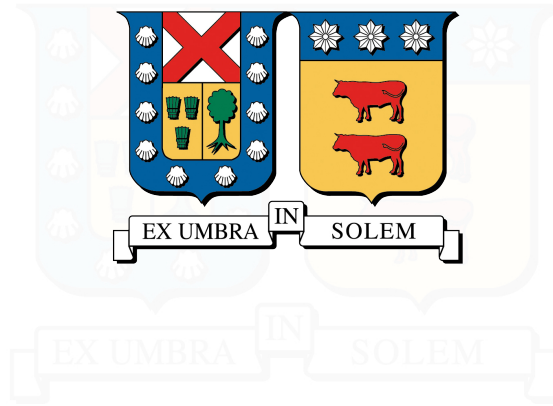


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA
Valparaiso- CHILE



**"MEDICIÓN DE GASES CONTAMINANTES DE UN MOTOR A GAS KUBOTA
DG972, PARA GENERACIÓN DE DATOS DE ENTRADA PARA LA
CALIBRACIÓN DEL MODELO DEL MOTOR OPERANDO BAJO
COMBUSTIÓN ANORMAL."**

Nicolás Dueñas Pardo

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO MENCIÓN ENERGÍA

PROFESOR GUÍA : Dr.-Ing. German Amador
PROFESOR CORREFERENTE : Dr.-Ing. Mauricio Osses

Marzo 2023



A mi familia ...

Agradecimientos

Agradezco a mi madre Maria del Pilar y mi padre Luis Alberto, por darme la oportunidad de estudiar esta hermosa carrera. Les agradezco todo su amor y apoyo expresado en conversaciones inquisitivas o distractoras, ricas comidas que reponían mi fuerza física y mental, la voluntad para facilitarme recursos destinados a apoyarme siempre y en especial en los cursos que más me costaron, la paciencia y confianza depositadas en este largo proceso académico.

Al resto de mi núcleo familiar, mis hermanos y hermana, José Luis, Joaquín, Pilar y Francisco, que fueron siempre conejeros, confidentes y los amigos con quienes podía contar al volver a casa.

A mi abuela Pilar Sainz que siempre me apoyó y quien cobró especial presencia durante el proceso de tesis, cuando se volvió mi vecina. Gracias por los ricos almuerzos que me salvaron cuando no me planifiqué bien, cuando enfermé e incluso cuando fueron solo una muestra de afecto que llenó mi corazón. Gracias también a Bernardita Espinoza por su ayuda en estos detalles y el cariño que recibí en estos.

A mis amistades sansanas, con quienes compartimos todo lo bueno y todo lo malo. En especial al grupo que un día se formó con la sencilla razón de almorzar bien acompañados, pero que rápidamente se volvió un espacio mucho más especial.

A los amigos con quienes no compartimos casa de estudio, los de la vida, los siempre presentes, Sebastián Calderón y el Circulo.

Al apoyo académico del laboratorio de termo fluidos y en particular al señor Daniel Galleguillos, siempre dispuesto a ayudar durante todo el desarrollo de esta memoria.

A mi profesor guía Germán Amador, correferente Mauricio Osses y a ANID que a través del proyecto FONDECYT Iniciación N° 11190447 titulado “Development of a detailed chemical Kinetic mechanism for modeling autoignition and knock intensity in renewable gas spark ignition engines” permitió el desarrollo de esta memoria de titulación.

RESUMEN EJECUTIVO

Las emisiones de un motor a combustión interna (MCI) son de gran utilidad a la hora de examinar su funcionamiento. En conjunto con otros datos, estas pueden ser usadas para estimar otras cifras de interés como el flujo volumétrico de escape, factores de emisión e incluso lograr comprender de la calidad de la combustión y determinar si hay presencia de fenómenos negativos como el "knock".

El objetivo general de este trabajo es realizar mediciones de especies contaminantes de un MCI a gas Kubota DG972-E2, para la generación de datos de entrada, para la calibración de un modelo computacional del motor, desarrollado en GT-Power para predecir el knock.

Con el propósito de optimizar dicho modelo computacional es que se diseñó un procedimiento de medición experimental basado en las normativas dictadas por la agencia de protección medioambiental (Environmental Protection Agency, EPA), vigentes en el código de regulación federal estadounidense (Code of Federal Regulations, CFR). En conjunto a las normativas mencionadas, el diseño de las pruebas contempla las condiciones del laboratorio, para la formulación de un procedimiento óptimo y repetible. El trabajo experimental consistió en utilizar equipos de medición de gases y partículas según los procedimientos establecidos. Luego se realizaron cálculos para comparar los resultados obtenidos a la norma referida y generar datos de entrada para el modelo computacional desarrollado en GT-POWER.

Los resultados fueron satisfactorios en cuanto a la obtención de datos de entrada para el programa computacional. De la comparación de los factores de emisión del motor y los límites impuestos por la norma resalta el incumplimiento de esta. Este resultado da luces de la importancia de la optimización de algunas condiciones del laboratorio y equipos de medición. Adicionalmente se presentaron problemas específicos a condiciones de esta prueba experimental y otros de carácter más general. Tales complicaciones han servido para identificar lugares en los que se pueden hacer mejoras en cuanto a las instalaciones del laboratorio. También destacan la información compilada y depurada que sirve de guía para el uso de los equipos SEMTECH y la determinación de la normativa que pueda ser de utilidad en futuras investigaciones.

ABSTRACT

The emissions of an internal combustion engine (MCI) are very useful when examining its operation. In conjunction with other data, these can be used to estimate other figures of interest such as exhaust volumetric flow, emission factors and even gain an understanding of the quality of combustion and determine if there are negative phenomena such as "knock".

The general objective of this work is to carry out measurements of contaminating species of a Kubota DG972-E2 gas MCI, for the generation of input data, for the calibration of a computational model of the engine developed to predict knock.

With the purpose of optimizing said computational model, a procedure based on the regulations issued by the Environmental Protection Agency (EPA) in force in the code of federal regulations (CFR) of United States, was designed to carry out the experimental measurements. Together with the aforementioned regulations. The design of the tests contemplates the conditions of the university's laboratory, for the formulation of an optimal and repeatable procedure. The experimental work consisted of using gas and particle measurement equipment according to the established procedures. Then calculations were made to compare the results obtained to the referred standard and to generate input data for the computational model developed in GT-POWER.

The results were satisfactory in terms of obtaining input data for the software. From the comparison of the emission factors of the engine and the limits imposed by the norm, the non-compliance with it stands out. This result sheds light on the importance of optimizing some laboratory conditions and measurement equipment. Additionally, specific problems were presented to the conditions of this experimental test and others of a more general nature. Such complications have served to identify places where improvements can be made, in terms of laboratory facilities. Another satisfactory result of this work is the compiled and refined information that serves as a guide for the use of SEMTECH equipment and the determination of regulations that may be useful in future research.

Índice de Contenidos

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivo General	2
1.2.1. Objetivos Específicos	2
2. Revisión de la metodología utilizada para medir factores de emisiones de un motor a gas estacionario Kubota DG972.	3
2.1. Descripción de los equipos	3
2.2. GT-Power	8
2.3. Normativa Aplicable al motor Kubota DG972	8
2.3.1. Límites de emisiones	9
2.4. Diseño de la prueba de emisiones	9
2.4.1. Ciclo de trabajo	10
3. Protocolo de instalación y puesta a punto del motor y los equipos de medición	14
3.1. Instalación y puesta a punto	14
3.1.1. Disposición y conexiones	14
3.1.2. Secuencias de Arranque	15
3.1.3. Establecimiento de comunicación entre equipos	15
3.1.4. Calibración de equipos de medición	15
3.2. Toma de Datos	16
4. Resultados	18
4.1. Datos sin procesar	18
4.2. Procesamiento de datos para normativa EPA	18
4.3. Procesamiento de datos para su uso en el modelo computacional	21
4.4. Consideraciones para futuras mediciones de emisiones	22
5. Conclusiones	24
Bibliografía	25
A. Anexos	26
A.1. Anexo A	26

Índice de Tablas

2.1. Clases de MCI	9
2.2. Límites de emisiones EPA	9
2.3. Ciclo de Trabajo	10
2.4. Ciclo de Trabajo Según la Potencia Eléctrica	11
2.5. Eficiencia generador	12
2.6. Potencia mecánica a partir de la potencia y eficiencia eléctrica	12
4.1. Especies, equipos y objetivos	18
4.2. Densidades de contaminantes relativas al gas de escape según combustible	21
4.3. Comparación de Límites de emisión	21
4.4. Resumen de datos de entrada para GT-Power	22
A.1. Sistemas operativos SEMTECH D y G	26

Índice de Figuras

2.1. Motor Kubota DG972	3
2.2. Alternador Mecc Alte	4
2.3. Banco de carga	4
2.4. Analizador de Gases Diesel	4
2.5. Analizador de Gases Gasolina	4
2.6. Analizador de Gases Gasolina	5
2.7. Analizador de Gases Gasolina	5
2.8. Flujómetro de gases de escape	5
2.9. Analizador de material particulado	5
2.10. Medidor de corriente de tenaza	6
2.11. Flujómetro de combustible	6
2.12. Termometro	6
2.13. Tacómetro digital	6
2.14. Tubo flujómetro EFM	7
2.15. Dilutor de material particulado	7
2.16. Gases de calibración	7
2.17. Regulador de presión	7
2.18. Valvula de gas	8
2.19. Extrapolación polinomial eficiencia generador	12
A.1. Conexiones SEMTECH G	27
A.2. Conexiones SEMTECH D	28
A.3. Conexiones SEMTECH EFM	29
A.4. Menu de internet de la barra de tareas	30
A.5. Ajustes de internet	30
A.7. Propiedades de Ethernet	31
A.6. Ajustes de Ethernet	31
A.8. Fijando dirección IP	32
A.9. Ventana de inicio	32
A.10. Índice de ventanas SENSOR Tech-PC	33
A.11. Ubicación botella FID	34
A.13. Ventana de resultado de Zero	34
A.12. Ventana de Zero con indicadores	35
A.14. Ventana de Span	36
A.15. Ventana de resultado Span	36
A.16. Ventana de Audit	37
A.17. Ventana de resultado Audit	37
A.18. Diagrama de flujo del proceso de calibración	38

1 | Introducción

1.1. Motivación

Los MCI liberan emisiones que contaminan el medio ambiente, generando un impacto negativo en este y la salud de las personas. Es por esta razón que los organismos legisladores han incrementado progresivamente las limitaciones impuestas a fabricantes y usuarios de tales máquinas, en relación con las emisiones de las mismas. Con el fin de reducir emisiones, las naciones y entidades privadas del mundo emplean también otros métodos, como el incentivo al desarrollo y uso de tecnologías más limpias. Chile es un claro ejemplo de estos dos fenómenos, adhiriéndose a las estrictas normativas de emisiones vehiculares europeas e impulsando programas de subsidio para incentivar el uso de tecnologías de energías renovables. Este camino a la descarbonización de Chile y otras naciones del mundo ha generado un sostenido incremento en el interés por desarrollar tecnologías que permitan reducir el consumo de combustibles fósiles. Una de las vías posibles para reducir dicho consumo es la de la sustitución parcial de los mismos. El hidrógeno es un ejemplo de sustituto que destaca en nuestro país, en gran parte debido a la popularidad del concepto acuñado como “hidrógeno Verde”.

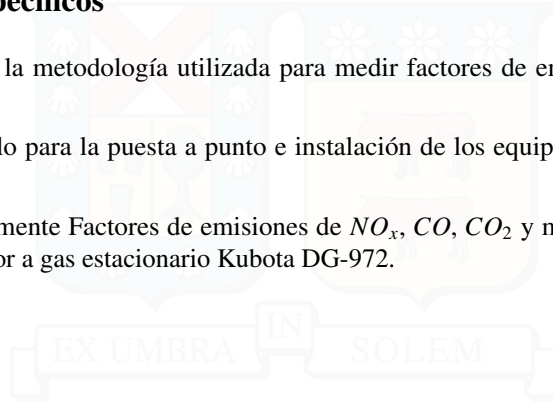
Es por estos motivos que una comprensión más acabada de los mecanismos de la combustión cobra importancia, ya que sustituir combustibles fósiles por alternativas más ecológicas viene acompañado de múltiples desafíos. Un fenómeno sumamente relevante, que limita el desarrollo de tecnologías que permitan dicha sustitución, es el “knock”. Este fenómeno se expresa como sonidos agudos, causados por la combustión prematura de una parte del combustible en el cilindro. Las ondas de presión de alta frecuencia generadas por la combustión prematura, resultan en vibraciones que pueden generar daños en el motor. Es por las razones anteriores que el grupo de investigación en Motores y Combustibles Alternativos GIMCA, ha concentrado esfuerzos en el estudio del knock. Una de las investigaciones desarrolladas por el grupo modela la operación de un motor a combustión interna mediante el programa de ANSYS Chemkin-Pro, que le permite determinar el ángulo de ocurrencia de knock (KOKA, por sus siglas en inglés). Además de los datos experimentales que alimentan esta herramienta, existen otros datos de entrada que son extremadamente difíciles de obtener experimentalmente o simplemente no se puede con las herramientas que actualmente se dispone. Para generar tales datos de entrada se modela un motor mono cilíndrico mediante el programa GT-Power. Este modelo permite obtener los datos que no se pueden obtener experimentalmente a partir de otros que sí se pueden medir. Es con la intención de aportar datos de entrada a dicho estudio que se ha desarrollado este trabajo de investigación. En función de la generación de datos de entrada, es que se estudia la metodología para desarrollar óptimos procedimientos experimentales asociados a la medición de factores de emisión en MCI. Tales procedimientos pretenden aumentar la fidelidad de la información, así como la formulación de documentación que habilite a futuros investigadores replicar y desarrollar sus propios experimentos para la medición de elementos contaminantes en motores de combustión interna.

1.2. Objetivo General

Medición de gases contaminantes de un motor a gas Kubota DG972 para generación de datos de entrada para la calibración del modelo del motor operando bajo combustión anormal.

1.2.1. Objetivos Específicos

- Identificar y revisar la metodología utilizada para medir factores de emisiones de un motor a gas estacionario.
- Realizar un protocolo para la puesta a punto e instalación de los equipos de medición en el motor Kubota DG-972.
- Medir experimentalmente Factores de emisiones de NO_x , CO , CO_2 y material particulado ($PM_{2,5}$), generado por el motor a gas estacionario Kubota DG-972.



2 | Revisión de la metodología utilizada para medir factores de emisiones de un motor a gas estacionario Kubota DG972.

En esta sección se hará un repaso de algunas de las normativas que regulan las emisiones de un motor Kubota DG972-E2-BBH y como estas definen los protocolos de las pruebas de emisiones. En primer lugar se describen los equipos usados en el experimento. Usando esta información se determina que normativas aplican al motor, para luego, identificar los elementos que regulan las pruebas de emisiones y como estas se pueden adaptar a los equipos y condiciones del laboratorio. Finalmente, se diseña una metodología para medir factores de emisión, concentraciones de gases de escape y material particulado.

El estudio de la normativa y el repaso de como se puede aplicar a las condiciones del presente trabajo de investigación, cumple la función de sentar las bases para el diseño de una metodología óptima, en relación con la calidad de los datos obtenidos. Es con tal intención que se identifican y resuelven, con buen juicio ingenieril, las diferencias y dificultades para su aplicación en el trabajo experimental y las condiciones particulares del laboratorio donde este se lleva a cabo.

2.1. Descripción de los equipos

Motor [7]

- Marca: Kubota
- Año: 2004
- Modelo: DG972-E2-BBH
- Ciclo: Otto
- Número de Cilindros: 3
- Carrera: 73.6 [mm]
- Diámetro de cilindro: 74,5 [mm]
- Cilindrada: 962 [cm^3]
- Peso: 72,0 [kg]
- Relación de compresión: 9,2 : 1
- Potencia máxima: 18,7 [kW]



Figura 2.1: Motor Kubota DG972

Alternador [8]

- Marca: Mecc Alte
- Año: 2011
- Modelo: ECP3 3S2
- Rango de Potencia (kVA): 8 - 24
- Frecuencia de salida (Hz): 50, 60
- Velocidad Síncrona rpm: 3000, 3600
- Número de fases: 1, 3
- Número de Polos: 2



Figura 2.2: Alternador Mecc Alte

Banco de carga

- Corriente alterna y directa
- Rango: 0 a 9000 [W]
- Resolución: 60 [W]



Figura 2.3: Banco de carga

Analizador de gases portátil 1 [10]

- Marca: Sensors, inc.
- Modelo: SEMTECH-D
- Mediciones de: THC , NO_x , CO , CO_2 , O_2 , humedad relativa y temperatura ambiente.
- Frecuencia de muestreo: 1 [Hz]
- Resolución: 1 ppm



Figura 2.4: Analizador de Gases Diesel

Analizador de gases portátil 2 [11]

- Marca: Sensors, inc.
- Modelo: SEMTECH-G
- Mediciones de: THC , NO , CO , CO_2 , O_2 , humedad relativa y temperatura ambiente.
- Frecuencia de muestreo: 1 [Hz]
- Resolución: 1 ppm



Figura 2.5: Analizador de Gases Gasolina

Analizador de gases portátil 3 [3]

- Marca: TESTO
- Modelo: 340
- Medición de: O_2 , CO , NO , NO_2 y SO_2
- Resolución: 1 ppm
- Temperatura máxima: $500^{\circ}C$



Figura 2.6: Analizador de Gases Gasolina

Analizador de gases portátil 4 [9]

- Marca: BOSCH
- Modelo: BEA 250-EU
- Frecuencia de muestreo (Hz):
- Mediciones de: CO , CO_2 , HC , O_2 , Λ y NO
- Resolución: 1-10 ppm según especie.



Figura 2.7: Analizador de Gases Gasolina

Flujómetro de gases de escape

- Marca: Sensors, inc.
- Modelo: SEMTECH EFM
- Frecuencia de muestreo: 1 [Hz]
- Medición indirecta de: Caudal másico y volumétrico corregidos.



Figura 2.8: Flujómetro de gases de escape

Medidor de material particulado [1]

- Marca: Dekati
- Modelo: Efilter EF16-AM
- Medición de: Tamaño, número y masa.
- Tamaño mínimo de partícula: $5[nm]$
- Tamaño máximo de partícula: $3[\mu m]$



Figura 2.9: Analizador de material particulado

Medidor de corriente y voltaje

- Marca: ISO-TECH
- Modelo: ICM 36II
- Corriente maxima (A): 600
- Resolucion corriente (mA): 100
- Voltaje maximo (V): 600
- Resolucion voltaje (mV): 0,1



Figura 2.10: Medidor de corriente de tenaza

Medidor de Flujo de GLP

- Marca: AALBORG
- Modelo: GFC 57, 67 77
- Flujo máximo: 200, 500, 1000 l/min
- Presión máxima de gas: 1000 psig
- Temperatura de gas: 0a50°C
-



Figura 2.11: Flujómetro de combustible

Termómetro

- Marca: CEM
- Modelo: DT-8891A
- Rango de temperaturas: -200°C a 1372°C
- Resolución sobre -100°C: $\pm[0.15 \% \text{ rdg} + 1^\circ\text{C}]$



Figura 2.12: Termometro

Tacómetro digital

- Marca: Lutron
- Modelo panel: DT2240D
- Modelo sensor: PX-01
- Rango: 5 a 9.999 RPM
- Precision: $\pm(0,05 \% + 1d)$
- Frecuencia de muestreo: 600 Hz, max.



Figura 2.13: Tacómetro digital

Tubo flujómetro EFM

- Marca: Sensors, inc.
- Modelo: SEMTECH EFM
- Material: Acero inoxidable.
- Conexiones de muestreo: 2
- Diámetro exterior: 4"



Figura 2.14: Tubo flujómetro EFM

Dilutor

- Marca: DEKATI
- Modelo: Diluter L6
- Flujo de muestra: 10 o 30 [L/min]
- Flujo diluido: 60 lpm
- Razón de dilución: 1:8
- Temperatura de trabajo: 0 – 450°C



Figura 2.15: Dilutor de material particulado

Gases de calibración

- Gas de zero: N_2
- Gas de span 1: CH_4 , CO , CO_2 y N_2
- Gas de span 2: NO , NO_2 y N_2
- Gas de FID: H y He



Figura 2.16: Gases de calibración

Reguladores de Presión

- Marca: Linde
Reguladores de presión de uso general. Diseñados para mantener una presión de salida constante, independiente de la presión de suministro.



Figura 2.17: Regulador de presión

Válvula de gas

- Marca: Swagelok
- Modelo: SS-4GUM4-F4
- Tipo: Válvula de aguja
- Material: Acero inoxidable.
- Tipo de conexión: NPT
- Dimensión conexión: 1/4 in.
- Temperatura mínima: -17°C
- Temperatura Máxima: 232°C



Figura 2.18: Válvula de gas

2.2. GT-Power

GT-Power es un programa de simulación computacional ampliamente utilizado en la industria automotriz para el modelado y análisis de sistemas de propulsión. Se enfoca principalmente en el estudio de motores de combustión interna, tanto de gasolina como diésel. El programa permite simular y analizar el comportamiento de un motor y sus sistemas asociados en diferentes condiciones de operación. A través de un enfoque basado en modelos matemáticos, el software simula el ciclo de admisión, compresión, combustión y escape del motor, teniendo en cuenta factores como el flujo de aire, la mezcla de combustible, la ignición, la temperatura y la presión. El modelo es capaz de determinar, entre otras cosas, la porción de los gases quemados que permanecen en cámara y se mezclan con los gases de admisión, conocidos como gases de recirculación. Para mejorar la robustez de este modelo se le puede alimentar con cierta información de los gases de escape, en particular las proporciones volumétricas de hidrocarburos no quemados (THC en PPM_C1), monóxido de carbono (CO en PPM) y óxido de nitrógeno (NO en PPM). Se entiende entonces que será necesario medir tales contaminantes, junto a los gases que la normativa imponga límites. Las concentraciones de los contaminantes son ingresadas al modelo asociadas al ciclo de trabajo del motor durante la generación de las mismas. El ciclo de trabajo es un concepto definido y dictado por la normativa. De la normativa se extraerán entonces no solo los límites y procedimientos para la medición de emisiones, si no también, el ciclo de trabajo aplicado al motor durante la medición y que será utilizado posteriormente en el modelo como dato de entrada.

2.3. Normativa Aplicable al motor Kubota DG972

El motor Kubota DG972 es fabricado en Estados Unidos y como tal, se encuentra sujeto al código de regulación federal (CFR, del inglés “code of federal regulation”) de dicho país. El CFR, Resolución 40 / Capítulo I / Sub capítulo U, define las normas generales para el control de contaminantes. Dentro de este sub capítulo U se distinguen las partes 1048 y 1054, que se refieren a nuevos motores “nonroad” encendidos por chispa. El término “nonroad” se traduce como “fuera de la carretera” y se define de forma general como todos aquellos motores que no son de vehículos, vehículos de competición, aeronaves ni motores estacionarios. La diferencia fundamental entre las partes 1054 y 1048 está en que la primera regula a los equipos con una potencia máxima igual o inferior a $19[\text{kW}]$, mientras que la parte 1048 regula equipos de potencias superiores. Considerando que la potencia máxima intermitente del Kubota DG972-E2 es de $18,7[\text{kW}]$ (a 3600 rpm), se identifica que pertenece a la categoría regulada en la parte 1054. Si bien la definición de nonroad excluye motores estacionarios, lo que pudiese dejar al equipo de estudio fuera dicha parte, en la misma se especifica que también aplica a motores estacionarios. Se identifica entonces que el equipo de pruebas es regulado según las normas definidas en el CFR, título 40 / capítulo I / sub capítulo U / parte 1054, que de ahora en adelante será referida como 40 CFR 1054, en concordancia con el formato de citación del mismo sistema. En el sitio

web del CFR [2] es posible acceder a las normas referidas, introduciendo en el buscador la nomenclatura recién descrita. De igual forma se podrá acceder a cualquier párrafo, ecuación u otro al que se le refiera de esta forma.

2.3.1. Límites de emisiones

Si bien ya se tiene la parte del CFR que contiene los límites impuestos al motor en cuestión, dentro del mismo se distinguen distintos límites que aplican a distintos equipos. Para diferenciar entre tales equipos usan una separación por clase, que se definen en la tabla 2.1.

Tabla 2.1: Clases de MCI

Clase	Descripción de motores de equipos
I-A	no portátiles con un desplazamiento menor a 66 [cm ³].
I-B	no portátiles con un desplazamiento mayor o igual a 66 [cm ³] pero menor a 100 [cm ³].
I	no portátiles con un desplazamiento mayor o igual a 100 [cm ³] pero menor a 225 [cm ³].
II	no portátiles con un desplazamiento mayor o igual a 225 [cm ³].
III	portátiles con un desplazamiento menor a 20 [cm ³].
IV	portátiles con un desplazamiento mayor o igual a 20 [cm ³] pero menor a 50 [cm ³].
V	portátiles con un desplazamiento mayor o igual a 50 [cm ³].

Notar que “no portátiles” es una traducción de “non-handheld”, lo que se refiere a un motor que no se sostiene con las manos. Un ejemplo de motor sostenido con las manos podría ser el de una motosierra y distinto del de una cortadora de césped. Identificando entonces que el motor kubota DG972 es no portátil, solo queda referirse a la cilindrada para identificar a qué clase corresponde. El desplazamiento total del motor es de 962[cm³], lo que lo ubica en la Clase II.

Identificada la categoría del motor dentro de la norma, se puede entonces distinguir a cuáles límites de emisiones está suscrito. En la tabla 2.2 se presentan los límites definidos por norma, en [g/kWh]. Notar que los límites se refieren a factores de emisión, en gramos de contaminante por unidad de energía, la que corresponde a la energía transmitida por el cigüeñal.

Tabla 2.2: Límites de emisiones EPA

Categoría Motor	HC + NOx	CO
Clase II	12,7 [g/kWh]	610 [g/kWh]

2.4. Diseño de la prueba de emisiones

El motor utilizado en estas pruebas forma parte de un equipo de generación eléctrica, mediante la quema de gas obtenido de una unidad gasificador de madera. Para efectos de este trabajo de investigación se prescindió del sistema de gasificación, manteniendo el generador eléctrico y muchos de los sistemas de control que gobiernan la operación del motor. El lector comprenderá entonces que lo que se tiene como equipo de pruebas es un grupo electrógeno. La normativa dicta que los grupos electrógenos deben ser desacoplados, conectando un freno dinamométrico sobre el MCI para aplicarle la carga que se requiera. Debido a la falta de un freno dinamométrico adecuado, se utilizó el alternador para cumplir la función de aplicar carga. Con esta configuración se requiere de un banco de carga para generar demanda sobre el motor eléctrico, que a su vez, frenará el MCI. Si bien la solución es práctica y sencilla de implementar, esta resulta en una dificultad adicional para la aplicación de la normativa. Cuando se utiliza un freno dinamométrico se tiene una lectura del par de torsión directamente sobre el eje del motor. Mientras que al utilizar un generador eléctrico y banco de carga, lo que se tiene es la potencia eléctrica generada por el alternador. Esto implica que para obtener la potencia correspondiente al par torsor, se han de considerar las pérdidas debido a la eficiencia del alternador.

Si bien se tiene la eficiencia del alternador según el fabricante, no deja de ser una fuente de error a la hora de determinar la potencia producida por el motor.

2.4.1. Ciclo de trabajo

El concepto de ciclo de trabajo se refiere a una prueba de carga estandarizada que se ha de aplicar sobre un motor, durante la cual se llevan a cabo las mediciones. Esto constituye una herramienta que permite calcular factores de emisión que sean comparables dentro de su propia categoría. Un ejemplo familiar para el lector pudiese ser el de un ciclo de conducción para medir factores de emisión en un vehículo. Al usar un ciclo de conducción estandarizado se pueden comparar los factores de emisión de distintos vehículos de forma directa, entre sí y con la norma.

Se sabe de secciones anteriores, la norma que determina los límites de emisiones del motor. De la misma norma se extraen los ciclos de trabajo aplicables a los motores que la misma regula. En este caso se tiene un motor que opera bajo un régimen de velocidad constante, debido a los elementos de control que regulan su funcionamiento como grupo electrógeno. Para lo cual se deben seguir los procedimientos en 40 CFR 1065, usando uno de los ciclos de trabajo definidos en 40 CFR 1054.505(b). De los tres ciclos de trabajo descritos en dicha parte, solo uno es aplicable al caso presente. Esto se debe a que uno corresponde a motores “handheld” y otro requiere aplicar carga sobre el motor con incrementos lineales, lo que no es posible con el sistema de alternador y banco de carga del que se dispone. Notar que este último sería posible con el uso de un freno dinamométrico. El ciclo de carga restante se presenta en la tabla 2.3.

Tabla 2.3: Ciclo de Trabajo

Modo N°	Torque %	Factores de Peso w
1	100	0,09
2	75	0,20
3	50	0,29
4	25	0,30
5	10	0,07
6	0	0,05

El ciclo de trabajo de la Tabla 2.3 corresponde a una serie de modos de operación a los que se debe someter el motor durante la toma de datos. Para cada modo de operación se calculan los factores de emisión (e_x) exigidos por la norma y se multiplican por el factor de peso (w) correspondiente. Al sumar los resultados de cada modo se obtiene el factor de emisión. En la ecuación 2.1 se ilustra lo descrito.

$$e_x = \sum_{i=1}^6 e_{x_i} w_i \quad (2.1)$$

donde

- e_x Es el factor de emisión del contaminante x .
- i Es el modo de operación.
- e_{x_i} Es el factor de emisión del contaminante x en el modo de operación i
- w_i Es el factor peso del modo de operación i .

El valor de torque en porcentaje se basa en el torque máximo del motor, el cual se obtiene mediante un procedimiento dictado por norma (40 CFR 1065.510), en el que se lleva a cabo un proceso de mapeo del motor (40 CFR 1065.510(d)). El mapa se genera con el uso de un freno dinamométrico, por lo que no es algo posible para el caso de investigación. Para determinar un valor de torque máximo se usó el generador conectado al banco de resistencia. Con estos equipos se fue incrementando la carga sobre el motor de forma gradual. Eventualmente, se alcanzó una potencia de salida máxima que se encontraba limitada

por los sistemas de seguridad del alternador, pues en este punto se cortaba el paso de corriente y el motor continuaba funcionando. El valor obtenido en dicho punto fue de 6600[W], valor inferior al límite de potencia según el manual (8 [kVA]). Con el objetivo de garantizar la estabilidad de los equipos durante la prueba, se determinó prudente reducir la potencia máxima de salida a 6000[W]. Para garantizar que tal condición de operación sea estable y no resulte en una detención durante la prueba, se operó el motor con dicha carga, monitoreando su temperatura hasta que esta se estabilizó. El criterio usado para considerar que la temperatura se ha estabilizado fue tomado de la norma (40 CFR 1065.530(a)(2)(iii)) y determina que se considera estable cuando se mantiene a $\pm 2\%$ de su valor promedio durante 2 minutos.

Sabemos que la potencia de salida del motor se relaciona con el torque y la velocidad angular [6] de la siguiente forma:

$$P = 2\pi NT \cdot 10^{-3} \quad (2.2)$$

donde

- P Potencia del motor [kW].
- N Velocidad rotacional del cigüeñal [rev/s].
- T Torque ejercido por el motor a través del cigüeñal [$N \cdot m$]

De la ecuación 2.2 se puede apreciar que la potencia del motor se relaciona de forma directa al torque cuando la velocidad es constante. Con esta consideración se determinó que el ciclo de trabajo se puede definir, para este caso particular, como una función de la potencia y no el torque. Esta conclusión resultó ser un error debido a que la eficiencia del generador varía según la carga.

La potencia eléctrica del motor se relaciona con la del MCI según la siguiente fórmula:

$$P_e = P_m \cdot \eta_a \quad (2.3)$$

donde:

- P_e Potencia eléctrica en [W].
- P_m Potencia mecánica en [W].
- η_g Eficiencia alternador.

En la ecuación 2.3 se puede notar que si el valor de eficiencia del generador fuese constante, entonces, la relación entre la potencia de motor y la potencia eléctrica también lo sería. Este supuesto fue usado cuando se llevaron a cabo las pruebas experimentales. Bajo tales condiciones, el ciclo de carga utilizado para las pruebas podría ser basado en la potencia eléctrica y así fue como se formuló e implemento. Dicho ciclo de carga se presenta en la Tabla: 2.4.

Tabla 2.4: Ciclo de Trabajo Según la Potencia Eléctrica

Modo N°	Potencia Electrica [W]	Factores de Peso
1	6000	0,09
2	4500	0,20
3	3000	0,29
4	1500	0,30
5	600	0,07
6	0	0,05

La Tabla 2.4 usa todas las consideraciones anteriormente descritas, siendo las más relevantes el supuesto de que la eficiencia del generador no varía según la carga y que la potencia máxima se encuentra en el punto en que la potencia de salida del generador es de 6000 [W].

Se reconoce que dicho ciclo de trabajo genera valores de potencia del motor que siguen un patrón distinto debido a que la eficiencia del generador varía en función de la carga. Para poder llevar a cabo los cálculos de factores de emisión con los datos obtenidos, será necesario determinar la potencia del motor en

cada uno de los modos de operación usados, según la eficiencia del modo. De la información entregada por el fabricante del generador [8] se tienen los valores de eficiencia entregados en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5: Eficiencia generador

P_e/P_n	η [%]	P_e si $P_n = 8000$ [W]
4/4	83,0	8000
3/4	83,5	6000
2/4	80,0	4000

La fracción P_e/P_n se refiere a la potencia exigida al generador respecto de la potencia nominal. Para la configuración usada se tiene que la potencia nominal es de 8000 [W]. En la tercera columna se puede ver como la eficiencia entregada por el fabricante coincide con solo una de las potencias usadas en el ciclo de trabajo. Es necesario definir la eficiencia del generador bajo las condiciones de funcionamiento de los modos 2, 3, 4 y 5. Para determinar los valores de eficiencia del generador en tales puntos, se generó una extrapolación polinomial de los 3 valores entregados por el fabricante.

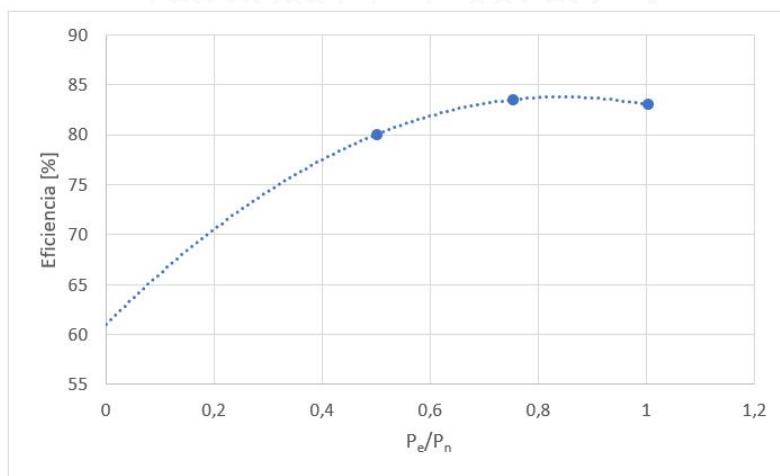


Figura 2.19: Extrapolación polinomial eficiencia generador

Mediante el uso de la extrapolación mostrada en la Figura 2.19 se pueden calcular los valores de eficiencia para los puntos restantes. Con la eficiencia en cada punto de operación se calcula entonces la carga sobre el motor a combustión.

Tabla 2.6: Potencia mecánica a partir de la potencia y eficiencia eléctrica

Modo N°	P_e [W]	Carga eléctrica [%]	η_g [%]	P_m [W]	Carga mecánica [%]
1	6000	100	83,50	7186	100,0
2	4500	75	81,25	5538	77,1
3	3000	50	76,75	3909	54,4
4	1500	25	70,00	2143	29,8
5	600	10,0	64,87	925	12,9
6	0	0	-	0	0

En la Tabla 2.6 se tienen los valores de potencia eléctrica (P_e) con los que se operó el banco de carga. La carga sobre el motor está dada por la columna de potencia mecánica (P_m). Se incluye una sexta columna donde se define la carga en porcentaje para cada modo, considerando la potencia de 6000[W] como el 100 %. Es esta columna la que debió tener la tendencia presente en la columna de carga eléctrica [%]. Es importante

reconocer que la caída de eficiencia a baja carga se debe en gran medida a pérdidas de tipo constante. Tales pérdidas están presentes en el sexto modo. A la hora de calcular los factores de emisión se consideran tales pérdidas.



3 | Protocolo de instalación y puesta a punto del motor y los equipos de medición

En el presente capítulo se recogen las condiciones repasadas en secciones anteriores para la formulación del protocolo de medición ajustado al caso de estudio. En primer lugar se muestra la instalación y puesta a punto del motor y los equipos de medición. Seguido de esto se presenta el proceso experimental al iniciar la toma de datos.

Adicionalmente se invita al lector a consultar el Anexo A si desea informarse sobre detalles específicos al uso de los equipos SEMTECH.

3.1. Instalación y puesta a punto

El primer paso en la puesta a punto de los equipos es la disposición física y conexión de los equipos que no forman parte de las instalaciones del laboratorio. Seguido de esto se inician las secuencias de arranque, se establece la comunicación de los dispositivos digitales y se finaliza con la calibración de los equipos de medición que lo requieran.

3.1.1. Disposición y conexiones

- **Equipos analizadores de gases:** Se disponen en el escape del motor.
- **Computadores:** Los computadores son utilizados para operar los equipos SEMTECH y se disponen junto a estos.
- **Banco de carga:** El banco de carga se conecta a la salida del alternador y se dispone cerca de la cabina del motor.

Con los equipos en su lugar se procede a realizar las conexiones necesarias en el orden propuesto.

- **Conexiones de alimentación:** Se inicia con la conexión de cada equipo a su respectiva fuente de poder. Este paso se ejecuta primero para permitir que los equipos de medición inicien sus secuencias de arranque. En particular los equipos SEMTECH requieren de al menos 30 minutos para alcanzar su temperatura de operación.
- **Conexiones de gases:** Las conexiones de los equipos analizadores a la línea de escape ha de seguir un orden particular para el funcionamiento óptimo de los mismos. Considerando aguas arriba como el inicio, las conexiones de muestreo se conectan en el siguiente orden:

1. BOSCH

2. SEMTECH

3. Testo

4. eFilter

- **Conexiones de señales:** Las conexiones restantes corresponden a todas aquellas que permiten el intercambio de información entre los equipos y sus subsistemas.

3.1.2. Secuencias de Arranque

En este punto se encienden los equipos de medición y se arranca el motor Kubota. Este paso es importante no retrasarlo cuando se busca optimizar el manejo del tiempo, ya que el motor y algunos equipos de medición requieren calentarse. Los equipos de medición pueden establecer comunicación con los computadores durante la secuencia de arranque, pero no podrán hacer mediciones ni procesos de calibración alguno. Como se vio en la sección 2.4.1, el motor debe iniciar la prueba en caliente, lo cual se logra operando el motor en el primer modo de carga (100 %) hasta que su temperatura se estabiliza.

3.1.3. Establecimiento de comunicación entre equipos

En este paso, mientras los equipos se calientan, se procede a establecer comunicación entre los computadores y los equipos SEMTECH. Este proceso se detalla en el Anexo A. El resto de los equipos de medición guardan sus datos de forma local, o la lectura y grabado de sus mediciones es análoga.

3.1.4. Calibración de equipos de medición

El procedimiento de calibración es exclusivo de los equipos SEMTECH. Previo a la calibración se requiere llenar la botella de FID (del inglés Flame Ionization Detector) del SEMTECH D, ya que esta contiene el combustible necesario para el sistema que mide THC. Dentro de los procedimientos de calibración de los equipos SEMTECH se distinguen:

- **Fijación de cero:** Este procedimiento consiste en suministrar al equipo un gas de prueba (N_2) completamente carente de las especies contaminantes que el equipo es capaz de medir. Al iniciar la fijación del cero de una especie en particular, el equipo medirá las cantidades de dicha especie en el gas de calibración y fijará los valores obtenidos como el cero. Este procedimiento es un requisito para iniciar una prueba de medición.
- **Proceso de Span:** El Span (del inglés lapso) se hace con un gas de calibración que contiene una cantidad conocida de la especie que se desea graduar. Si el proceso anterior determinó cuál es el cero, entonces este fija un punto según una magnitud conocida gracias al gas de calibración.
- **Proceso de Audit:** Su traducción del inglés es auditoría. Este proceso ejecuta una medición sobre los gases de calibración, lo que implica que las mediciones registradas por el equipo deben coincidir con los valores conocidos de los gases. Este procedimiento se debe ejecutar después de cada Zero, Span y al finalizar cada prueba de medición. Su resultado permite conocer el “drift” (del inglés deriva o desviación) de la medición y determinar si se requiere calibración.

Es recomendable guardar capturas de pantalla de los resultados de cada uno de estos procedimientos. Los resultados quedarán guardados en el archivo CSV (del inglés Comma Separated Values) generado por el equipo, pero el uso de capturas de pantalla contiene más información y facilita su análisis.

3.2. Toma de Datos

Algunos de los procedimientos que se detallan a continuación ya han sido definidos en la sección 3.1.2 “Secuencias de Arranque”. Esta repetición se considera necesaria para detallar algunas dificultades específicas a estos equipos. A continuación se detallan los pasos a seguir en orden cronológico, para llevar a cabo la toma de datos.

- I Se le añade carga al motor desde el ralentí hasta 100 % en intervalos de 500[W]. En cada aumento de carga, el motor bajará sus revoluciones y las volverá a subir al cabo de unos segundos de forma automática. Antes de sumar más carga al motor se debe esperar a que las revoluciones del mismo se estabilicen. Durante este procedimiento ocurre que a pesar de la regulación automática del acelerador del motor, este es incapaz de alcanzar su velocidad de operación, después de que cierto nivel de carga se le exige. Se estima que este fenómeno ocurre debido al reducido diámetro de la línea de alimentación de GLP, el cual requiere altos niveles de presión para lograr el flujo de combustible que el motor consume a elevados niveles de carga. Para dar respuesta a este fenómeno se desarrolló el siguiente procedimiento. Después de cada incremento de carga se espera a que la velocidad del motor se estabilice, a continuación se aumenta la presión a la salida del cilindro de combustible hasta que el motor alcance su velocidad de operación de 3000 revoluciones por minuto. Notar que este procedimiento se lleva a cabo una única vez, para alcanzar el primer modo de operación al 100 % de carga. En el caso de los otros modos de operación el procedimiento consiste en reducir la carga. En estos casos también ocurre que el motor no es capaz de alcanzar su velocidad nominal de forma automática, para lo cual, se cierra gradualmente el regulador de presión del combustible hasta alcanzar la velocidad nominal. Para asistir en este proceso es que se hizo uso del analizador de gases BOSCH. Este equipo es situado en la cabina del motor para permitir al operador ver el monitor donde el analizador de gases muestra en tiempo real la razón de aire combustible. En la medida en que el motor se acelera al reducir la carga también se percibe que la mezcla se enriquece. Al aumentar la carga el comportamiento es análogo.
- II Se inicia el grabado de datos de los equipos SEMTECH, Testo y eFilter.
- III Para modos distintos del primero se debe reducir la carga siguiendo las indicaciones del paso 1.
- IV Al alcanzar la carga objetivo, se debe esperar hasta que la temperatura del refrigerante se estabilice.
- V Una vez la temperatura del refrigerante se estabiliza, se toma nota de los siguientes datos.
 - Registrar la hora.
 - Registrar temperatura de refrigerante.
 - Registrar temperatura del aire de admisión.
 - Registrar temperatura de escape en cabina.
 - Registrar las revoluciones por minuto.
 - Registrar la corriente en el banco de carga.
 - Registrar el caudal de combustible
- VI Al cabo de 5 minutos se acaba la toma de datos en el modo presente y se puede estar frente a una de dos situaciones:
 - **Los datos tomados corresponden a un modo distinto del último:** Se debe pasar al siguiente modo de operación siguiendo las indicaciones del paso 3.
 - **Los datos tomados corresponden al sexto y último modo de operación:** Se finaliza la toma de datos y se continúa con el proceso de cierre de las mediciones descritos a partir del paso 7.
- VII Se procede finalizar la toma de datos en cada equipo y se apaga el motor.
- VIII Se inicia el proceso de Audit para determinar el “drift” presente en las mediciones.

IX Guardar datos de equipos de medición

X Cerrar sesión en equipos de medición que lo requieran

XI Apagar equipos de medición.



4 | Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de las pruebas de emisiones. Desde los datos sin procesar, se analiza como la información entregada por cada equipo ha de ser trabajada de forma particular para cada objetivo. Adicionalmente se presentan datos anecdóticos de dificultades que surgieron durante la toma de datos y como se les dio respuesta.

4.1. Datos sin procesar

En primer lugar, se debe reconocer que los datos obtenidos son utilizados para más de una finalidad. Primero se busca comparar las emisiones del motor a los límites establecidos por la norma. En segundo lugar se busca utilizar la información obtenida para generar datos de entrada, que aportaran en la optimización del modelo computacional descrito en la motivación del presente trabajo. Se hace esta acotación debido a que dependiendo del objetivo y otras condiciones, los datos obtenidos serán procesados de forma distinta.

Una tabla de las especies de interés, los equipos de las cuales se obtuvieron, sus unidades y otros elementos de interés, se presenta a continuación:

Tabla 4.1: Especies, equipos y objetivos

	Equipo	Unidad medida	Interes de Estudio	Unidad objetivo
NO_x	Testo	ppm	EPA, GT-Power	g/kWh, ppm
CO	Semtech	ppm	EPA, GT-Power	g/kWh, ppm
CO_2	Testo	ppm		g/kWh, ppm
$MP_{2,5}$	eFilter			
THC	Semtech	ppmC	EPA, GT-Power	g/kWh, ppmC

En la Tabla: 4.1 se pueden apreciar las unidades en las que se deben presentar los datos, dependiendo de la finalidad. Los datos son entregados por los equipos de medición en concentraciones volumétricas. Se puede apreciar que los datos destinados a GT-Power no requieren de ningún tipo de conversión, mientras que la normativa requiere del cálculo de factores de emisión a partir de dichas concentraciones.

4.2. Procesamiento de datos para normativa EPA

Desde el prisma de la normativa se busca comparar los límites impuestos a las emisiones del motor en particular. Para hacer dicha comparación la normativa hace uso del concepto de factor de emisión. Dependiendo del equipo del que se trate el factor de emisión tendrá unidades particulares. En general tendrán la forma de gramos de contaminantes sobre alguna unidad de trabajo. Esta unidad de trabajo podría ser definida en vatios, o bien, la distancia recorrida por un vehículo. Para transformar los datos obtenidos en factores de emisión la norma dicta los pasos y cálculos a seguir. En primer lugar se debe reconocer que la

información registrada por los equipos es de carácter continuo y corresponde a la concentración volumétrica de cada contaminante en cada segundo. La unidad específica es la de partes por millón (ppm). La unidad objetivo es de gramos sobre kilovatio hora (g/kWh). El método de cálculo propuesto por la normativa (40 CFR 1065.650(b)(2)) asociado a equipos de medición continua, en pruebas de carga discreta y a velocidad constante, se presenta a continuación.

$$e_x = \frac{\bar{m}_x}{\bar{P}} \quad (4.1)$$

donde:

- e_x Es el factor de emisión del contaminante x.
- \bar{m}_x Es el flujo másico medio del contaminante x [g/h].
- \bar{P} Es la potencia promedio [kWh].

El lector recordara de la Tabla: 2.4 que existe un modo de operación en que la potencia es cero. La norma dicta que para cumplir con este modo de operación, el valor de torque debe encontrarse bajo el 5 % del valor del modo 1. En la configuración presente en este experimento el valor mínimo de torque que era posible lograr se encontraba al eliminar toda carga del generador. En este punto el torque sobre el cigüeñal corresponde al necesario para mover el generador, su ventilador y vencer resistencias como las asociadas a roces entre partes móviles. Para obtener un valor de potencia en este modo de operación, se podría asumir que la eficiencia del generador esta asociada a perdidas variables y otras constantes. Adicionalmente se supondrá que existen perdidas que varían en función de la velocidad del motor, como lo seria la resistencia que impone el ventilador del generador. Dentro de las perdidas variables definidas en la literatura [5], la de mayor magnitud (no asociada a perdidas mecánicas) son las perdidas en el cobre de los devanados. Estas perdidas están asociadas al calentamiento del devanado, debido a la resistencia eléctrica del mismo. 4.2.

$$P_c = 3 \cdot I^2 \cdot R \quad (4.2)$$

Donde:

- P_c Son las perdidas en vatios.
- I Es la corriente eléctrica [A].
- R Es la resistencia eléctrica del devanado [Ω].

De la ecuación 4.2 se puede entender que tales perdidas son nulas cuando el valor de la corriente es 0. De esto se puede deducir que cualquier perdida en dicho punto seria una de carácter constante u asociada a la velocidad de giro. Las perdidas en el generador se reducen entonces un grupo constante y las que varían según la carga y la constante de resistencia del devanado. Tanto la resistencia del devanado como las perdidas constantes son valores desconocidos, pero, usando los valores de eficiencia dados por el fabricante se podrían calcular.

$$\eta_g = \frac{P_e}{P_e + 3I^2R + p_k} \quad (4.3)$$

Donde:

- η_g Es la eficiencia del generador.
- P_e Es la potencia eléctrica de salida.
- p_k Es la suma de todas las perdidas de comportamiento constante.

Del fabricante se tienen valores de eficiencia para potencias eléctricas de salida de 8[kW], 6[kW] y 4[kW], mientras que del experimento se tienen valores de corriente para potencias eléctricas de 6[kW] y 4,5[kW]. Resolviendo el sistema de ecuaciones para dichos valores se obtiene un valor de pérdidas constantes de 849,8 [W]. Este valor corresponde a la potencia mecánica entregada por el motor en el modo 6. Es importante entender que sobre estimar el valor de potencia en un modo de operación resultaría en un factor de emisión subestimado. Por este motivo se usará como valor de potencia del 5 % de la potencia del modo 1, es decir, $P_6 = 359,3$. Calculando el factor de emisión del sexto modo con este valor de potencia, inferior al calculado a partir de la ecuación 4.3, se obtiene un resultado mayor.

Teniendo la potencia de cada modo de operación, faltaría calcular el flujo másico de cada contaminante, en cada modo. Para determinar el flujo másico de un contaminante en particular es necesario contar, entre otras cosas, con el caudal de gases de escape. Durante la toma de datos se notó que los equipos SEMTECH no registraban el caudal másico. Se estima que este problema se pudo presentar debido a los altos niveles de condensación que se tenían en el sistema. Se sabe de otras pruebas que los equipos para determinar caudal másico se encuentran operativos. Una diferencia de la configuración de esta investigación y otras pruebas realizadas, es el combustible utilizado. Es posible que este pudo contribuir a la condensación en la línea de escape, generando acumulaciones de agua en las aperturas del flujómetro que conectan a los sensores de presión. Se sabe también que los niveles de condensación en el escape aumentan aguas abajo. Se estima entonces que el uso de GLP, sumado a la gran distancia entre el motor y los puntos de muestreo, pudo generar los niveles de condensación que imposibilitaron obtener mediciones de flujo volumétrico y másico. Desafortunadamente, no era factible tomar las muestras de gases más cerca del motor, sin embargo, es un punto del cual se hace registro y que se espera mejorar en las instalaciones a futuro. No pudiendo solucionar la causa raíz, se optó por estimar dicho valor usando métodos publicados en el diario oficial de la unión europea [4].

Para la determinación del caudal másico de escape ($q_{mew,i}$ [kg/s]) se emplea un método que lo relaciona con el caudal másico instantáneo de combustible ($q_{mf,i}$ [kg/s]), la relación aire-combustible estequiométrica (A/F_{st}) y el coeficiente de exceso de aire instantáneo (λ_i) según la ecuación 4.4.

$$q_{mew,i} = q_{mf,i} \times (1 + A/F_{st} \times \lambda_i) \quad (4.4)$$

La relación aire combustible instantánea se calcula a partir de las concentraciones de los gases de escape y la relación molar entre sus elementos químicos según la siguiente ecuación:

$$\lambda_i = \frac{\left(100 - \frac{c_{CO} \times 10^{-4}}{2} - c_{HC_w} \times 10^{-4}\right) + \left(\frac{\alpha}{4} \times \frac{1 - \frac{2 \times c_{CO} \times 10^{-4}}{3,5 \times c_{CO_2}}}{1 + \frac{2 \times c_{CO} \times 10^{-4}}{3,5 \times c_{CO_2}}} - \frac{\varepsilon}{2} - \frac{\delta}{2}\right) \times (c_{CO_2} + c_{CO} \times 10^{-4})}{4,764 \times \left(1 + \frac{\alpha}{2} - \frac{\varepsilon}{2} + \gamma\right) \times (c_{CO_2} + c_{CO} \times 10^{-4} + c_{HC_w} \times 10^{-4})} \quad (4.5)$$

donde:

- c_{CO} Es la concentración en base seca de CO [ppm]
- c_{CO_2} Es la concentración en base seca de CO₂ [%]
- c_{HC_w} Es la concentración en base húmeda de HC [ppm]
- α Es la relación molar de hidrógeno (H/C)
- ε Es la relación molar de oxígeno (O/C)
- δ Es la relación molar de nitrógeno (N/C)
- γ Es la relación molar de azufre (S/C)

Mediante el uso de la ecuación 4.5 se calculó el valor del coeficiente de exceso de aire para cada valor obtenido de los equipos de medición. Teniendo dicho valor se puede emplear entonces la ecuación 4.4 para obtener los valores de caudal másico de escape en cada punto. Es importante precisar que las mediciones obtenidas para el caudal másico de combustible no son instantáneas, sino, corresponden a valores registrados de forma

análoga mediante la lectura del flujómetro de combustible. Para cada modo de operación del ciclo de carga se tiene un único valor de caudal másico de combustible. Esta discrepancia con el método genera un error adicional en la medición indirecta del flujo de escape. Afortunadamente al operar en condiciones estabilizadas y sin variaciones dentro de cada modo de operación, dicho error no debiese ser tan significativo.

Teniendo el flujo másico de escape, el método propone el calculo de la masa de contaminante mediante la siguiente ecuación:

$$m_{x,i} = u_x \cdot c_{x,i} \cdot q_{mew,i} \quad (4.6)$$

donde:

- $m_{x,i}$ Es la masa del contaminante x en [g/s].
- u_x Es la relación entre la densidad del contaminante x y la densidad global del escape tal como se muestra en la Tabla: 4.2.
- $c_{x,i}$ Es la concentración medida del contaminante x en [ppm].
- $q_{mew,i}$ Es el caudal másico de escape en [kg/s].
- i Es el numero de la medición.

A continuación se muestra la Tabla: 4.2, modificada de la normativa correspondiente a la ecuación 4.6.

Tabla 4.2: Densidades de contaminantes relativas al gas de escape según combustible

Combustible	ρ_e [kg/m ³]	Componente o contaminante					
		NO_x	CO	HC	CO_2	O_2	CH_4
		ρ_x [kg/m ³]					
		2,053	1,250	0,653	1,9636	14277	0,716
		u_x					
GLP	1,2811	0,001602	0,000976	0,000510	0,001533	0,001115	0,000559

La Tabla: 4.2 es una síntesis de la original, conteniendo solo la información relativa al GLP. Con el uso de esta tabla, los valores de caudal calculados con la ecuación 4.4 y las concentraciones de escape en partes por millón ya se tienen todos los elementos para determinar los factores de emisión. Solo resta referirse a las correcciones que la norma EPA (40 CFR 1065.650(c)(1)) propone hacer sobre los datos, previo al calculo de factores de emisión. Dentro de las correcciones propuestas solo una es pertinente referir en este caso y corresponde a la de corregir los valores medidos de base seca a base húmeda. La corrección de base seca a húmeda se basa en el uso de factores de corrección cuyos valores dependen de los productos de la combustión y las propiedades del combustible. Los equipos SEMTECH calculan los factores de corrección y proporcionan al usuario los datos de las mediciones tanto en base seca como húmeda. A continuación se presenta la Tabla: 4.3 que muestra los limites establecidos por norma y los resultados obtenidos.

Tabla 4.3: Comparación de Límites de emisión

HC + NOx	CO
12,7 [g/kWh]	610 [g/kWh]

(a) Límites de emisiones EPA

HC + NOx	CO
14,7 [g/kWh]	788 [g/kWh]

(b) Factores de emisión motor Kubota

4.3. Procesamiento de datos para su uso en el modelo computacional

GT-Power es un programa usado para predecir cantidades asociadas a la operación y rendimiento de un motor. Este permite determinar cantidades difíciles o imposibles de medir como las temperaturas

iniciales al cierre de la válvula de entrada, cantidad de gases residuales, y propiedades de la mezcla aire combustible. Para determinar tales cantidades se modela un MCI mono cilíndrico que utiliza como datos de entrada, las concentraciones volumétricas de los gases de escape y el modo de operación asociado. Esto quiere decir que para cada uno de los 6 modos de operación descritos en el ciclo de trabajo, se genera el modelo computacional correspondiente y se le suministran los datos de entrada. Estos datos corresponden a THC [ppmC], CO [ppm] y NO [ppm]. Para este efecto se construye una tabla que indica los promedios de los componentes asociados a cada ciclo de carga. La potencia del motor corresponde en este caso a la calculada en el cigüeñal (P_m) a partir de la potencia medida en la salida del generador (P_e).

Tabla 4.4: Resumen de datos de entrada para GT-Power

Modo de operación	Potencia [W]	CO [ppm]	NO_x [ppm]	THC [ppmC]
1	7.186	58.530,5	0,0	1.169,5
2	5.538	63.631,3	0,0	1.494,0
3	3.909	58.812,8	0,0	1.621,4
4	2.143	48.940,9	23,9	2.259,0
5	924,9	31.502,2	9,8	1.234,6
6	359,3	11.039,9	12,7	350,1

4.4. Consideraciones para futuras mediciones de emisiones

Durante las mediciones surgieron problemas que dificultaron los procesos y aumentaron la incertidumbre o error de los resultados. Algunos de estos problemas podrían ser eliminados en futuras mediciones. En esta sección se recogen tales experiencias y se presentan junto a propuestas que puedan servir para buscarles solución.

a) Uso de un generador y banco de carga como freno dinamométrico

La combinación de un generador eléctrico y un banco de carga es una practica alternativa para generar carga sobre un MCI. Esta configuración es especialmente conveniente cuando el motor en cuestión forma parte de un grupo electrógeno. Para reducir el error asociado a cálculos de potencia antes y después del generador, sería recomendable caracterizar la maquina eléctrica previamente. Existen métodos experimentales para determinar las perdidas en el generador, y en particular, aquellas asociadas a la velocidad de giro, como lo son las perdidas por roce en rodamientos o por efectos del ventilador.

La generación de información sobre el generador mediante procedimientos experimentales indudablemente serviría para reducir errores de calculo en mediciones de emisiones, aunque también ha de tenerse presente que surgen aún más elementos a considerar si se quisiera usar esta configuración en un ciclo de trabajo de carácter continuo.

b) Flujo de escape y condensación

La ausencia de una lectura de flujo de escape por parte de los equipos SEMTECH pudo ocurrir por exagerados niveles de condensación. Para determinar si el uso de GLP propició la ocurrencia de este fenómeno, se podrían realizar pruebas experimentales comparando la operación del motor alimentado con gasolina y GLP por separado. Además se reconoce que aún sin hacer tales pruebas, es recomendable adaptar el tubo de escape del motor en la cabina, para así permitir el uso de los equipos SEMTECH en dicho punto. Esta adaptación tendría también el beneficio de aumentar la precisión de otros datos captados por los equipos, como THC y NO_x .

c) Suministro de GLP al motor

El fenómeno percibido durante las mediciones, en que fue necesario aumentar la presión de salida del cilindro de GLP en la medida que se aumentaba la carga sobre el motor, es otro que se recomienda solucionar. Si fue necesario variar la presión de salida del cilindro, aún cuando el motor cuenta con un regulador de GLP en la admisión, entonces parece ser que el diámetro de la línea de suministro de gas es insuficiente para los

niveles de flujo requeridos. Su evaluación y corrección también es recomendada para futuras pruebas sobre el motor.



5 | Conclusiones

- **Resultados normativa:** El motor no cumplió con los márgenes impuestos por la normativa, superando los límites entre un 15 % y 30 %. Considerando que el motor es del año 2004 y ha sido ampliamente usado, no es extraño que este no cumpla los límites. Podría ser el caso que si cumpliera al usar un ciclo de carga que se ajuste más a la norma y con menos fuentes de error como la medición indirecta de flujo de escape. Aun así al menos el orden de magnitud de los valores es un buen indicador de la calidad de la medición.
- **Resultados GT-Power:** Respecto de los datos solicitados por GT-Power es positivo que los valores pueden ser ingresados en unidades de partes por millón, siendo estas las unidades con menos cálculos y aproximaciones que entregan los equipos de medición. Adicionalmente se pudo asociar de forma satisfactoria cada unidad de especie contaminante a un ciclo de trabajo, tal y como el programa lo requiere.
- **Resultados metodología normativa:** Se identificó que la normativa aplicable al motor Kubota GD972-E2-BBH corresponde al CFR40/U/1054, mientras que el grueso de los procedimientos requeridos para las pruebas de emisión se encuentran en el CFR40/U/1065.
- **Resultados puesta a punto:** Se definió exitosamente un protocolo para la puesta a punto del motor y equipos de medición que se ajusta a la norma y condiciones del laboratorio de la universidad.

Bibliografía

- [1] Dekati efilter brochure. <https://www.testo.com/es-CL/testo-340/p/0632-3340#tab-details>. Accedido por ultima vez el 20 de enero de 2022. 2.1
- [2] e-cfr: Electronic code of federal regulations. <https://www.ecfr.gov/>. Accedido por ultima vez el 20 de enero de 2022. 2.3
- [3] testo 340 - analizador de gases de combustión para la industria. <https://www.testo.com/es-CL/testo-340/p/0632-3340#tab-details>. Accedido por ultima vez el 20 de enero de 2022. 2.1
- [4] European Commission. Regulation (eu) 2016/427 of the european commission. *Official Journal of the European Union*, 59(3):1–85, 2016. 4.2
- [5] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley Jr, and S. D. Umans. *Máquinas Eléctricas*. McGraw-Hill, México, 2003. 4.2
- [6] J. B. Heywood. *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill Education, 2018. 2.4.1
- [7] Kubota Corporation. *Workshop Manual Gasoline, LPG, Natural Gas Engine WG972-E2, DF972-E2, DG972-E2*. 2.1
- [8] Mecc Alte SpA. *ECP3 Datasheet*. 2.1, 2.4.1
- [9] RF. *Instrucciones de manejo BEA 150/250/350 - Descripción del equipo*. Robert Bosch S.A. 2.1
- [10] V. D. Shahinian. *On-Vehicle Diesel Emission Analyzer SEMTECH-D User's Manual*. Sensors, Inc. 2.1, A.1
- [11] V. D. Shahinian. *On-Vehicle Gasoline Emission Analyzer SEMTECH-G User's Manual*. Sensors, Inc. 2.1, A.1