de mejoras en el rendimiento energético global ni en las emisiones gaseosas dentro del rango de concentraciones estudiado. Finalmente, la metodología de estabilización desarrollada permitió controlar la variabilidad térmica del banco de ensayos y establecer un procedimiento experimental reproducible para evaluar suspensiones acuosas de nanopartículas inyectadas en la admisión de aire. Este procedimiento constituye un aporte metodológico para futuras investigaciones orientadas a estudiar estrategias de inyección acuosa de nanopartículas en motores diésel.

5.2. Recomendaciones para trabajos futuros

Durante el desarrollo de este trabajo se presentaron diversos desafíos técnicos, asociados principalmente a la estabilidad de las suspensiones y a la implementación física del sistema de inyección de agua. Con el propósito de facilitar el desarrollo y la continuidad de esta línea de investigación, se detallan a continuación las principales problemáticas identificadas junto con sus respectivas recomendaciones.

5.2.1. Estabilidad y conservación nCu

Uno de los principales problemas detectados en los análisis de estabilidad fue la alta sensibilidad de las nanopartículas a las condiciones ambientales. Durante el almacenamiento del aditivo comercial, el aire que quedaba atrapado en los frascos de vidrio favoreció la oxidación parcial del cobre. Esto provocó aglomeración del material, que se pegara a las paredes del frasco y que el vidrio se tiñera, lo que reduce la concentración efectiva de nCu disponible para las pruebas. Por este motivo se recomienda reducir al mínimo la presencia de aire durante el almacenamiento (usando envases al vacío o con atmósfera inerte) y preparar las suspensiones justo después de abrir el envase original, para limitar la oxidación y conservar mejor las propiedades del aditivo.



Figura 50. frascos con residuos de nCu tras almacenamiento.



Figura 51. Frasco precipitado con residuos de nCu.

Otro punto importante por mejorar es el método usado para evaluar la estabilidad de las suspensiones. El ensayo de transmitancia óptica no funcionó bien con estas muestras, porque su coloración oscura saturó el equipo y no permitió obtener lecturas confiables por encima de 218 ppm. Además, como se comentó en la Sección 4.1.3, tanto el grado de dilución como la concentración de nanopartículas influyen directamente en la estabilidad de la mezcla. Por eso, para trabajos futuros se recomienda probar otras técnicas de caracterización, como la velocidad de sedimentación por contrapeso o la medición del potencial Zeta. También convendría preparar una suspensión similar a la comercial, pero con menor concentración de nanopartículas de cobre, para poder seguir mejor su estabilidad durante el almacenamiento.

5.2.2. Modificaciones del sistema de inyección

A partir de la experiencia de los ensayos se detectaron varios puntos críticos de mejora en el sistema de inyección. En primer lugar, conviene evitar que la bomba trabaje a su presión máxima, porque en ese límite el caudal de agua se volvió más inestable y afectó la repetibilidad de las pruebas. Se propone instalar una válvula reguladora de presión independiente en el circuito de inyección. De este modo el caudal de agua se mantendría constante, aunque cambie la presión en el colector de admisión del motor. Esta modificación permitiría separar el funcionamiento del sistema de inyección de la carga del motor, facilitaría la comparación directa entre distintos regímenes y ayudaría a aislar mejor el efecto real de la concentración de nanopartículas. Para el cálculo del consumo específico de combustible, el flujo másico se obtuvo a partir de la pendiente de la variación de masa en la balanza durante un intervalo de operación cuasi-estacionario. Aunque este método dio resultados repetibles, en trabajos futuros sería conveniente usar un sistema de adquisición continua que sincronice en tiempo real la medición del flujo de combustible con la potencia efectiva del motor. Así se reduciría el efecto de los periodos transitorios, sobre todo al inicio de la inyección de agua, se

bajaría el margen de error y se ganaría precisión en la estimación del BSFC en condiciones dinámicas.



Figura 52. Sistema de inyección de agua.

Referencias

- [1] Ü. Ağbulut, S. Sarıdemir, U. Rajak, F. Polat, A. Afzal, and T. N. Verma, “Effects of high-dosage copper oxide nanoparticles addition in diesel fuel on engine characteristics,” *Energy*, vol. 229, art. no. 120611, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.120611.
- [2] S. Khulief and T. M. Aboul-Fotouh, “Experimental investigation of upgraded diesel fuel with copper oxide nanoparticles on performance and emissions characteristics of diesel engine,” *Journal of Energy and Power Engineering*, vol. 11, no. 8, Aug. 2017, doi: 10.17265/1934-8975/2017.08.006.
- [3] A. K. Hasannuddin *et al.*, “Nano-additives incorporated water in diesel emulsion fuel: Fuel properties, performance and emission characteristics assessment,” *Energy Conversion and Management*, vol. 169, pp. 291–314, 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.05.070.
- [4] R. Garugubilli, V. V. Siva Prasad, and J. Sagari, “Experimental investigation on diesel engine operating with CuO nanoparticles dispersed *Azadirachta indica* biodiesel,” *International Journal of Thermofluids*, vol. 22, art. no. 100641, May 2024, doi: 10.1016/j.ijft.2024.100641.
- [5] P. M. Rastogi, A. Sharma, and N. Kumar, “Effect of CuO nanoparticles concentration on the performance and emission characteristics of the diesel engine running on jojoba (*Simmondsia chinensis*) biodiesel,” *Fuel*, vol. 286, art. no. 119358, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2020.119358.
- [6] K. Surendrababu, K. G. Muthurajan, M. Prabhakar, S. Prakash, M. Saravana Kumar, and M. Jayakumar, “Performance, emission, and study of DI diesel engine running on pumpkin seed oil methyl ester with the effect of copper oxide nanoparticles as an additive,” *Journal of Nanomaterials*, vol. 2022, art. no. 3800528, Jan. 2022, doi: 10.1155/2022/3800528.
- [7] T. Karthikeyan, “Effects of copper oxide nanoparticle addition in diesel and biodiesel blends on the performance and emission characteristics of a diesel engine,” *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, vol. 7, no. 4, pp. 156–161, Apr. 2019, doi: 10.22214/ijraset.2019.4028.
- [8] S. Muniyappan and R. Krishnaiah, “Investigation on CuO nanoparticle enhanced mahua biodiesel/diesel fuelled CI engine combustion for improved performance and emission abetted by response surface methodology,” *Scientific Reports*, vol. 14, art. no. 26882, Nov. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-77271-3.
- [9] K. Kalaimurugan, S. Karthikeyan, M. Periyasamy, G. Mahendran, and T. Dharmaprabakaran, “Experimental studies on the influence of copper oxide nanoparticle on biodiesel-diesel fuel blend in CI engine,” *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 45, no. 3, pp. 8997–9012, Aug. 2023, doi: 10.1080/15567036.2019.1679290.

- [10] V. A. B. Pascual, “Determinación de estabilidad, propiedades termofísicas y efectos tanto en el rendimiento como en las emisiones de un motor Diesel, para un aditivo en base a nanopartículas de cobre, mediante un diseño experimental,” Memoria de título, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.
- [11] R. Holtbecker and M. Geist, “Exhaust emissions reduction technology for Sulzer marine diesel engines: General aspects,” Wärtsilä NSD Switzerland Ltd., Winterthur, Switzerland, Jul. 1998.
- [12] J. Vollenweider, M. Geist, and M. Schaub, “Residual fuels in emission-controlled diesel engines: Background, developments and operational results,” in *Proc. 1995 CIMAC Congress*, Interlaken, Switzerland, 1995.
- [13] D. Szöllősi and P. Kiss, “Effects of water injection in diesel engine emission treatment system—A review in the light of EURO 7,” *Energies*, vol. 17, no. 20, art. no. 5107, Oct. 2024, doi: 10.3390/en17205107.
- [14] W. A. Majewski, “Water in diesel combustion,” *DieselNet Technology Guide*, EcoPoint Inc. [Online]. Available: https://dieselnet.com/tech/engine_water.php
- [15] Z. Şahin, M. Tuti, and O. Durgun, “Experimental investigation of the effects of water adding to the intake air on the engine performance and exhaust emissions in a DI automotive diesel engine,” *Fuel*, vol. 115, pp. 884–895, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.fuel.2012.10.080.
- [16] M. Kettner *et al.*, “Investigating the influence of water injection on the emissions of a diesel engine,” *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, vol. 10, no. 1, pp. 1863–1881, Jun. 2016, doi: 10.15282/jmes.10.1.2016.11.0179.
- [17] N. Ortega C., “Análisis de la inyección de agua en un motor diésel para la reducción de emisiones contaminantes,” Memoria de título, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile, 2021.
- [18] K. A. Subramanian, “A comparison of water–diesel emulsion and timed injection of water into the intake manifold of a diesel engine for simultaneous control of NO and smoke emissions,” *Energy Conversion and Management*, vol. 52, no. 2, pp. 849–857, Feb. 2011, doi: 10.1016/j.enconman.2010.08.010.
- [19] X. Tauzia, A. Maiboom, and S. R. Shah, “Experimental study of inlet manifold water injection on combustion and emissions of an automotive direct injection Diesel engine,” *Energy*, vol. 35, no. 9, pp. 3628–3639, Sep. 2010, doi: 10.1016/j.energy.2010.05.007.
- [20] A. Stark, “Brake specific fuel consumption (BSFC),” *x-engineer.org*, Aug. 2017. [Online]. Available: <https://x-engineer.org/brake-specific-fuel-consumption-bsfc/>

- [21] EstSuperPro, “Potencia al freno: Definición y cálculo,” *Scribd*. [Online]. Available: <https://es.scribd.com/document/847726874/potencia-al-freno>
- [22] “Brake mean effective pressure (BMEP) – Definition, formula, and calculation,” *X-Engineer.org*, 2023. [Online]. Available: <https://x-engineer.org/brake-mean-effective-pressure-bmep/>
- [23] J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, 2nd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2018.
- [24] F. O. Olanrewaju, H. Li, G. E. Andrews, and H. N. Phylaktou, “Improved model for the analysis of the heat release rate (HRR) in compression ignition (CI) engines,” *Journal of the Energy Institute*, vol. 93, no. 5, pp. 1901–1913, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.joei.2020.04.005.
- [25] A. Kefalas, A. Ofner, G. Pirker, S. Posch, B. Geiger, and A. Wimmer, “Estimation of combustion parameters from engine vibrations based on discrete wavelet transform and gradient boosting,” *Sensors*, vol. 22, no. 11, p. 4235, Jun. 2022, doi: 10.3390/s22114235.
- [26] B. M. Prabhu, S. F. Ali, R. C. Murdock, S. M. Hussain, and M. Srivatsan, “Copper nanoparticles exert size and concentration dependent toxicity on somatosensory neurons of rat,” *Nanotoxicology*, vol. 4, no. 2, pp. 150–160, Jun. 2010, doi: 10.3109/17435390903337693.
- [28] A. A. Janjua, W. Khalid, S. R. Shah, and X. Tauzia, “Exploring the efficacy of port water injection on air–fuel ratios and NO_x emissions in diesel engines: An experimental study,” *Engineering Proceedings*, vol. 75, no. 1, art. no. 38, Oct. 2024, doi: 10.3390/engproc2024075038.
- [29] M.-J. Lai *et al.*, “Effect of size and concentration of copper nanoparticles on the antimicrobial activity in *Escherichia coli* through multiple mechanisms,” *Nanomaterials*, vol. 12, no. 21, p. 3715, Oct. 2022, doi: 10.3390/nano12213715.
- [30] M. Ajdary *et al.*, “Health concerns of various nanoparticles: A review of their in vitro and in vivo toxicity,” *Nanomaterials*, vol. 8, no. 9, p. 634, Aug. 2018, doi: 10.3390/nano8090634.
- [31] W. Liu, Y. Wu, C. Wang, H. C. Li, T. Wang, C. Y. Liao, L. Cui, Q. F. Zhou, B. Yan, and G. B. Jiang, “Impact of silver nanoparticles on human cells: Effect of particle size,” *Nanotoxicology*, vol. 4, no. 3, pp. 319–330, Sep. 2010, doi: 10.3109/17435390.2010.483745.
- [32] X. Li, L. Wang, Y. Fan, Q. Feng, and F. Cui, “Biocompatibility and toxicity of nanoparticles and nanotubes,” *Journal of Nanomaterials*, vol. 2012, art. no. 548389, Jan. 2012, doi: 10.1155/2012/548389.
- [33] M. M. Rashid, P. Forte Tavčer, and B. Tomšič, “Influence of titanium dioxide nanoparticles on human health and the environment,” *Nanomaterials*, vol. 11, no. 9, p. 2354, Sep. 2021, doi: 10.3390/nano11092354.

- [34] D. Docter, D. Westmeier, M. Markiewicz, S. Stolte, S. K. Knauer, and R. H. Stauber, “The nanoparticle biomolecule corona: Lessons learned – challenge accepted?” *Chemical Society Reviews*, vol. 44, no. 17, pp. 6094–6121, 2015, doi: 10.1039/C5CS00217F.
- [35] S. T. Stern and S. E. McNeil, “Nanotechnology safety concerns revisited,” *Toxicological Sciences*, vol. 101, no. 1, pp. 4–21, Jan. 2008, doi: 10.1093/toxsci/kfm169.
- [36] G. Caracciolo, O. C. Farokhzad, and M. Mahmoudi, “Biological identity of nanoparticles in vivo: Clinical implications of the protein corona,” *Trends in Biotechnology*, vol. 35, no. 3, pp. 257–264, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.tibtech.2016.08.011.
- [37] S. Naz, A. Gul, and M. Zia, “Toxicity of copper oxide nanoparticles: A review study,” *IET Nanobiotechnology*, vol. 14, no. 1, pp. 1–13, Feb. 2020, doi: 10.1049/iet-nbt.2019.0176.
- [38] I. Na and D. C. Kennedy, “Size-specific copper nanoparticle cytotoxicity varies between human cell lines,” *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 22, no. 4, p. 1548, Feb. 2021, doi: 10.3390/ijms22041548.
- [39] C. Peng *et al.*, “Transformation of CuO nanoparticles in the aquatic environment: Influence of pH, electrolytes and natural organic matter,” *Nanomaterials*, vol. 7, no. 10, p. 326, Oct. 2017, doi: 10.3390/nano7100326.
- [40] R. D. Kent and P. J. Vikesland, “Dissolution and persistence of copper-based nanomaterials in undersaturated solutions with respect to cupric solid phases,” *Environmental Science & Technology*, vol. 50, no. 13, pp. 6772–6781, Jul. 2016, doi: 10.1021/acs.est.5b04719.
- [41] A. Tegenaw, G. A. Sorial, E. Sahle-Demessie, and C. Han, “Role of water chemistry on stability, aggregation, and dissolution of uncoated and carbon-coated copper nanoparticles,” *Environmental Research*, vol. 187, art. no. 109700, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.envres.2020.109700.
- [42] J. R. Conway, A. S. Adeleye, J. Gardea-Torresdey, and A. A. Keller, “Aggregation, dissolution, and transformation of copper nanoparticles in natural waters,” *Environmental Science & Technology*, vol. 49, no. 5, pp. 2749–2756, Mar. 2015, doi: 10.1021/es504918q.
- [43] V. I. Pryakhina, B. I. Lisjikh, V. A. Lebedev, S. A. M. Tofail, and V. Ya. Shur, “Temperature controlled morphology transformation during aging of colloidal copper nanoparticles produced by laser ablation in water,” *Materials Today Communications*, vol. 35, art. no. 105939, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.mtcomm.2023.105939.
- [44] B. N. Ross and C. D. Knightes, “Simulation of the environmental fate and transformation of nano copper oxide in a freshwater environment,” *ACS ES&T Water*, vol. 2, no. 9, pp. 1532–1543, Sep. 2022, doi: 10.1021/acsestwater.2c00157.

- [45] Commission Regulation (EU) 2018/1881 of 3 December 2018 amending Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council on the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH) as regards Annexes I, III, VI, VII, VIII, IX, X, XI and XII to address nanoforms of substances, *Official Journal of the European Union*, 2018.
- [46] European Agency for Safety and Health at Work, “CLP: Classification, labelling and packaging of substances and mixtures,” EU-OSHA. [Online]. Available: <https://osha.europa.eu/es/themes/dangerous-substances/clp-classification-labelling-and-packaging-of-substances-and-mixtures>
- [47] National Institutes of Health, Office of Research Services, Division of Occupational Health and Safety, *Nanotechnology Safety and Health Program*. Bethesda, MD, USA: National Institutes of Health, 2016. [Online]. Available: <https://ors.od.nih.gov/sr/dohs/Documents/nanotechnology-safety-and-health-program.pdf>
- [48] Ministerio de Salud, *Decreto Supremo N.º 594: Aprueba Reglamento sobre Condiciones Sanitarias y Ambientales Básicas en los Lugares de Trabajo*. Santiago, Chile, 29 Apr. 2000. [Online]. Available: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=167766>
- [49] Ministerio de Salud, *Decreto Supremo N.º 148: Aprueba Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos*. Santiago, Chile, 12 Jun. 2003. [Online]. Available: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=226458>
- [50] International Organization for Standardization, *ISO/TS 80004-2:2015, Nanotechnologies—Vocabulary—Part 2: Nano-objects*. Geneva, Switzerland: ISO, Jun. 2015. [Online]. Available: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/20048/97cd291878734f74906c8661e7fce8e6/ISO-TS-80004-2-2015.pdf>
- [51] D. Di Battista, D. Vittorini, M. Di Bartolomeo, and R. Cipollone, “Optimization of the engine intake air temperature through the air conditioning unit,” *SAE Technical Paper* 2018-01-0973, Apr. 2018, doi: 10.4271/2018-01-0973.
- [52] C. Yu, W. Zhang, X. Xue, J. Lou, and G. Lao, “Analysis of water-cooled intercooler thermal characteristics,” *Energies*, vol. 14, no. 24, art. no. 8332, Dec. 2021, doi: 10.3390/en14248332.
- [53] V. Bondar, S. Aliukov, A. Malozemov, and A. Das, “Mathematical model of thermodynamic processes in the intake manifold of a diesel engine with fuel and water injection,” *Energies*, vol. 13, no. 17, art. no. 4315, Aug. 2020, doi: 10.3390/en13174315.
- [54] Kistler Group, “Piezoelectric pressure sensors Type 603C... – Miniature transducers for highly dynamic measurements up to 1000 bar,” Datasheet 003-288e, Kistler Instrumente AG, Winterthur, Switzerland, 2025.

[55] Kistler Group, “Laboratory charge amplifier Type 5015A...,” Datasheet 000-297e, Kistler Instrumente AG, Winterthur, Switzerland.

[56] Kistler Group, “Piezoelectric pressure sensors Type 601C...,” Datasheet 003-199e, Kistler Instrumente AG, Winterthur, Switzerland, 2025.

[57] Kistler Group, “KiTorq / Force sensor flange – measure. analyze. innovate.,” Product documentation, Kistler Instrumente AG, Winterthur, Switzerland.

[58] Omega Engineering, “OMB-DAQ-56 USB Data Acquisition System,” User’s Guide OMB-491-0901, Omega Engineering Inc., Stamford, CT, USA.

Anexo 1: Datos utilizados en gráficos de variaciones porcentuales.

Tabla 20. Resultados para el cálculo de variaciones porcentuales a 100% de carga.

Parámetro	Diésel	nCu0	nCu26	nCu55
NOx	668,56 ± 7,07	626,67 ± 11,67	613,67 ± 13,45	607,33 ± 22,59
HC	3,67 ± 0,78	0,67 ± 0,67	4,67 ± 1,33	3,67 ± 1,45
CO	0,04 ± 0,003	0,04 ± 0,005	0,04 ± 0,008	0,03 ± 0,000
CO ₂	6,89 ± 0,05	6,92 ± 0,06	6,81 ± 0,10	6,79 ± 0,17
O ₂	11,65 ± 0,06	11,69 ± 0,053	11,75 ± 0,145	11,76 ± 0,219
TEG	516,30 ± 1,21	515,57 ± 1,58	518,87 ± 0,41	518,07 ± 0,59
BSFC	206,13 ± 0,5	208,78 ± 0,99	207,07 ± 1,30	206,49 ± 0,62
CA10-90	27,09 ± 0,80	26,13 ± 0,12	26,4 ± 0,06	26,87 ± 0,69
P_{max}	141,1 ± 0,59	143,15 ± 1,28	139,95 ± 0,66	138,62 ± 0,42
θ_{Pmax}	17,87 ± 0,05	17,70 ± 0,12	17,77 ± 0,03	18,0 ± 0,00
HRR_{max}	185,59 ± 1,19	187,32 ± 1,89	181,79 ± 1,18	181,52 ± 0,21
θ_{HRRmax}	14,76 ± 0,31	13,77 ± 0,77	14,43 ± 0,72	14,67 ± 0,69
BMEP	14,71 ± 0,06	14,71 ± 0,12	14,73 ± 0,08	14,69 ± 0,06

Tabla 21. Resultados para el cálculo de variaciones porcentuales a 60% de carga.

Parámetro	Diésel	nCu0	nCu83	nCu171
NOx	375,33 ± 9,51	317,33 ± 15,34	309,00 ± 0,58	321,67 ± 2,96
HC	2,33 ± 0,65	0,67 ± 0,67	1,67 ± 0,88	2,00 ± 1,00
CO	0,004 ± 0,001	0,0023 ± 0,0003	0,0023 ± 0,0019	0,0017 ± 0,0012
CO ₂	3,87 ± 0,08	3,79 ± 0,16	3,8 ± 0,02	3,7 ± 0,19
O ₂	15,76 ± 0,11	15,94 ± 0,15	15,91 ± 0,07	15,98 ± 0,24
TEG	405,74 ± 1,08	407,57 ± 2,89	405,53 ± 1,36	404,53 ± 1,05
BSFC	207,24 ± 0,9	207,76 ± 0,76	208,11 ± 0,47	209,13 ± 0,52
CA10-90	23,87 ± 0,058	23,9 ± 0,12	24,17 ± 0,15	23,90 ± 0,00
P_{max}	103,5 ± 0,35	104,00 ± 0,41	103,10 ± 0,15	103,57 ± 0,43
θ_{Pmax}	16,82 ± 0,23	16,67 ± 0,42	16,33 ± 0,03	16,33 ± 0,03
HRR_{max}	147,01 ± 0,97	146,98 ± 0,66	143,10 ± 2,34	146,53 ± 1,52
θ_{HRRmax}	10,72 ± 0,56	11,20 ± 0,06	9,67 ± 1,69	9,60 ± 1,65
BMEP	8,96 ± 0,06	8,94 ± 0,09	8,94 ± 0,09	8,85 ± 0,03

Anexo 2: Medidas de seguridad e la manipulación de nanopartículas

Tabla 22. Regulaciones sobre la exposición laboral a nanopartícula NIOSH.

Nanomaterial	REL NIOSH	Tipo de exposición	Comentario
Dióxido de titanio (TiO ₂) - fino	2.4 mg/m ³	TWA 8 h	Para partículas ≥100 nm
Dióxido de titanio (TiO ₂) - nano	0.3 mg/m ³	TWA 8 h	Mayor toxicidad por superficie activa específica
Nanotubos de carbono / nanofibras	1 µg/m ³	TWA 8 h (como respirable elemental C)	Valor extremadamente bajo por fibrosis e inflamación
Óxidos metálicos (p. ej. CuO, ZnO)	No hay REL aún	—	Se recomienda ALARA y control banding
Nanopartículas de plata (AgNPs)	No hay REL aún	—	Estudio en curso; potencial citotoxicidad documentada
Nanopartículas de sílice amorfa	En evaluación	—	Algunas formas ya reguladas como sílice cristalina respirable

Tabla 23. Regulaciones para exposición laboral de nanopartículas OSHA.

Sustancia	PEL OSHA (ppm)	PEL OSHA (mg/m³)	Tipo de PEL
Plomo	50 µg/m ³	0.050 mg/m ³	PEL para exposición en 8 horas
Cobre	No tiene PEL específico	1.0 mg/m ³	PEL (sólo para polvo de cobre)
Asbestos	0.1 f/cc (fibra por centímetro cúbico)	N/A	PEL para exposición a fibras

Silica cristalina (polvo)	50 µg/m³ (en respirable)	0.05 mg/m³	PEL para polvo respirable
Benceno	1.0 ppm	3.2 mg/m³	PEL para exposición en 8 horas
Amoníaco	50 ppm	35 mg/m³	PEL para exposición en 8 horas
Tolueno	200 ppm	500 mg/m³	PEL para exposición en 8 horas

Tabla 24. Límites Permisibles Ponderados (LPP) de agentes químicos en el ambiente de trabajo.

Metal / Compuesto	Forma	VLP-TWA (mg/m³, 8 h)	Notas
Cobre (Cu)	Polvo y nieblas	0,8	Como Cu, fracción respirable
	Humos metálicos	0,16	
Plomo (Pb)	Inorgánico	0,05	Exposición total al polvo de plomo
Níquel (Ni)	Compuestos inorgánicos solubles	0,1	Como Ni
	Compuestos inorgánicos insolubles	1,0	
Cromo (Cr)	Cr III (compuestos)	0,5	
	Cr VI (compuestos)	0,05	Cancerígeno
Hierro (Fe)	Óxidos de hierro (humos)	5,0	
Zinc (Zn)	Óxido de zinc (humos)	5,0	
Manganeso (Mn)	Polvo y compuestos inorgánicos	0,2	Como Mn
Cadmio (Cd)	Compuestos inorgánicos	0,01	Como Cd; cancerígeno
Mercurio (Hg)	Vapor inorgánico	0,025	
Arsénico (As)	Inorgánico	0,01	Cancerígeno
Boro (B)	Ácido bórico y boratos	10,0	

