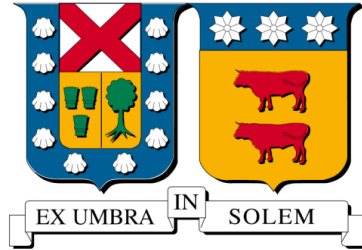


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
VALPARAÍSO – CHILE



“INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS  
EMISIONES Y DESEMPEÑO DE UN MOTOR  
DE COMBUSTIÓN INTERNA DIÉSEL  
ENRIQUECIDO CON HIDRÓGENO”

NICOLÁS RENÉ CASTRO SORUCO

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:  
INGENIERO CIVIL MECÁNICO MENCIÓN ENERGÍA.

PROFESOR GUÍA: DR. ING. MARIO TOLEDO T.  
PROFESOR CORREFERENTE: DR. GERMAN AMADOR D.

JULIO – 2018

## AGRADECIMIENTOS

En primera instancia quisiera agradecer a todos los profesores que han sido parte de mi formación, incluyendo los que me cuidaron y enseñaron las primeras lecciones de la vida, hasta aquellos que supieron despertar mi interés científico en cada uno de los campos específicos de la ingeniería mecánica, alimentando mis deseos de aprender y mostrándome la belleza del mundo científico. En especial a mis profesores guía Mario Toledo y Germán Amador, que posibilitaron el desarrollo de este trabajo. También al profesor Fernando Rojas y a todo el personal de la universidad que de alguna u otra forma participó en este trabajo.

A mis padres, que me apoyaron desde los comienzos de esta travesía, entusiasmándome siempre a soñar con lo mejor y luchar por ello a toda costa. Gracias por la valentía que mostraron, alentándome incluso en decisiones que se sabían difíciles para ambos. Gracias por creer en mí y empujarme a soñar.

A mis abuelos Toño y Lola por mostrarme a través de las cosas simples que los esfuerzos tarde o temprano dan frutos. A mis abuelos Tata y Abue por entregarme tanto cariño en cada oportunidad que han tenido.

A mis tías Aye, Ani, Mané y Eli, por el apoyo, el cariño y la constante preocupación, en especial durante el desarrollo de esta importante etapa.

A Constanza, mi polola, por su apoyo incondicional y consejo, gracias por acompañarme en cada paso, por ofrecerme tu apoyo, cariño y consejo. Además a tu familia, que me acogió como un hijo más.

A mis amigos, que supieron compartir alegrías y tristezas conmigo, por esos momentos de dispersión, estudio y conversación, gracias por acompañarme.

## **DEDICATORIA**

A mis padres y abuelos,  
los que me inculcaron el tesón y esfuerzo  
a través de su tremendo ejemplo de vida.

## RESUMEN

El presente trabajo estudia las emisiones y desempeño de un motor diésel sobrealimentado de 2.0 litros con sistema de inyección directa, en el que se sustituye parcialmente el combustible convencional por hidrógeno, adicionándolo a través de la admisión de aire. Se caracteriza la línea base de operación en cuanto a emisiones y desempeño utilizando sólo diésel a cuatro velocidades de giro (2000, 2400, 2800 y 3000 RPM) y tres niveles de carga (30%, 60% y 100%). A partir de la eficiencia y estabilidad de operación observada a 2400 RPM, se elige esta velocidad para desarrollar las pruebas con adición de  $H_2$ .

El consumo específico de combustible diésel disminuyó con la adición de  $H_2$  en todos los casos exceptuando la inyección de una pequeña cantidad de hidrógeno a baja carga (10% de reemplazo). El menor consumo específico (136 [g/kWh]) se midió a 60% de carga y máximo nivel de reemplazo (60%). La eficiencia térmica del motor disminuyó conforme aumentaba la adición de hidrógeno, esta disminución fue mayor en la operación a 30% de carga, mientras que a plena carga este parámetro se vio menos afectado, reduciéndose sólo 5% con el máximo nivel de reemplazo (40%) para esta carga. En el caso de 30% de carga se alcanzó 80% de reemplazo. Los parámetros de operación del motor se mantuvieron dentro de los rangos medidos durante la operación normal (sólo diésel). Se detectó la ocurrencia de “knock” para los máximos niveles de reemplazo a media y plena carga.

El incremento de la concentración de hidrógeno sobre los límites de flamabilidad permitió la ocurrencia de retroceso de llama, impidiendo alcanzar mayores niveles de reemplazo.

Las emisiones de  $CO_2$  se redujeron en todos los casos, mientras que las de  $NO$  aumentaron, se mantuvieron y disminuyeron en los casos de plena, media y baja carga.

**Palabras clave:** motor dual hidrógeno-diésel, combustibles alternativos.

## ABSTRACT

The present research study emissions and performance of a diesel direct injection supercharged engine with diesel substitution by means of hydrogen air intake injection. Four different velocities (2000, 2400, 2800, and 3000 RPM) are studied at three loads (30%, 60%, 100%) with diesel fueling. 2400 RPM is chosen for hydrogen addition due to good efficiency and stability operation.

Specific fuel consumption of diesel was reduced with hydrogen addition in all cases, excepting the injection of a small amount of hydrogen (10% substitution of diesel by hydrogen) at 30% load. The smallest specific fuel consumption (136 [g/kWh]) was obtained at 60% load and higher substitution rate (60%). Brake thermal efficiency diminished with increase of hydrogen addition, at 30% load the loss of efficiency was worse than at full load, in which case just a 5% reduction was observed with maximum substitution rate (40%) for this load operation. In the 30% load case the highest substitution rate was 80%. Engine operation parameters were in normal diesel operation range. Knock onset was detected at highest substitution levels in 60% and 100% load operation.

Increase in molar fraction of hydrogen in air intake stream over flammability limit caused backfire and stopping of the engine making impossible a further rise in substitution rate at 60% and full load operation.

CO<sub>2</sub> emissions were reduced in all the cases while *NO* behaviour was different for each load, at full load emissions were increased, 60% load were no difference with hydrogen addition and for 30% load emissions were slightly reduced.

**Keywords:** hydrogen-diesel dual fuel engine, alternative fuel.

# ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS .....	I
DEDICATORIA.....	II
RESUMEN.....	III
ABSTRACT .....	IV
ÍNDICE.....	V
ÍNDICE DE IMÁGENES.....	VIII
ÍNDICE DE GRÁFICOS .....	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
GLOSARIO DE TÉRMINOS .....	XII
<b>1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS.....	2
1.1.1 <i>Objetivo general.</i> .....	2
1.1.2 <i>Objetivos específicos.</i> .....	2
1.2 MOTIVACIÓN. ....	3
1.3 ESTADO DEL ARTE. ....	4
<b>2. FUNDAMENTO TEÓRICO. ....</b>	<b>9</b>
2.1 ESTUDIO DE MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA.....	9
2.1.1 <i>Pruebas.</i> .....	9
2.1.1.1 Ensayos de potencia al freno. ....	9
2.1.1.2 Consumo de combustible. ....	10
2.1.1.3 Consumo de aire. ....	10
2.1.2 <i>Factores de desempeño y operación.</i> .....	10
2.1.2.1 Presión media efectiva indicada (IMEP) y al freno (BMEP).....	10
2.1.2.2 Razón de equivalencia. ....	11
2.1.2.3 Eficiencia volumétrica.....	12
2.1.2.4 Consumo específico de combustible (sfc).....	13
2.1.2.5 Eficiencia mecánica.....	14
2.1.2.6 Eficiencia térmica.....	14
2.1.2.7 Emisiones.....	15

2.2	DIÉSEL.....	15
2.2.1	<i>Propiedades relacionadas a la combustión.....</i>	15
2.2.2	<i>Normativa chilena respecto al uso, transporte y almacenamiento de diésel.....</i>	16
2.3	HIDRÓGENO.....	16
2.3.1	<i>Propiedades.....</i>	16
2.3.2	<i>Normativa chilena respecto del uso, transporte y almacenamiento de hidrógeno.....</i>	18
2.3.3	<i>Normativa internacional respecto del uso, transporte y almacenamiento de hidrógeno.</i>	22
2.4	DETECCIÓN DE “KNOCK” MEDIANTE MÉTODO NO INVASIVO.....	26
<b>3.</b>	<b>DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS E INSTRUMENTOS.....</b>	<b>28</b>
3.1	BANCO DE PRUEBAS.....	28
3.1.1	<i>Motor diésel marino.....</i>	29
3.1.2	<i>Freno dinamométrico hidráulico.....</i>	30
3.2	INSTRUMENTACIÓN.....	31
3.2.1	<i>Tacómetro.....</i>	31
3.2.2	<i>Cronómetro.....</i>	31
3.2.3	<i>Probeta de medición de volumen de combustible.....</i>	31
3.2.4	<i>Analizador de gases.....</i>	31
3.2.5	<i>Opacímetro.....</i>	32
3.2.6	<i>Sistema de adquisición de datos.....</i>	32
3.2.7	<i>Manómetros de columna (Mercurio y agua).....</i>	32
3.2.8	<i>Rotámetro.....</i>	32
3.2.9	<i>Densímetro.....</i>	33
3.2.10	<i>Sensor de detonación.....</i>	33
3.2.11	<i>“Incremental Rotary Encoder”.....</i>	33
3.2.12	<i>Placa de acondicionamiento de señal.....</i>	34
3.3	SISTEMA DE INYECCIÓN DE HIDRÓGENO.....	35
3.3.1	<i>Regulador de presión.....</i>	35
3.3.2	<i>Válvulas de corte.....</i>	35
3.3.3	<i>Controlador de flujo másico pequeño.....</i>	35
3.3.4	<i>Controlador de flujo másico grande.....</i>	36
3.3.5	<i>Arresta-llama.....</i>	36
3.4	ESQUEMA DE MONTAJE EXPERIMENTAL.....	36

<b>4.</b>	<b>PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>38</b>
4.1	PROCEDIMIENTOS DESARROLLADOS PARA REALIZACIÓN DE PRUEBAS. ....	38
4.1.1	<i>Operación sólo diésel.....</i>	38
4.1.2	<i>Detención en operación sólo diésel. ....</i>	39
4.1.3	<i>Puesta en marcha en operación con inyección de hidrógeno. ....</i>	40
4.1.4	<i>Detención en operación con inyección de hidrógeno. ....</i>	41
4.1.5	<i>“Checklist” desarrollado para parada de emergencia.....</i>	41
4.2	METODOLOGÍA DE INYECCIÓN. ....	42
4.3	ELECCIÓN DE MODOS DE OPERACIÓN. ....	43
4.4	ADQUISICIÓN DE DATOS. ....	43
4.5	VALIDACIÓN DE INDICADOR DE DETONACIÓN PROPUESTO.....	45
4.6	INYECCIÓN DE HIDRÓGENO.....	46
<b>5.</b>	<b>ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES .....</b>	<b>47</b>
5.1	RESULTADOS LÍNEA BASE. ....	47
5.1.1	<i>Análisis estadístico .....</i>	47
5.1.2	<i>Parámetros de operación .....</i>	52
5.1.2.1	Temperatura del aceite .....	52
5.1.2.2	Temperatura del agua a la salida del intercambiador .....	53
5.1.3	<i>Factores de desempeño.....</i>	54
5.1.3.1	Torque .....	54
5.1.3.2	Potencia .....	55
5.1.3.3	Razón de equivalencia .....	56
5.1.3.4	Eficiencia volumétrica .....	57
5.1.3.5	Consumo específico de combustible .....	58
5.1.3.6	Eficiencia térmica.....	59
5.1.4	<i>Emisiones.....</i>	60
5.1.4.1	Oxígeno.....	60
5.1.4.2	Dióxido de Carbono .....	61
5.1.4.3	Óxido de Nitrógeno.....	62
5.1.4.4	Opacidad.....	63
5.2	RESULTADOS PARA INDICADOR DE DETONACIÓN.....	64
5.3	RESULTADOS OPERACIÓN CON ADICIÓN DE HIDRÓGENO. ....	65
5.3.1	<i>Análisis estadístico. ....</i>	66
5.3.2	<i>Parámetros de operación .....</i>	71

5.3.2.1	Índice de detonación .....	71
5.3.2.2	Temperatura del aceite .....	72
5.3.2.3	Temperatura del agua a la salida del intercambiador de calor.....	73
5.3.2.4	Temperatura de los gases de escape .....	74
5.3.2.5	Fracción molar de hidrógeno en aire admitido.....	75
5.3.2.6	“Aporte energético del hidrógeno a la operación del motor” .....	77
5.3.3	<i>Factores de desempeño</i> .....	78
5.3.3.1	Razón de equivalencia .....	78
5.3.3.2	Eficiencia volumétrica .....	79
5.3.3.3	Consumo específico de combustible diésel .....	81
5.3.3.4	Eficiencia térmica.....	83
5.3.4	<i>Emisiones</i> .....	85
5.3.4.1	Oxígeno.....	85
5.3.4.2	Dióxido de Carbono .....	87
5.3.4.3	Óxido de Nitrógeno.....	89
5.3.4.4	Opacidad.....	91
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>93</b>
6.1	CONCLUSIONES .....	93
<b>7.</b>	<b>TRABAJOS FUTUROS. ....</b>	<b>96</b>
<b>8.</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>100</b>
8.1	ANEXO A: CERTIFICADO DE PODER CALORÍFICO SUPERIOR E INFERIOR COMBUSTIBLE DIÉSEL. ....	100
8.2	ANEXO B: VALORES MEDIDOS DE INDICADOR DE DETONACIÓN PARA DIFERENTES MODOS DE OPERACIÓN. ...	101
8.3	ANEXO C: DATOS MEDIDOS LÍNEA BASE.....	101
8.4	ANEXO D: DATOS MEDIDOS CON ADICIÓN DE HIDRÓGENO. ....	104

## ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 3.1:	Vista general del conjunto freno-motor. ....	28
Imagen 3.2:	Motor Perkins M80T.....	30
Imagen 3.3:	Freno dinamométrico Schenck. ....	30
Imagen 3.4:	Probeta de medición de combustible. ....	31
Imagen 3.5:	Equipo analizador de gases.....	31
Imagen 3.6:	Módulo adquisidor de datos.....	32

Imagen 3.7: Diagrama eléctrico placa de acondicionamiento de señal.....	34
Imagen 3.8: Regulador de presión para hidrógeno. ....	35
Imagen 3.9: Válvula de corte Swagelok. ....	35
Imagen 3.10: Controlador de flujo másico.....	36
Imagen 3.11: Esquema general del montaje experimental.....	37

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 5.1: Línea base de la temperatura del aceite. ....	53
Gráfico 5.2: Línea base de la temperatura a la salida del intercambiador de calor.....	54
Gráfico 5.3: Línea base del torque medido. ....	55
Gráfico 5.4: Línea base de la potencia efectiva. ....	56
Gráfico 5.5: Línea base de la razón de equivalencia total.....	57
Gráfico 5.6: Línea base de la eficiencia volumétrica. ....	58
Gráfico 5.7: Línea base del consumo específico de combustible diésel. ....	59
Gráfico 5.8: Línea base de la eficiencia térmica del motor.....	60
Gráfico 5.9: Línea base de las emisiones de oxígeno. ....	61
Gráfico 5.10: Línea base de las emisiones de dióxido de carbono. ....	62
Gráfico 5.11: Línea base de las emisiones de óxido de nitrógeno. ....	63
Gráfico 5.12: Línea base de la opacidad de los gases de escape.....	64
Gráfico 5.13: Índice de detonación medido en pruebas con adición de hidrógeno. ....	72
Gráfico 5.14: Temperatura del aceite para pruebas con distintos niveles de reemplazo.....	73
Gráfico 5.15: Temperatura del agua a la salida del intercambiador para distintos niveles de reemplazo. ....	74
Gráfico 5.16: Temperatura de los gases de escape para distintos niveles de reemplazo. ....	75
Gráfico 5.17: Concentración molar de hidrógeno en aire admitido para diferentes niveles de reemplazo.....	76
Gráfico 5.18: Aporte energético del hidrógeno para distintos niveles de reemplazo.....	77
Gráfico 5.19: Razón de equivalencia total para diferentes niveles de reemplazo.....	78
Gráfico 5.20: Variación relativa de la razón de equivalencia total para diferentes niveles de reemplazo.....	79
Gráfico 5.21: Eficiencia volumétrica para diferentes niveles de reemplazo.....	80

Gráfico 5.22: Variación relativa de la eficiencia volumétrica para diferentes niveles de reemplazo.....	81
Gráfico 5.23: Consumo específico de combustible diésel para diferentes niveles de reemplazo. ....	82
Gráfico 5.24: Variación relativa del consumo específico de combustible diésel para diferentes niveles de reemplazo.....	83
Gráfico 5.25: Eficiencia térmica para diferentes niveles de reemplazo.....	84
Gráfico 5.26: Variación de la eficiencia térmica para diferentes niveles de reemplazo. ....	85
Gráfico 5.27: Emisiones de oxígeno para diferentes niveles de reemplazo.....	86
Gráfico 5.28: Variación relativa de las emisiones de oxígeno para diferentes niveles de reemplazo.....	87
Gráfico 5.29: Emisiones de dióxido de carbono para diferentes niveles de reemplazo.....	88
Gráfico 5.30: Variación relativa de las emisiones de dióxido de carbono para diferentes niveles de reemplazo. ....	89
Gráfico 5.31: Emisiones de óxido de nitrógeno para diferentes niveles de reemplazo.....	90
Gráfico 5.32: Variación relativa de las emisiones de óxido de nitrógeno para diferentes niveles de reemplazo. ....	91
Gráfico 5.33: Variación relativa de la opacidad para diferentes niveles de reemplazo. ....	92

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Propiedades del combustible diésel. ....	15
Tabla 2.2: Propiedades del hidrógeno como combustible. ....	16
Tabla 5.1: Análisis estadístico de datos obtenidos para línea base a 2000 RPM.....	47
Tabla 5.2: Análisis estadístico de datos obtenidos para línea base a 2400 RPM.....	48
Tabla 5.3: Análisis estadístico de datos obtenidos para línea base a 2800 RPM.....	50
Tabla 5.4: Análisis estadístico de datos obtenidos para línea base a 3000 RPM.....	51
Tabla 5.5: Indicador de detonación para diferentes cargas a 2400 RPM.....	64
Tabla 5.6: Velocidad calculada de giro para diferentes cargas a 2400 RPM.....	65
Tabla 5.7: Análisis estadístico para datos correspondientes a 30% de carga con adición de hidrógeno.....	66

Tabla 5.8: Análisis estadístico para datos correspondientes a 30% de carga con adición de hidrógeno (continuación).....	67
Tabla 5.9: Análisis estadístico para datos correspondientes a 60% de carga con adición de hidrógeno.....	68
Tabla 5.10: Análisis estadístico para datos correspondientes a 100% de carga con adición de hidrógeno.....	70
Tabla 8.1: Valores de indicador de detonación medidos para diferentes modos de operación.....	101
Tabla 8.2: Datos medidos para la operación línea base.....	101
Tabla 8.3: Datos medidos para la operación línea base (continuación).....	103
Tabla 8.4: Datos medidos para la operación con adición de hidrógeno.....	104

## **GLOSARIO DE TÉRMINOS**

### **ABREVIATURAS**

MCI	Motor de combustión interna
CV	Coefficiente de variación
G	Aceleración de gravedad
RAC	Relación Aire combustible
RPM	Revoluciones por minuto
DE	Desviación estándar
CORFO	Corporación de Fomento de la Producción
BMEP	Presión media efectiva
IMEP	Presión media indicada
sfc	Consumo específico de combustible

### **LETRAS GRIEGAS**

$\phi$	Razón de Equivalencia
$\rho$	Densidad
$\eta_v$	Eficiencia volumétrica
$\eta_m$	Eficiencia mecánica
$\eta_{th}$	Eficiencia térmica

## NOMENCLATURA DE FORMULAS QUÍMICAS

$\text{CO}_2$  Dióxido de carbono

$\text{CO}$  Monóxido de Carbono

$\text{H}_2\text{O}$  Agua

$\text{NO}$  Óxido de Nitrógeno

$\text{O}_2$  Oxígeno

$\text{H}_2$  Hidrógeno

# CAPÍTULO 1

## 1. Introducción y Objetivos.

El petróleo diésel es hoy en día el combustible más utilizado en equipos autopropulsados o que no pueden estar conectados directamente a la red eléctrica, éstos incluyen rubros como el transporte, minería, agricultura, construcción, petrolífera, entre otras. Su uso se ha masificado no sólo en las áreas en las que ha sido protagonista hace años, sino que también se ha extendido a áreas tales como la propulsión de vehículos liviano, sector en el que otros combustibles lideran el mercado.

El presente trabajo de título investiga las emisiones y el desempeño de un motor diésel de inyección directa, en el que se adiciona hidrógeno como combustible, reemplazando el uso de diésel en distintas proporciones.

Se abarcarán investigaciones realizadas en este ámbito a nivel mundial. Destacando los resultados más alentadores y motivantes, además de ofrecer en detalle, las razones encontradas que mantienen la posibilidad de un motor dual hidrógeno-diésel en fase experimental.

Aspectos fundamentales del estudio de motores de combustión interna serán mencionados, a fin de clarificar todos los parámetros que se utilizarán para evaluar el desempeño del motor en modo dual y encontrar explicación a los resultados que se puedan obtener.

La normativa asociada al uso del hidrógeno será tratada, destacando los aspectos más importantes y que serán considerados en la realización de pruebas usando este combustible.

Se Incluye una descripción acabada de los equipos e instrumentos utilizados para el desarrollo del experimento, presentando luego una visión general del esquema de la instalación completa. Se presenta el procedimiento experimental detallando las tareas a realizar para desarrollar el experimento en sí, detallando las medidas de precaución en cada caso y la forma de proceder para cada ensayo a realizar.

Se presentará para los parámetros medidos, primero un análisis estadístico de los datos recolectados, para luego dar paso al análisis. Los datos para la línea base servirán de parámetro con el cual se comparará la operación adicionando hidrógeno. Además, se utilizará para estudiar la variabilidad de las mediciones realizadas.

Finalmente se presentan conclusiones y recomendaciones obtenidas a partir de los resultados, agregando una pequeña lista de trabajos futuro que el autor considera que se deberían realizar.

## **1.1 Objetivos.**

### **1.1.1 Objetivo general.**

El presente trabajo tiene como objetivo general la investigación experimental del desempeño y de las emisiones de un motor de combustión interna encendido por compresión con adición de hidrógeno como combustible, aspirando el motor una mezcla de aire e hidrógeno.

### **1.1.2 Objetivos específicos.**

- Revisión y estudio del estado del arte de sistemas de inyección de hidrógeno en motores de combustión interna.
- Establecer un procedimiento seguro de inyección de hidrógeno en motores de combustión interna encendidos por compresión, considerando la normativa nacional e internacional vigente.

- Determinar la línea base de operación para el motor diésel en condiciones de régimen estable en al menos 12 modos de operación.
- Determinar los límites posibles de reemplazo de combustible diésel por hidrógeno y evaluar su impacto en el desempeño del motor y sus emisiones.

## **1.2 Motivación.**

La forma actual de satisfacer el consumo mundial de energía recae principalmente en el uso de combustibles fósiles, a medida que estos son agotados, existe una urgente necesidad de encontrar combustibles alternativos que sean amigables con el medio ambiente, permitiendo así la sostenibilidad de la obtención energética de la humanidad.

Se han llevado a cabo numerosas investigaciones en combustibles alternativos como biodiésel, alcoholes, biogás, gasificación de biomasa, gasificación de carbón, etcétera, sin embargo, ninguno de estos ofrece la capacidad de aprovechamiento del potencial solar de nuestro país como lo hace el hidrógeno, factible de producirse por medio de la electrólisis de agua de mar.

En Chile durante el año 2015 se utilizó un total de 956,769 [TJ], en donde el 70% provino de combustibles fósiles [1]. El hidrógeno es uno de los pocos combustibles alternativos que existen que no contiene carbono en su estructura, eliminando de esta forma la posibilidad de formación de gases de efecto invernadero. Su combustión produce principalmente agua y pequeñas cantidades de óxidos de nitrógeno.

La industria nacional del cobre para el mismo año registró un consumo energético que asciende a 163,063 [TJ], en donde el 42% corresponde directamente al consumo de combustible diésel, utilizado principalmente en las faenas de extracción y transporte de mineral, teniendo estas un carácter de gran importancia [2].

Las líneas de desarrollo tecnológico que atacan el problema del suministro energético en los casos del transporte a gran escala, como lo es el equipamiento mina,

apuntan al uso de motores de combustión interna alimentados en modo dual hidrógeno-diésel. Capaz de producir las potencias necesarias, que no pueden ser obtenidas a partir del uso de hidrógeno en celdas combustibles o a través del uso de baterías de litio.

Es así que en el año 2017 la CORFO, organismo del estado de Chile, abrió un proceso de postulación para el desarrollo de capacidades tecnológicas que llevaba por título: “Desarrollo de sistema de Combustión Dual Hidrógeno-Diésel en vehículos y equipos mina” en el cual se buscaba la conformación de un Consorcio Tecnológico para la adaptación y/o desarrollo de soluciones tecnológicas permitan la transformación de la operación convencional en base a diésel de los equipos en operación mina, hacia una operación basada en una combustión dual diésel-hidrógeno.

Es en este panorama, en el que el desarrollo de una investigación en la operación de un MCI diésel con adición de hidrógeno, cubriendo los objetivos específicos propuestos, representa gran aporte a la comunidad científica mundial y a la sostenibilidad del país.

### **1.3 Estado del arte.**

El masivo uso de combustibles fósiles y sus efectos negativos en el ambiente requieren una alternativa urgente para suplir de manera sustentable las necesidades energéticas con mínimo impacto medioambiental [3]. A nivel mundial se han realizado varios estudios para evaluar el desempeño y emisiones de motores alimentados con combustibles alternativos como lo son: hidrógeno, gas natural comprimido, alcoholes, gas licuado de petróleo, biogás, bio-diésel, gas de síntesis a partir de biomasa, etc. Estudios de expertos indican que el hidrógeno es el combustible del futuro, si bien no es ampliamente usado en la actualidad, posee un gran potencial como vector energético, debido a su alto poder calorífico (120.0 [MJ/kg]) y su bajo nivel de emisiones, consistiendo estas principalmente en vapor de agua [4].

El hidrógeno puede ser usado como combustible único en motores de combustión interna enfrentando desafíos tales como baja eficiencia volumétrica, alta temperatura

de autoencendido, gran retraso en el tiempo de autoencendido y baja densidad energética comparado con motores convencionales [3]. Debido a su alta temperatura de auto ignición, es atractiva la idea de utilizarlo en motores de encendido por chispa en donde el tiempo de encendido puede ser controlada a gusto, sin embargo, esto no es suficiente para superar los problemas de eficiencia volumétrica y densidad de potencia. El incremento de la presión de admisión a través de turbocompresores o supercargadores es una estrategia probada y efectiva para aumentar la potencia máxima de MCI alimentados con combustibles convencionales [4]. Existe un caso en que se logró aumentar en un 30% la potencia específica de un motor comparado con un motor a gasolina naturalmente aspirado, sin embargo, al incrementar la presión en la admisión las razones de equivalencia tolerables antes de la aparición de problemas de pre-ignición y “knock” son menores. Ensayos realizados por Nagalingam y otros mostraron que este límite se redujo de 1.0 a 0.5 cuando incrementaron la presión a 2.6 bar [5]. Otros ensayos realizados requirieron disminuciones de la razón de equivalencia a valores bajo 0.4 para mantener las emisiones de NO en niveles aceptables [4]. Los problemas de pre-ignición y “knock” siguen constituyendo una gran barrera para el uso de hidrógeno como combustible exclusivo en motores de encendido provocado.

Otro campo que ha sido explorado es el de los motores encendidos por compresión, con la opción de combustible Dual, en los cuales una pequeña cantidad de diésel es inyectada para encender otro combustible generalmente gaseoso, el cual es aspirado dentro de la cámara de combustión y constituye la fuente principal de energía [6]. Actualmente existen algunos modelos comerciales de motores de trabajo pesado que permiten la utilización de gas natural y diésel, beneficiándose del menor precio del gas natural o de su mayor disponibilidad sobre todo en equipos para faenas de la industria del petróleo. Estos motores ajustan la inyección de gas basados en las condiciones operacionales maximizando la sustitución del combustible líquido por gas natural, manteniendo la economía de combustible y emisiones en los niveles requeridos para no poner en riesgo la durabilidad del motor ni estabilidad de su operación [7].

Los rangos de operación en los que una mayor sustitución de diésel causa problemas en el funcionamiento son evitados por el sistema de control de dichos motores, evitando la pre-ignición, “knock” y zonas de peor eficiencia térmica.

Numerosas investigaciones se han desarrollado en motores de combustible dual, principalmente en ejemplares de baja potencia (5-25 kW). El problema de la pre-ignición se hace más presente mientras mayor es la relación de equivalencia, no pudiendo operarse a razones de equivalencia mayores a 0.3, sin embargo, si se compara el aporte energético, se logra que el hidrógeno provea hasta un 80%-90% de la energía [6]. Los valores de eficiencia térmica alcanzados muestran una fuerte dependencia en el nivel de carga en el que se opera y la cantidad de hidrógeno inyectado, en casos de alta carga, estos valores son en algunos casos levemente superiores a los de un motor convencional de encendido por compresión, sin embargo, con pequeñas cantidades de inyección suele disminuir la eficiencia, se cree que probablemente una mezcla demasiado pobre no es capaz de quemarse completamente. Si bien se busca la eliminación del uso y dependencia de combustibles fósiles en muchas investigaciones, la situación actual no permite el uso de hidrógeno de manera práctica y segura, no existe suministro generalizado del mismo, ni la tecnología apropiada para su uso. De esta forma resulta interesante el uso del hidrógeno en combinación con otros combustibles logrando una mejora proveniente de la sinergia de ambos, disminuyendo la emisión de material particulado [9], gases de efecto invernadero, aumentando la eficiencia térmica o simplemente posibilitando el uso de un vector energético proveniente de fuentes de energía renovable intermitente (solar, eólica, mareomotriz, entre otras).

Liew y otros determinaron que la presencia de mezclas pobres y extra pobres en hidrógeno retrasan el encendido del petróleo inyectado. En la operación a baja carga (15%) se determinó que la adición de diferentes cantidades de hidrógeno deteriora la combustión de premezcla, retardándola en todos los casos, disminuyendo con ello la potencia del motor y la eficiencia térmica del mismo. Para el caso de alta carga (70%) se hallaron efectos positivos en la combustión de premezcla, adelantando el tiempo de

encendido y reduciendo el periodo de combustión, aumentando con esto la eficiencia térmica del motor. Se registró un aumento de la presión máxima dentro del cilindro, el que podría afectar la durabilidad e integridad de los elementos mecánicos del motor en cuestión [9].

Otros autores obtuvieron similares resultados a baja carga, en donde la eficiencia térmica disminuyó al adicionar hidrógeno [10, 11, 13, 14, 16]. Dhole y otros proponen que esta baja se debe a que la cantidad de diésel inyectado en cada ciclo no es suficiente para encender de buena forma la mezcla extra pobre de la cámara de combustión [16]. La modificación de la inyección permitió que en condiciones de media y alta carga se obtuvieran mejoras en la economía de combustible, pero sólo en algunos casos específicos [11].

En cuanto a las emisiones obtenidas, los resultados de otras investigaciones son variados, coinciden generalmente en la disminución de las emisiones de dióxido de carbono y hollín, mientras que, en el caso de los óxidos nitrosos, en los casos en que se ha variado el tiempo de inyección, se obtienen reducciones que son igualmente obtenibles por esta modificación con sólo diésel. En los casos en que se redujo las emisiones de monóxido de carbono, se atribuye la baja principalmente a la disminución hollín y consecuentemente de carbono libre para reaccionar.

Trabajos realizados por Bika y otros lograron reemplazar el uso de diésel en un 40% considerando como base de cálculo la energía aportada al motor por el diésel [15]. Hosseini y Ahmadi lograron reemplazos de hasta un 74%, pero no estando exentos de “knock”, el cual fue advertido por ellos también en pruebas con un 50% de reemplazo [12]. Otra investigación en donde se varió la concentración molar del hidrógeno en el aire admitido logró un 65% de reemplazo a baja carga, para una concentración molar de 7.5%, no se realizaron pruebas con mayor cantidad de hidrógeno. Para el caso de 70% de carga, la concentración molar fue de 6% y se logró un reemplazo de un poco más del 30% [10].

En el caso de operación con ajuste del tiempo de inyección, se detectó igualmente la aparición de “knock” para los casos de presión media indicada de 0.7 y 0.9 [MPa] y alto nivel de reemplazo, se determinó que para razones de equivalencia de hidrógeno mayores a 0.35 ocurría combustión anormal [13].

Es así como surge la intención de experimentar la adición de hidrógeno en un motor diésel marino de inyección directa, con el fin de detectar aquellos puntos en los que es posible la operación normal del mismo; y aquellos en que la operación se puede ver beneficiada por la adición de hidrógeno, ya sea aumentando la eficiencia térmica, mejorando las emisiones, o simplemente modificando la curva de torque del motor, manteniendo las exigencias mecánicas del mismo dentro de los límites originales.

# CAPÍTULO 2

## 2. Fundamento teórico.

### 2.1 Estudio de motores de combustión interna.

Debido a la complejidad de estas máquinas, se debe recurrir a ensayos de laboratorio para probar nuevos conceptos de diseño o simplemente para comprobar las prestaciones de un diseño existente en ciertas condiciones de trabajo. En este apartado se presentarán una lista de pruebas que se realizan a motores de combustión interna, para luego abordar con un poco más de profundidad los factores de desempeño típicos que se obtienen a partir de resultados de las pruebas anteriormente descritas. Estos factores nos permiten evaluar la calidad de las prestaciones de un motor, así como también compararlo con otros. Para comenzar definiremos un concepto que se utilizará en el desarrollo del trabajo y que dependiendo del autor se le suele dar diferentes definiciones, la carga del motor, será entendida como el cociente entre el torque que el motor está entregando a un determinado nivel de revoluciones y el máximo torque que éste es capaz de generar a ese mismo nivel de revoluciones.

#### 2.1.1 Pruebas.

##### 2.1.1.1 Ensayos de potencia al freno.

Para esta clase de ensayos el único aparato requerido es un instrumento para determinar la velocidad de giro del motor y un freno dinamométrico que permita conocer el torque del motor en el cigüeñal. El torque es el producto de la fuerza aplicada en el brazo del dinamómetro multiplicada por la distancia desde su punto de aplicación hasta el centro del eje [17].

$$T = W \times L \quad (2.1)$$

La expresión que conecta el torque con la potencia al freno en unidades S.I. es:

$$P_e = \frac{T \times 2\pi \times N}{60000} [kW] \quad (2.2)$$

En donde:

T: Torque medido en el freno dinamométrico [ $Nm$ ].

N: Velocidad de giro expresada en revoluciones por minuto [ $min^{-1}$ ].

### **2.1.1.2 Consumo de combustible.**

Para medir el consumo de combustible de la máquina existen diversos dispositivos que permiten contabilizar un volumen o una masa de combustible que será alimentado al motor y con la ayuda de un cronómetro se determina el cociente entre la cantidad medida y el tiempo que tomó a la máquina consumirlo. En caso de medir volumétricamente el consumo se debe luego medir la densidad del combustible utilizado, para obtener el flujo másico.

### **2.1.1.3 Consumo de aire.**

El trabajo realizado por un MCI proviene de su capacidad de quemar una mezcla de aire y combustible, donde el aire ocupa una porción mucho mayor del volumen dentro del cilindro. Por lo tanto, un parámetro importante de cuantificar es la cantidad de aire que el MCI es capaz de admitir relacionándose directamente con la cantidad de trabajo que puede realizar.

## **2.1.2 Factores de desempeño y operación.**

### **2.1.2.1 Presión media efectiva indicada (IMEP) y al freno (BMEP).**

La presión media indicada (IMEP) es la presión uniforme que actuando durante la fase de potencia del cilindro ejercería el mismo trabajo que es realizado por la presión variable dentro del mismo. La presión media efectiva al freno (BMEP) es la proporción

de la presión media efectiva indicada que está disponible para realizar trabajo externo en el volante del motor. Es decir, la BMEP es menor que la IMEP una cantidad equivalente a lo que se requiere para vencer la fricción en el motor y lo que consumen los dispositivos auxiliares tales como, bomba inyectora de combustible, bomba de aceite, alternador, etc.

Estos parámetros son de vital importancia en el estudio de motores de combustión interna porque permiten obtener información de las condiciones de operación de un motor independizándola de la velocidad de giro de este, así como también del tamaño de este.

La presión media efectiva al freno puede ser obtenida mediante la siguiente fórmula de cálculo:

$$BMEP = \frac{T \times 2 \times \pi \times n_c}{D} [kPa] \quad (2.3)$$

En donde:

T: Torque medido [*Nm*].

$n_c$ : Es un factor que corresponde al número de vueltas por carrera de trabajo (1 para motores de dos tiempos, 2 para motores cuatro tiempos).

D: Corresponde al desplazamiento total del motor [*L*].

#### **2.1.2.2 Razón de equivalencia.**

Corresponde al cociente entre la cantidad de aire estequiométrico (teórico) y la cantidad de aire disponible (real) para la combustión.

$$\phi = \frac{1}{\lambda} = \frac{V_{a,e}}{V_{a,r}} \quad (2.4)$$

En términos de las pruebas que se realizan al motor se puede determinar para un combustible mediante:

$$\phi_i = \frac{\dot{m}_c \times RAC}{\dot{m}_a} \quad (2.5)$$

en el caso de usarse dos o más combustibles se puede calcular una razón de equivalencia global o totalizada por:

$$\phi_t = \frac{\sum_i \dot{m}_{c,i} \times RAC_i}{\dot{m}_a} \quad (2.6)$$

Donde:

$\dot{m}_{c,i}$ : Corresponde al flujo másico del i-ésimo combustible.

$RAC_i$ : Corresponde a la razón aire-combustible estequiométrica (teórica) para el i-ésimo combustible.

$\dot{m}_a$ : Corresponde al flujo másico de aire que el motor admite en las condiciones de operación específicas.

Como se puede advertir, la razón total de equivalencia es igual a la sumatoria de las razones de equivalencia de cada combustible.

### **2.1.2.3 Eficiencia volumétrica.**

Este parámetro permite evaluar la capacidad del motor para aspirar el aire requerido en la combustión. Es definido como el cociente entre la masa de aire que es admitido en la carrera de admisión y la masa de aire que teóricamente debió admitir al llenar el volumen del desplazamiento del pistón con aire a temperatura y presión atmosférica. O alternativamente, la masa de aire que es admitida por unidad de tiempo dividida por el desplazamiento por unidad de tiempo, que puede ser calculado con el régimen de giro, en revoluciones por minuto, el desplazamiento total del motor, la

densidad del aire atmosférico y un factor “N” igual a 2 debido a que se requieren dos vueltas del motor para que todos los cilindros completen un ciclo.

$$\eta_v = \frac{\dot{m}_a n_c}{\rho_a D N} [-] \quad (2.7)$$

Donde:

$\dot{m}_a$ : Corresponde al flujo másico real de aire que es admitido  $[kg/min]$ .

$n_c$ : Es un factor que corresponde al número de vueltas por carrera de trabajo (1 para motores de dos tiempos, 2 para motores cuatro tiempos).

$\rho_a$ : Corresponde a la densidad del aire atmosférico o en el múltiple de admisión, dependiendo como se describió anteriormente del parámetro a evaluar  $[kg/L]$ .

$D$ : Corresponde al desplazamiento total del motor  $[L]$ .

$N$ : Velocidad de giro expresada en revoluciones por minuto  $[min^{-1}]$ .

En motores supercargados la eficiencia volumétrica puede ser menor o mayor a la unidad. En algunos casos, el denominador de la ecuación (2.7) puede ser basado en las condiciones en el múltiple de admisión y no atmosféricas, con el fin de independizar el parámetro, del desempeño del supercargador.

#### **2.1.2.4 Consumo específico de combustible (sfc).**

Es un parámetro comparativo que relaciona la cantidad de combustible requerida para producir una cantidad de trabajo determinada. Permite evaluar qué tan eficientemente el motor convierte el combustible en trabajo. Se suele preferir por sobre la eficiencia, ya que es un parámetro más tangible y evidente. Se puede calcular en unidades comerciales típicas de la siguiente manera:

$$sfc = \frac{\dot{m}_f}{P_e} \left[ \frac{g}{kWh} \right] \quad (2.8)$$

En donde:

$\dot{m}_f$ : Corresponde al consumo horario de combustible en gramos  $\left[ \frac{g}{h} \right]$

$P_e$ : Potencia efectiva al freno  $[kW]$ .

#### **2.1.2.5 Eficiencia mecánica.**

Se determina al dividir la potencia efectiva al freno por la potencia indicada, o de manera análoga el cociente entre IMEP y BMEP. De esta manera permite una medida de qué proporción de la energía liberada en el ciclo está realmente disponible para realizar trabajo externo y qué proporción es invertida en vencer la fricción y en mantener los requerimientos de lubricación y refrigeración entre otros.

$$\eta_m = \frac{BMEP}{IMEP} [-] \quad (2.9)$$

#### **2.1.2.6 Eficiencia térmica**

Se determina como el cociente entre la potencia mecánica de salida de la máquina, aprovechable y la potencia suministrada a la misma.

$$\eta_{th} = \frac{P_e}{P_{in}} [-] \quad (2.10)$$

En donde:

$P_{in}$ : Corresponde a la potencia térmica suministrada por el combustible a través del flujo másico y el calor específico del mismo  $[kW]$

$P_e$ : Potencia efectiva al freno  $[kW]$ .

### 2.1.2.7 Emisiones

Se determinan a partir del análisis de los gases generados en la combustión, los principales indicadores son: Las concentraciones de HC, Monóxido de Carbono y Dióxido de Carbono; las emisiones de Óxidos Nitrosos expresados en base másica y divididos por unidad de energía generada; y, el material particulado que puede ser estimado en forma indirecta a través de índices de ennegrecimiento u opacidad, o bien medido y expresado en forma específica generalmente.

## 2.2 Diésel.

El combustible diésel utilizado en MCI de encendido por compresión, presente en la mayoría del transporte terrestre de carretera, maquinaria de movimiento de tierras y agrícola corresponde al denominado “Diésel grado A1”. Éste es un destilado de la fracción intermedia del petróleo crudo, ligeramente más pesado que el kerosene. Posee características de baja volatilidad, a condiciones normales atmosféricas no forma atmósferas explosivas, disminuyendo los riesgos asociados a su uso, a diferencia de las gasolinas. Baja temperatura de autoencendido, siendo esta característica esencial para su uso en este tipo de motores.

### 2.2.1 Propiedades relacionadas a la combustión

En la Tabla 2.1 se presentan las características más importantes del combustible diésel grado A1.

*Tabla 2.1: Propiedades del combustible diésel.*

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
Densidad a temperatura ambiente (20°C) [kg/m <sup>3</sup> ]	840.0
Poder calorífico inferior [MJ/kg] <sup>i</sup>	42831

<sup>i</sup> Obtenido a partir de certificado de ensayo de poder calorífico en Anexo A.

Temperatura de autoencendido [K]	473
Necesidad de aire [kg/kg]	14.5
Límites de encendido en aire [%]	0.6 – 6.5

*Fuente: Elaboración propia a partir de [18] y Anexo A.*

### **2.2.2 Normativa chilena respecto al uso, transporte y almacenamiento de diésel.**

- NCh 2120/3. Combustibles líquidos.
- NCh758. Of71. “Sustancias peligrosas – Almacenamiento de líquidos inflamables – Medidas particulares de seguridad”.
- NCh2190. Of2003. Transporte de sustancias peligrosas – Distintivos para identificación de riesgos.

## **2.3 Hidrógeno.**

Es el elemento más liviano de la tabla periódica, en su estado gaseoso se le encuentra como molécula diatómica. El hidrógeno es mucho más liviano que el aire, por lo que difunde con facilidad en el ambiente y se acumula en las partes altas de recintos cerrados. Su combustión completa en oxígeno produce exclusivamente agua. Arde en una llama escasamente visible. Sus propiedades más importantes se detallan en la Tabla 2.2.

### **2.3.1 Propiedades**

*Tabla 2.2: Propiedades del hidrógeno como combustible.*

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
Densidad en condiciones normales [kg/m <sup>3</sup> ]	0.090

Poder calorífico inferior [MJ/kg]	120.0
Temperatura de autoencendido [K]	833
Necesidad de aire [kg/kg]	34
Límites de encendido en aire [%]	4 – 77
Energía mínima de ignición [mJ]	0.02
Velocidad de llama en aire [cm/s]	265 – 325
Poder calorífico de mezcla estequiométrica [MJ/Nm <sup>3</sup> ] <sup>ii</sup>	3.21

*Fuente: Elaboración propia a partir de [4, 18, 19].*

Se pueden destacar entre otros aspectos lo amplio del límite de encendido, así como también su baja energía mínima de ignición, transformándolo en un combustible que fácilmente puede formar atmósferas explosivas y que requiere un mínimo de energía para encenderse.

Para una compresión más profunda del comportamiento inflamable del hidrógeno, se ha consultado un trabajo experimental que busca establecer las características de la combustión de hidrógeno en diferentes condiciones de concentración, temperatura y presión. En particular se enfatiza en los límites de encendido y cómo se propaga la llama en los casos de mezclas pobres y qué tan influenciado se ven estos límites por la presión y temperatura.

En primer lugar, se debe diferenciar entre los casos en que la mezcla logra encenderse, conocido como límite de encendido, y los casos en que se logra observar la propagación descendente de la llama, instancia que se conoce como el límite de flamabilidad. Mediante el uso de un recipiente esférico cerrado, se logró detectar que

---

<sup>ii</sup> Valor para metro cúbico Normal, 0°C de temperatura y 1.01 bar de presión.

a una presión de 100[kPa] y temperatura de 303[K] el límite en el cual se logra propagación descendente de llama es 8% de concentración molar, es decir, bajo este límite el frente de llama no logra propagarse por toda la mezcla, se enciende y luego se propaga en dirección ascendente, consumiendo sólo la mezcla que está sobre el punto de ignición. El límite de encendido para estas mismas condiciones es de 4.5% de concentración molar en aire. Mezclas más pobres no logran encenderse [20].

Se observa además que, en los casos de mezclas pobres, es decir que la concentración molar de hidrógeno está bajo el 30% en aire, el frente de llama tiende a no ser liso y desarrollar cierta especie de pliegues o arrugas que aumentan la superficie del frente. Este fenómeno se hace más fuerte mientras más pobre es la mezcla, propiciando además el desarrollo de turbulencias [20].

Vistas estas características de peligrosidad, es que se hace necesario mencionar la normativa que existe respecto a su uso, transporte y almacenamiento. Como literatura base en la orientación del tratamiento que se le da a la sustancia.

### **2.3.2 Normativa chilena respecto del uso, transporte y almacenamiento de hidrógeno.**

En cuanto a la normativa existente en Chile relativa al hidrógeno se destacarán las normas del instituto chileno de normalización que competen al mismo y una breve descripción de cómo estas regulan su manejo. Además, se incluyen algunos decretos supremos que hacen mención del uso de Hidrógeno en la legislación chilena actual.

- NCh382. Of2004. “Sustancias peligrosas – Clasificación general”.
  - Esta norma establece una clasificación general de las sustancias peligrosas en Clase y División. Presenta dos listas de las sustancias peligrosas ordenadas de diferente forma especificando número de las naciones unidas, nombre, riesgo secundario y número de guía GRE (primeras acciones en caso de emergencia).

- Esta norma clasifica a las sustancias peligrosas de acuerdo al riesgo más significativo que presentan en el transporte terrestre en territorio nacional, en su manipulación y almacenamiento asociados al transporte.
- NCh389. Of1998. “Sustancias peligrosas – Almacenamiento de sólidos, Líquidos y Gases Inflamables – Medidas Generales de Seguridad”.
  - Esta norma establece las medidas generales de seguridad, que deben adaptarse en el almacenamiento de sustancias inflamables que se encuentran es estado sólido, líquido o gaseoso.
  - Esta norma aplica a las sustancias inflamables de clases 2, 3 y 4 según NCh382.
- NCh 1377. Of1990. “Cilindros de gas para uso industrial. Identificación del contenido”.
  - Esta norma establece un sistema de marcas para identificar el gas comprimido de uso industrial, contenido en cilindros; establece también las marcas para identificar las clases de riesgos y la forma en que deben presentarse las principales precauciones de seguridad.
- NCh2245. Of1993. “Hoja de datos de seguridad de productos químicos. Contenido y disposición de los temas”.
  - Esta norma establece la forma para presentar la información que debe aparecer en una hoja de datos de seguridad (HDS).
  - Establece la forma para presentar la información que debe aparecer en la HDS, específicamente define: La distribución general de la HDS; Los títulos de 16 secciones; La numeración y secuencia de las secciones; y Los ítems necesarios a proporcionar en una HDS y las condiciones de su aplicabilidad o utilización.
- NCh2352. Of1996. “Sustancias peligrosas – Transporte por carretera – Hoja de Datos de Seguridad”.
  - Esta norma establece las características generales de presentación de la Hoja de Datos de Seguridad para Transporte (HDST).

- Se aplica como una guía para la confección de la HDST, que debe acompañar a la Guía de Despacho para el transporte por carretera de una carga de sustancias peligrosas.
- NCh 2120/2. Of1992. “Sustancias peligrosas - Parte 2: Clase 2 – Gases.
  - Esta norma establece un listado de los gases clasificados como sustancia peligrosa en la Clase 2, de acuerdo con NCh382.
  - Esta norma establece la clase o división, riesgo secundario, grupo embalaje/envase, disposiciones especiales y número de guía GRE (primeras acciones en caso de emergencia).
  - Se clasifica el hidrógeno dentro de la división 2.1: Gases inflamables, debido a que cumple con ambos criterios exigidos. También se incluye su número de identificación de Naciones Unidas, siendo este 1049
- NCh1411/1-4. Of1978. “Prevención de riesgos”. Esta norma consta de cuatro partes, Parte 1: Letreros de seguridad; Parte 2: Señales de seguridad; Parte 3: Tarjetas de seguridad; y Parte 4: Identificación de riesgos de materiales. Si bien todas las partes tienen relación con el manejo del hidrógeno se hará mención a la parte 4 por ser la que tienen relación más directa.
  - Esta norma se aplica a las instalaciones donde se fabrican, almacenan o usan materiales que presenten riesgos. No se aplica al transporte de productos peligrosos.
  - Pretende entregar información básica al personal que trabaja en dichas instalaciones o a aquellas personas que actúan en emergencias.
  - Es de carácter complementario con las normas de señalización antes mencionadas.
  - Especifica los riesgos que se deben informar en tres categorías: Salud, Inflamabilidad y Reactividad o Inestabilidad. Esta norma recoge todos los aspectos de la norma 704 de la NFPA (National Fire Protection Association), en la que se establece un cuadrado rotado en 45° en el que se dividen cuatro sectores para especificar el nivel de riesgo en las tres categorías mencionadas, agregando un cuarto espacio para riesgos

especiales. Los niveles de riesgo se establecen desde el uno hasta el número cuatro, siendo este el de mayor severidad.

- DSN°40 Modificación de 1995. “Reglamento sobre prevención de riesgos profesionales”.
  - En este reglamento se especifican algunas obligaciones a las empresas en cuanto a materia de prevención de riesgos, se establece la obligatoriedad de establecer un reglamento interno con al menos cuatro capítulos principales: Disposiciones generales, obligaciones, prohibiciones y sanciones.
  - En el capítulo obligaciones se deben incluir normas generales, tales como responsabilidades de los niveles ejecutivos intermedios, los elementos de seguridad para cada faena, las disposiciones concernientes a materias de seguridad en general.
  - En el capítulo sobre obligaciones, debe especificarse toda obligación que deben cumplir los trabajadores en vías de resguardar su seguridad y la de todo el personal de la empresa.
  - En el capítulo sobre prohibiciones se enunciará expresamente toda conducta que no está permitida y las posibles multas a las que se arriesga el personal por el no cumplimiento de ello. Se deben especificar además todos los riesgos asociados a cada faena que los trabajadores deberán desarrollar, explicando los riesgos y las medidas que se deben tomar para controlarlos.
  - Se deben informar especialmente a los trabajadores acerca de los elementos, productos y sustancias que deben utilizar en los procesos de producción o en su trabajo, sobre la identificación de los mismos, sobre los límites de exposición permisibles de esos productos, acerca de los peligros para la salud y sobre las medidas de control y prevención que deben adoptar para evitar tales riesgos.
- DSN°78 Modificación de 2016. “Reglamento de almacenamiento de sustancias peligrosas”.

- Este reglamento establece las condiciones de seguridad de las instalaciones de almacenamiento de sustancias declaradas como peligrosas en NCh382. Se excluyen del ámbito de aplicación de este reglamento entre otros, los combustibles líquidos y gaseosos, utilizados como recursos energéticos, regulados por los decretos N°160 y N°29 del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción.
- Establece los requerimientos para el establecimiento de bodegas comunes de sustancias peligrosas, y bodegas exclusivas de sustancias peligrosas, las cantidades admisibles según la clasificación de la sustancia y la compatibilidad de sustancias con bodegas comunes o exclusivas.
- Establece además los requerimientos para el almacenamiento de pequeñas cantidades.
- Establece normas para el almacenamiento de sólidos, líquidos y gases a granel. También incluye apartados para cilindros de gases a presión.
- DSN°294. Modificación de 1995. “Reglamenta Transporte de Cargas Peligrosas por Calles y Caminos”.
  - Establece las condiciones, normas y procedimientos aplicables al transporte de carga, por calles y caminos, de sustancias peligrosas, según lo definido en NCh382.
  - Detalla condiciones que deben cumplir los vehículos destinados a tales fines, así como también la señalética y medidas que deben tomarse en la carga, estiba, transporte y descarga de las sustancias.

### **2.3.3 Normativa internacional respecto del uso, transporte y almacenamiento de hidrógeno.**

En el ámbito internacional existe también normativa que regula y guía el uso de hidrógeno. Entre ellas destacan:

- ISO10165:2010. “Gas cylinders – Gases and gas mixtures – Determination of fire potential and oxidizing ability for the selection of cylinder valve outlets”.
  - Especifica métodos para determinar cuándo un gas o mezcla de estos es inflamable en aire y cuando es más o menos oxidante que el aire atmosférico.
- ISO12619. “Road vehicles – Compressed gaseous hydrogen and hydrogen/natural gas blends fuel system components”.
  - Esta norma especifica los requerimientos generales de los componentes de un sistema de combustible a base de hidrógeno gaseoso comprimido o mezclas de hidrógeno/gas natural.
  - Consta de 16 partes, las cuales tratan de: Definiciones y requerimientos generales; Desempeño y métodos generales de prueba; Válvula anti-retorno; Inyector de gas; Indicador de presión; Válvula de alivio de presión; Válvula de exceso de flujo; Líneas rígidas de acero inoxidable; Líneas de combustible flexibles; Filtro; Coplas; Regulador de presión; Carcasa hermética y mangueras de ventilación.
- ISO16110-1:2007. “Hydrogen generators using fuel processing technologies – Part 1: Safety”
  - Esta norma se aplica a sistemas de generación de hidrógeno empacados o auto contenidos de capacidad menor a 400 [m<sup>3</sup>/h] a condiciones normales que utilizan un flujo de combustible para ser transformado en una corriente rica en hidrógeno. Trata materias de seguridad de los dispositivos anteriormente mencionados
- ISO16110-1:2007. “Hydrogen generators using fuel processing technologies – Part 2: Test methods for performance”.
  - Esta norma establece los métodos de prueba de desempeño de los aparatos especificados en la parte uno de la misma norma.
- ISO16111:2008. “Transportable gas storage devices – Hydrogen absorbed in reversible metal hydride”.

- Esta norma define los requerimientos aplicables al material, diseño, construcción y prueba de sistemas de almacenamiento de hidrógeno gaseoso conocidos como hidruros metálicos que utilizan estructuras que no superan los 150 L de capacidad interna y no exceden una presión desarrollada de 25 MPa.
  - Se aplica solamente a los sistemas de almacenamiento rellenable, donde hidrogeno es el único medio transferido.
- ISO17268:2012. "Gaseous hydrogen land vehicle refuelling connection devices".
  - Establece el diseño, seguridad y características de operación de conectores para la recarga de vehículos terrestres que utilizan hidrógeno gaseoso.
- ISO22734-1:2008. "Hydrogen generators using water electrolysis process – Part 1: Industrial and commercial applications"
  - Define la manufactura, seguridad y requerimientos de desempeño de generadores de hidrógeno a base de electrólisis para producir oxígeno e hidrógeno. Se aplica a sistemas para uso industrial o comercial al interior o exterior.
- ISO22734-2:2008. "Hydrogen generators using water electrolysis process – Part 2: Residential applications."
  - Establece los mismos parámetros que en la parte uno de la norma, pero para el caso de una aplicación de uso residencial.
- ISO23273:2013. "Fuel cell road vehicles – Safety specifications – Protection against hydrogen hazards for vehicles fuelled with compressed hydrogen"
  - Esta norma especifica los requerimientos esenciales para vehículos propulsados por celdas de combustible en lo que respecta a la protección de las personas y el medio ambiente, dentro y fuera del vehículo contra los peligros relacionados con el uso de hidrógeno.
- ISO26142:2010. "Hydrogen detection apparatus – Stationary applications.

- Esta norma define los requerimientos de desempeño y métodos de prueba de aparatos de detección de hidrógeno diseñados para medir concentraciones en aplicaciones estacionarias.
- ISO/TS15869:2009. “Gaseous hydrogen and hydrogen blends – Land vehicle fuel tanks”.
  - Esta norma técnica especifica los requerimientos para estanques rellenables livianos utilizados para almacenaje de hidrógeno o mezclas de hidrógeno a alta presión en vehículos terrestres.
  - Se aplica a estanques de acero, acero inoxidable, aluminio o materiales de construcción no metálicos, usando cualquier método de diseño o manufactura apta para las condiciones de servicio específicas.
- ISO/TS19880-1:2016. “Gaseous hydrogen – Fuelling stations – Part 1: General requirements”.
  - Esta norma técnica entrega recomendaciones en cuanto a las características mínimas de diseño en seguridad y desempeño para estaciones de despacho de hidrogeno gaseoso, para vehículos livianos terrestres.
  - Provee recomendaciones en diversas áreas que se encuentran involucradas en una estación de carga: Producción/entrega de hidrógeno; Reparto de hidrógeno a través de tuberías, camiones o hidruros metálicos; Generadores de hidrógeno *in-situ* usando electrólisis de agua; almacenamiento líquido de hidrógeno; purificación de hidrógeno; compresión; bombas y vaporizadores; etc.
- DIN1127-1:2011. “Explosive atmospheres – Explosion prevention and protection – Part 1: Basic concepts and methodology”.
  - Especifica métodos para la identificación y evaluación de situaciones riesgosas que podrían llevar a explosiones y las medidas adecuadas de seguridad que se deben incluir en el diseño y construcción para mitigar los riesgos.

## **2.4 Detección de “knock” mediante método no invasivo.**

La detección del fenómeno de golpeteo, picado o “knock” revierte gran importancia, ya que la mayor potencia y economía de combustible, manteniendo bajos los niveles de emisiones de contaminantes, se logran operando justo en el umbral de aparición del “knock” [21]. Los sistemas de control por lo tanto requieren ajustar la mezcla aire-combustible y el tiempo de encendido de manera tal que se mantengan justo cercanos a la aparición del fenómeno, maximizando potencia y economía y minimizando las emisiones.

Es sabido que un método invasivo, por ejemplo, mediante un transductor de presión en el interior de la cámara de combustión, provee la mejor señal para analizar y detectar el “knock”, sin embargo, cada cilindro requiere su propio sensor cuyo costo se mantiene relativamente alto. Como resultado, estos son usados principalmente en aplicaciones de investigación.

La ocurrencia del “knock” tiene una huella espectral definida, que depende principalmente de las dimensiones del motor [22], por lo que encontrar señal en esta banda de frecuencias específica es lo que permite identificar su aparición.

Los sensores no invasivos o remotos usan las vibraciones transmitidas por el block del motor para detectar la aparición de “knock” en la cámara de combustión. La señal recibida puede ser contaminada por otras fuentes, con el aumento de la dificultad de procesamiento correspondiente. Esto se vuelve especialmente importante a mayor velocidad, donde las vibraciones mecánicas aumentan.

Existen principalmente dos tipos de sensores; los resonantes, que por medios mecánicos o electrónicos responden a una frecuencia en particular en la que se han configurado, y los de respuesta plana o de amplio espectro, los cuales son capaces de captar una amplia gama de frecuencias, estos ofrecen mayor versatilidad ya que funcionan para prácticamente cualquier motor y se adaptan solamente cambiando el acondicionamiento de la señal y post procesamiento [21].

Finalmente, la señal de vibraciones adquirida es procesada mediante algún algoritmo basado en el análisis de frecuencias, a través de una transformada discreta de Fourier o de otra herramienta matemática que permita diferenciar la aparición o no de la llamada huella del “knock” en el motor estudiado. [21, 22]

# CAPÍTULO 3

## 3. Descripción de equipos e instrumentos.

A continuación, se detallan los equipos e instrumentos utilizados en el desarrollo de las pruebas experimentales. Finalmente se presenta el esquema de montaje experimental.

### 3.1 Banco de pruebas.



*Imagen 3.1: Vista general del conjunto freno-motor.*

### 3.1.1 Motor diésel marino.

- Marca: Perkins.
- Año: 1994
- Modelo: Prima M80T.
- Ciclo: 4 tiempos.
- Número de cilindros: 4
- Diámetro de cilindro: 84.5 [mm].
- Carrera: 88.9 [mm].
- Cilindrada: 1994 [cm<sup>3</sup>]
- Relación de compresión: 17.2:1
- Aspiración: Turboalimentado.
- Sistema de combustión: Inyección directa.
- Sistema de inyección: Bomba rotativa Bosch VE con parada eléctrica y mecánica, avance eléctrico de partida en frío, control de aceleración y venteo automático.
- Potencia máxima: 58 [kW] a 4500 RPM.
- Torque máximo: 145 [Nm] a 2350 RPM.
- Peso: 230 [kg].



*Imagen 3.2: Motor Perkins M80T.*

### **3.1.2 Freno dinamométrico hidráulico.**

- Marca: Schenck.
- Modelo: U2-20.
- Año: 1.959
- Tipo: Freno hidráulico Froude
- Rango: 40 [kgf].
- Resolución: 0.1 [kgf].
- Potencia máxima: 200 [PS].
- Velocidad máxima: 5,000 [RPM]



*Imagen 3.3: Freno dinamométrico Schenck.*

## 3.2 Instrumentación.

### 3.2.1 Tacómetro.

- Marca: H & B
- Rango: 0 – 6,000 RPM.
- Resolución: 50 RPM.

### 3.2.2 Cronómetro.

- Marca: Casio.
- Resolución: 1/100 [s].
- Tipo: Digital.

### 3.2.3 Probeta de medición de volumen de combustible.

- Marca: Fabricación USM.
- Volumen: 55 – 125 – 180 [cm<sup>3</sup>]



Imagen 3.4: Probeta de medición de combustible.

### 3.2.4 Analizador de gases.

- Marca: Bosch.
- Modelo: BEA 250-EU.
- Rango: 0 – 9.999 ppm HC; 0 – 10 % vol. CO; 0,5 – 9,999 Lambda; 0 – 18 % vol. CO<sub>2</sub>; 0 – 22 % vol. O<sub>2</sub>.
- Sensores de oxígeno: Typ R 17-A; Typ A7-11.5.



Imagen 3.5: Equipo analizador de gases.

### 3.2.5 Opacómetro.

- Marca: TEXA.
- Modelo: OPABOX AUTOPOWER.
- Rango: Opacidad: 0 – 9.99 [ $\text{m}^{-1}$ ]; Opacidad relativa: 0 – 99.9 %.

### 3.2.6 Sistema de adquisición de datos.

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

### 3.2.7 Manómetros de columna (Mercurio y agua).

- Rango: 840 [mm].
- Resolución: 1 [mm].



Imagen 3.6: Módulo adquisidor de datos.

### 3.2.8 Rotámetro.

- Marca: Aerzen.
- Modelo: D74.
- Caudal mínimo: 32 [ $\text{m}^3/\text{h}$ ].
- Caudal máximo: 650 [ $\text{m}^3/\text{h}$ ].
- Presión máxima: 10.0 [bar].
- Resolución: 0.1 [ $\text{m}^3$ ]
- Rango: 0 – 9,999,999.9 [ $\text{m}^3$ ]

### **3.2.9 Densímetro.**

- Marca: Hill Scientific Inc.
- Tipo: Bulbo sumergible.
- Rango: 0.800 – 0.900 [g/cm<sup>3</sup>]
- Resolución: 0.010 [g/cm<sup>3</sup>]

### **3.2.10 Sensor de detonación.**

- Marca: MTE-THOMSON
- Modelo: 70022
- Tipo: Piezoeléctrico de respuesta plana.
- Sensibilidad: 25 [mV/G]

### **3.2.11 “Incremental Rotary Encoder”.**

- Marca: “OMRON”
- Modelo: E6B2-CWZ6C
- Resolución: 2,000 pulsos por revolución.
- Tipo de señal: “N-P-N Open-Collector Output”.

### 3.2.12 Placa de acondicionamiento de señal.

- Se presenta un diagrama del circuito que se desarrolló para el acondicionamiento de las señales del “encoder” rotatorio y sensor de detonación, permitiendo que estas sean adquiridas a través de la tarjeta de audio de un computador.

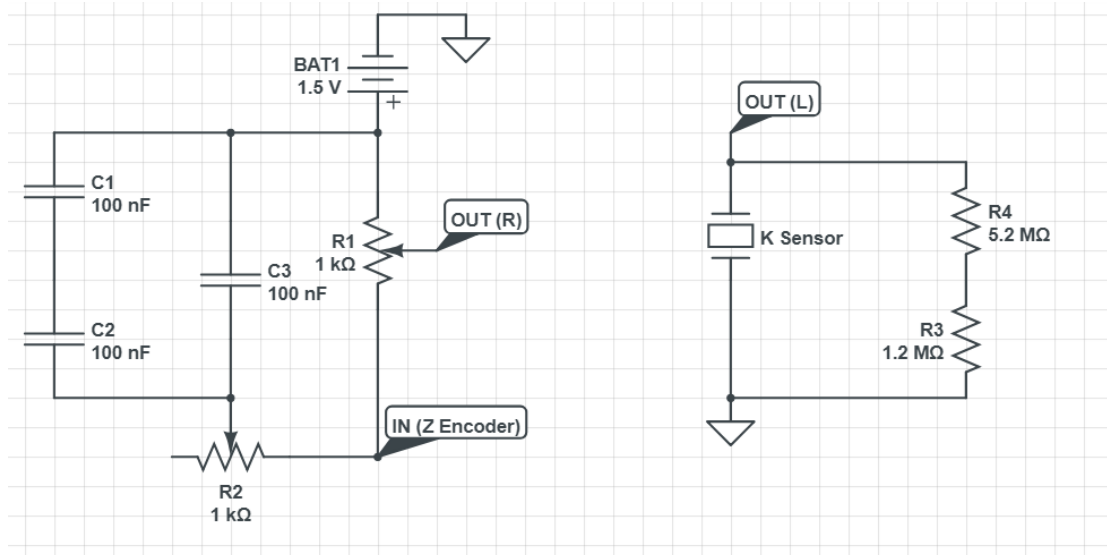


Imagen 3.7: Diagrama eléctrico placa de acondicionamiento de señal.

- Para el sensor de detonación el circuito consiste solamente en conectar uno de los dos terminales a tierra y el otro utilizarlo como salida de señal, sin embargo, debido a la alta impedancia del sensor y el alto voltaje de salida del sensor, se decide conectar la salida igualmente a tierra, pero a través de una resistencia de alto valor.
- La señal del “encoder” rotatorio es del tipo “NPN-open-collector”, es decir funciona como un interruptor comandado por un voltaje, por lo que se debe aplicar un voltaje exterior al mismo, detectando entonces la caída o no de voltaje en alguna resistencia conocida. Los desafíos entonces fueron definir un voltaje que fuera apto para la tarjeta de sonido y que la señal tuviese la duración suficiente para ser adquirida por la tarjeta de audio del computador. En la tarjeta desarrollada finalmente, se puede controlar la amplitud de la señal con el

potenciómetro “R1” y la duración de la señal se logró extender mediante el uso de los condensadores combinados logrando una capacitancia equivalente de 0.15 microfaradios. Finalmente, el potenciómetro “R2” permite ajustar la resistencia del circuito de carga de los condensadores y limitar la corriente máxima que circula por el transistor del “encoder”, no pudiendo superar los 35 [mA].

### 3.3 Sistema de inyección de hidrógeno

#### 3.3.1 Regulador de presión.

- Marca: Harris.
- Modelo: HP701-125.
- Gas: Hidrógeno.
- Diafragma: Acero Inoxidable 302.
- Presión máxima de entrada: 3,000 [psi].
- Presión de salida: 125 [psi].



*Imagen 3.8: Regulador de presión para hidrógeno.*

#### 3.3.2 Válvulas de corte.

- Marca: Swagelok.
- Modelo: 316 923625001.
- Presión máxima: 206 [bar] a 37 [°C]



*Imagen 3.9: Válvula de corte Swagelok.*

#### 3.3.3 Controlador de flujo másico pequeño.

- Marca: Aalborg.
- Modelo: GFC37
- Rango: 0 – 50 [l/min] de aire.

- Resolución:  $\pm 0.5$  [l/min].

### 3.3.4 Controlador de flujo másico grande.

- Marca: Aalborg.
- Modelo: GFC57
- Rango: 0 – 200 [l/min] de aire.
- Resolución:  $\pm 3$  [l/min] en rango 40 – 200 [l/min];



Imagen 3.10: Controlador de flujo másico.

$\pm 6$  [l/min] en rango 0 – 40 [l/min].

### 3.3.5 Arresta-llama.

- Marca: Gas Control Equipment (GCE).
- Modelo: FS500-BC.
- Presión máxima de entrada: 10 [bar].

## 3.4 Esquema de montaje experimental.

En la imagen 3.11 se aprecia el esquema ilustrativo del banco de pruebas utilizado, se detallan: 1.-Cilindro de hidrógeno, 2.-Regulador de presión, 3.-Manómetro, 4.-Válvula de cierre, 5.-Controlador de flujo másico de gas, 6.-Arresta-llama, 7.-Rotámetro, 8.-“Incremental rotary encoder”, 9.-Placa de acondicionamiento de señal, 10.-Intercambiador de calor, 11.-Adquisidor de datos, 12.-Computador, 13.-Freno dinamométrico, 14.-Analizador de gases, 15.-Estanque de combustible diésel, 16.-Probeta de medición de combustible, 17.-Motor, 18.-Sensor de detonación, 19.-Set de termocuplas.

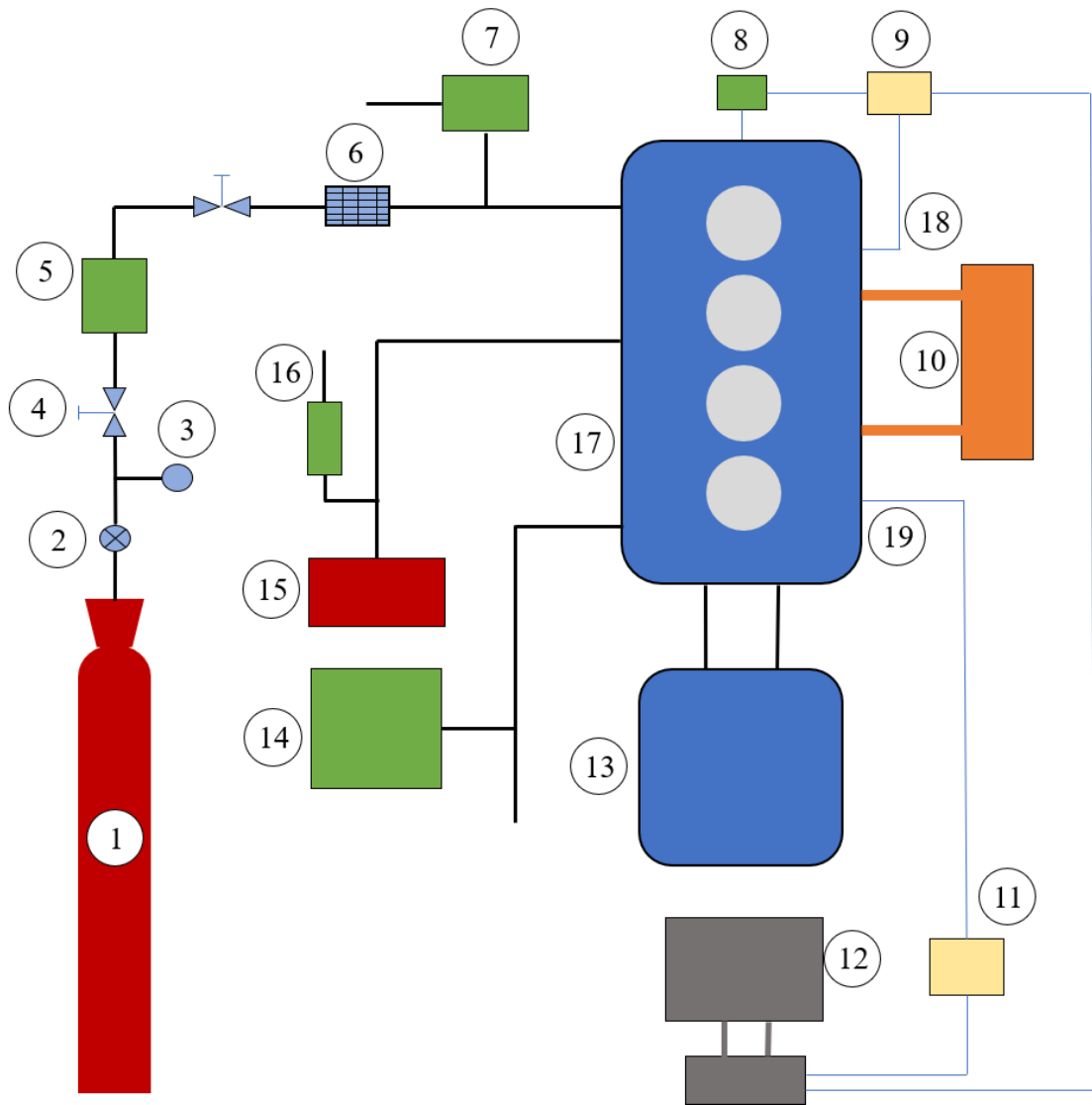


Imagen 3.11: Esquema general del montaje experimental.

# CAPÍTULO 4

## 4. Procedimiento Experimental

### 4.1 Procedimientos desarrollados para realización de pruebas.

Para materializar los procedimientos de inyección segura de hidrógeno en motores de combustión interna, se decidió elaborar “Checklists” que nos permiten estandarizar y explicitar cada una de las tareas a realizar en el momento en que se desarrollan pruebas, en virtud de mantener la integridad y seguridad del personal involucrado, de los equipos utilizados y del experimento propiamente tal. A continuación, se presentan las listas elaboradas para diferentes casos. Las que deben mantenerse visibles y deben ser ampliamente difundidas y conocidas por toda persona involucrada en el desarrollo de los experimentos.

#### 4.1.1 Operación sólo diésel.

1. Luces de cabina y puesto de control encendidas.
2. Analizador de gases y opacímetro en funcionamiento.
3. Dispositivos de medición están conectados y funcionando (termocuplas y manómetros).
4. Se verificaron niveles de lubricante y refrigerante.
5. La batería está conectada al sistema de arranque del motor.
6. Válvula de alimentación de agua del freno está abierta.
7. Caudal de agua de refrigeración se ha ajustado.
8. Válvula de alimentación de combustible diésel abierta.
9. Inspección visual conjunto freno-motor, no hay elementos ajenos o sueltos; línea de inyección diésel no presenta fugas visibles.
10. Extractor de aire en operación y ducto de cabina contigua tapado.

11. Extintores al interior y exterior de la cabina se encuentran operativos.
12. Motor en funcionamiento.
13. El motor opera de manera normal (Temperaturas y presiones de control, sonido del motor, etc.) y ha alcanzado la temperatura normal de operación.
14. Se realizó segunda inspección visual y auditiva con el motor en operación (Sistema de alimentación de combustible, vibraciones, flujos de refrigeración, etc.).

Finalizado el proceso de chequeo y puesta en marcha del motor, se inicia el desarrollo de las pruebas establecidas.

#### **4.1.2 Detención en operación sólo diésel.**

1. Temperatura de gases de escape bajo 200 °C.
2. Temperatura de aceite estable y bajo 100 °C.
3. Motor detenido.
4. Válvula de alimentación diésel cerrada.
5. Válvula de alimentación del freno cerrada.
6. Válvula de agua de refrigeración cerrada.
7. Batería desconectada.
8. Inspección visual conjunto freno-motor, no existen elementos sueltos o averiados.
9. Verificación de fugas en sistema de alimentación de combustible, aguas de refrigeración o lubricación del motor.
10. Se ha controlado y eliminado cualquier derrame producido.
11. Se identificaron y repararon todas las fugas existentes.
12. Extractor de aire apagado.
13. Instrumentos de medición apagados.
14. Luces de cabina y halógenos apagados.

### **4.1.3 Puesta en marcha en operación con inyección de hidrógeno.**

1. Luces de cabina y puesto de control encendidas.
2. Analizador de gases y opacímetro en funcionamiento.
3. Controlador de flujo de hidrógeno conectado y en operación.
4. Dispositivos de medición están conectados y funcionando (termocuplas y manómetros).
5. Se verificaron niveles de lubricante y refrigerante.
6. La batería está conectada al sistema de arranque del motor.
7. Válvula de alimentación de agua del freno está abierta.
8. Caudal de agua de refrigeración se ha ajustado.
9. Válvula de alimentación de combustible diésel abierta.
10. Línea de inyección de hidrógeno no tiene fugas.
11. Inspección visual conjunto freno-motor, no hay elementos ajenos o sueltos; línea de inyección diésel no presenta fugas visibles.
12. Extractor de aire en operación y ducto de cabina contigua tapado.
13. Extintores al interior y exterior de la cabina se encuentran operativos.
14. Motor en funcionamiento.
15. El motor opera de manera normal (Temperaturas y presiones de control, sonido del motor, etc.) y ha alcanzado la temperatura normal de operación.
16. Han transcurrido 15 minutos desde que se encendió el controlador de flujo de hidrógeno.
17. Se probó operación del sistema de inyección de hidrógeno con baja o nula carga.
18. Se realizó segunda inspección visual y auditiva con el motor en operación (Sistema de alimentación de diésel, sistema de alimentación de hidrógeno, vibraciones, flujos de refrigeración, etc.).

Finalizado el proceso de chequeo y puesta en marcha del motor, se inicia el desarrollo de las pruebas establecidas.

#### **4.1.4 Detención en operación con inyección de hidrógeno.**

1. Válvula de cilindro de hidrógeno cerrada, línea de alimentación despresurizada.
2. Temperatura de gases de escape bajo 200 °C.
3. Temperatura de aceite estable y bajo 100 °C.
4. Motor detenido.
5. Válvula de alimentación diésel cerrada.
6. Válvula de alimentación del freno cerrada.
7. Válvula de agua de refrigeración cerrada.
8. Batería desconectada.
9. Inspección visual conjunto freno-motor, no existen elementos sueltos o averiados.
10. Verificación de fugas en sistema de alimentación de combustibles, aguas de refrigeración o lubricación del motor.
11. Se ha controlado y eliminado cualquier derrame producido.
12. Se identificaron y repararon todas las fugas existentes.
13. Extractor de aire apagado.
14. Instrumentos de medición apagados.
15. Luces de cabina y halógenos apagados.

#### **4.1.5 “Checklist” desarrollado para parada de emergencia.**

En el caso de que ocurra una anomalía durante el desarrollo de las pruebas, sin necesariamente ser esta un incidente ni una situación de gravedad mayor, que ponga en riesgo el equipo, la seguridad de las personas, o simplemente afecte el experimento como tal, se debe contar con una lista de instrucciones a seguir expresamente clara, que debe ser de conocimiento de todo el equipo de trabajo involucrado en las pruebas, que asegure una correcta detención del experimento. La lista se presenta a continuación:

1. Cortar alimentación de hidrógeno al sistema de inyección. Se puede realizar mediante controlador de flujo o válvulas de corte rápido instaladas en línea de suministro.
2. Detener motor de forma rápida y segura mediante botón de detención ubicado en tablero, en caso de falla eléctrica, se cuenta también con un sistema mecánico de detención que puede ser accionado igualmente desde afuera de la cabina.
3. Cortar alimentación de combustible diésel.
4. Dar aviso a personal de laboratorio.
5. En caso de incendio detener extractor de aire de la cabina.
6. Atacar fuego con extintores de polvo químico seco.
7. No arriesgar la integridad física con acciones temerarias.
8. Evacuar la zona siniestrada.
9. En caso de ser necesario, evacuar el laboratorio por puerta de acceso.
10. Llamar al fono de emergencias en campus 4222.

## **4.2 Metodología de inyección.**

La adición de hidrógeno al motor contempla la operación en las mismas condiciones de salida del motor (Torque y régimen de giro) que cuando se utiliza sólo diésel, pero se pretende reducir el consumo de este último reemplazándolo por el combustible gaseoso. Una vez obtenida la línea base de operación del motor, se conocen los aportes energéticos que realiza el diésel para cada uno de los modos. Se define así el nivel de reemplazo como el porcentaje, referido a ese aporte energético, que será entregado por el hidrógeno, reemplazando el uso de combustible diésel. La forma en la que se fija la cantidad de hidrógeno a inyectar implica que al momento del ensayo no necesariamente se cumple la participación indicada a priori para cada uno de los combustibles en el aporte total energético al motor.

### **4.3 Elección de modos de operación.**

Al elegir los modos de operación a estudiar se consideraron los siguientes requisitos:

- Diferentes niveles de revoluciones, ya que éstas determinan el tiempo del que se dispone para el desarrollo de la combustión dentro del cilindro.
- Diferentes niveles de carga, impactando este parámetro en las condiciones de razón de equivalencia, temperaturas de operación, máxima presión al interior del cilindro y presión media efectiva en las que opera el motor.
- Régimen de giro al que se obtiene el máximo torque del motor, ya que se suele operar en la vecindad de éste.

De esta manera, se decide operar a cuatro niveles de velocidad de giro, siendo estas, 2000, 2400, 2800 y 3000 RPM. Se establecieron tres niveles de carga, correspondiendo estos a 100 %, 60% y 30%; totalizando 12 modos de operación que serán estudiados utilizando sólo combustible diésel. Logrando así, caracterizar el motor en su desempeño y emisiones, y, además estudiar la estabilidad de los modos de operación elegidos y la variabilidad asociada a las mediciones en cada uno de estos modos.

### **4.4 Adquisición de datos.**

Dependiendo de los equipos utilizados, hay mediciones que deben ser leídas y registradas manualmente durante el desarrollo de los experimentos, así como algunas otras son adquiridas por el software computacional automáticamente, sin embargo, se deben procesar posteriormente a los ensayos. Los parámetros que se estabilizan en el menor tiempo se registran primero, permitiendo que parámetros que requieren un tiempo mayor de operación se establezcan sin necesidad de mantener el equipo operando en vano. La secuencia utilizada durante los ensayos será presentada a continuación:

0. Ejecutar procedimiento de puesta en marcha definido en sección 3, permitiendo el calentamiento del motor y eliminación de los estados no estacionarios. Registro de condiciones ambientales y caudal de agua de refrigeración.
1. Ajustar el acelerador y posición del freno conjuntamente para lograr el nivel de régimen de giro y torque deseado. Este procedimiento es de tipo iterativo ya que el comando del freno no regula directamente el torque a aplicar si no la apertura de los álabes del sistema interior, siendo el torque dependiente de la velocidad de giro. En los casos de pruebas a plena carga (100%) se debe fijar el acelerador en la posición máxima y mediante la palanca de control del freno lograr la velocidad deseada.
2. Esperar algunos segundos y corroborar que la operación es estable. El freno y motor deben mantenerse estables en cuanto a torque y velocidad de giro respectivamente.
3. Establecido el modo de operación se inicia el conteo de la cantidad de aire que el motor admite, midiendo el tiempo necesario para que 3 [m<sup>3</sup>] sean aspirados por el motor.
4. Se procede de manera similar con el consumo de combustible, midiendo el tiempo que transcurre en que el motor utilice una cantidad previamente conocida de diésel, esto se logra mediante la probeta de medición de volumen, la cual cuenta con dos marcas pudiendo utilizarse 55[cm<sup>3</sup>], 125[cm<sup>3</sup>] o la suma de ambos.
5. Se toma registro de la presión manométrica del aire en el múltiple de admisión y en la aspiración del motor mediante los manómetros de columna.
6. Se registran las lecturas de las termocuplas instaladas en el equipo de prueba correspondiendo estas a temperatura en múltiple de admisión, refrigerante del motor, gases de escape, agua a la salida del intercambiador y temperatura en el cárter de aceite.
7. Se registran las emisiones leídas en el analizador de gases marca Bosch.

8. Se registra la lectura del opacímetro.
9. Se ajusta el nuevo modo de operación a ensayar.

#### **4.5 Validación de indicador de detonación propuesto**

Para evaluar la repetibilidad del indicador de detonación propuesto y establecer un intervalo de confianza de este en cada modo de operación se realizarán diez réplicas en cada uno. Se procede estableciendo el modo de operación primero, sólo con combustible diésel, luego se registran las señales del sensor de detonación y “encoder” conjuntamente por alrededor de 15 segundos. Los registros se guardan para su posterior procesamiento.

Los registros se realizan mediante un software de grabación de sonido, obtenidas las grabaciones, se procede a exportar los datos y procesarlos mediante una programación desarrollada en lenguaje Python que realiza el análisis de 200 ciclos consecutivos de un cilindro en particular. La señal bruta es procesada a través de una función ventana, utilizando aproximadamente 60° de giro del cigüeñal, región donde se encuentra la mayor cantidad de información relacionada con la combustión. A cada una de estas ventanas obtenidas, se le aplica una transformada rápida de Fourier en la que solo los coeficientes comprendidos en el rango de frecuencias de 5 a 7 kHz son considerados, el máximo del valor absoluto de estos coeficientes para cada uno de los 200 ciclos es sumado, obteniéndose así el indicador “KI”. Se espera que este indicador aumente drásticamente cuando comience a ocurrir el fenómeno de detonación, deflagración o similares, asociados a una combustión anormal dentro de la cámara.

Adicionalmente, se le ha añadido al programa la función de calcular la velocidad de giro del motor a partir de la señal del “encoder”, para compararla con la lectura indicada en el tacómetro.

## **4.6 Inyección de hidrógeno.**

Los ensayos con inyección de hidrógeno se centran en estudiar el comportamiento del motor, en cuanto a sus emisiones, desempeño y estabilidad, al variar el nivel de reemplazo de combustible, aumentando paulatinamente hasta encontrar el nivel máximo de reemplazo en que el motor es capaz de operar sin haberle hecho ninguna modificación. Para estos fines se ha elegido la velocidad de giro de 2400 RPM, en la que se observan mejores condiciones de estabilidad de la operación y mediciones, así como también cercanía al punto de máximo torque. Debido a la escasez de experiencias previas en el motor disponible con adición de hidrógeno, se decide comenzar por los modos de operación con menor carga, debido a que en estos se utiliza menos combustible, así como también se exige menos mecánicamente el motor, representando este conjunto, menor gravedad en el caso de una eventual falla. Encontrado el mayor nivel de reemplazo posible se procederá a aumentar la carga hasta encontrar el nuevo nivel máximo de reemplazo registrando todas las variables de interés en cada caso. Se aumentará aún más la carga encontrando ahora el máximo nivel de reemplazo para plena carga. Finalmente se realizarán réplicas de los experimentos realizados con el fin de validar los resultados obtenidos en la primera serie de experimentos. El valor del índice de detonación es monitoreado en cada uno de los ensayos a fin de detectar el comienzo de la aparición del fenómeno de detonación. Este nos indica cuando hemos alcanzado el máximo nivel de reemplazo.

# CAPÍTULO 5

## 5. Análisis y discusión de resultados experimentales

### 5.1 Resultados línea base.

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos en la operación del motor en modo sólo diésel en los doce modos de operación estudiados, en el primer apartado se detalla un análisis estadístico de los datos. Luego se presentan los parámetros de operación medidos, que en este caso corresponden a las temperaturas involucradas en el refrigeración y lubricación del motor, los factores de desempeño y finalmente las emisiones medidas. Todo lo anterior se hace por separado para la operación sólo diésel y combustible dual.

#### 5.1.1 Análisis estadístico

Para la etapa de línea base se realizaron 4 réplicas de cada modo de operación, se calculó el promedio, desviación estándar muestral y coeficiente de variación para todos los parámetros medidos en cada modo de operación. Los resultados se muestran en tablas separadas para cada régimen de giro. Mediante el coeficiente de variación comparamos los parámetros que muestran variabilidades aceptables como para establecer conclusiones a partir de los datos obtenidos, para aquellas que muestran variabilidades intermedias se analizaran sólo las tendencias.

Tabla 5.1: Análisis estadístico de datos obtenidos para línea base a 2000 RPM.

Nivel de carga	30%			60%			100%		
	$\bar{x}$	<i>DE</i>	<i>CV</i>	$\bar{x}$	<i>DE</i>	<i>CV</i>	$\bar{x}$	<i>DE</i>	<i>CV</i>
Presión de admisión [mm-Hg]	117	4	3%	183	7	4%	335	7	2%

<b>Vacío de aspiración [mm-H<sub>2</sub>O]</b>	24	3	12%	28	3	10%	31	1	3%
<b>Temperatura de admisión [°C]</b>	39.4	1.6	4%	53.2	8.7	16%	69.4	1.1	2%
<b>Temperatura de escape [°C]</b>	180	8.4	5%	254	6.8	3%	380	2.9	1%
<b>Temperatura agua ref. [°C]</b>	21.6	0.6	3%	22.4	1.0	4%	25.2	1.4	5%
<b>Temperatura del aceite [°C]</b>	91	5.0	5%	94	5.6	6%	99	1.4	1%
<b>Emisiones de O<sub>2</sub> [%]</b>	16.1	0.15	1%	13.6	0.43	3%	10.7	0.45	4%
<b>Emisiones de CO<sub>2</sub> [%]</b>	3.52	0.09	3%	5.29	0.29	5%	7.46	0.32	4%
<b>Emisiones de CO [ppmv]</b>	143	22	16%	100	68	68%	773	496	64%
<b>Emisiones de NO [ppmv]</b>	330	19	6%	536	47	9%	681	21	3%
<b>Opacidad [m<sup>-1</sup>]</b>	0.14	0.02	15%	0.23	0.07	32%	1.51	0.37	25%
<b>Emisiones de HC [ppmv]</b>	9	3	36%	8	5	68%	21	24	113 %
<b>Aire [l/min]</b>	2049	24	1%	2125	59	3%	2353	30	1%
<b>Diésel [l/h]</b>	3.0	0.05	2%	5.2	0.08	2%	8.4	0.10	1%

Para 2000 RPM, los datos de emisiones de CO, HC y Opacidad presentan un coeficiente de variación que supera el 20%, en los casos de HC y CO la situación es mucho peor, ya que se alcanzan niveles de incluso 113% en un modo de operación. En el caso de las otras variables, el coeficiente de variación se mantiene bastante bajo en general menor a 10%. No se aprecian grandes diferencias en la variabilidad a distintos niveles de carga.

Tabla 5.2: Análisis estadístico de datos obtenidos para línea base a 2400 RPM.

Nivel de carga	30%			60%			100%		
	$\bar{x}$	DE	CV	$\bar{x}$	DE	CV	$\bar{x}$	DE	CV

<b>Presión de admisión [mm-Hg]</b>	185	6	3%	281	11	4%	434	8	2%
<b>Vacío de aspiración [mm-H<sub>2</sub>O]</b>	34	1	3%	37	2	5%	42	3	6%
<b>Temperatura de admisión [°C]</b>	45.6	0.9	2%	58.5	0.6	1%	79.1	1.1	1%
<b>Temperatura de escape [°C]</b>	174	2.9	2%	245	3.1	1%	346	8.8	3%
<b>Temperatura agua ref. [°C]</b>	21.9	0.9	4%	22.7	0.8	3%	25.6	1.7	7%
<b>Temperatura del aceite [°C]</b>	91	1.2	1%	97	0.8	1%	105	3.6	3%
<b>Emisiones de O<sub>2</sub> [%]</b>	16.4	0.16	1%	14.4	0.23	2%	11.8	0.65	6%
<b>Emisiones de CO<sub>2</sub> [%]</b>	3.33	0.12	4%	4.72	0.16	3%	6.79	0.46	7%
<b>Emisiones de CO [ppmv]</b>	110	29	27%	35	35	100%	210	116	55%
<b>Emisiones de NO [ppmv]</b>	360	23	6%	570	38	7%	749	36	5%
<b>Opacidad [m<sup>-1</sup>]</b>	0.13	0.04	30%	0.18	0.03	15%	0.97	0.13	13%
<b>Emisiones de HC [ppmv]</b>	8	3	30%	6	5	91%	30	30	99%
<b>Aire [l/min]</b>	2602	34	1%	2759	21	1%	2964	46	2%
<b>Diésel [l/h]</b>	3.6	0.06	2%	5.7	0.09	2%	8.8	0.13	2%

A 2400 RPM, las emisiones de HC y CO presentan coeficientes de variación mayores a 20%, en todos los casos, alcanzando incluso el valor de 99% para HC a plena carga. El CV de la Opacidad superó sólo en el caso de 30% de carga el valor de 20%, mientras que para las otras cargas rondó el 15%. Para los demás parámetros se observaron coeficientes de variación menores a 7%. En general se aprecia menos variabilidad que en el caso de 2000 RPM.

Tabla 5.3: Análisis estadístico de datos obtenidos para línea base a 2800 RPM.

Nivel de carga	30%			60%			100%		
	$\bar{x}$	DE	CV	$\bar{x}$	DE	CV	$\bar{x}$	DE	CV
Presión de admisión [mm-Hg]	277	12	4%	379	2	1%	534	4	1%
Vacío de aspiración [mm-H <sub>2</sub> O]	51	3	6%	53	3	5%	60	3	6%
Temperatura de admisión [°C]	55.6	1.9	3%	70.1	0.9	1%	89.1	0.4	0%
Temperatura de escape [°C]	173	2.1	1%	239	8.5	4%	315	5.8	2%
Temperatura agua ref. [°C]	22.8	1.2	5%	23.8	0.5	2%	25.1	1.7	7%
Temperatura del aceite [°C]	95	1.4	2%	106	4.9	5%	108	1.5	1%
Emisiones de O <sub>2</sub> [%]	16.7	0.10	1%	15.2	0.20	1%	13.3	0.53	4%
Emisiones de CO <sub>2</sub> [%]	3.06	0.09	3%	4.17	0.16	4%	5.63	0.38	7%
Emisiones de CO [ppmv]	93	22	24%	98	25	26%	125	13	10%
Emisiones de NO [ppmv]	343	10	3%	513	25	5%	667	57	9%
Opacidad [m <sup>-1</sup> ]	0.14	0.03	21%	0.21	0.03	13%	0.41	0.10	24%
Emisiones de HC [ppmv]	9	1	15%	10	2	20%	13	6	48%
Aire [l/min]	3260	88	3%	3479	34	1%	3712	44	1%
Diésel [l/h]	4.2	0.07	2%	6.2	0.05	1%	9.5	0.08	1%

En el caso de 2800 RPM, la variación de CO, HC y Opacidad superó el 20% en la mayoría de los casos, la mayor variabilidad se encontró en el caso de HC a plena carga alcanzando el 48%, a pesar de esto, se obtiene la menor variabilidad para estos parámetros, comparada con las otras velocidades de giro. Para el resto de los parámetros, CV se mantuvo bajo el 7% en la mayoría de los casos.

Tabla 5.4: Análisis estadístico de datos obtenidos para línea base a 3000 RPM.

Nivel de carga	30%			60%			100%		
	$\bar{x}$	<i>DE</i>	<i>CV</i>	$\bar{x}$	<i>DE</i>	<i>CV</i>	$\bar{x}$	<i>DE</i>	<i>CV</i>
Presión de admisión [mm-Hg]	344	16	5%	443	16	4%	589	9	2%
Vacío de aspiración [mm-H <sub>2</sub> O]	63	4	7%	70	6	9%	80	1	1%
Temperatura de admisión [°C]	63.3	2.6	4%	76.5	2.1	3%	94.2	2.8	3%
Temperatura de escape [°C]	188	2.8	2%	236	5.4	2%	310	6.6	2%
Temperatura agua ref. [°C]	23.2	1.2	5%	23.9	1.1	5%	28.7	5.2	18%
Temperatura del aceite [°C]	98	0.7	1%	105	1.9	2%	110	3.6	3%
Emisiones de O <sub>2</sub> [%]	16.5	0.03	0%	15.1	0.29	2%	12.3	0.47	4%
Emisiones de CO <sub>2</sub> [%]	3.20	0.02	1%	4.26	0.24	6%	5.84	0.30	5%
Emisiones de CO [ppmv]	75	48	64%	93	33	36%	105	26	25%
Emisiones de NO [ppmv]	364	5	2%	527	22	4%	715	16	2%
Opacidad [m <sup>-1</sup> ]	0.17	0.02	12%	0.23	0.06	25%	0.35	0.08	22%
Emisiones de HC [ppmv]	8	2	32%	7	3	37%	11	7	62%
Aire [l/min]	3656	92	3%	3842	110	3%	4175	57	1%
Diésel [l/h]	4.8	0.15	3%	6.7	0.29	4%	10.1	0.07	1%

Al nivel de régimen de giro de 3000 RPM los coeficientes de variación de las emisiones de CO, HC y la Opacidad, superan el valor de 20% alcanzando un máximo de 64% en el caso de las emisiones de CO a 30% de carga. La variabilidad de los otros parámetros estudiados se mantiene bajo un 7%, con la excepción de la temperatura del agua de refrigeración en el caso de plena carga.

Se observan variabilidades aceptables para la mayoría de los parámetros, en todos los niveles de régimen de giro, exceptuando las mediciones de Monóxido de Carbono e Hidrocarburos, en los que el CV superó el 20 % en todos los casos, llegando incluso a valores tan altos como 113% para las emisiones de Hidrocarburos. En el caso de la opacidad, la variabilidad obtenida fue regular, superando en algunos casos el valor de 20% y en otros no, por lo que se observará la tendencia de este parámetro.

## **5.1.2 Parámetros de operación**

Algunos parámetros de operación fueron estudiados para evaluar la estabilidad del modo y observar la presencia o no de histéresis térmicas. La temperatura del aceite y agua a la salida del intercambiador se presentan a continuación.

### **5.1.2.1 Temperatura del aceite**

Este parámetro es uno de los que entrega más información respecto al estado térmico del motor, ya que es el fluido que retira calor más directamente de las partes involucradas en la combustión. Se observó un aumento de la temperatura al aumentar la carga del motor y la velocidad de giro, congruentemente con los estados en los que mayor tasa de combustible es quemado. En general se aprecia estabilidad de la temperatura en cada modo de operación.

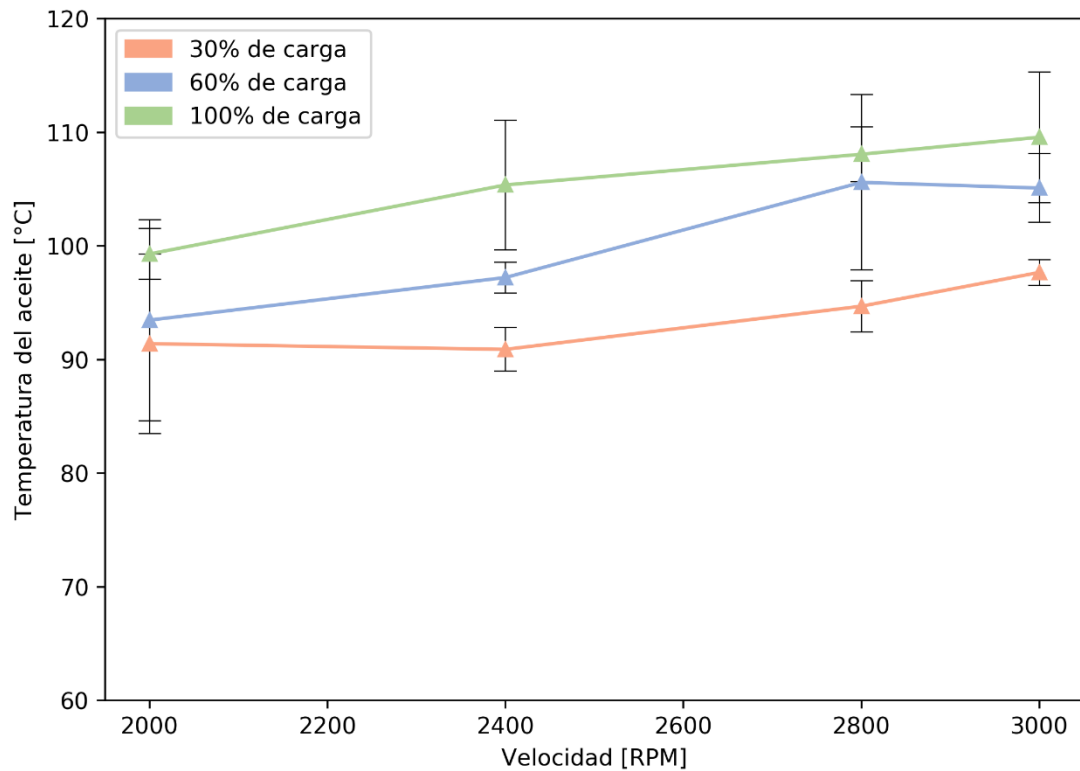


Gráfico 5.1: Línea base de la temperatura del aceite.

### 5.1.2.2 Temperatura del agua a la salida del intercambiador

Si bien este parámetro parece alejado de la operación del motor, en realidad nos dice casi de manera directa cuánto es el calor que está siendo rechazado del motor a través de la refrigeración. La ventaja de este parámetro respecto a la temperatura del refrigerante es que el agua de refrigeración opera con un caudal constante, por lo que una variación de la temperatura implica necesariamente una variación del calor retirado. En el caso del refrigerante, el caudal de este depende de la apertura del termostato y además no sabemos la temperatura con la que retorna al motor, sólo la con la que sale. Se aprecia al igual que en el caso de la temperatura del aceite que para mayores consumos de combustible, se obtienen mayores temperaturas. Las temperaturas aparecen estables a pesar de que sean muy cercanas entre los diferentes modos de operación. En el caso de 3000 RPM y plena carga se aprecia un aumento pronunciado de la temperatura y por consiguiente de la potencia de refrigeración. Esta

tiene su explicación debido a que durante las primeras pruebas se detectó una falla en el sistema de refrigeración que fue posteriormente corregido.

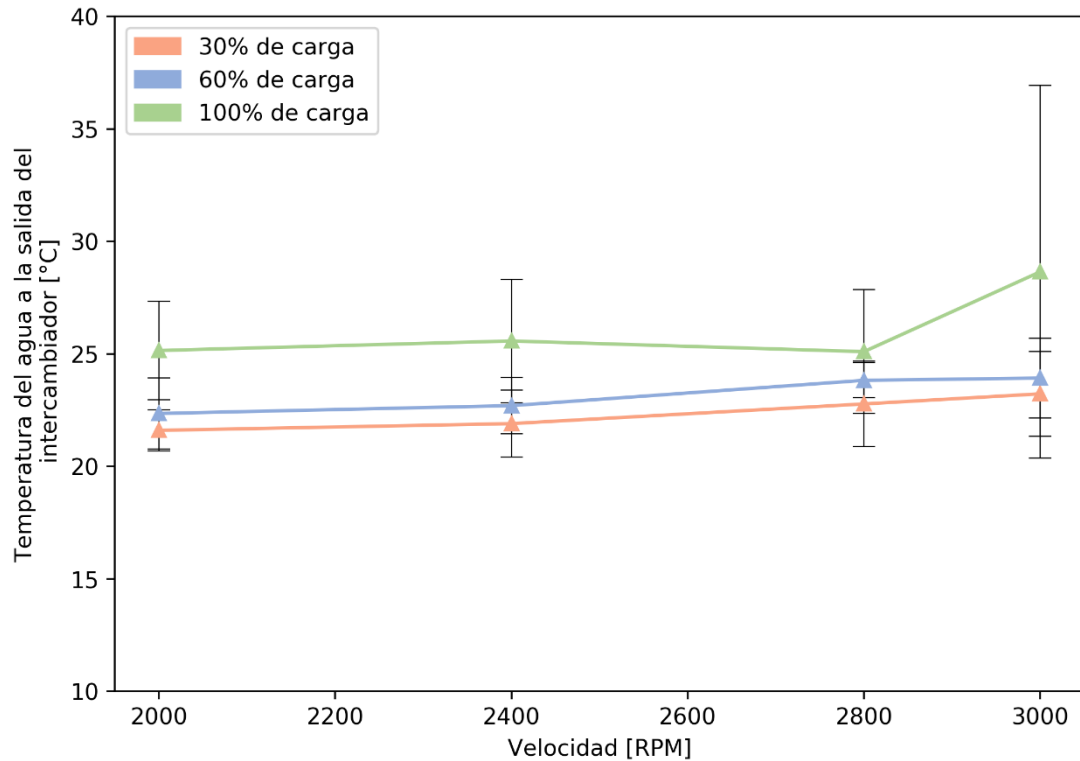


Gráfico 5.2: Línea base de la temperatura a la salida del intercambiador de calor.

### 5.1.3 Factores de desempeño

Se grafican los factores de desempeño estudiados, indicando en cada caso su intervalo de confianza para un 95 de probabilidad experimental.

#### 5.1.3.1 Torque

Se grafican los valores de torque obtenido durante las mediciones, para los casos de media y baja carga, no es apreciable la barra de error que define el intervalo de confianza, ya que en estos casos el torque se fija mediante la manipulación del freno, transformándose esta en una variable de control del experimento y no en una variable de resultado. Se observa el máximo de torque a 2000 RPM, sin embargo, al nivel

siguiente de velocidad no se observa una baja importante. Velocidades superiores a 2400 RPM muestran una disminución en el torque entregado, convirtiéndolas en velocidades menos deseables de operación.

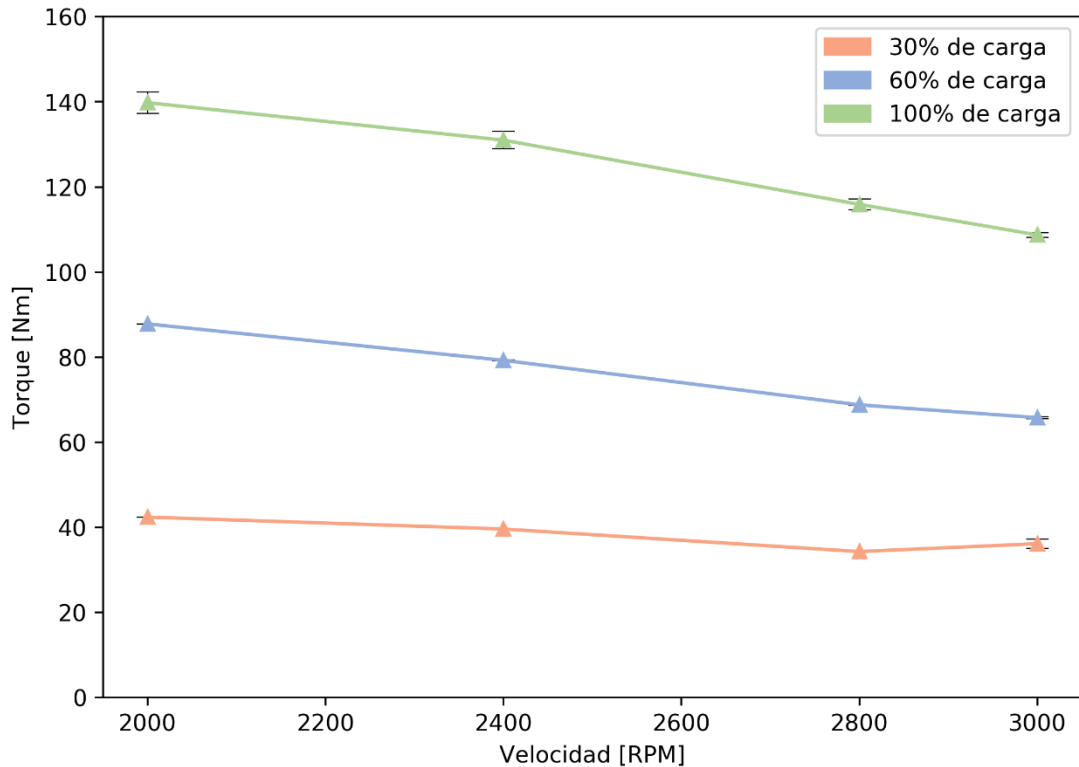


Gráfico 5.3: Línea base del torque medido.

### 5.1.3.2 Potencia

La potencia entregada por el motor es graficada para cada modo de operación, debido a la forma en que se definieron los niveles de carga, no se presenta variabilidad en la potencia a media y baja carga, situación idéntica al caso anterior. La máxima potencia medida fue de 34.2 [kW] a plena carga y 3000 RPM. La potencia máxima indicada por el fabricante se alcanza a la velocidad máxima de giro (4500 RPM), se observa la tendencia en aumento al aumentar la velocidad de giro a pesar de la disminución en el torque desarrollado. Es apreciable además cierta diferencia entre los valores medidos y la curva entregada por el fabricante, diferencia atribuible a desgaste y diferencias en las condiciones de prueba.

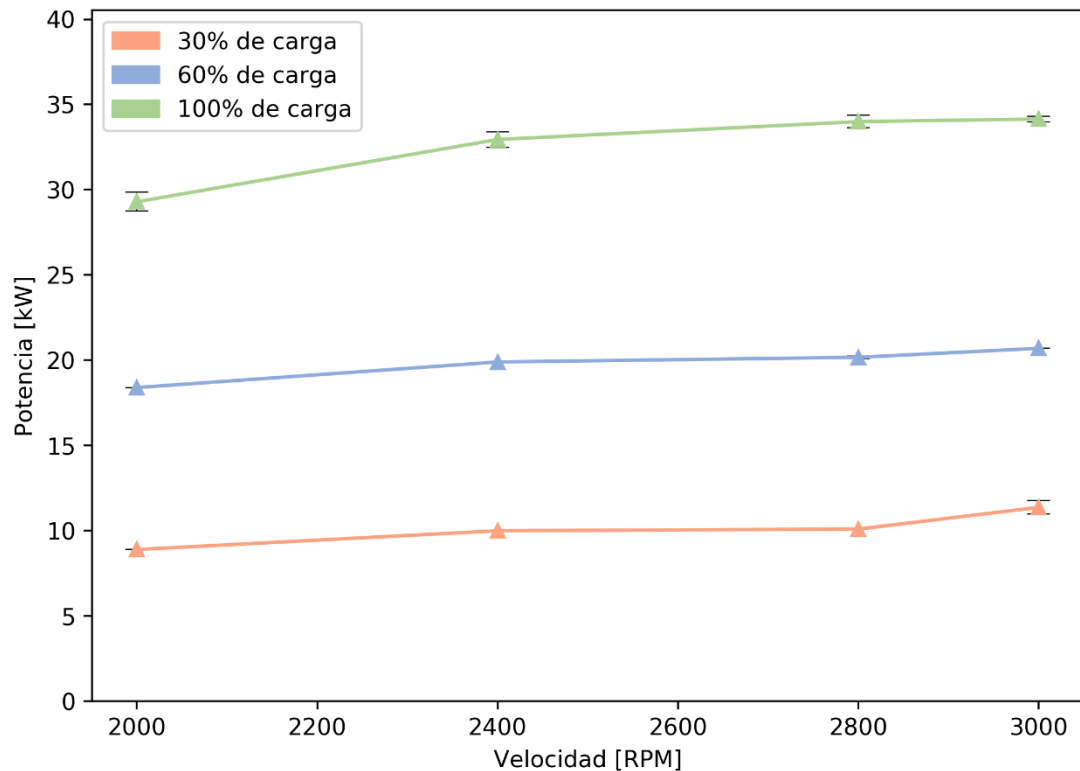


Gráfico 5.4: Línea base de la potencia efectiva.

### 5.1.3.3 Razón de equivalencia

Se identifica la máxima razón de equivalencia a 2000 revoluciones por minuto y plena carga. La variabilidad de los valores es relativamente baja, se observa que al aumentar la velocidad de giro el parámetro disminuye para todos los niveles de carga. La variación es mucho mayor a plena carga que a cargas menores. Para un mismo nivel de régimen de giro, la razón de equivalencia aumenta junto con la carga, concordando con la teoría ya que la cantidad de aire admitido es altamente sensible al nivel de revoluciones y escasamente dependiente del nivel de carga, y la cantidad de combustible inyectado es aproximadamente proporcional a la carga. Para el caso de 30% de carga se observa un leve incremento de la razón de equivalencia entre 2800 y 3000 RPM, pudiendo deberse a que a esta velocidad la pequeña cantidad de combustible inyectada no dispone de suficiente tiempo para quemarse completamente.

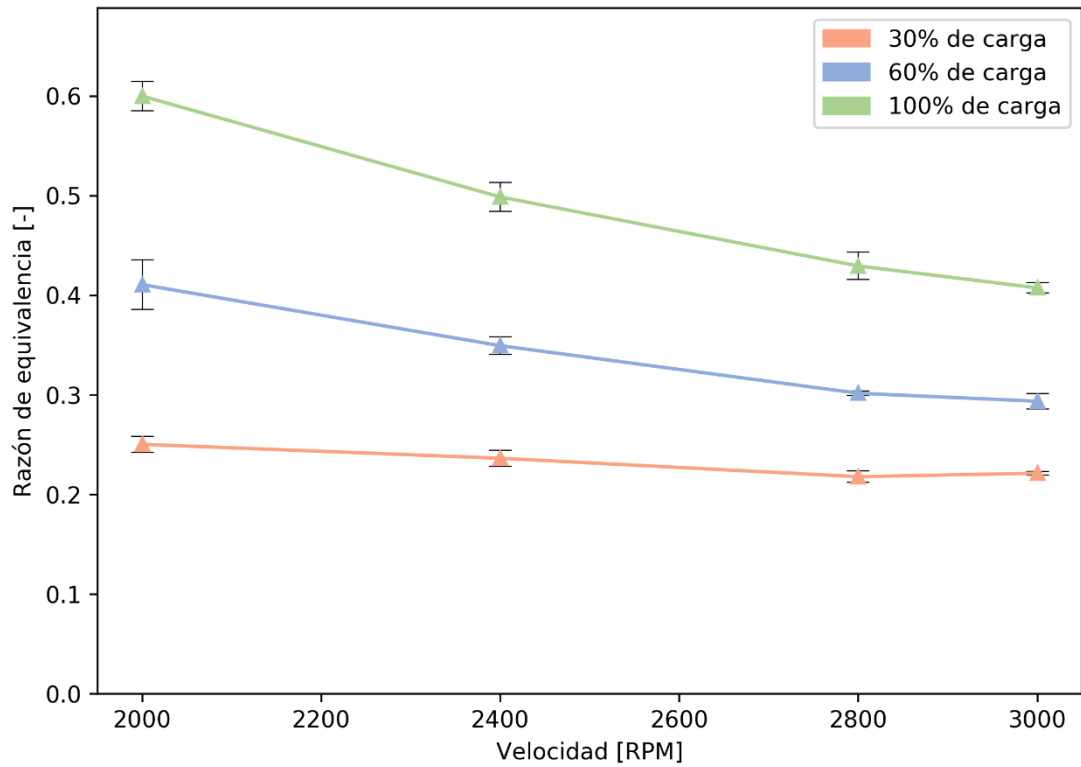


Gráfico 5.5: Línea base de la razón de equivalencia total.

#### 5.1.3.4 Eficiencia volumétrica

Se observa un aumento sostenido de la eficiencia volumétrica al aumentar la velocidad de giro y un aumento leve entre diferentes cargas, siendo este efecto más notorio a 2000 revoluciones por minuto. Las diferencias en eficiencia volumétrica para diferentes cargas evidencian el actuar del turbocompresor, que al ser los gases de escape más calientes y abundantes (alta carga), logra una mayor sobrealimentación del motor. De igual forma, para mayores velocidades de giro este efecto es más importante.

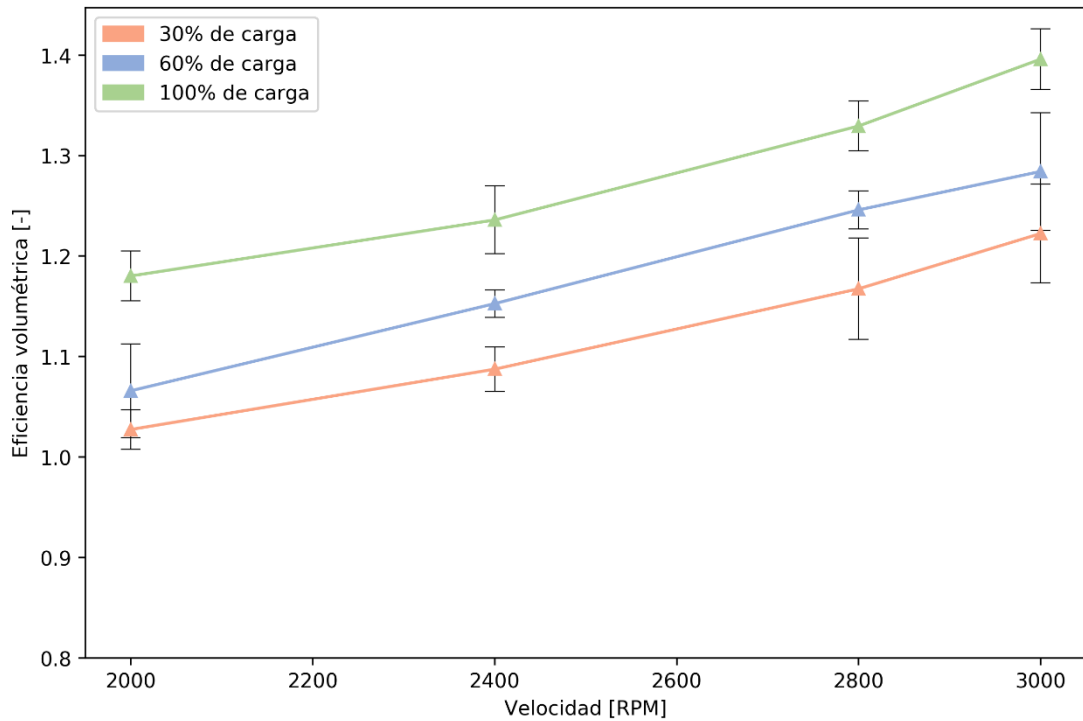


Gráfico 5.6: Línea base de la eficiencia volumétrica.

### 5.1.3.5 Consumo específico de combustible

Se obtiene menor consumo de combustible operando a plena carga, sin embargo, la diferencia entre ésta y un nivel de carga intermedio es pequeña. A baja carga se obtienen resultados notoriamente más desfavorables, evidencia de que la potencia de roce consumida por el motor es constante y depende exclusivamente de la velocidad de giro, así el sólo hecho de mantener el motor girando consume la mayor parte de la energía, sin ser aprovechada la capacidad completa del equipo. Se aprecia un aumento sostenido del consumo específico al aumentar la velocidad de giro, exceptuando el caso de plena y media carga entre 2000 RPM y 2400 RPM, este comportamiento anormal puede tener explicación si observamos la eficiencia de quemado del combustible inyectado, si bien a 2400 RPM la potencia de roce es mayor, el mejor desempeño del turbocompresor hace posible la operación con más exceso de aire, mejorando la eficiencia de conversión del combustible en energía útil. El menor

consumo fue de  $223.7 \left[ \frac{g}{kWh} \right]$  operando a plena carga y 2400 RPM. El máximo valor medido se obtuvo con un 30% de carga a 3000 RPM siendo este de  $355.3 \left[ \frac{g}{kWh} \right]$ , aproximadamente un 59% mayor al mínimo consumo específico.

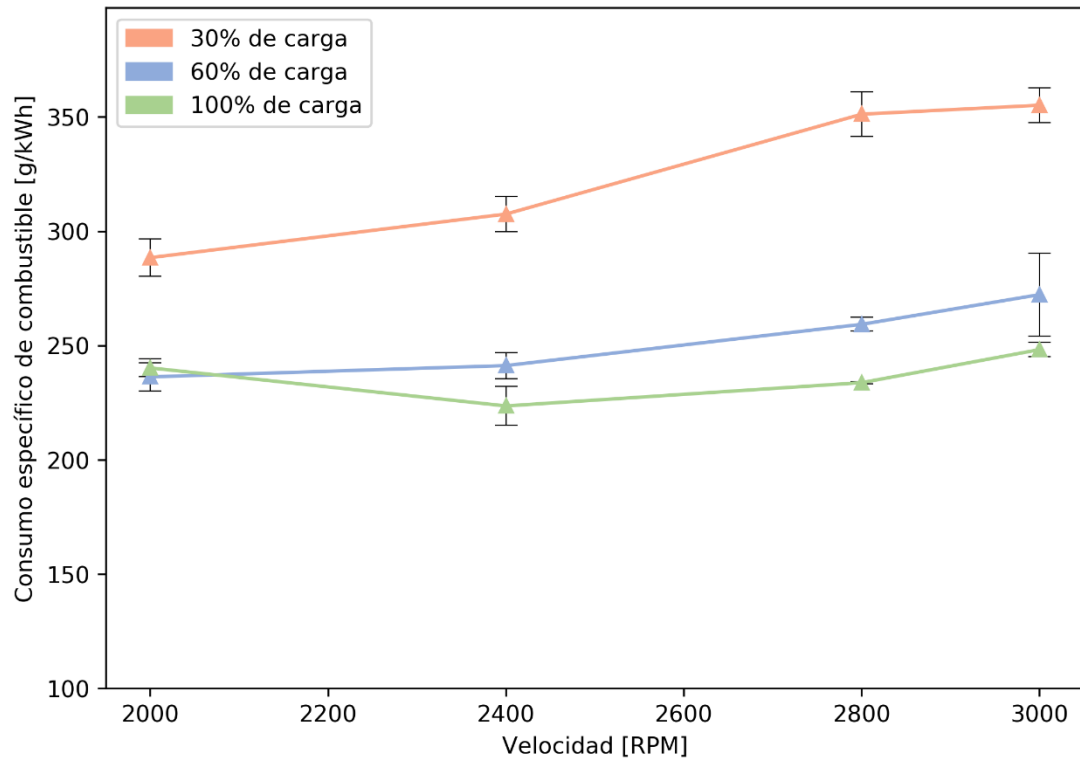


Gráfico 5.7: Línea base del consumo específico de combustible diésel.

### 5.1.3.6 Eficiencia térmica

Concordantemente con el consumo específico se obtienen los valores más favorables para plena carga y 2400 RPM, siendo la eficiencia en este caso igual a un 37.6% y los más desfavorables a 30% de carga y 3000 RPM, correspondiéndole un 23.7%. Para el estudio en modo sólo diésel la eficiencia térmica y el consumo específico hablan exactamente del mismo parámetro de desempeño expresado en diferentes términos, sin embargo, estos valores serán considerados por separado debido

a que en la operación dual expresan conceptos diferentes. El consumo específico nos permitirá evaluar exactamente cuánto es el potencial ahorro de diésel, mientras que la eficiencia térmica continuará hablándonos de qué tan capaz es el motor de convertir la energía química contenida en ambos combustibles y transformarla en potencia mecánica disponible.

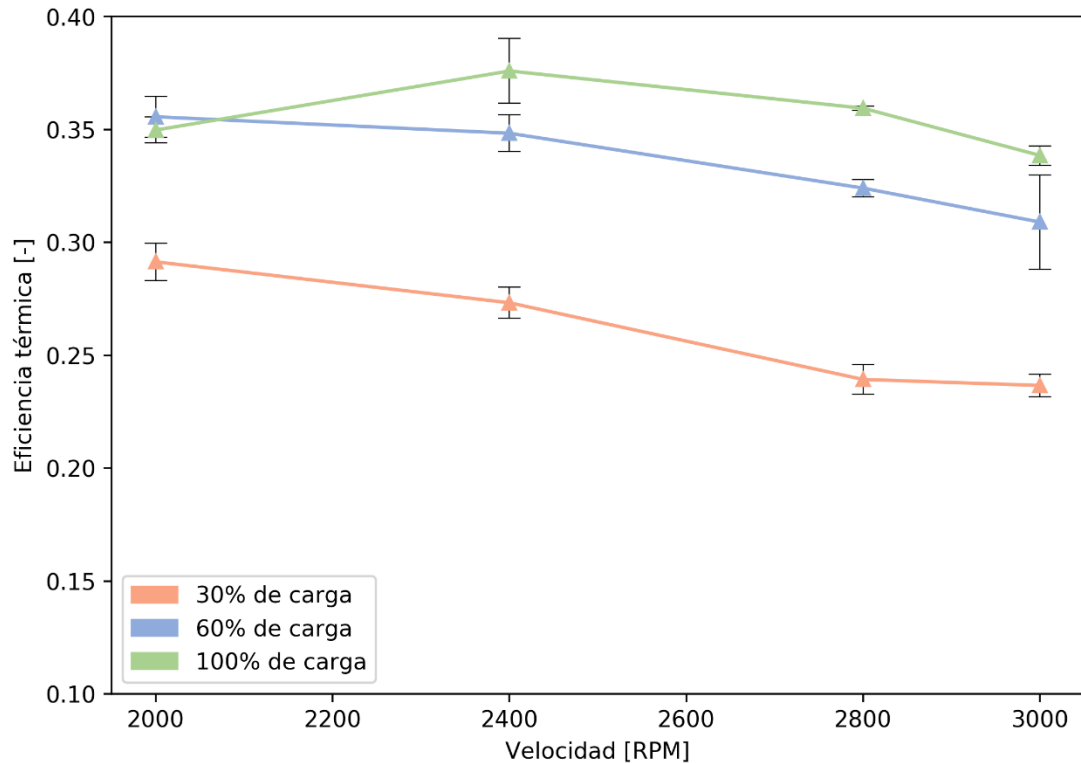


Gráfico 5.8: Línea base de la eficiencia térmica del motor.

## 5.1.4 Emisiones

### 5.1.4.1 Oxígeno

En el caso de las emisiones de oxígeno se detectaron las menores concentraciones en el caso de plena carga y 2000 RPM, correspondiendo este valor a 10.7%. Mientras que la mayor concentración de oxígeno se registró en el caso de 30% de carga y 2800 RPM, alcanzando un 16.7%. Los valores de concentración de oxígeno mostraron perfecta concordancia con la razón de equivalencia medida, ya que, para

cualquier condición de carga o velocidad, mientras menor razón de equivalencia (más exceso de aire) mayores concentraciones de oxígeno fueron detectas en los gases de escape.

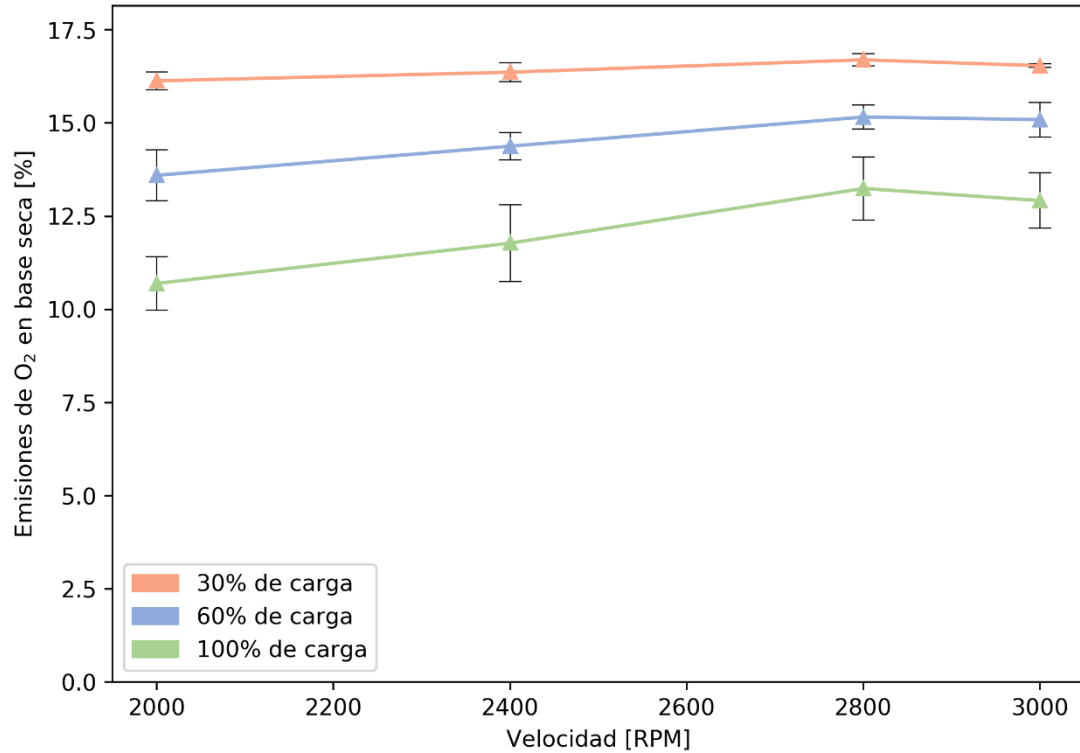


Gráfico 5.9: Línea base de las emisiones de oxígeno.

#### 5.1.4.2 Dióxido de Carbono

Las emisiones de dióxido de carbono fueron congruentes con las de oxígeno, a medida que aumenta la concentración de oxígeno en los gases de escape, menores concentraciones de dióxido de carbono fueron advertidas. Evidencia de la ocurrencia de las reacciones de combustión. El máximo valor medido fue de 7.5%, en el caso de plena carga y 2000 RPM, punto de máxima relación de equivalencia.

El cambio en la tendencia del comportamiento de este parámetro entre 2800 y 3000 RPM, para media y plena carga posiblemente este relacionado con la pérdida de eficiencia observada, por lo que a pesar de desarrollarse la combustión en condiciones

de levemente mayor exceso de aire, el aumento de la inyección de combustible necesario para mantener la operación produce mayores concentraciones de dióxido de carbono, reduciendo así también las de oxígeno.

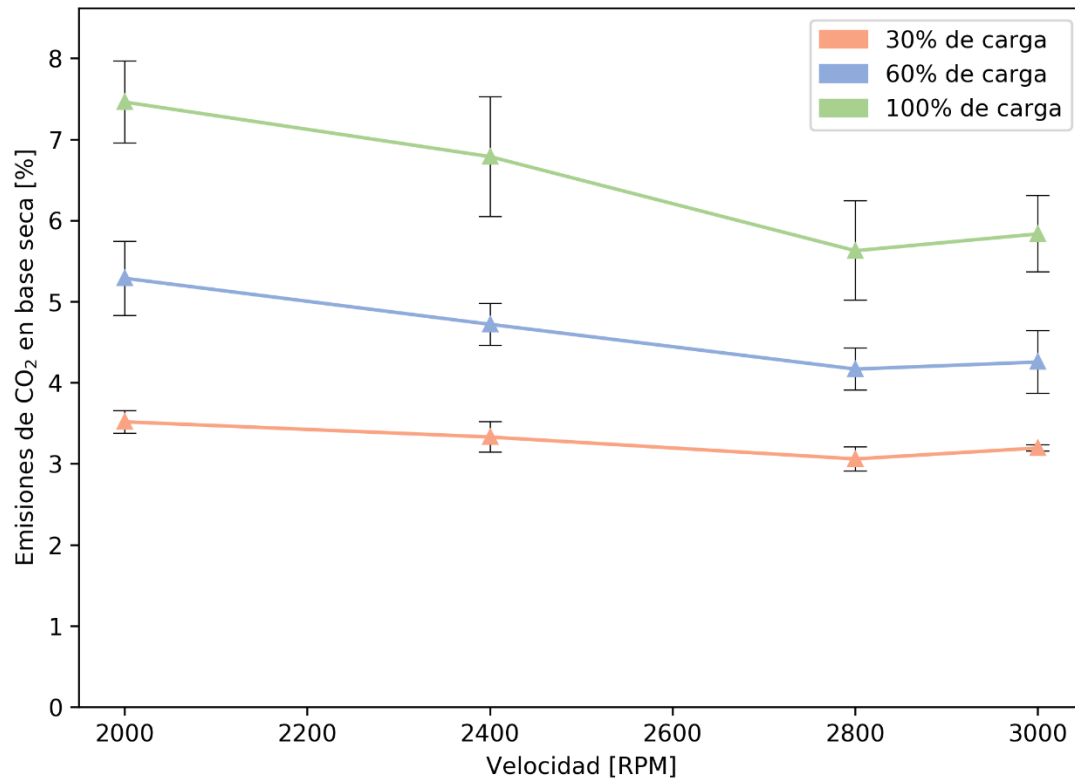


Gráfico 5.10: Línea base de las emisiones de dióxido de carbono.

### 5.1.4.3 Óxido de Nitrógeno

En el caso del óxido de nitrógeno, si bien se aprecian variaciones con respecto a la velocidad de giro, éstas son mínimas comparadas con las variaciones a distintos niveles de carga. Esto puede encontrar su origen en que la formación de NO depende principalmente de la temperatura en el frente de llama y en menor grado, del tiempo disponible para llevar a cabo la reacción.

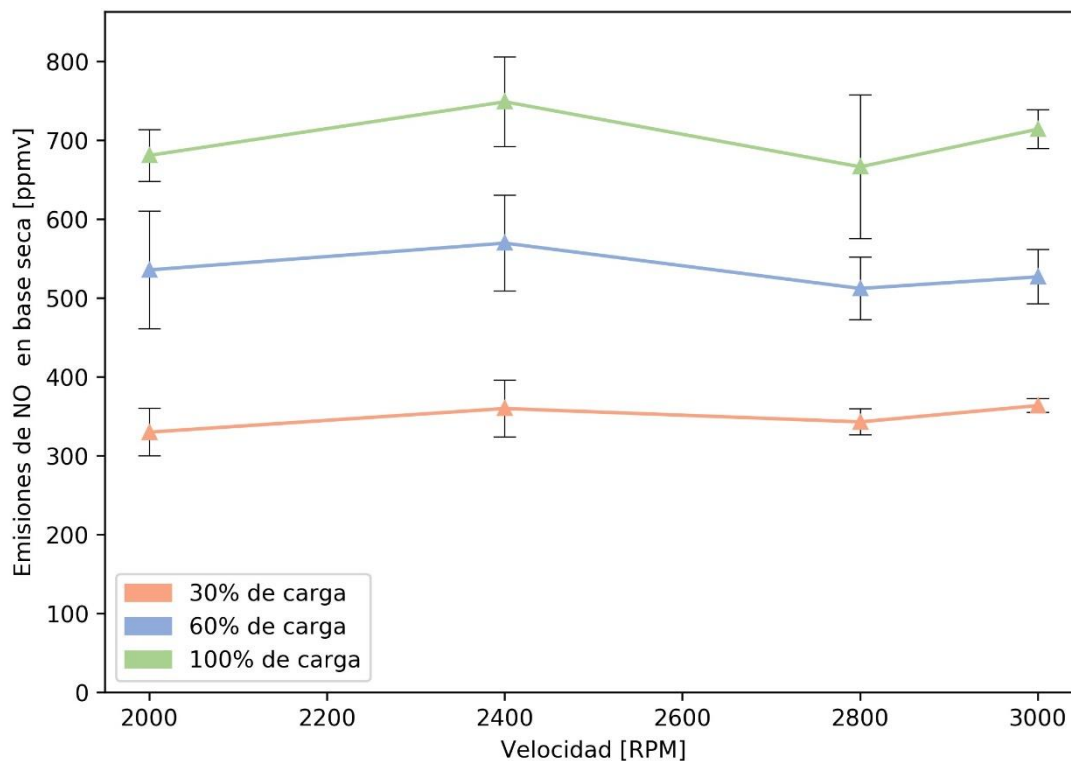


Gráfico 5.11: Línea base de las emisiones de óxido de nitrógeno.

#### 5.1.4.4 **Opacidad**

Los mayores valores de opacidad se midieron en las condiciones de plena carga y 2000 RPM, siendo estos excepcionalmente mayores que el resto de las condiciones medidas. Al aumentar la velocidad, disminuyendo la razón de equivalencia, se observa una rápida disminución de la opacidad, evidenciando la relación existente entre estos dos parámetros. Se observa además la relación entre la obtención del máximo valor y la menor eficiencia en el caso de plena carga y 2000 RPM comparado con la misma carga y 2400 RPM, encontrándose una posible explicación a esta diferencia en la cantidad de carbono que es emitido a 2000 RPM y no es quemado correctamente.

En condiciones de baja y media carga los valores medidos son muy bajos y se encuentran cercanos al umbral de detección del equipo.

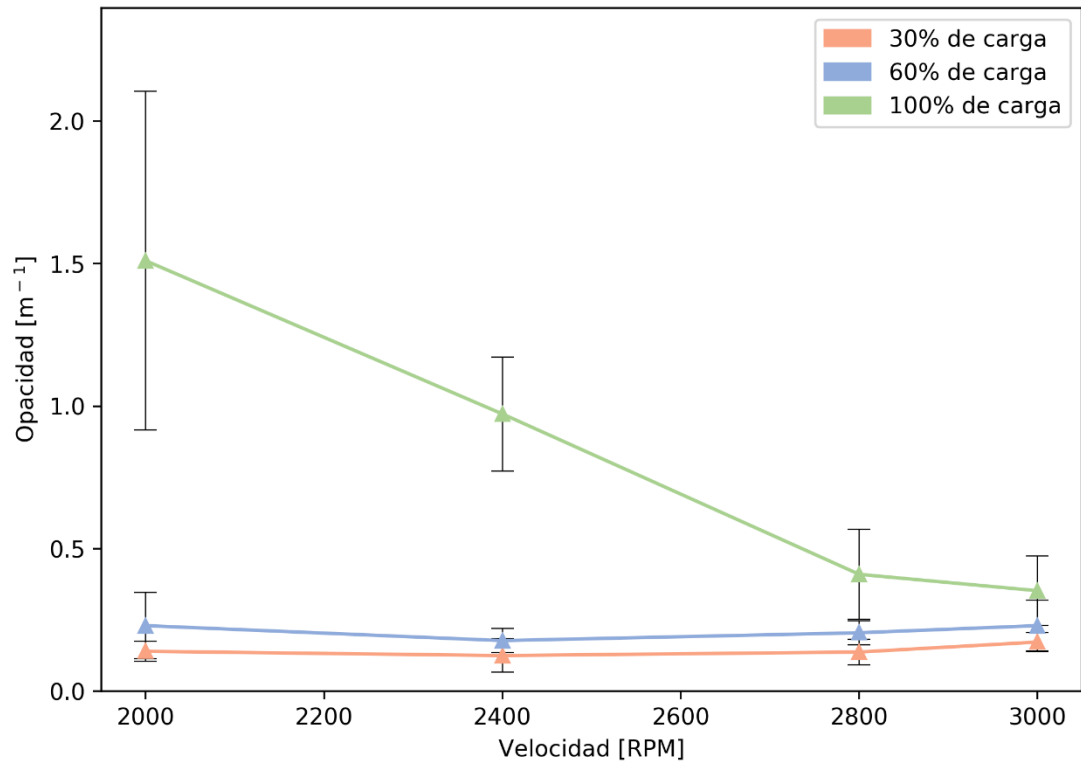


Gráfico 5.12: Línea base de la opacidad de los gases de escape.

## 5.2 Resultados para indicador de detonación

En el caso del indicador de detonación se desarrollaron pruebas a 2400 RPM, velocidad elegida para las pruebas en operación dual, es decir con adición de hidrógeno.

Tabla 5.5: Indicador de detonación para diferentes cargas a 2400 RPM.

Nivel de Carga	KI				
	$\bar{x}$	DE	CV	Desviación	Rango
30%	14.47	1.1605	8.0%	$\pm 0.83$	13.64 – 15.30
60%	9.48	0.6334	6.7%	$\pm 0.45$	9.03 – 9.93
100%	11.53	0.7922	6.9%	$\pm 0.57$	10.96 – 12.10

Los valores de velocidad de giro medidos y calculados se encuentran en la tabla 5.6. Se aprecia poca variabilidad de los datos estableciéndose un intervalo de confianza suficientemente estrecho, al mismo tiempo se observa que el valor del tacómetro con el cual realizamos las pruebas se encuentra desviado respecto a la realidad, siendo esta desviación de alrededor de 144 RPM. La baja variabilidad de este dato nos permite confirmar que las mediciones del índice de detonación se han realizado en las mismas condiciones de régimen de giro.

*Tabla 5.6: Velocidad calculada de giro para diferentes cargas a 2400 RPM.*

Nivel de Carga	Revoluciones por minuto				
	$\bar{x}$	<i>DE</i>	<i>CV</i>	<i>Desviación</i>	<i>Rango</i>
<b>30%</b>	2524	16.1	0.6%	$\pm 12$	2512 – 2536
<b>60%</b>	2518	9.2	0.4%	$\pm 7$	2511 – 2525
<b>100%</b>	2591	13.5	0.5%	$\pm 10$	2581 – 2601

### **5.3 Resultados operación con adición de hidrógeno.**

Se presentan los resultados obtenidos para la operación en modo dual, a diferentes condiciones de carga. Se detalla primeramente un análisis estadístico de las variables medidas. Luego se presenta parámetros de operación, desempeño y emisiones, al igual que en el caso de operación son sólo diésel. Finalmente se agregan algunos gráficos comparativos en los que se observa el porcentaje de variación del parámetro al aumentar la adición de hidrógeno con respecto al valor en operación normal.

Durante el desarrollo de las pruebas que nos permitieran encontrar el máximo de reemplazo sucedieron dos incidentes, en estos el experimento se vio interrumpido debido a retroceso de llama y detención del motor. El primero fue con u 60% de carga y 70% de reemplazo, el segundo a plena carga y 45% de reemplazo.

### 5.3.1 Análisis estadístico.

Para la etapa de pruebas con adición de hidrógeno se realizaron 2 réplicas por cada modo de operación, se calculó el promedio, desviación estándar muestral y coeficiente de variación para todos los parámetros medidos en cada modo de operación. Los resultados se muestran en tablas separadas para cada nivel de carga. Se seguirá un procedimiento similar al llevado a cabo anteriormente, con los datos de línea de base. En este caso, al contar con menor cantidad de datos, se aceptarán mayores variabilidades, entendiendo siempre que el énfasis de la interpretación de estos resultados está en las tendencias.

*Tabla 5.7: Análisis estadístico para datos correspondientes a 30% de carga con adición de hidrógeno.*

Nivel de reemplazo	10%			30%			50%		
	$\bar{x}$	<i>DE</i>	<i>CV</i>	$\bar{x}$	<i>DE</i>	<i>CV</i>	$\bar{x}$	<i>DE</i>	<i>CV</i>
<b>KI</b>	12.3	3.04	25%	13.8	0.49	4%	14.5	0.99	7%
<b>Presión de admisión [mm-Hg]</b>	211	4	2%	202	4	2%	193	11	6%
<b>Vacío de aspiración [mm-H<sub>2</sub>O]</b>	40	1	2%	38	1	4%	37	1	2%
<b>Temperatura refrigerante [°C]</b>	72	0.3	0%	72	0.6	1%	72	0.3	0%
<b>Temperatura de admisión [°C]</b>	43	1.1	2%	41	4.0	10%	42	2.6	6%
<b>Temperatura de escape [°C]</b>	159	0.8	0%	157	5.0	3%	165	5.4	3%
<b>Temperatura agua ref. [°C]</b>	21	0.1	1%	21	0.2	1%	21	0.2	1%
<b>Temperatura del aceite [°C]</b>	87	3.3	4%	82	1.4	2%	85	1.1	1%
<b>Emisiones de O<sub>2</sub> [%]</b>	16.3	0.07	0%	16.2	0.14	1%	16.3	0.04	0%
<b>Emisiones de CO<sub>2</sub> [%]</b>	3.23	0.08	3%	2.94	0.09	3%	2.61	0.14	5%

<b>Emisiones de CO [ppmv]</b>	90	57	63%	90	14	16%	75	64	85%
<b>Emisiones de NO [ppmv]</b>	317	11	3%	295	21	7%	263	11	4%
<b>Opacidad [m<sup>-1</sup>]</b>	0.03	0.02	85%	0.04	0.01	20%	0.05	0.00	0%
<b>Emisiones de HC [ppmv]</b>	9	2	25%	11	1	7%	6	1	24%
<b>Aire [l/min]</b>	2770	61	2%	2727	0	0%	2590	27	1%
<b>Diésel [l/h]</b>	3.74	0.10	3%	3.33	0.11	3%	2.74	0.08	3%

Tabla 5.8: Análisis estadístico para datos correspondientes a 30% de carga con adición de hidrógeno (continuación).

<b>Nivel de reemplazo</b>	<b>70%</b>			<b>80%</b>		
	$\bar{x}$	<b>DE</b>	<b>CV</b>	$\bar{x}$	<b>DE</b>	<b>CV</b>
<b>KI</b>	17.6	0.99	6%	17.3	0.21	1%
<b>Presión de admisión [mm-Hg]</b>	192	2	1%	182	8	4%
<b>Vacío de aspiración [mm-H<sub>2</sub>O]</b>	36	0	0%	34	0	0%
<b>Temperatura refrigerante [°C]</b>	72	0.2	0%	72	0.0	0%
<b>Temperatura de admisión [°C]</b>	45	1.8	4%	44	0.4	1%
<b>Temperatura de escape [°C]</b>	175	4.0	2%	174	2.3	1%
<b>Temperatura agua ref. [°C]</b>	22	0.1	1%	22	0.0	0%
<b>Temperatura del aceite [°C]</b>	89	1.0	1%	89	1.1	1%
<b>Emisiones de O<sub>2</sub> [%]</b>	16.5	0.04	0%	16.6	0.10	1%
<b>Emisiones de CO<sub>2</sub> [%]</b>	2.06	0.02	1%	1.62	0.10	6%

<b>Emisiones de CO [ppmv]</b>	85	35	42%	45	7	16%
<b>Emisiones de NO [ppmv]</b>	259	11	4%	239	5	2%
<b>Opacidad [m<sup>-1</sup>]</b>	0.06	0.02	39%	0.04	0.04	101%
<b>Emisiones de HC [ppmv]</b>	12	1	12%	10	1	14%
<b>Aire [l/min]</b>	2590	27	1%	2536	50	2%
<b>Diésel [l/h]</b>	2.14	0.01	1%	1.65	0.13	8%

Para la operación con 30% de carga, los datos de índice de detonación mostraron alta variabilidad sólo en el modo con 10% de reemplazo. Las condiciones de operación mostraron en general baja variabilidad (CV menor a 10%), evidenciando estados de operación estacionarios. En lo que respecta a las emisiones de CO, HC y Opacidad se observa algo similar a lo ocurrido en las mediciones de línea base, en donde presentan muy alta variabilidad, el coeficiente de variación supera el 20% alcanzando un máximo de 101% en el caso de la Opacidad con 80% de reemplazo. No se aprecian grandes diferencias en la variabilidad a distintos niveles de reemplazo de combustible diésel.

*Tabla 5.9: Análisis estadístico para datos correspondientes a 60% de carga con adición de hidrógeno.*

<b>Nivel de reemplazo</b>	<b>30%</b>			<b>50%</b>			<b>60%</b>		
	$\bar{x}$	<b>DE</b>	<b>CV</b>	$\bar{x}$	<b>DE</b>	<b>CV</b>	$\bar{x}$	<b>DE</b>	<b>CV</b>
<b>KI</b>	10.9	1.96	18%	12.5	1.48	12%	20.9	2.74	13%
<b>Presión de admisión [mm-Hg]</b>	283	6	2%	275	0	0%	252	3	1%
<b>Vacío de aspiración [mm-H<sub>2</sub>O]</b>	39	1	4%	38	1	2%	35	0	0%
<b>Temperatura refrigerante [°C]</b>	77	0.3	0%	76	2.4	3%	76	0.7	1%

<b>Temperatura de admisión [°C]</b>	57	0.8	1%	54	6.2	12%	52	2.2	4%
<b>Temperatura de escape [°C]</b>	237	3.5	1%	238	17.2	7%	239	6.7	3%
<b>Temperatura agua ref. [°C]</b>	23	0.7	3%	23	0.5	2%	23	0.3	1%
<b>Temperatura del aceite [°C]</b>	92	0.1	0%	93	3.7	4%	93	2.2	2%
<b>Emisiones de O<sub>2</sub> [%]</b>	14.5	0.05	0%	14.7	0.11	1%	14.5	0.16	1%
<b>Emisiones de CO<sub>2</sub> [%]</b>	3.95	0.04	1%	3.12	0.02	1%	2.83	0.01	0%
<b>Emisiones de CO [ppmv]</b>	45	7	16%	80	14	18%	50	14	28%
<b>Emisiones de NO [ppmv]</b>	635	3	0%	685	21	3%	777	33	4%
<b>Opacidad [m<sup>-1</sup>]</b>	0.16	0.08	50%	0.12	0.05	43%	0.08	0.06	85%
<b>Emisiones de HC [ppmv]</b>	9	2	25%	13	1	6%	12	1	6%
<b>Aire [l/min]</b>	2748	30	1%	2687	57	2%	2571	0	0%
<b>Diésel [l/h]</b>	4.85	0.15	3%	3.96	0.00	0%	3.22	0.11	4%

Para la operación con 60% de carga, los datos de índice de detonación mostraron variabilidad regular, pero similar entre los distintos niveles de reemplazo de combustible. Las condiciones de operación mostraron en general baja variabilidad (CV menor a 5%), evidenciando estados de operación estacionarios. Para las emisiones de CO y Opacidad se observa muy alta variabilidad, el coeficiente de variación supera el 20% alcanzando un máximo de 85% en el caso de la Opacidad con 60% de reemplazo. Las emisiones de HC varían levemente, en particular un poco más en el caso de 30% de reemplazo. No se aprecian grandes diferencias en la variabilidad a diferentes niveles de reemplazo de combustible.

Tabla 5.10: Análisis estadístico para datos correspondientes a 100% de carga con adición de hidrógeno.

Nivel de reemplazo	10%			30%			40%		
	$\bar{x}$	DE	CV	$\bar{x}$	DE	CV	$\bar{x}$	DE	CV
<b>KI</b>	12.8	2.26	18%	12.5	0.71	6%	19.15	1.91	10%
<b>Presión de admisión [mm-Hg]</b>	441	5	1%	415	5	1%	392	31	8%
<b>Vacío de aspiración [mm-H<sub>2</sub>O]</b>	47	2	5%	45	0	0%	41	1	3%
<b>Temperatura refrigerante [°C]</b>	82	0.8	1%	81	0.4	0%	82	0.7	1%
<b>Temperatura de admisión [°C]</b>	78	0.7	1%	69	1.8	3%	70	0.1	0%
<b>Temperatura de escape [°C]</b>	320	10.9	3%	316	11.4	4%	321	13.5	4%
<b>Temperatura agua ref. [°C]</b>	25	0.2	1%	24	0.0	0%	24	0.4	1%
<b>Temperatura del aceite [°C]</b>	99	1.2	1%	102	0.4	0%	101	1.5	1%
<b>Emisiones de O<sub>2</sub> [%]</b>	13.5	1.06	8%	13.0	0.35	3%	12.5	0.14	1%
<b>Emisiones de CO<sub>2</sub> [%]</b>	5.15	0.64	12%	4.65	0.35	8%	4.45	0.21	5%
<b>Emisiones de CO [ppmv]</b>	170	71	42%	130	71	54%	230	99	43%
<b>Emisiones de NO [ppmv]</b>	640	134	21%	873	78	9%	1018	1	0%
<b>Opacidad [m<sup>-1</sup>]</b>	0.82	0.57	69%	0.56	0.30	55%	0.94	0.54	58%
<b>Emisiones de HC [ppmv]</b>	12	3	24%	11	3	26%	9	4	47%
<b>Aire [l/min]</b>	2951	0	0%	2976	35	1%	2813	62	2%
<b>Diésel [l/h]</b>	8.11	0.10	1%	6.63	0.28	4%	5.93	0.71	12%

En el caso de operación a plena carga, el índice de detonación mostró la menor variabilidad de los tres niveles de carga. Las emisiones de CO, HC y Opacidad mostraron alta variabilidad, con coeficientes que superan el 40%, el mayor coeficiente de variación se produjo en la Opacidad con un reemplazo del 10%. Las emisiones de NO también mostraron alta variabilidad en un modo de operación en particular alcanzando un 24%. Los parámetros de operación obtuvieron coeficientes de variación menores a 6%.

### **5.3.2 Parámetros de operación**

El primer parámetro en presentar es el índice de detonación, en el cual se basa este trabajo para poder determinar los límites de reemplazo sin producir efectos no deseados. Luego se muestran las condiciones de temperatura de: aceite, agua a la salida del intercambiador y gases de escape; además de la fracción molar de hidrógeno en aire admitido y el porcentaje de aporte energético del hidrógeno real a la operación del motor.

Se muestra así la estabilidad del modo de operación, las variaciones al incorporar hidrógeno y las condiciones de flamabilidad de la mezcla aire-combustible que está siendo admitida.

#### **5.3.2.1 Índice de detonación**

Se aprecia en la mayoría de los casos leves variaciones con respecto a la operación normal. Es notable el aumento súbito que es visible en los casos de media y alta carga en los máximos niveles de reemplazo. En el caso de 30% de carga no se aumenta más la inyección de hidrógeno, ya que se ha logrado un nivel de reemplazo considerablemente alto y el indicador se encuentra ya en valores fuera del rango normal de operación. El aumento de la concentración de hidrógeno en la mezcla admitida dentro de la cámara de combustión por sobre ciertos límites produce cambios drásticos en la forma en la que se propaga el frente de llama, detectado en este caso mediante el aumento considerable del índice de detonación.

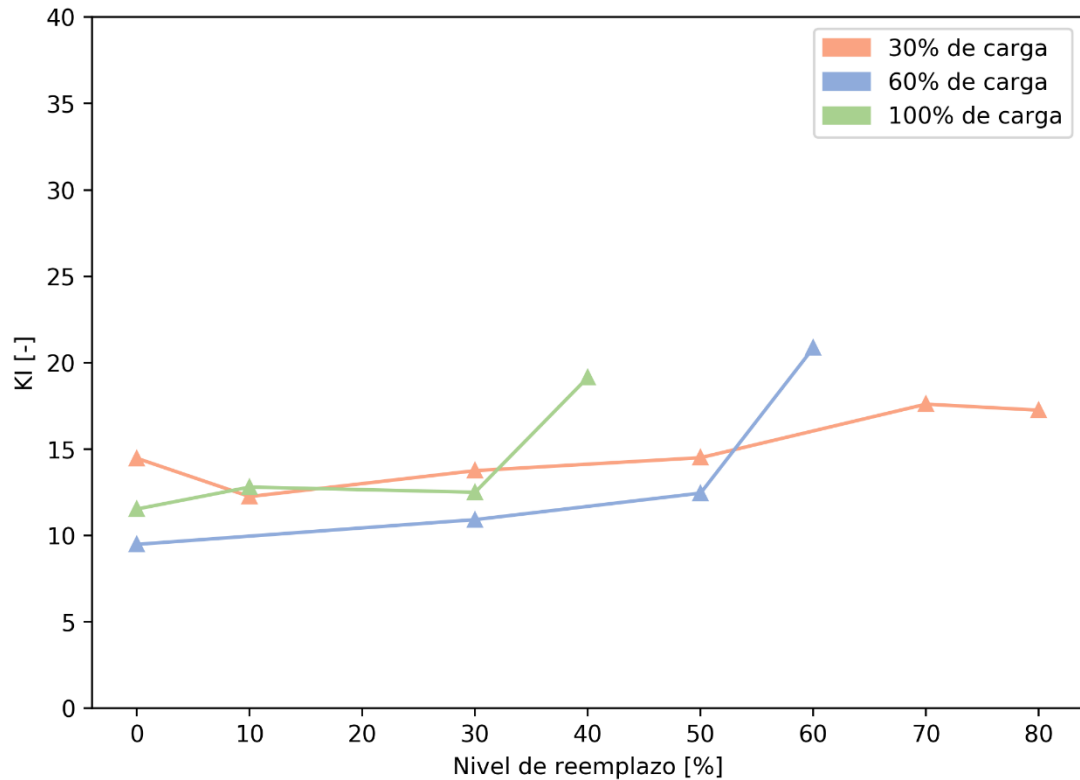


Gráfico 5.13: Índice de detonación medido en pruebas con adición de hidrógeno.

### 5.3.2.2 Temperatura del aceite

Se muestran las temperaturas del aceite durante las pruebas desarrolladas con adición de hidrógeno. Se observa que incluso con pequeñas cantidades de sustitución la temperatura del aceite disminuye, respecto de la operación sólo diésel, para todas las cargas. Un aumento progresivo de la sustitución tiende a aumentar la temperatura del aceite aun manteniéndose bajo la temperatura de operación en modo sólo diésel. Se mantiene la relación de la temperatura con el nivel de carga siendo el mayor valor registrado para la operación con mayor aporte energético mediante el combustible.

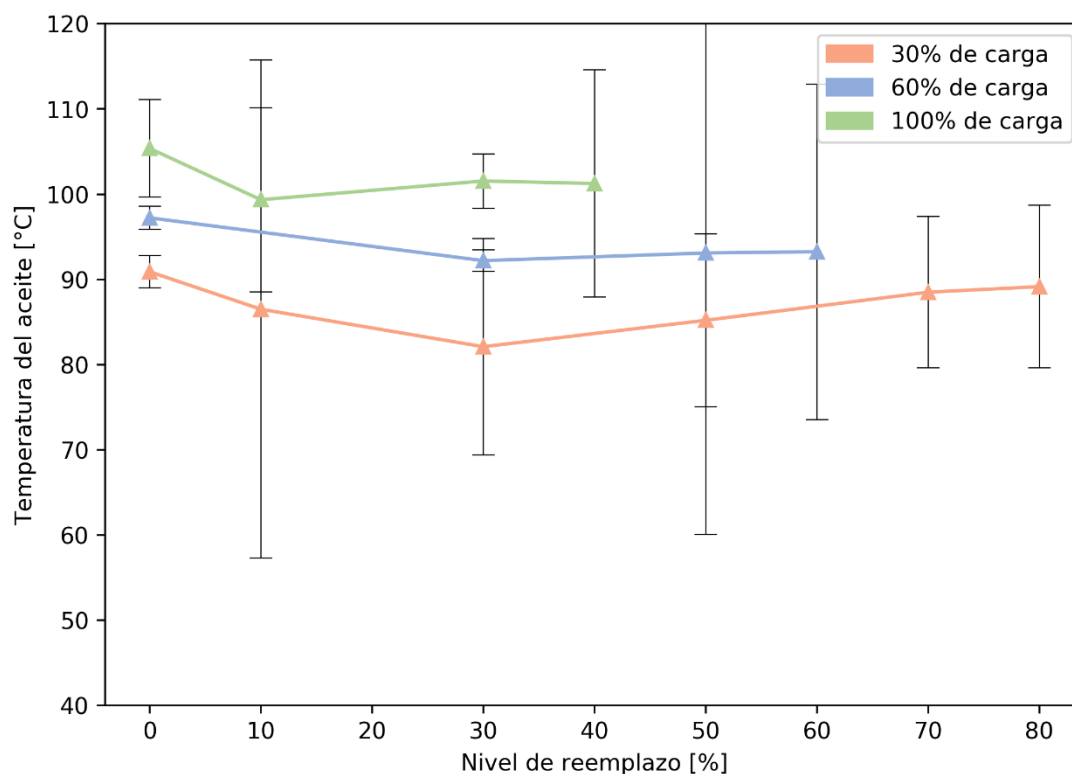


Gráfico 5.14: Temperatura del aceite para pruebas con distintos niveles de reemplazo.

### 5.3.2.3 Temperatura del agua a la salida del intercambiador de calor.

Para la temperatura del agua a la salida del intercambiador se observó la misma lógica que en la línea base de operación, se aprecia una disminución de la temperatura de salida, implicando una disminución en la potencia de refrigeración al adicionar hidrógeno. No es evidente algún mayor cambio al aumentar la inyección de hidrógeno a la operación. Sólo en el caso de 60% de carga, no se observa la disminución de la temperatura al inyectar hidrógeno.

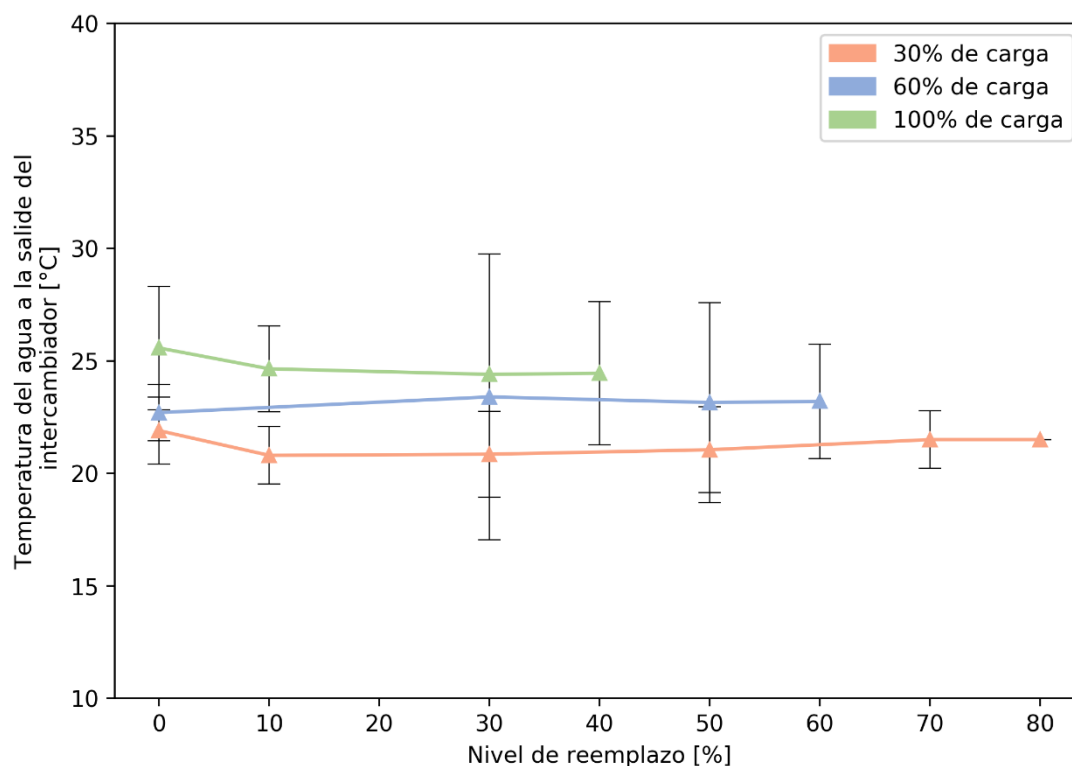


Gráfico 5.15: Temperatura del agua a la salida del intercambiador para distintos niveles de reemplazo.

#### 5.3.2.4 Temperatura de los gases de escape

Para los gases de escape se observa una inmediata disminución de la temperatura al operar en modo dual en los casos de plena y baja carga. Un aumento progresivo de la adición de hidrógeno tiende a reestablecer el nivel de temperatura de gases normal (línea base). La disminución es más notoria en el caso de plena carga, la cual se presume que esté en relación directa con el cambio en la composición de los gases de escape, un aumento de la emisión de vapor de agua, con mayor calor específico, retira más calor de la combustión a una menor temperatura.

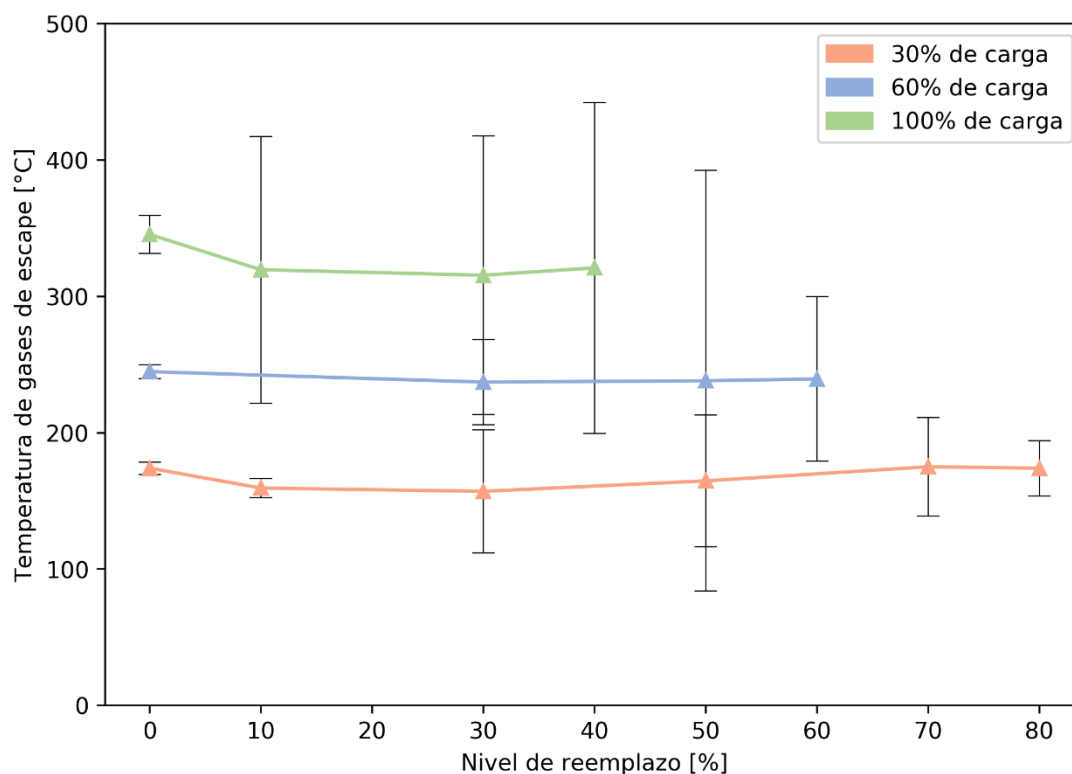


Gráfico 5.16: Temperatura de los gases de escape para distintos niveles de reemplazo.

### 5.3.2.5 Fracción molar de hidrógeno en aire admitido

La fracción molar de hidrógeno en el aire admitido por el motor nos permite saber cuándo hemos entrado al límite de encendido de la mezcla y a la región de flamabilidad de esta. Cabe destacar la diferencia de ambos, en el primer caso la mezcla es capaz de encenderse y quemarse, pero la llama no es capaz de propagarse de manera descendente ni horizontalmente, es decir, no se enciende la totalidad de la mezcla; en el segundo caso la mezcla se enciende y el frente de llama es capaz de propagarse en todas direcciones, consumiéndose la mezcla en su totalidad. Esto cobra mayor relevancia al momento de entender el porqué de los dos incidentes ocurridos durante las pruebas. Se aprecia que, en el caso de baja carga, no se ingresa a la región de flamabilidad, determinándose el máximo de reemplazo sólo a través del aumento del valor del indicador de detonación.

Para el caso de 60% de carga, se sospechaba previamente que sería posible lograr reemplazos mayores a los obtenidos con un 30% de carga, por lo que se comenzaron los experimentos a 70% de reemplazo, ingresando justo por encima del límite a la región de flamabilidad y ocurriendo el primer incidente.

Para el caso de plena carga, se detectó en el parámetro KI, con un reemplazo de 40%, un aumento visible, sin embargo, se realizó un siguiente experimento aumentando levemente el porcentaje de reemplazo a 45%. Se observó inestabilidad en la operación desencadenándose el segundo incidente. Debe considerarse además que los límites de encendido y flamabilidad varían con la temperatura y presión de la mezcla.

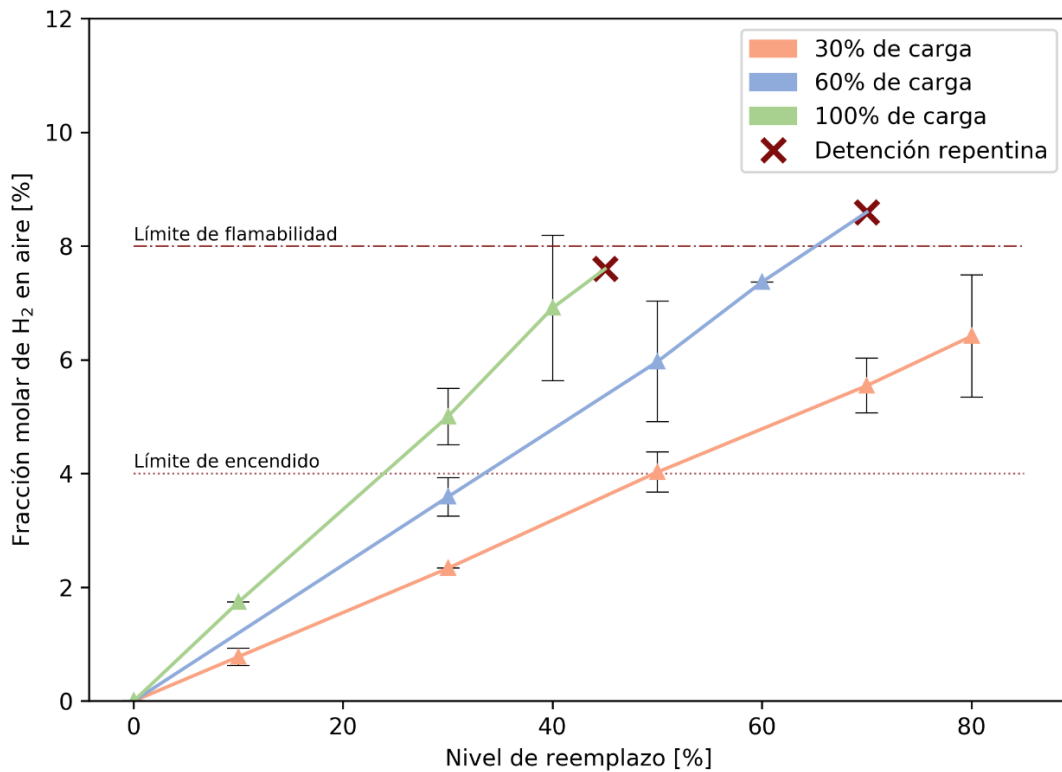


Gráfico 5.17: Concentración molar de hidrógeno en aire admitido para diferentes niveles de reemplazo.

### 5.3.2.6 “Aporte energético del hidrógeno a la operación del motor”

Como se mencionó en el apartado 4.2, el porcentaje de reemplazo se definió basándose siempre en la operación con sólo diésel. En el gráfico 5.18, se muestra el real aporte energético del hidrógeno al funcionamiento del motor, la línea segmentada corresponde al valor teórico esperado. Debido a bajas en la eficiencia se observa cómo en el caso de baja carga, los valores obtenidos se alejan de la recta teórica esperada, mientras que en el caso de plena carga la diferencia es mínima, coincidentemente con el caso donde se afecta menos la eficiencia térmica.

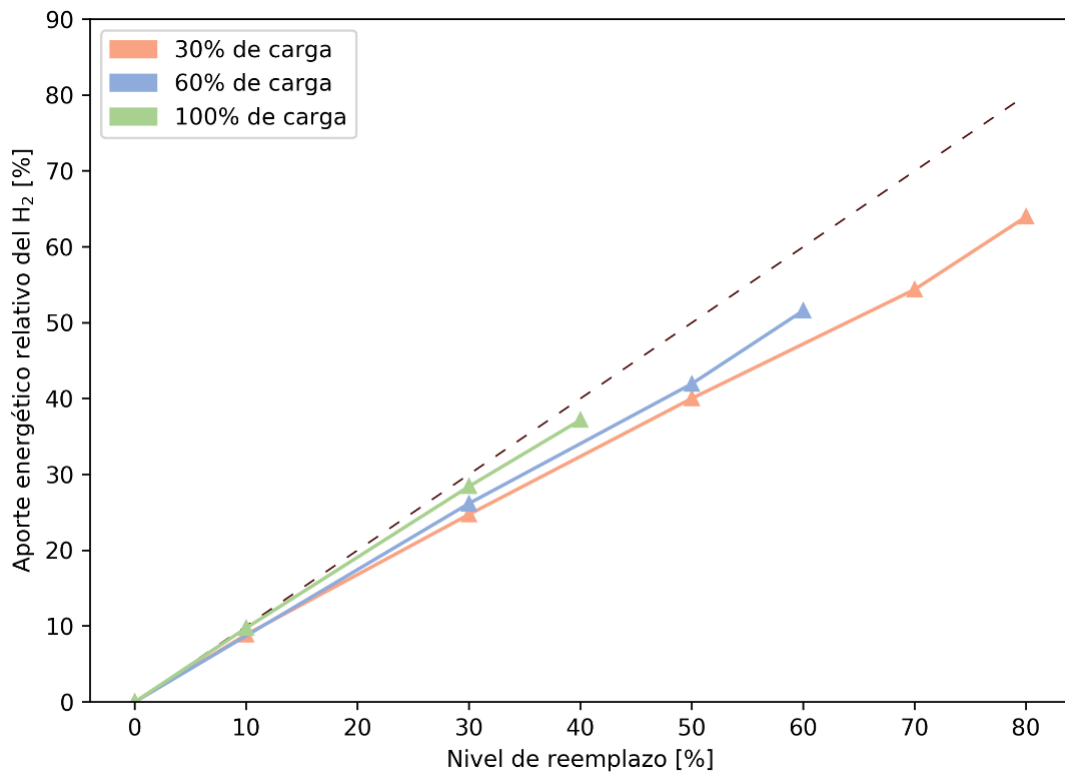


Gráfico 5.18: Aporte energético del hidrógeno para distintos niveles de reemplazo.

### 5.3.3 Factores de desempeño

#### 5.3.3.1 Razón de equivalencia

Se aprecia un leve aumento de la razón de equivalencia al aumentar el nivel de reemplazo independientemente de la carga. Se obtiene la máxima razón de equivalencia a plena carga con un 40% de reemplazo. En algunos casos la alta dispersión no permite apreciar en detalle los cambios en el parámetro, sin embargo, la tendencia general es clara y corresponde a un aumento progresivo de la razón de equivalencia al aumentar la adición de hidrógeno. Este último consume proporcionalmente más cantidad de oxígeno para su combustión que el combustible diésel y además desplaza parte del aire admitido por el motor al ser aspirado en conjunto con el aire.

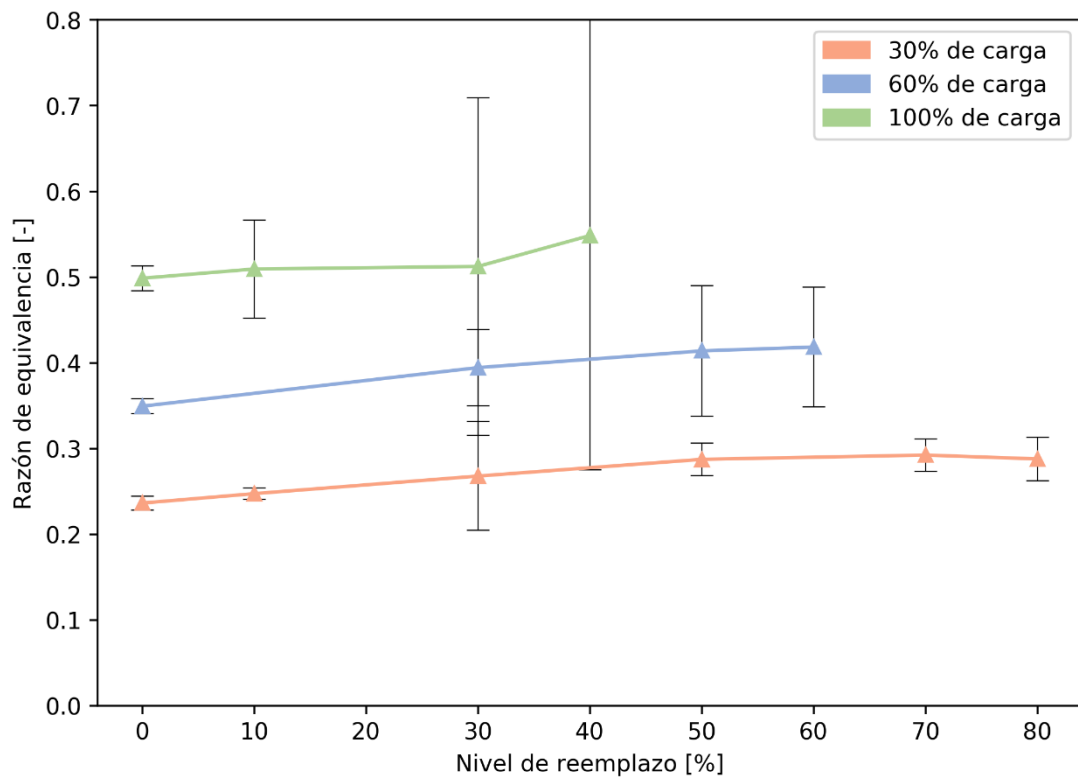


Gráfico 5.19: Razón de equivalencia total para diferentes niveles de reemplazo.

En el gráfico 5.20 se aprecia la variación del parámetro estudiado con respecto al valor normal. Los mayores cambios porcentuales se obtienen a media y baja carga, aumentando siempre al aumentar la adición de hidrógeno.

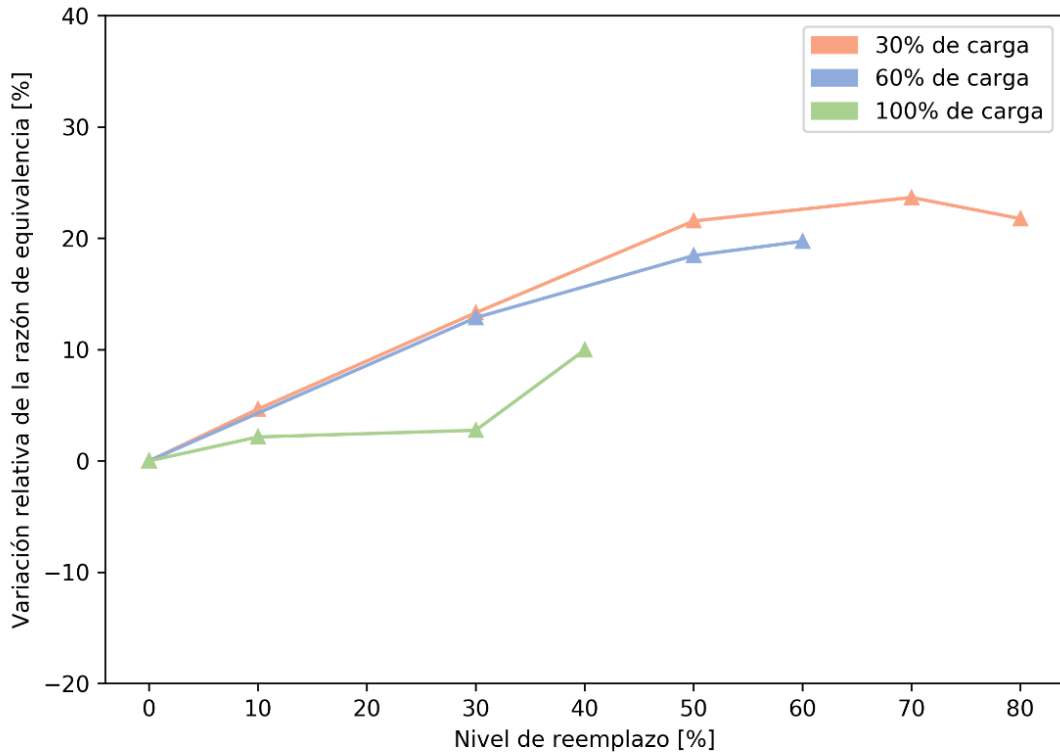


Gráfico 5.20: Variación relativa de la razón de equivalencia total para diferentes niveles de reemplazo.

### 5.3.3.2 Eficiencia volumétrica

Se aprecian variabilidades no menores, sin embargo, la tendencia es a disminuir conforme aumenta la inyección de hidrógeno para los casos de media y plena carga. En el caso de baja carga se distingue primero un aumento debido principalmente al incremento en la presión de admisión. De todos modos, las variaciones son pequeñas y no representan una desventaja importante al momento de evaluar el desempeño del motor con adición de hidrógeno. En el gráfico 5.22 se aprecia que la máxima variación

no alcanza el 10%. El efecto de desplazamiento de aire admitido por hidrógeno es pequeño, ya que la concentración de hidrógeno en aire no supera el 8%. Otro efecto interesante de estudiar es la baja de la temperatura en la admisión de aire, inducida por la rápida expansión del hidrógeno que es inyectado desde un cilindro comprimido a alta presión.

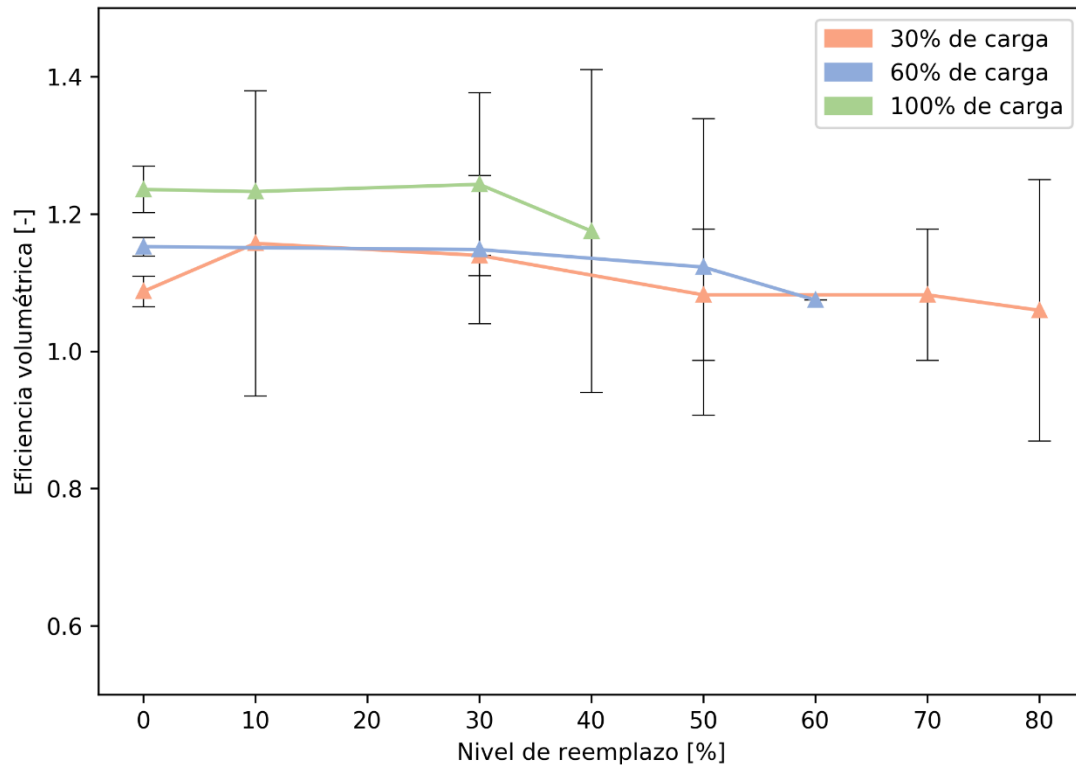


Gráfico 5.21: Eficiencia volumétrica para diferentes niveles de reemplazo.

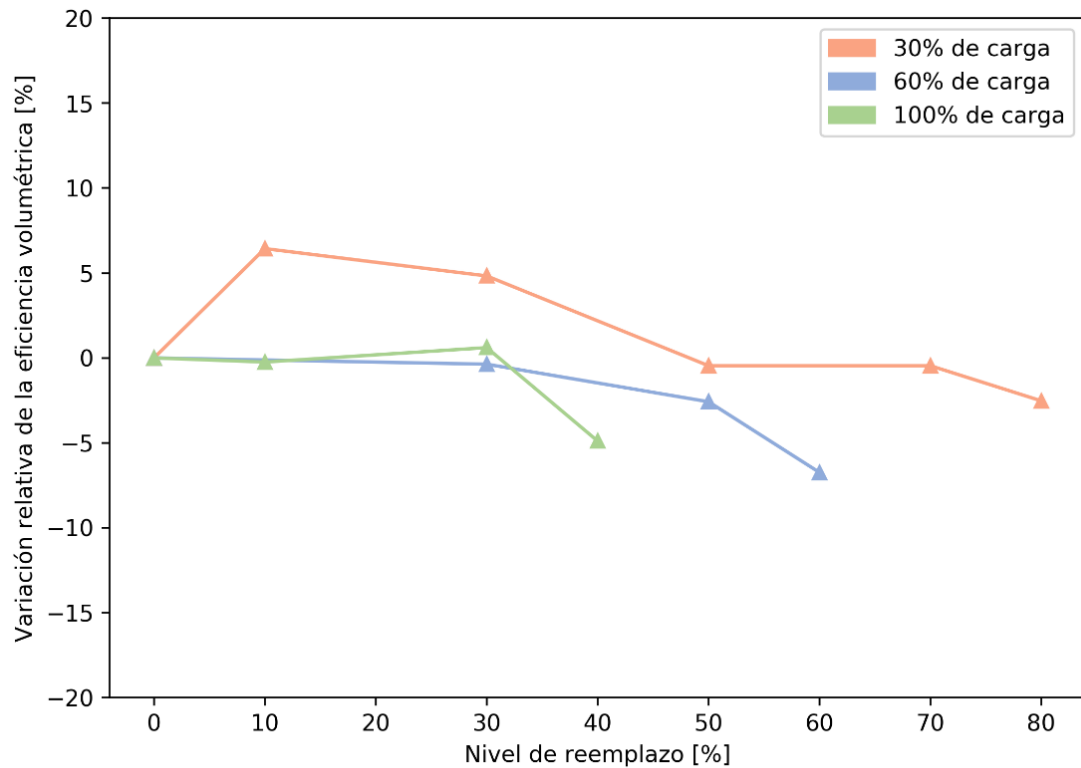


Gráfico 5.22: Variación relativa de la eficiencia volumétrica para diferentes niveles de reemplazo.

### 5.3.3.3 Consumo específico de combustible diésel

Se mantienen las diferencias entre diferentes cargas observadas en la operación sólo diésel. Sólo en el caso de baja carga y 10% de reemplazo, el consumo aumenta, evidenciando un decremento importante de la eficiencia térmica. El menor consumo específico de combustible diésel fue de  $135 \left[ \frac{g}{kWh} \right]$  y se registró con 60% de carga y 60% de reemplazo, éste representa un ahorro de combustible diésel aproximado de un 44%, respecto a la operación en modo normal. La brecha existente entre el ahorro real y el porcentaje de reemplazo se entiende desde la baja en la eficiencia térmica del proceso.

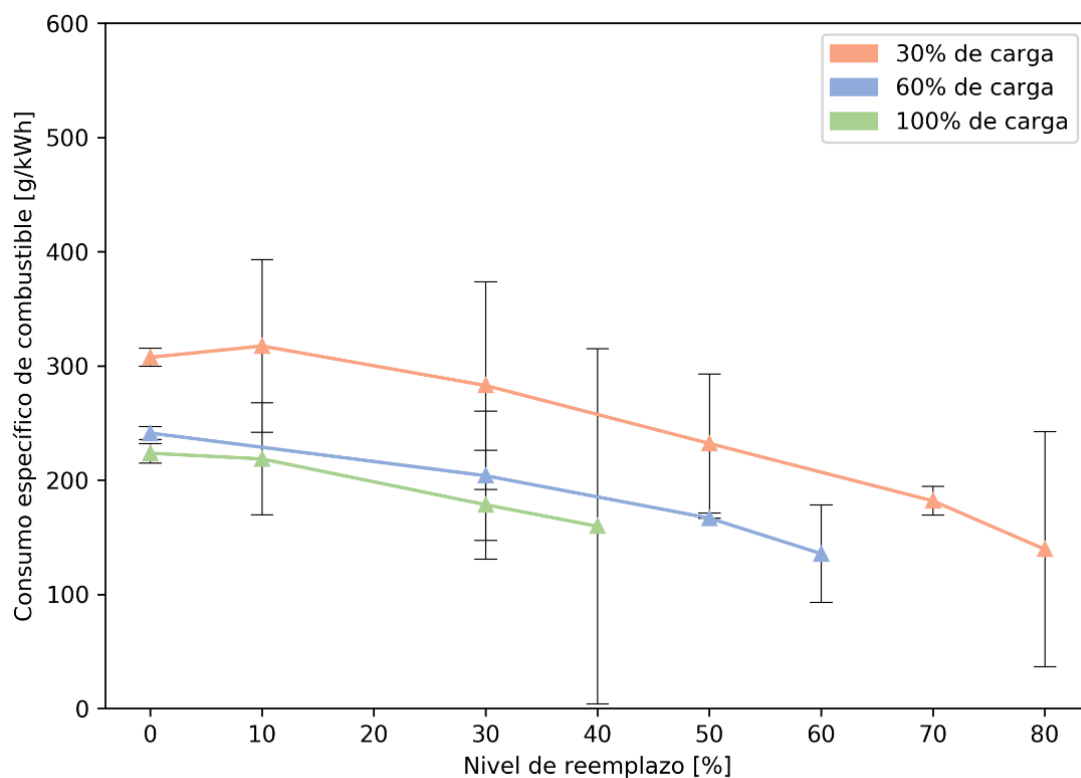


Gráfico 5.23: Consumo específico de combustible diésel para diferentes niveles de reemplazo.

En gráfico 5.24 se observa la reducción porcentual del consumo específico de diésel a diferentes niveles de reemplazo. Se graficó una línea segmentada para mostrar el valor teórico esperado en caso de que la eficiencia térmica del motor se mantuviera constante. A mayores grados de carga la eficiencia se afecta menos negativamente, visible en la menor distancia entre la línea trazada de referencia y los valores calculados. El mayor ahorro de combustible diésel (55%) se obtiene con baja carga y 80% de reemplazo, sin embargo, en este modo de operación se obtiene una de las mayores distancias a la línea que representa eficiencia constante, por lo tanto es un modo de operación menos conveniente desde el punto de vista del buen uso de los recursos energéticos.

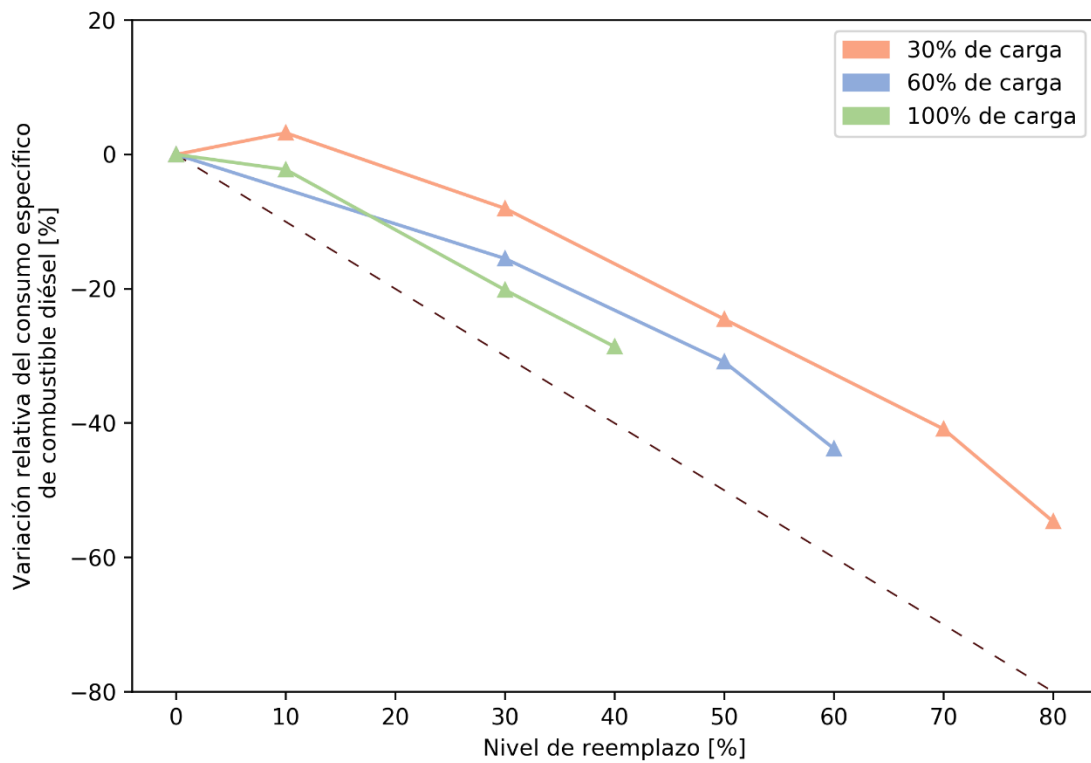


Gráfico 5.24: Variación relativa del consumo específico de combustible diésel para diferentes niveles de reemplazo.

#### 5.3.3.4 Eficiencia térmica

La eficiencia térmica se vio afectada negativamente por la adición de hidrógeno. En todos los casos se aprecian disminuciones de esta al aumentar la cantidad de hidrógeno inyectado. En todo caso el menor valor calculado fue un 21%.

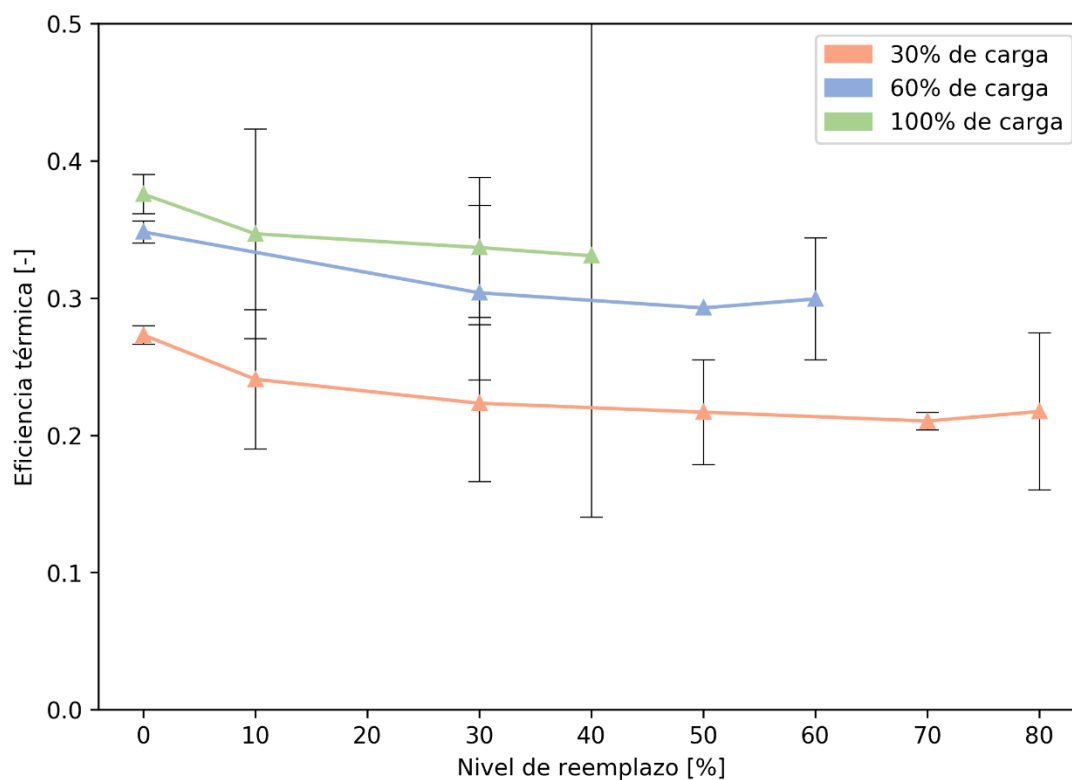


Gráfico 5.25: Eficiencia térmica para diferentes niveles de reemplazo.

En el caso de 30% de carga, que tiene los peores valores de eficiencia, es donde se ve el mayor efecto, reduciéndose esta en más de un 20% del valor nominal. El caso de plena carga es el menos perjudicado, con una disminución de 5% con el máximo reemplazo. Se cree que particularmente en la adición de pequeñas cantidades la concentración molar del hidrógeno bajo el límite de encendido puede traducirse en la incapacidad de combustionar la mezcla adecuadamente, emitiéndose hidrógeno sin quemar en los gases de escape. En el caso de plena y media carga, las concentraciones de hidrógeno están en la mayoría de los casos sobre el límite de encendido y bajo el de inflamabilidad, facilitando una correcta combustión de la mezcla.

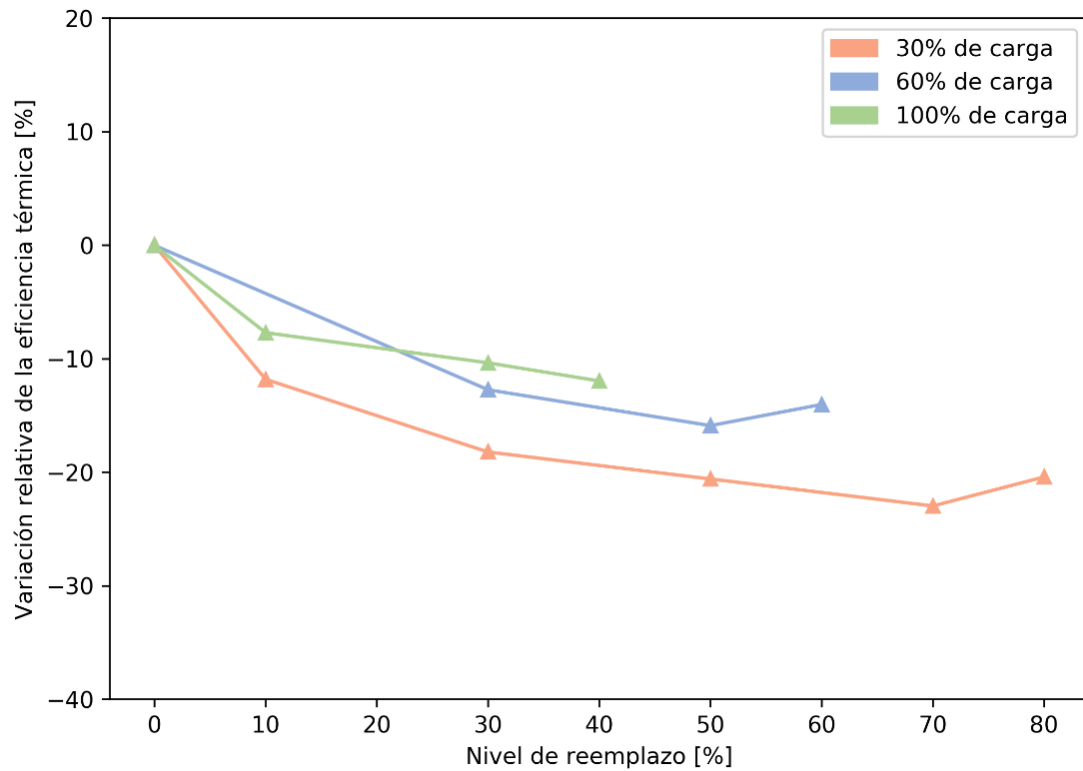


Gráfico 5.26: Variación de la eficiencia térmica para diferentes niveles de reemplazo.

### 5.3.4 Emisiones

#### 5.3.4.1 Oxígeno

La concentración de oxígeno en los gases de escape se mantuvo similar a la observada en la operación de línea base. Es posible apreciar la dependencia de este parámetro con el nivel de carga, se miden menores concentraciones para mayores cargas, la mayor variación se observó a plena carga y 10% de reemplazo, lugar en el que también se observó alta variabilidad.

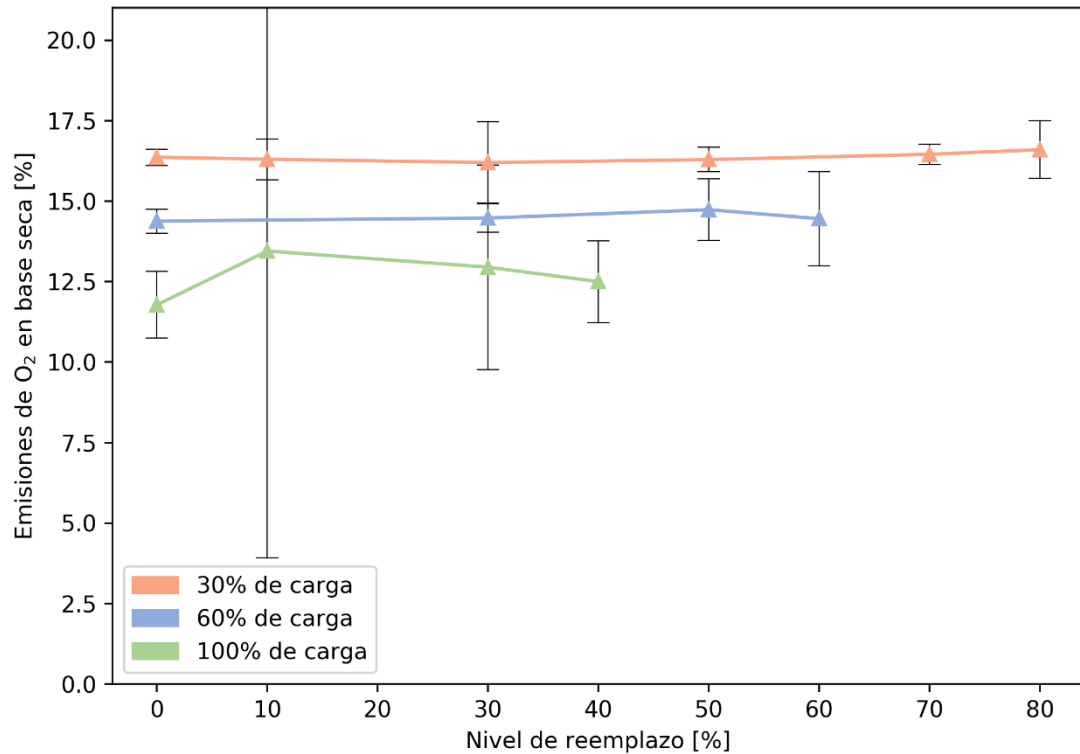


Gráfico 5.27: Emisiones de oxígeno para diferentes niveles de reemplazo.

La mayor diferencia en las emisiones fue cercana a un 15%, si bien a primera vista puede parecer como que una pequeña variación estos resultados se deben observar con cautela, ya que la combustión de hidrógeno modifica drásticamente la humedad de los gases producto y estas mediciones son realizadas en base seca. Este es uno de los detalles que explica que a pesar de haber un aumento sostenido de la razón de equivalencia con la adición de hidrógeno, no se observe una disminución de la concentración de oxígeno, que sería esperable si es que la modificación de la razón de equivalencia se diera utilizando sólo diésel.

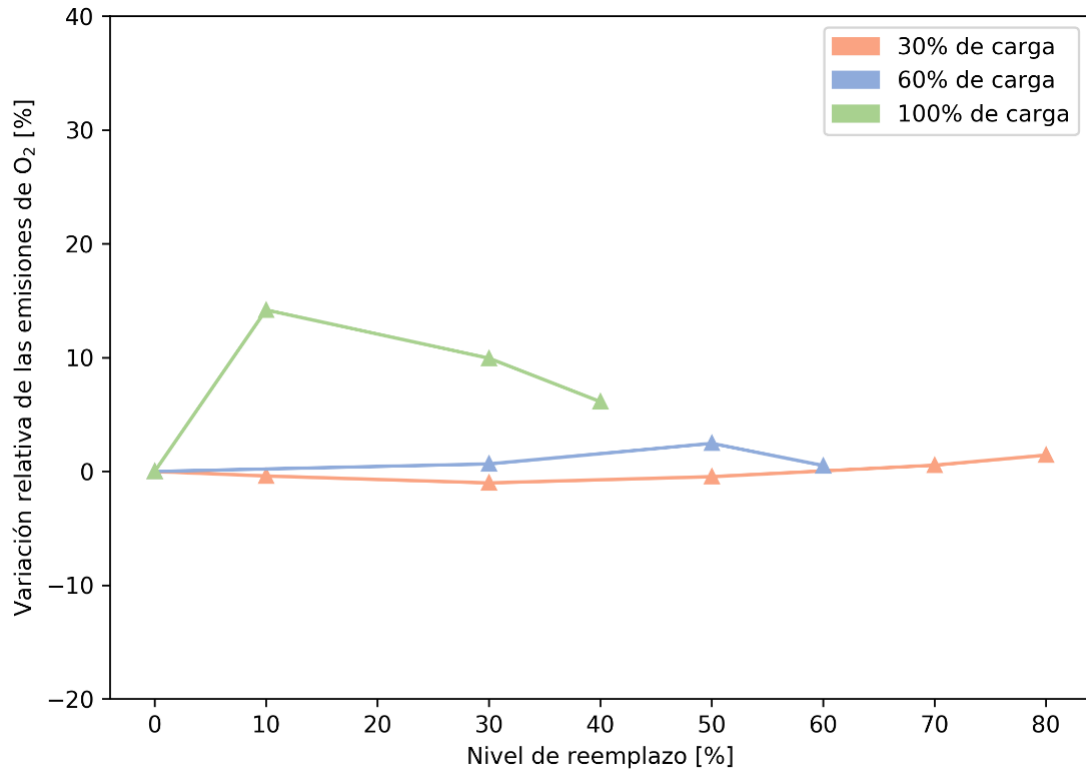


Gráfico 5.28: Variación relativa de las emisiones de oxígeno para diferentes niveles de reemplazo.

#### 5.3.4.2 Dióxido de Carbono

Se observa independientemente de la carga, una reducción sostenida de las emisiones de dióxido de carbono a medida que se aumenta el reemplazo de diésel. Para el caso de plena carga se observa alta variabilidad, sin embargo, la tendencia obtenida es concluyente.

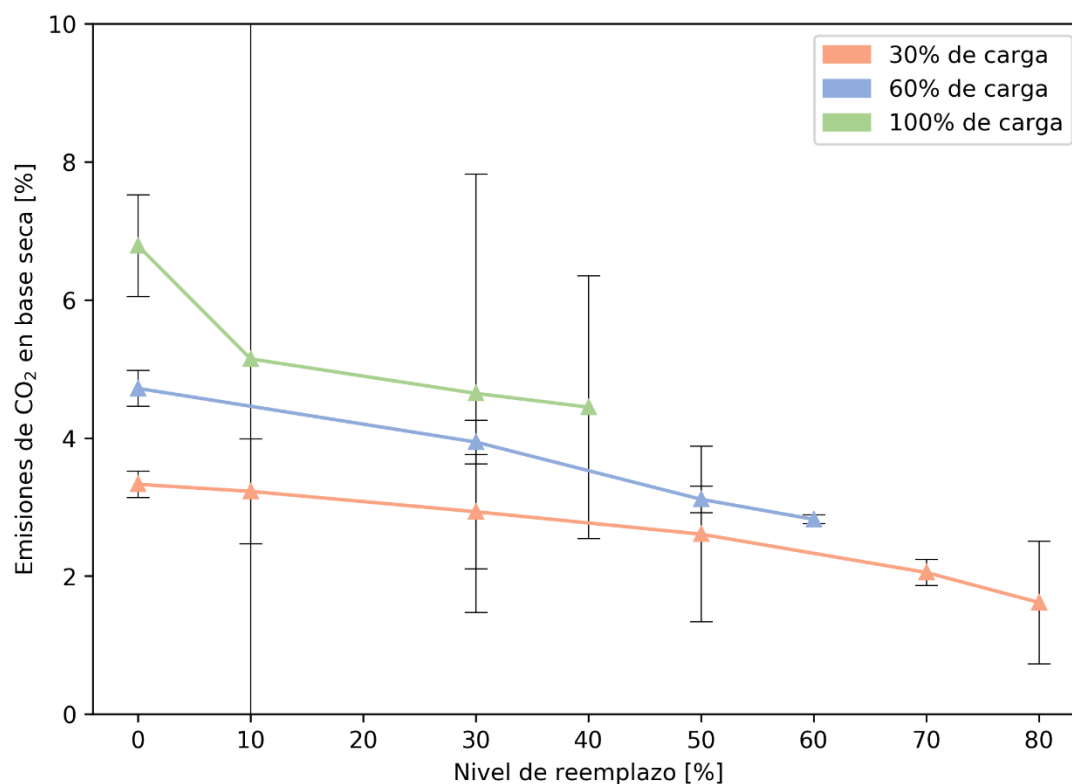


Gráfico 5.29: Emisiones de dióxido de carbono para diferentes niveles de reemplazo.

La línea segmentada representa el valor teórico de reducción en la que las emisiones de dióxido de carbono son inversamente proporcionales al porcentaje de reemplazo de diésel por hidrógeno. Se obtiene la mayor reducción de emisiones en el caso de 30% de carga y 80% de reemplazo, alcanzando esta un 50%. Se aprecia que en el caso de plena carga y 10% de reemplazo el valor obtenido es levemente superior al teórico, siendo esto explicable en parte por la alta variabilidad de la medición en particular. La disminución observada en los otros casos es menor a la esperada en parte porque el aumento de la producción de vapor de agua a partir de la combustión de hidrógeno disminuye el volumen de gases de escape en base seca, haciendo que una determinada cantidad de dióxido de carbono represente una mayor concentración en esta mezcla en la que se excluye la consideración de la cantidad de vapor de agua del total de gases. Se explica la disminución de la concentración de dióxido de carbono

debido a que la disminución de la inyección de diésel aporta menor cantidad de carbono a la reacción para ser oxidado y convertido en dióxido de carbono.

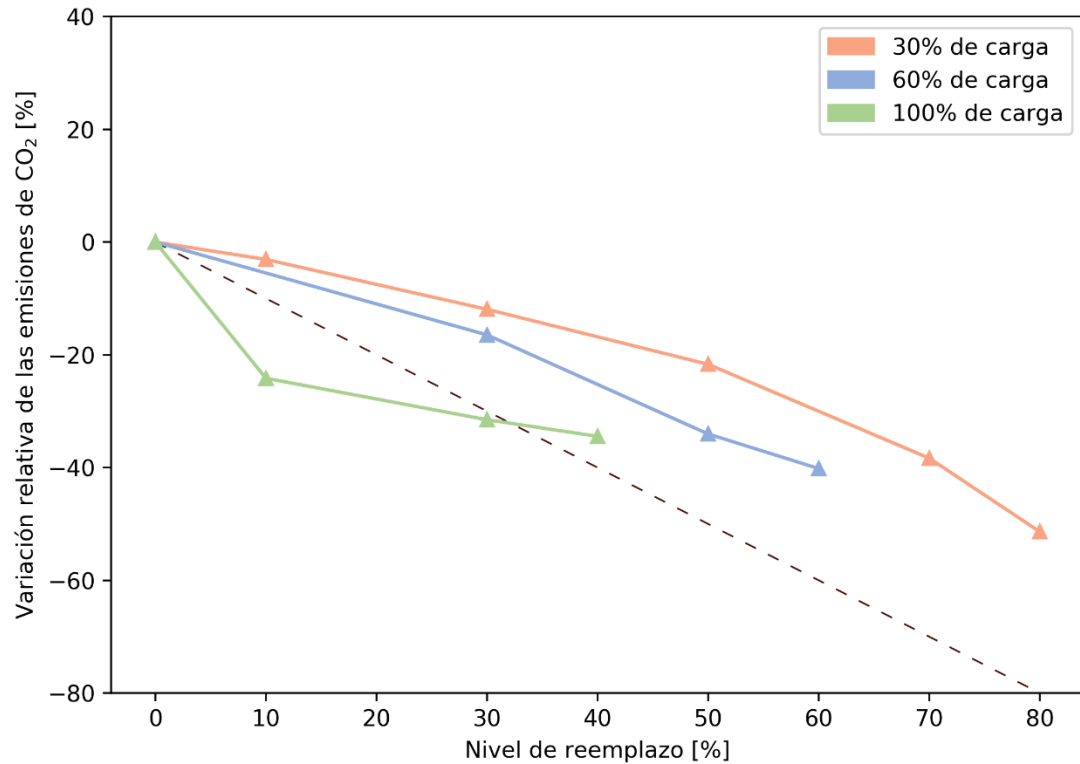


Gráfico 5.30: Variación relativa de las emisiones de dióxido de carbono para diferentes niveles de reemplazo.

### 5.3.4.3 Óxido de Nitrógeno

Las mediciones de este parámetro en el caso de plena carga muestran excepcionalmente alta dispersión, por lo que se considerarán sólo para analizar las tendencias de las emisiones, no considerando el valor numérico de estas.

Para el caso de 30% de carga se observa que la adición de hidrógeno reduce levemente las emisiones de NO, alcanzando cerca de un 30% de reducción en el caso de máximo reemplazo.

Para el caso de 60% de carga, las emisiones de NO son mayores que a baja carga y aumentan ligeramente con la adición de reemplazo. Se observa un aumento de emisiones cercano al 40% en este caso.

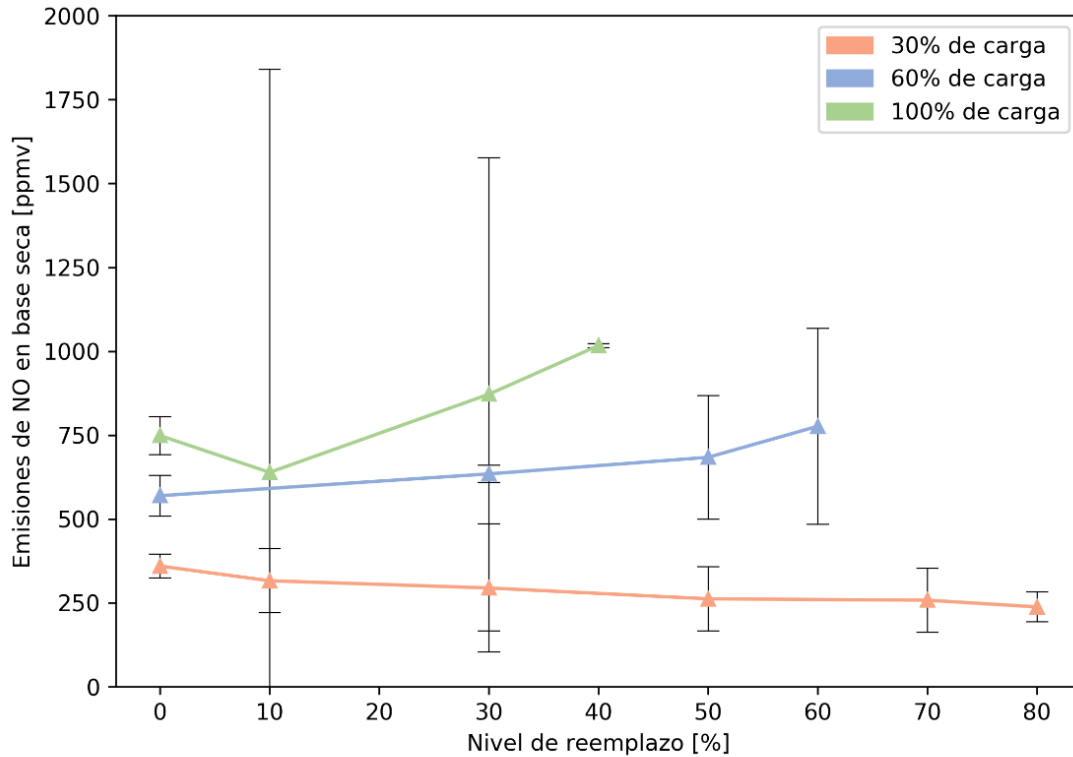


Gráfico 5.31: Emisiones de óxido de nitrógeno para diferentes niveles de reemplazo.

Para la operación a plena carga el comportamiento es errático, disminuyendo en primera instancia y luego aumentando al adicionar más hidrógeno. Se visualiza la tendencia de aumentar junto con el nivel de reemplazo, entendiéndose ésta a partir de la posible mayor temperatura desarrollada en el frente de llama por la combustión de hidrogeno. La disminución en baja carga se atribuye probablemente a que en mezclas pobres el hidrógeno promueve la formación de turbulencia en la propagación de la llama, por lo que una mayor mezcla con el exceso de aire permite reducir las temperaturas locales en el sector en el que se desarrolla la combustión.

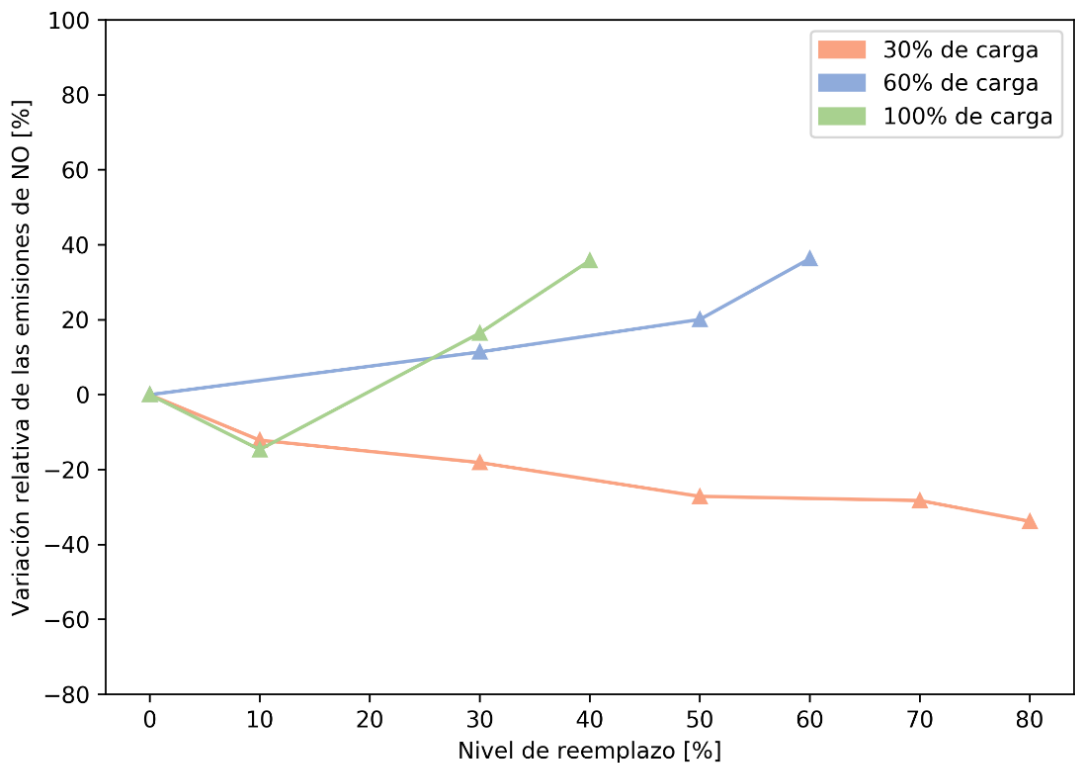


Gráfico 5.32: Variación relativa de las emisiones de óxido de nitrógeno para diferentes niveles de reemplazo.

#### 5.3.4.4 Opacidad

La opacidad se presenta únicamente a nivel de variación relativa, ya que la variabilidad obtenida en el experimento no permite concluir a partir del valor de estos.

La tendencia general es a disminuir a medida que se aumenta la adición de hidrógeno, se cree que el efecto en el caso de baja carga se aprecia más fuerte debido a lo pequeño del valor quedando este bajo el umbral de medición del equipo utilizado, mientras a media y plena carga, es posible apreciar un efecto más real del fenómeno, ya que los valores se encuentran más en el rango medible.

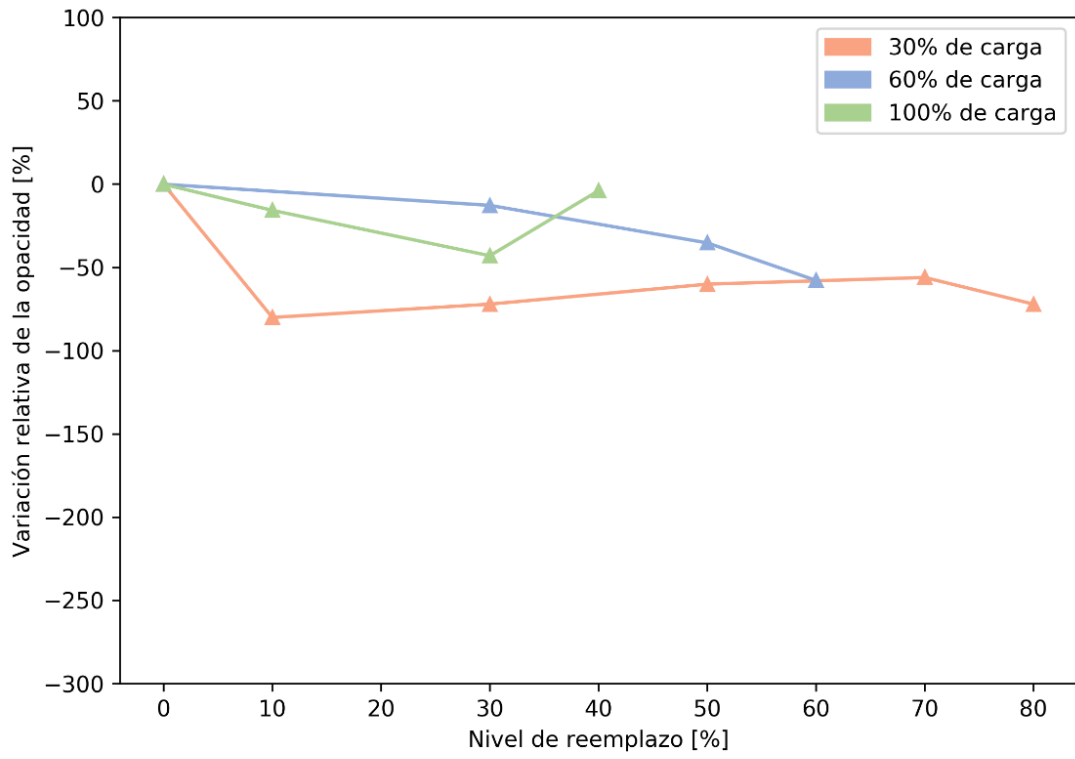


Gráfico 5.33: Variación relativa de la opacidad para diferentes niveles de reemplazo.

# CAPÍTULO 6

## 6. Conclusiones y recomendaciones

### 6.1 Conclusiones

En el presente trabajo de investigación se logró establecer un procedimiento seguro de inyección de hidrógeno a un MCI encendido por compresión. Se estudiaron las emisiones y desempeño utilizando como combustible una mezcla de hidrógeno gaseoso y diésel, junto con determinar el máximo nivel de reemplazo seguro sin atentar contra la integridad del equipo.

En el estudio de la línea base del motor se caracterizaron doce modos de operación con sus respectivas emisiones y desempeño. A partir del comportamiento observado se decidió realizar las pruebas con presencia de hidrógeno a 2400 RPM, debido a que en esta velocidad se obtuvieron los mejores resultados respecto a eficiencia y estabilidad de operación, variando el nivel de carga.

Se consideró la aparición de “knock” para determinar el máximo nivel de reemplazo posible, condición monitoreada mediante un método no invasivo basado en la medición de las vibraciones del block del motor. El indicador elaborado fue caracterizado en la operación de línea base, su capacidad de detección fue probada induciendo el fenómeno por medio de la modificación del tiempo de inyección de diésel. Se determinó un límite de 40%, 60% y 80% de reemplazo de diésel por hidrógeno en los casos de plena, media y baja carga respectivamente. En los casos de media y plena carga se detectó la ocurrencia de “knock” en dichos límites. Un incremento mayor fue testado resultando estas pruebas fallidas debido a la ocurrencia de retroceso de llama.

Los incidentes ocurridos pueden ser explicados a partir de las propiedades de inflamabilidad de la mezcla hidrógeno-aire en los casos de 45% de reemplazo a plena carga y 70% de reemplazo a media carga, visible en el gráfico 5.17 en donde el aire enriquecido con hidrógeno traspasa dicho límite.

En el caso de baja carga, para 70% y 80% de reemplazo se advierte la aparición de “knock”, superando el índice de detonación el rango establecido en el estudio de la línea base.

En cuanto al desempeño del motor, se observó que la razón de equivalencia aumentó junto con la adición de hidrógeno, siendo la mayor variación en el caso de baja carga y 70% de reemplazo. La eficiencia volumétrica se vio escasamente afectada, tendiendo a disminuir conforme el hidrógeno desplaza cierta proporción de aire admitido.

El consumo específico de combustible disminuyó en todos los casos en que se inyectó hidrógeno excepto en la operación a baja carga y 10% de reemplazo. Esto puede deberse a la baja en la eficiencia térmica, observada en todos los casos en que se operó en modo dual. Coincidentemente con la literatura [9, 10, 11, 13, 14, 16], a baja carga y bajo nivel de reemplazo, la eficiencia térmica se ve más disminuida. Un aumento mayor en la inyección de hidrógeno continuó disminuyendo la eficiencia térmica, pero en menor medida. En operación a alta carga se registró la menor baja de eficiencia con la adición de hidrógeno. Se cree que este efecto negativo puede ser superado mediante la modificación del tiempo de inyección de diésel, estrategia que en otras investigaciones permite incluso aumentar la eficiencia por sobre los valores medidos en el caso de utilizar sólo combustible diésel [11].

Las emisiones de dióxido de carbono disminuyeron conforme aumentó el reemplazo de diésel. Para un determinado nivel de reemplazo, se obtuvieron mayores reducciones de emisiones a alta carga. La máxima reducción fue de aproximadamente un 50%, con el máximo reemplazo (80%) a baja carga.

Las emisiones de oxígeno variaron escasamente, mientras que las emisiones de óxido de nitrógeno mostraron una tendencia fuertemente dependiente de la carga con la que se operó. A baja carga se observaron reducciones de cerca de un 30% con el máximo nivel de reemplazo, mientras que a alta carga estas aumentaron cerca de un 40%, situación similar al caso de media carga. No hay claridad respecto a las emisiones de dióxido de nitrógeno, que, si bien en operación sólo diésel son pequeñas, se cree que con la presencia de hidrógeno estas pueden aumentar.

A pesar de que se logró superar el límite de reemplazo de otros trabajos [15, 12], se cree que la principal causa por la cual no se pudo aumentar este valor radica en la concentración molar de hidrógeno en el aire de admisión, afectando esto la ocurrencia de retroceso de llama, así como también las condiciones de propagación del frente de llama dentro de la cámara de combustión. Otros investigadores se mantuvieron igualmente alejados de este límite, logrando operar con una concentración de 6% y 70% de carga [10], pero siempre bajo un 7.5% de concentración molar.

Vistos los resultados generales obtenidos, se observan las mejores condiciones de operación dual al modo plena carga y 30% de reemplazo, donde se obtiene uno de los menores consumos de combustible diésel sin verse la eficiencia térmica fuertemente comprometida o bien el modo de 60% de carga y 50% de reemplazo, donde el consumo específico es aún menor, pero la eficiencia térmica sufre una baja un poco mayor que en el caso anterior. En ambos casos se observan reducciones desde el punto de vista de las emisiones y además no se detecta la ocurrencia de “knock”, que pondría en riesgo la integridad mecánica del motor.

# CAPÍTULO 7

## 7. Trabajos Futuros.

Se presentan recomendaciones para trabajos futuros al estudiar las emisiones y desempeño de MCI encendidos por compresión en modo dual con adición de gases combustibles.

- En cuanto a la detección de “knock” se propone profundizar en el desarrollo del indicador, ya que actualmente este es dependiente del nivel de carga y de la velocidad de giro del motor, elaborando así un índice que pueda ser interpretado sin la necesidad de caracterizar cada uno de los modos de operación a estudiar.
- Respecto a las emisiones se recomienda utilizar un analizador de gases de mayor precisión en la medición de monóxido de carbono, hidrocarburos y óxidos de nitrógeno, que contemple ambas especies, o tal vez la extracción de muestras de gases para ser contrastadas con otro medio de análisis, como por ejemplo cromatografía.
- Se propone realizar un estudio similar con una forma de inyección distinta en la que la adición de hidrógeno se haga en un punto posterior a la etapa de sobrealimentación.
- Repetir el estudio para otro nivel de revoluciones, para el cual se permita aumentar los porcentajes de reemplazo sin traspasar el límite de flamabilidad del hidrógeno a diferentes condiciones de carga.
- Estudiar la operación dual de MCI encendidos por compresión, con la adición de otros gases combustibles, o mezclas de estos, como por ejemplo gas natural o licuado de petróleo.

## Bibliografía

[1] Comisión Nacional de Energía, Ministerio de Energía. Anuario Estadístico de Energía 2017, serie temporal 2007-2017 [en línea] <<https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2018/06/AnuarioCNE2018.pdf>> [consulta: 17 de junio 2018]

[2] CORFO, Gerencia de Capacidades Tecnológicas. Guía Técnica Convocatoria Programas Tecnológicos Estratégicos: “Desarrollo de sistemas de combustión dual hidrógeno-diésel en vehículos y equipos en operación mina”, serie temporal noviembre 2017 [en línea] <<https://www.corfo.cl/sites/Satellite?blobcol=urldata&blobkey=id&blobtable=MungoBlobs&blobwhere=1475166591633&ssbinary=true>> [consulta: 17 de junio 2018]

[3] An, H., Yang, W. M., Maghbouli, A., Li, J., Chou, S. K., & Chua, K. J. (2013). A numerical study on a hydrogen assisted diesel engine, 8, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.12.062>

[4] Roy, M. M., Tomita, E., Kawahara, N., Harada, Y., & Sakane, A. (2010). An experimental investigation on engine performance and emissions of a supercharged H<sub>2</sub>-diesel dual-fuel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(2), 844–853. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.11.009>

[5] Nagalingam B, Du' bel M, Schmillen K. Performance of the supercharged spark ignition hydrogen engine. SAE paper 831688 ;1983

[6] Saravanan N, Nagarajan G. Performance and emission studies on port injection of hydrogen with varied flow rates with diesel as an ignition source. *Appl Energy* 2010;87: 2218e29

[7] Cummins Engines, Oil and Gas Cummins Dual Fuel Engines For Well Servicing Applications Brochure. [en línea] Bulletin Number 4087304 Rev. 11/13 2013. <<https://cumminsengines.com/brochure-download.aspx?brochureid=309>> [consulta: septiembre de 2017]

[8] Adnan, R. (2009). An experimental investigation of unmodified DI diesel engine with hydrogen addition, (December), 7–8

[9] Liew, C., Li, H., Nuszowski, J., Liu, S., Gatts, T., Atkinson, R., & Clark, N. (2010). An experimental investigation of the combustion process of a heavy-duty diesel engine enriched with H<sub>2</sub>. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(20), 11357–11365. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.06.023>

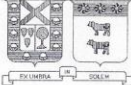
- [10] Gatts, T., Li, H., Liew, C., Liu, S., Spencer, T., Wayne, S., & Clark, N. (2010). An experimental investigation of H<sub>2</sub> emissions of a 2004 heavy-duty diesel engine supplemented with H<sub>2</sub>. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(20), 11349–11356. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.06.056>
- [11] Santoso, W. B., Bakar, R. A., & Nur, A. (2013). Combustion characteristics of diesel-hydrogen dual fuel engine at low load, 32, 3–10. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.05.002>
- [12] Hosseini, S. M., & Ahmadi, R. (2017). Performance and emissions characteristics in the combustion of co-fuel diesel-hydrogen in a heavy duty engine. *Applied Energy*, 205, 911–925. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.044>
- [13] Tsujimura, T., & Suzuki, Y. (2017). The utilization of hydrogen in hydrogen/diesel dual fuel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(19), 14019–14029. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.152>
- [14] Tomita, E., Kawahara, N., Piao, Z., Fujita, S., & Hamamoto, Y. (2001). Hydrogen Combustion and Exhaust Emissions Ignited with Diesel Oil in a Dual Fuel Engine. *SAE Paper*, (2011-01–3503), 1–8. <https://doi.org/10.4271/2001-01-3503>
- [15] Bika, A., Franklin, L., and Kittelson, D., "Emissions Effects of Hydrogen as a Supplemental Fuel with Diesel and Biodiesel," *SAE Int. J. Fuels Lubr.* 1(1):283-292, 2009, <https://doi.org/10.4271/2008-01-0648>
- [16] Dhole, A. E., Yarasu, R. B., Lata, D. B., & Priyam, A. (2014). ScienceDirect Effect on performance and emissions of a dual fuel diesel engine using hydrogen and producer gas as secondary fuels, 9, 1–11
- [17] Young, S. J., & Pryer, R. W. J. (1936). *The testing of internal combustion engines*. London: English Universities.
- [18] Bosch. (1990). *Manual de la técnica del automóvil*. Barcelona: Editorial Reverté.
- [19] Karim, G. A. (2003, May). Hydrogen as a spark ignition engine fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(02\)00150-7](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(02)00150-7)
- [20] Cheikhravat, H., Chaumeix, N., Bentaib, A., & Paillard, C.-E. (2012). Flammability limits of hydrogen-air mixtures. *Nuclear Technology*, 178(1), 5–16. <https://doi.org/10.13182/NT12-A13543>
- [21] Horner, T. Engine knock detection using spectral analysis techniques with a TMS320 DSP. *Documentazione Tecnica Fornita Dalla Texas*. 1995. [en línea] <<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Engine+Knock+>

Detection+Using+Spectral+Analysis+Techniques+With+a+TMS320+DSP#0>  
[consulta: marzo 2018]

[22] Wise, D. M. Investigation into producer gas utilization in high performance natural gas engines. Tesis (PhD. Mechanical Engineering). Fort Collins, Colorado. Colorado State University, Department of Mechanical Engineering, 2013. 191 h.

## 8. Anexos

### 8.1 Anexo A: Certificado de Poder calorífico superior e inferior combustible diésel.

  
**UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA**  
**DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA**  
**LABORATORIO TERMODINAMICA**

**CERTIFICADO**

Se certifica haber analizado la muestra de: COMBUSTIBLE.

Para determinar : PODER CALORÍFICO SUPERIOR E INFERIOR

Enviada por : SR. MARIO TOLEDO  
DIRECTOR DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA.

Muestra : Petróleo Diésel Petrobras Proyecto Komatsu.

Orden de ensayo N° : Solicitud de análisis del 15.05.2015 At. Sr. Mario Toledo.


Fecha de recibo : 15.05.2015

Análisis N° : LTP-14-50

**RESULTADOS OBTENIDOS**

<b>Determinación</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidad</b>	<b>Norma</b>
Poder Calorífico Superior	45.709	[ kJ/kg ]	ASTM D-240
Poder Calorífico Inferior	10.920	[ kcal/kg ]	
	42.831	[ kJ/kg ]	
	10.232	[ kcal/kg ]	

**Observaciones:** Resultado obtenido del promedio de dos determinaciones.  
Muestra enviada a Laboratorio de Termodinámica por Sr. Daniel Galleguillos.

  
Valdivia, 19 de mayo de 2015  
Daniel Espinoza Silva  
Laboratorio de Termodinámica  
Departamento de Ingeniería Mecánica

VALPARAISO, 19 de mayo de 2015

---

Avda. España 1680-Fono 56-32-2654170-2654162 -Fax 56-32-2797472 e-mail [labtd.mec@usm.cl](mailto:labtd.mec@usm.cl)  
Casilla 110-V Valparaiso CHILE

## 8.2 Anexo B: Valores medidos de indicador de detonación para diferentes modos de operación.

Tabla 8.1: Valores de indicador de detonación medidos para diferentes modos de operación.

Carga %	RPM	KI										Media	SD	CV	Variación <sup>iii</sup>
30	2000	12.2	13.0	10.8	11.6	13.4	12.1	13.1	13.7	13.4	12.6	12.60	0.91	0.07	0.65
30	2400	13.0	14.2	14.4	14.1	15.1	16.0	15.1	13.4	13.0	16.4	14.47	1.16	0.08	0.83
30	2800	14.7	14.1	14.1	17.0	16.7	16.6	15.9	15.0	16.5	17.2	15.79	1.21	0.08	0.86
30	3000	15.8	14.9	13.6	15.8	13.3	13.7	16.2	17.2	19.5	13.0	15.29	2.04	0.13	1.46
60	2000	14.2	12.5	12.8	10.9	11.3	10.6	10.7	12.6	10.9	10.3	11.67	1.25	0.11	0.89
60	2400	9.8	10.3	8.9	10.0	9.7	9.7	9.9	8.2	9.1	9.2	9.48	0.63	0.07	0.45
60	2800	12.0	11.6	11.6	14.4	11.5	10.3	10.8	11.2	11.5	11.5	11.65	1.07	0.09	0.77
60	3000	9.1	10.3	11.0	9.5	9.6	11.2	11.4	9.8	10.6	11.5	10.40	0.86	0.08	0.62
100	2400	10.2	10.9	12.1	12.0	11.8	12.5	11.2	10.5	12.4	11.7	11.53	0.79	0.07	0.57

## 8.3 Anexo C: Datos medidos línea base.

Tabla 8.2: Datos medidos para la operación línea base.

Carga [%]	RPM	Presión admisión [mmHg]	Presión aspiración [mm-H <sub>2</sub> O]	Temperatura admisión [°C]	Temperatura escape [°C]	Temperatura agua refrigeración [°C]	Temperatura aceite [°C]
100	2000	337	32	68.2	380.5	24	99.6
100	2400	445	45	79	340.2	24.4	104.3
60	2000	175	25	46.6	249.9	21.7	92
60	2400	278	36	57.9	243.9	22.2	96.5
60	3000	420	61	73.6	230.7	22.8	102.3
30	2000	122	27	37.5	168.8	22.3	85.9
30	2400	190	35	45.5	169.8	23.2	91.8
30	2800	290	55	56.2	172.8	24.4	96.4
30	3000	321	57	59.9	178.3	24.7	98
100	2000	338	30	68.8	377.5	27.1	100.6
100	2400	435	40	80	355.5	28	110.7

<sup>iii</sup> Variación respecto a la media, para establecer el mínimo y máximo del intervalo de confianza de un 95%.

100	3000	595	80	96.8	314	36.4	111.3
60	2000	180	30	51	263.1	23.1	100.8
60	2400	275	39	59.3	249.1	23.1	98.1
60	2800	376	55	71.2	233.7	23.9	102.8
60	3000	445	73	78.5	233.4	24.1	105.5
30	2000	113	25	41.3	183.4	21.5	94.7
30	2400	177	33	46.7	175.2	21.5	91.7
30	2800	266	49	56.4	174.9	22.3	95.2
30	3000	348	67	65.6	184.7	22.8	98.5
100	3000	576	81	90.3	300.3	25.1	104.2
60	2000	188	30	66	248	21.3	87.4
60	2400	297	38	58.3	244.7	21.9	96.5
60	3000	453	74	76.4	242.8	23.4	106.2
30	2000	118	25	40	188.7	20.9	96.4
30	2400	187	33	44.6	175.3	21	90.9
30	2800	267	49	52.8	172.6	21.6	94.1
30	3000	352	63	62.5	183.3	21.9	96.9
100	2400	427	44	77.5	336.4	24.3	103
100	2800	532	63	88.8	307.2	22.7	105.8
100	2800	540	55	88.6	314.9	25.2	108.9
60	2800	381	50	69.7	239.6	23.2	105.1
60	2800	380	50	70.5	250.6	23.8	112.6
100	2000	341	30	70	383.1	25.1	97.3
100	2400	430	40	79.8	350	25.6	103.5
100	2800	532	60	89.2	320.3	26.8	108.8
100	3000	595	80	94.4	311.3	26.7	110.8
60	3000	455	70	77.4	238.3	25.4	106.4
60	2800	378	55	69.1	231.6	24.4	101.9
60	2400	275	35	58.4	241.7	23.6	97.8
60	2000	190	25	49.2	255.2	23.3	93.7
30	2000	115	20	38.9	179.4	21.7	88.6
30	2400	185	35	45.5	175.9	21.9	89.2
30	2800	285	50	56.9	169.8	22.8	93.1
30	3000	355	65	65	182.6	23.5	97.3
100	2000	325	30	70.5	376.9	24.4	99.7
100	2800	530	60	89.6	318.7	25.7	108.8
100	3000	590	80	95.4	314.3	26.4	112

Tabla 8.3: Datos medidos para la operación línea base (continuación).

Carga [%]	RPM	Emisiones de O <sub>2</sub> [%]	Emisiones de CO <sub>2</sub> [%]	Emisiones de CO [ppm]	Emisiones de NO [ppm]	Opacidad [m <sup>-1</sup> ]	Emisiones de HC [ppm]
100	2000	10.5	7.67	890	702	1.58	1
100	2400	11.53	6.99	180	767	1.07	0
60	2000	13.46	5.34	0	554	0.14	0
60	2400	14.39	4.66	0	573	0.14	-2
60	3000	15.13	4.16	50	530	0.15	4
30	2000	15.95	3.65	170	348	0.13	14
30	2400	16.41	3.4	140	357	0.12	11
30	2800	16.68	3.16	120	338	0.13	10
30	3000	16.56	3.23	10	357	0.16	9
100	2000	10.27	7.67	1320	688	1.25	16
100	2400	11.1	7.27	380	763	1.09	10
100	3000	12.5	6.09	140	728	0.34	10
60	2000	13.51	5.33	120	535	0.2	11
60	2400	14.16	4.85	60	559	0.19	7
60	2800	15.04	4.24	130	489	0.22	10
60	3000	15.2	4.1	90	498	0.23	7
30	2000	16.1	3.5	150	311	0.14	9
30	2400	16.3	3.3	120	346	0.13	8
30	2800	16.7	3.1	100	333	0.16	8
30	3000	16.5	3.2	70	363	0.19	4
100	3000	12.54	6.09	90	725	0.42	4
60	2000	13.21	5.59	150	583	0.29	12
60	2400	14.27	4.86	70	620	0.18	9
60	3000	14.68	4.62	130	550	0.27	6
30	2000	16.31	3.46	120	317	0.12	7
30	2400	16.56	3.18	110	345	0.08	9
30	2800	16.83	2.94	70	345	0.1	7
30	3000	16.53	3.18	100	366	0.15	8
100	2400	11.84	6.72	160	771	0.89	61
100	2800	13.05	5.78	140	692	0.41	8
100	2800	12.63	6.07	110	735	0.39	10
60	2800	14.95	4.35	100	536	0.17	10
60	2800	15.38	3.97	70	532	0.2	8
100	2000	10.7	7.51	120	682	2.01	56
100	2400	12.64	6.18	120	696	0.84	49
100	2800	13.43	5.5	130	630	0.54	22

100	3000	13.4	5.53	80	694	0.4	20
60	3000	15.36	4.15	100	531	0.27	10
60	2800	15.28	4.12	90	493	0.23	13
60	2400	14.7	4.52	10	528	0.2	10
60	2000	14.21	4.9	130	472	0.29	9
30	2000	16.17	3.47	130	345	0.17	7
30	2400	16.19	3.45	70	393	0.17	5
30	2800	16.58	3.05	80	357	0.16	9
30	3000	16.57	3.18	120	370	0.19	9
100	2000	11.32	7	760	653	1.2	12
100	2800	13.87	5.17	120	610	0.3	12
100	3000	13.24	5.64	110	711	0.25	9

## 8.4 Anexo D: Datos medidos con adición de hidrógeno.

Tabla 8.4: Datos medidos para la operación con adición de hidrógeno.

Carga [%]	RPM	KI	RPM medidas	H2 [l/min]	Presión admisión [mmHg]	Presión aspiración [mm-H <sub>2</sub> O]	Temperatura admisión [°C]	Temperatura escape [°C]	Temperatura agua refrigeración [°C]	Temperatura aceite [°C]
30	10	10.1	2571	22.04	208	39	42.5	160	20.9	88.8
30	30	13.4	2594	66.3	199	39	38.3	153.5	20.7	83.1
30	50	15.2	2544	110.5	185	37	40.6	160.9	20.9	84.4
30	70	18.3	2585	154.7	190	36	44	172.2	21.4	87.8
30	80	17.4	2561	176.8	176	34	44	172.4	21.5	88.4
60	30	9.53	2548	104.1	279	38	56.3	239.6	23.9	92.3
60	50	11.4	2596	173.4	275	37	49.1	226	22.8	90.5
60	60	18.92	2574	208.1	250	35	50.6	234.7	23.4	91.7
30	10	14.4	2614	22.1	213	40	44	158.9	20.7	84.2
30	30	14.1	2592	66.3	204	37	44	160.6	21	81.1
30	50	13.8	2553	110.5	201	36	44.3	168.5	21.2	86
30	70	16.9	2589	154.7	193	36	46.6	177.9	21.6	89.2
30	80	17.1	2588	176.8	187	34	44.6	175.6	21.5	89.9
60	30	12.3	2592	104.1	287	40	57.5	234.7	22.9	92.1
60	50	13.5	2601	173.4	275	38	57.9	250.3	23.5	95.7
60	60	22.8	2583	208.1	254	35	53.7	244.2	23	94.8
100	10	14.4	2554	53.1	437	45	77.9	327.3	24.5	100.2
100	30	12	2604	159.4	418	45	70.6	323.6	24.4	101.3
100	40	20.5	2630	212.5	414	42	70.4	330.5	24.7	102.3
100	10	11.2	2604	53.1	444	48	78.9	311.9	24.8	98.5

100	30	13	2622	159.4	411	45	68.1	307.5	24.4	101.8
100	40	17.8	2604	212.5	370	40	70.5	311.4	24.2	100.2

*Tabla 8.5: Datos medidos para la operación con adición de hidrógeno (continuación).*

Carga [%]	Nivel de reemplazo [%]	Emisiones de O <sub>2</sub> [%]	Emisiones de CO <sub>2</sub> [%]	Emisiones de CO [ppm]	Emisiones de NO [ppm]	Opacidad [m <sup>-1</sup> ]	Emisiones de HC [ppm]
30	10	16.35	3.17	130	309	0.01	10
30	30	16.3	2.87	100	280	0.04	11
30	50	16.32	2.51	30	270	0.05	5
30	70	16.48	2.04	60	251	0.07	11
30	80	16.67	1.55	50	235	0.06	11
60	30	14.51	3.97	50	637	0.21	7
60	50	14.66	3.13	70	699	0.15	13
60	60	14.34	2.83	40	800	0.12	12
30	10	16.25	3.29	50	324	0.04	7
30	30	16.1	3	80	310	0.03	10
30	50	16.26	2.71	120	255	0.05	7
30	70	16.43	2.07	110	266	0.04	13
30	80	16.53	1.69	40	242	0.01	9
60	30	14.44	3.92	40	633	0.1	10
60	50	14.81	3.1	90	670	0.08	12
60	60	14.57	2.82	60	754	0.03	11
100	10	12.7	5.6	220	734	1.22	14
100	30	12.7	4.9	180	928	0.77	13
100	40	12.4	4.6	300	1018	1.32	12
100	10	14.2	4.7	120	545	0.42	10
100	30	13.2	4.4	80	817	0.34	9
100	40	12.6	4.3	160	1017	0.55	6