

# PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

## FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

### EVALUACIÓN DE LOS DATOS DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE CALCULADO POR MÓDULOS DE CONTROL ELECTRÓNICO EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico, que presenta el bachiller:

**MAURICIO ANDRÉS GÓMEZ ORMEÑO**

**ASESOR: Dr. JULIO CÉSAR CUISANO EGÚSQUIZA**

Lima, noviembre de 2015

## RESUMEN

Uno de los retos más críticos que enfrenta la industria del motor Diésel es cómo mejorar la economía del combustible respetando los límites establecidos en las emisiones. En estas tecnologías, son esenciales las mediciones precisas de consumo de combustible para el propósito de control y por lo tanto juegan un papel importante en el desarrollo de técnicas para la reducción de emisiones y mejora del consumo de combustible. Sin embargo, no todos los métodos ni técnicas de medición del combustible ofrecen una adecuada precisión o utilidad de empleo.

El presente trabajo de tesis realizó un estudio experimental sobre cuatro técnicas distintas de medición de combustible a fin de determinar las desviaciones entre cada uno de ellas y su complejidad de implementación. Estas maneras de medición constan de un método gravimétrico, un balance de carbono considerando la composición del combustible y el resultado de las emisiones, un método de flujo másico medido con un coriolis y el valor calculado por el lazo de control del ECM del motor.

Se realizaron ensayos en dos motores, Caterpillar y Cummins, acumulando 183 puntos de prueba "*par-velocidad*", los cuales brindaron amplia información que permitió un trabajo estadístico y manejo de las incertidumbres muy preciso. Se registraron datos de manera simultánea de la balanza, cronómetro, coriolis y analizador de gases empleados en la experimentación. También se contó con los ECM de los motores, los cuales brindaron información sobre el consumo de combustible con un muestreo de un segundo.

Después de evaluar los diversos resultados obtenidos se determinó que el método gravimétrico tiene una incertidumbre ajustable por el usuario a partir de los tiempos de espera entre toma de datos; los ECM de los motores del laboratorio de energía de la PUCP no arrojan información confiable respecto al consumo de combustible; la principal debilidad del método de balance de carbono es la cantidad y complejidad de los cálculos necesarios involucrados en la determinación del consumo de combustible y que el método másico empleando un medidor de coriolis fue para nuestro caso el que arrojó los resultados más confiables.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TÍTULO : EVALUACIÓN DE LOS DATOS DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE CALCULADO POR MÓDULOS DE CONTROL ELECTRÓNICO EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

ÁREA : Energía # 367

PROPUESTO POR : Dr. Julio Cuisano Egúsquiza

ASESOR : Dr. Julio Cuisano Egúsquiza

TESISTA : Mauricio Andrés Gómez Ormeño

CÓDIGO : 20095649

FECHA : 14 de mayo de 2015

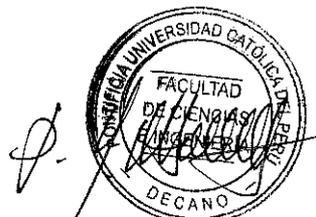


**DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:**

Uno de los retos más críticos que enfrenta la industria del motor diesel es cómo mejorar la economía del combustible respetando los límites establecidos en las emisiones. En estas tecnologías, son esenciales las mediciones precisas de consumo de combustible para el propósito de control y por lo tanto juegan un papel importante en el desarrollo de técnicas para la reducción de emisiones y mejora del consumo de combustible. Sin embargo, no todos los métodos ni técnicas de medición del combustible ofrecen una adecuada precisión o, debido a su complejidad, utilidad de empleo.

En ese sentido, se requiere una profunda comparación entre los diversos métodos y técnicas de medición del consumo de combustible diesel que puedan servir como herramienta en experimentaciones y como punto de partida en los proyectos de mejora de tecnologías de combustible.

El presente trabajo de tesis realizará un estudio experimental sobre cuatro técnicas distintas de medición de combustible a fin de determinar las desviaciones entre cada uno de ellos y su complejidad de implementación. El principal objetivo de la tesis es analizar, validar y contrastar los datos del consumo de combustible calculado por módulos de control electrónico en un motor Diesel marca Cummins y en uno marca Caterpillar, instalados en un banco de pruebas. Estas cuatro maneras de medición constan de un método gravimétrico, un balance de carbono considerando la composición del combustible y el resultado de las emisiones, un método de flujo másico medido con un coriolis y el valor calculado por el lazo de control del ECM del motor.





**TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**EVALUACIÓN DE LOS DATOS DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE  
CALCULADO POR MÓDULOS DE CONTROL ELECTRÓNICO EN MOTORES  
DE COMBUSTIÓN INTERNA**

Introducción

1. Estado del arte
2. Metodología experimental
3. Implementación del banco de pruebas
4. Análisis de resultados

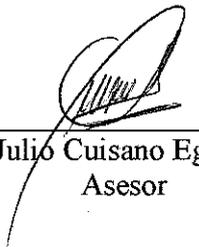
Observaciones y Recomendaciones

Conclusiones

Bibliografía

Anexos

*Máximo: 100 páginas*

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Julio Cuisano Egúsqiza  
Asesor









*A mis padres por el incondicional apoyo  
en la culminación de mi carrera.*

*A mis hermanos por enseñarme con el ejemplo.*

*A mi abuelita en el cielo.*

## ÍNDICE

Introducción.....	1
<b>CAPÍTULO 1: Estado del arte .....</b>	<b>3</b>
<b>CAPÍTULO 2: Metodología experimental.....</b>	<b>17</b>
2.1. Matriz de ensayos.....	17
2.1.1.Matriz de ensayos en el motor Cummins .....	18
2.1.2.Matriz de ensayos en el motor Caterpillar .....	20
2.2. Parámetros de desempeño y emisiones calculados.....	24
2.2.1.Potencia efectiva.....	24
2.2.2.Consumo de aire húmedo y aire seco.....	24
2.2.3.Consumo específico de combustible .....	26
2.2.4.Relación aire/combustible .....	26
2.2.5.Consumo de combustible mediante el análisis de emisiones .....	27
2.2.6.Consumo de combustible por el método gravimétrico .....	27
2.2.7.Manejo de las incertidumbres .....	28
<b>CAPÍTULO 3: Implementación del banco de pruebas.....</b>	<b>29</b>
3.1. Equipos de bancada .....	29
3.1.1.Motor Diesel Cummins .....	29
3.1.2.Motor Diesel Caterpillar.....	31
3.1.3.Dinamómetro de bancada .....	33
3.1.4.Módulo de control del banco de pruebas.....	33
3.2. Dispositivos de medición y control.....	34
3.2.1.Medición de aire admitido al motor .....	34
3.2.2.Medidor de flujo másico .....	36
3.2.3.Medidor de emisiones Testo 350XL.....	37
3.2.4.Balanza electrónica .....	40
3.2.5.Cronómetro digital.....	42
3.2.6.Medición de las condiciones del ambiente.....	42
3.2.7.Programa Insite del motor Cummins.....	43
3.2.8.Programa Electronic Technician del motor Caterpillar.....	44
3.3. Configuración y conexiones .....	45
3.3.1.Esquema del banco de pruebas .....	45
3.3.2.Toma de aire .....	45

3.3.3.Retorno de combustible .....	46
3.3.4.Analizador de gases.....	48
3.3.5.Suministro de combustible .....	49
3.3.6.Conexión con los ECM de los motores.....	49
<b>CAPÍTULO 4: Análisis de resultados .....</b>	<b>52</b>
4.1. Consumo de combustible obtenido por el método gravimétrico y el medidor de flujo másico coriolis.....	53
4.2. Consumo de combustible obtenido mediante el balance de carbono y el medidor de flujo másico coriolis.....	58
4.3. Consumo de combustible obtenido a través del ECM del motor y el medidor de flujo másico coriolis.....	62
4.4. Estudio de las incertidumbres en la obtención de la medida del consumo de combustible.....	66
Conclusiones .....	71
Recomendaciones .....	72
Bibliografía .....	73
Bibliografía complementaria.....	75
Anexos	

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 - Consumo de combustible según experimentaciones pasadas en el motor Cummins	18
Tabla 2.2 – Matriz de ensayos propuesta para el motor Cummins .....	19
Tabla 2.3 - Consumo de combustible según experimentaciones pasadas en el motor Caterpillar	21
Tabla 2.4 – Matriz de ensayos propuesta para el motor Caterpillar .....	22
Tabla 3.1 - Datos técnicos del motor Diesel marca Cummins.....	30
Tabla 3.2 - Datos técnicos del motor Diesel marca Caterpillar.....	31
Tabla 3.3 – Datos técnicos del dinamómetro de bancada.....	33
Tabla 3.4 - Datos técnicos del analizador de emisiones .....	40
Tabla 3.5 – Datos técnicos de la balanza Ohaus T21P .....	41
Tabla 4.1 – Condiciones mínimas para lograr que 001.....	54



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Medición por el método gravimétrico .....	4
Figura 1.2 – Esquema de un medidor coriolis .....	6
Figura 1.3 – Rango de medición confiable del medidor coriolis CMF010M .....	7
Figura 1.4 – Esquema del medidor tipo puente de Wheatstone para pequeños flujos .....	8
Figura 1.5 – Esquema del medidor de desplazamiento positivo .....	9
Figura 1.6 – Esquema del medidor de desplazamiento positivo servo controlado .....	9
Figura 1.7 – Interfaz de adquisición de data del programa Insite de Cummins .....	10
Figura 1.8 – Interfaz de adquisición de data del programa Electronic Technician de Caterpillar .....	11
Figura 1.9 – Principio de medición del AVL 733S .....	12
Figura 1.10 - Sistema de monitoreo portable de emisiones CATI (PEMS) .....	13
Figura 3.1 – Disposición del motor Diesel Cummins.....	30
Figura 3.2 – Motor Diesel Cummins.....	31
Figura 3.3 – Disposición del motor Diesel Caterpillar .....	32
Figura 3.4 – Motor Diesel Caterpillar .....	32
Figura 3.5 – Dinamómetro de bancada.....	33
Figura 3.6 – Panel de control de los motores de banco.....	34
Figura 3.7 - Tacómetro digital y regulador de torque.....	34
Figura 3.8 – Tanque amortiguador con placa orificio .....	35
Figura 3.9 – Manómetro digital .....	36
Figura 3.10 – Medidor de flujo másico tipo coriolis CMF010M.....	37
Figura 3.11 - Analizador testo 350 XL .....	39
Figura 3.12 – Balanza Ohaus T21P .....	41
Figura 3.13 – Cronometro <i>Traceable</i> de <i>Control Company</i> .....	42
Figura 3.14 – Higrómetro analógico.....	42
Figura 3.15 - Programa <i>Insite</i> de Cummins .....	43
Figura 3.16 – Programa Electronic Technician de Caterpillar .....	44
Figura 3.17 - Configuración experimental del motor instalado en banco de pruebas .....	45
Figura 3.18 – Conexiones de la toma de aire.....	46
Figura 3.19 – Retorno de combustible en motor Caterpillar .....	47
Figura 3.20 – Retorno de combustible en motor Cummins.....	47
Figura 3.21 – Montaje de la sonda del testo en el motor Caterpillar .....	48

Figura 3.22 – Montaje de la sonda del Testo en el motor Cummins .....	48
Figura 3.23 – Configuración del suministro de combustible .....	49
Figura 3.24 – Elementos de conexión al ECM Caterpillar .....	50
Figura 3.25 – Conexión al ECM Caterpillar.....	50
Figura 3.26 – Elementos de conexión al ECM Cummins.....	51
Figura 4.1 – Consumo de Diesel a 2000 rpm / Gravimetría vs Coriolis (Cummins). .....	55
Figura 4.2 – Consumo de Diesel a 1800 rpm/Gravimetría vs Coriolis (Cummins) .....	55
Figura 4.3 – Consumo de Diesel a 1600 rpm/Gravimetría vs Coriolis (Cummins) .....	56
Figura 4.4 – Consumo de Diesel a 1400 rpm/Gravimetría vs Coriolis (Cummins) .....	56
Figura 4.5 – Consumo de Diesel a 2200 rpm/Gravimetría vs Coriolis (Caterpillar) .....	57
Figura 4.6 – Consumo de Diesel a 1200 rpm/Gravimetría vs Coriolis (Caterpillar) .....	57
Figura 4.7 – Consumo de Diesel a 2000 rpm / Balance de carbono vs Coriolis (Cummins).....	59
Figura 4.8 – Consumo de Diesel a 1800 rpm / Balance de carbono vs Coriolis (Cummins).....	59
Figura 4.9 – Consumo de Diesel a 1600 rpm / Balance de carbono vs Coriolis (Cummins).....	60
Figura 4.10 – Consumo de Diesel a 1400 rpm / Balance de carbono vs Coriolis (Cummins).....	60
Figura 4.11 – Consumo de Diesel a 2200 rpm / Balance de carbono vs Coriolis (Caterpillar) ....	61
Figura 4.12 – Consumo de Diesel a 1200 rpm / Balance de carbono vs Coriolis (Caterpillar) ....	61
Figura 4.13 – Consumo de Diesel a 2000 rpm / ECM vs Coriolis (Cummins) .....	63
Figura 4.14 – Consumo de Diesel a 1800 rpm/ECM vs Coriolis (Cummins).....	63
Figura 4.15 – Consumo de Diesel a 1600 rpm/ECM vs Coriolis (Cummins).....	64
Figura 4.16 – Consumo de Diesel a 1400 rpm/ECM vs Coriolis (Cummins).....	64
Figura 4.17 – Consumo de Diesel a 2200 rpm/ECM vs Coriolis (Caterpillar) .....	65
Figura 4.18 – Consumo de Diesel a 1200 rpm/ECM vs Coriolis (Caterpillar) .....	66
Figura 4.19 – Comportamiento de las incertidumbres a 2000 rpm (Cummins) .....	67
Figura 4.20 – Comportamiento de las incertidumbres a 1800 rpm (Cummins) .....	68
Figura 4.21 – Comportamiento de las incertidumbres a 1600 rpm (Cummins) .....	68
Figura 4.22 – Comportamiento de las incertidumbres a 1400 rpm (Cummins) .....	69
Figura 4.23 – Comportamiento de las incertidumbres a 2200 rpm (Caterpillar) .....	69
Figura 4.24 – Comportamiento de las incertidumbres a 1200 rpm (Caterpillar) .....	70

## LISTA DE SÍMBOLOS

$C_xH_yS_zN_w$	Fórmula general de los combustibles
CO	Monóxido de carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
HC	Hidrocarburos no quemados
H <sub>2</sub> O	Fórmula química del agua
N <sub>2</sub>	Nitrógeno molecular
NO <sub>x</sub>	Óxidos de nitrógeno
O <sub>2</sub>	Oxígeno molecular
SO <sub>2</sub>	Dióxido de azufre
C <sub>d</sub>	Coefficiente de descarga de la placa orificio
cec	Consumo específico de combustible [g/kW.h]
$\dot{m}$	Consumo de combustible diesel [g/h]
P	Presión del aire admitido [Pa]
CC <sub>g</sub>	Consumo de combustible obtenido por el método gravimétrico [g/s]
CC <sub>lm</sub>	Consumo de combustible obtenido por el balance de carbono [g/s]
$\dot{m}$	Consumo de aire húmedo [kg/h]
$\dot{m}$	Consumo de aire seco [kg/h]
	Régimen de giro [rpm]
	Presión atmosférica [kPa]
	Potencia efectiva [kW]
	Presión del agua a temperatura ambiente [kPa]
	Constante del aire [kJ/kg.K]
	Constante del aire seco [kJ/kg.K]
	Constante del vapor de agua [kJ/kg.K]
RAC	Relación aire/combustible estequiométrica
T	Torque al freno [N.m]
	Temperatura ambiente [°C]
T <sub>k</sub>	Temperatura del aire [K]
	Humedad absoluta [kg/kg]
	Densidad del aire [kg/m <sup>3</sup> ]
λ	Factor lambda
	Humedad relativa [%]

## INTRODUCCIÓN

El motor Diesel es considerado un motor térmico de combustión interna y de encendido por compresión, cuya función es la de transformar la energía química del combustible (diesel) en energía mecánica de movimiento aplicado al tren motriz, permitiendo el desplazamiento de la unidad [1].

Los motores Diesel son utilizados no solo en el sector de transporte sino en una amplia gama de sectores industriales. Por ejemplo, los definidos como “motores Diesel de aplicación no viales” son motores de combustión interna utilizados para otros propósitos diferentes al transporte, como en actividades de construcción y minería [2].

Uno de los retos más críticos que enfrenta la industria del motor Diesel es cómo mejorar la economía del combustible respetando los límites establecidos en las emisiones [3]. Las tecnologías actuales enfocadas en mejorar la eficiencia del combustible y en reducir las emisiones son altamente dependientes de las tecnologías de modificación de la combustión y de sistemas de control avanzado en tiempo real. Las tecnologías de modificación de la combustión se orientan a ayudar o complementar el desempeño de los motores. En estas tecnologías, mediciones precisas de consumo de combustible son esenciales para el propósito de control y por lo tanto juegan un papel importante en el desarrollo de técnicas para la reducción de emisiones y mejora del consumo de combustible [3].

Sin embargo, no todos los métodos ni técnicas de medición del combustible ofrecen una adecuada precisión o, debido a su complejidad, utilidad de empleo. Por ejemplo, el Módulo de Control Electrónico (ECM) de un motor muchas veces no considera todas las variables reales y la función de transferencia que utiliza para predecir el consumo de combustible puede estar alejada de la realidad [4].

En ese sentido, se requiere una profunda comparación entre los diversos métodos y técnicas de medición del consumo de combustible diesel que puedan servir como herramienta en experimentaciones y como punto de partida en los proyectos de mejora de tecnologías de combustible.

El trabajo de tesis realizará un estudio experimental sobre la comparación de cuatro técnicas distintas de medición de combustible a fin de determinar las desviaciones entre cada uno de ellos y su complejidad de implementación. El presente documento

expondrá la metodología que se ha llevado a cabo para lograr esta comparación en las que las tomas de consumo de combustible fueron realizadas simultáneamente en un motor Diesel marca Cummins y en uno marca Caterpillar instalados en un banco de pruebas. Estas cuatro maneras de medición constan de un método gravimétrico, un balance de carbono considerando la composición del combustible y el resultado de las emisiones, un método de flujo másico medido con un coriolis y el valor calculado por el lazo de control del ECM del motor.

### **Objetivo general**

Analizar, validar y contrastar los datos del consumo de combustible calculado por módulos de control electrónico en motores Diesel.

### **Objetivos específicos**

- Revisar bibliografía técnica relacionada con el análisis del consumo de combustible en motores Diesel empleando sistemas de medición externos e internos (ECM).
- Desarrollar una metodología experimental para la toma de datos, a través de cuatro vías en simultáneo, para determinar el consumo de combustible.
- Determinar los parámetros estándares del motor Diesel para diversas condiciones de carga y diversos regímenes de giro, los cuales determinaran la red de puntos de ensayo.
- Analizar estadísticamente los resultados obtenidos sobre el consumo de combustible y las emisiones en el escape.
- Generar una base de datos que pueda servir como punto de partida de futuros proyectos relacionados con mediciones del consumo de combustible en diferentes tecnologías de motores Diesel.

# 1

## ESTADO DEL ARTE

Existen numerosos dispositivos de medición del consumo de combustible en motores de combustión utilizados tanto en la experimentación en bancos de pruebas como en actividades industriales en campo. La discriminación de ellos y por tanto optar por el uso de alguno depende básicamente de la exactitud requerida y de la disponibilidad de uso del equipo.

Los métodos gravimétricos de medición del consumo de combustible consisten de un recipiente de medida llenado con combustible situado sobre una balanza. La tasa de consumo de combustible se calcula por el tiempo de pérdida de peso del recipiente. El ratio de flujo de combustible es continuo durante el consumo del combustible del recipiente y discontinuo durante su recambio de combustible [3].

La principal ventaja de los métodos gravimétricos de consumo de combustible es que la medición no varía con cambios de temperatura del combustible. No necesita de mediciones de parámetros adicionales (presión, temperatura, etc.) y provee una medición continua y directa dentro de la capacidad permitida por el contenedor del combustible empleado. Su principal desventaja consta de los tiempos de recambio de combustible y el tiempo de amortiguación del combustible en el recipiente [3] (es decir, hasta que el movimiento del fluido no cause variaciones en la medida de la balanza). La Figura 1.1 presenta el método gravimétrico de medición del consumo.



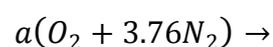
Figura 1.1 – Medición por el método gravimétrico

El método de balance de carbono como medición del consumo de combustible, a diferencia de los métodos gravimétricos y volumétricos, no requiere modificar la línea de combustible del motor. Este método asume que los átomos de carbono emanando del motor en el escape provinieron del combustible entrante a las cámaras de combustión del motor [5]. En lugar de medir el volumen o el peso del combustible entrante al motor, se miden los productos de combustión que abandonan el motor en el escape con ayuda de un analizador de gases y un medidor de flujo. En otras palabras, se mide la cantidad de carbono emitida al ambiente. Este método consume menos tiempo de instalación y elimina la necesidad de medición de todas las variables asociadas al combustible [6].

El balance de carbono se basa en el principio termodinámico de conservación de la materia que indica que la diferencia entre el ingreso y salida de materia en un sistema equivale a la acumulación de materia. Para el caso de los motores de combustión, el ingreso de combustible equivale a la salida de gases de combustión (acumulación nula).

Para emplear este método debemos resolver el siguiente balance estequiométrico para el combustible diesel comercial B5 [7].

(1.1)



Donde al resolver para los coeficientes se obtiene,

Con esta fórmula podemos determinar la cantidad de combustible diesel entrante al motor al medir las emisiones en el escape.

Si bien este método se considera sencillo, podríamos simplificarlo aún más si en vez de hallar el flujo de salida de las emisiones (las cuales se encuentran a grandes temperaturas) medimos los porcentajes de los componentes a través de un analizador de gases y de esta manera calcular la relación aire/combustible del motor al ingreso, según la respectiva ecuación estequiométrica. De esta manera no necesitaríamos un medidor de flujo másico para las emisiones sino un método de medición de aire al ingreso del motor, que puede ser tan simple como una combinación de placa orificio con un manómetro. Entonces, el consumo de combustible estaría determinado por la división entre el consumo de aire medido sobre la relación aire/combustible del motor al ingreso calculado a partir del análisis de los gases de emisión.

Los medidores de flujo másico del tipo coriolis consisten de uno o dos tubos vibratorios que son estimulados para vibrar a su frecuencia natural de resonancia por medio de una señal electromagnética. Cuando el flujo de combustible pasa por los tubos, estos giran proporcionalmente al caudal circundante. De esta forma, el valor del caudal es obtenido al medir el ángulo en el que giran los tubos [8]. Un esquema del principio de funcionamiento de los medidores coriolis se muestra en la Figura 1.2.

Este tipo de medidores trabajan con rangos esperados de medición del consumo de combustible. Para poder escoger un medidor coriolis de manera apropiada primero se debe realizar un estimado del rango que se va a obtener.

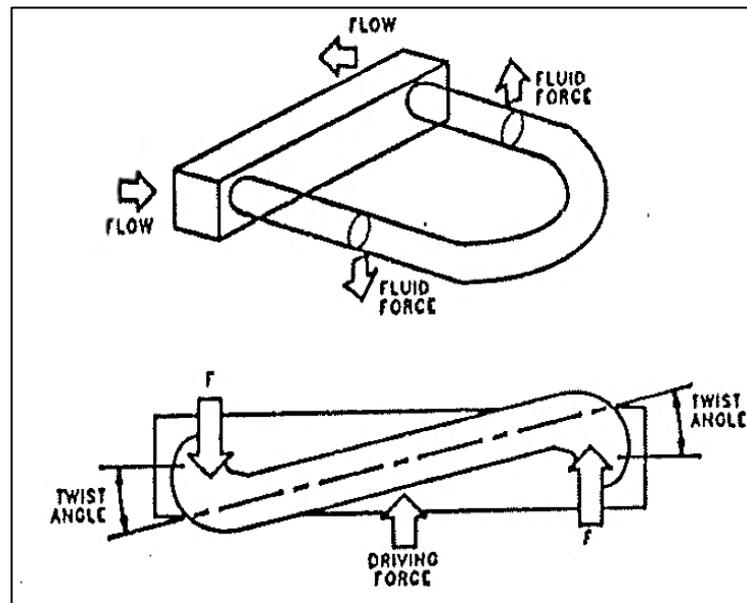


Figura 1.2 – Esquema de un medidor coriolis [8]

En base a experimentaciones similares anteriores [9] [10] se ha podido obtener un rango esperado entre 3.04 kg/h y 12.70 kg/h de consumo de combustible para la matriz de ensayos propuesta para el motor Cummins y 2.20 kg/h y 16.53 kg/h para el motor Caterpillar. Por ello, para nuestro caso se ha propuesto emplear el medidor coriolis CMF010M cuyo rango de medida (dentro de una condición aceptable de precisión) trabaja adecuadamente con valores comprendidos entre 1.65kg/h (0.5 galones por hora) y 16.57 kg/h (5 galones por hora) de flujo másico<sup>1</sup>, según se especifica en los datos técnicos brindados por el fabricante (ver Figura 1.3).

En el Anexo 1 se puede observar la hoja técnica de dicho instrumento. Se puede observar, como comentaremos posteriormente en el documento, que la incertidumbre relativa del instrumento es baja (0.10%).

<sup>1</sup> Para una densidad de Diesel de 870 kg/m<sup>3</sup>

<sup>2</sup> Tomado de la guía del fabricante

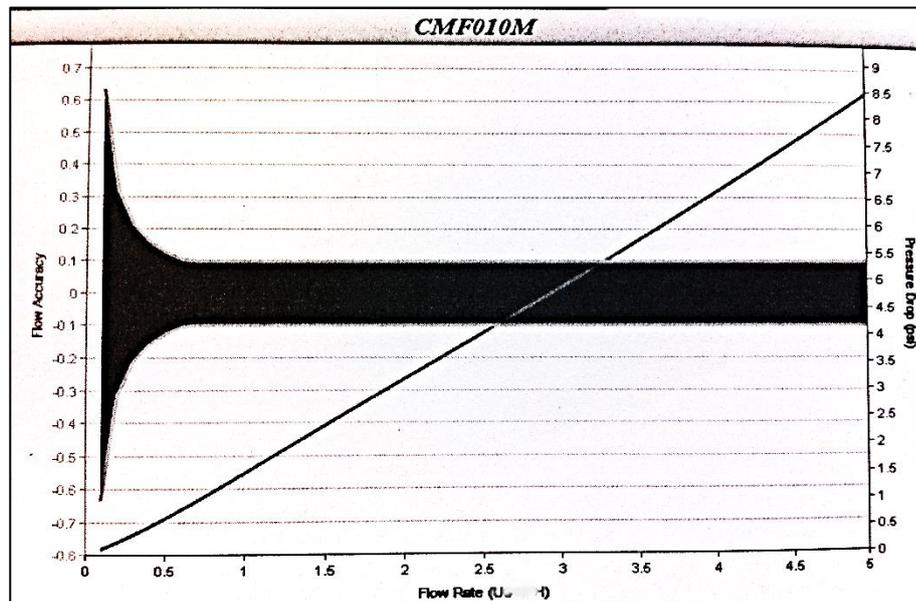


Figura 1.3 – Rango de medición confiable del medidor coriolis CMF010M<sup>2</sup>

Otro método de medición del consumo másico de combustible es el de masa lineal o del puente de Wheatstone [11]. El principio de este método es el equivalente hidráulico de un puente de Wheatstone. Consta de cuatro conductos idénticos por el cual pasa un flujo constante producto de la acción de una bomba recirculante. Un flujo externo (a medir) pasa por los extremos del puente y crea un desbalance de presión, el cual es medido por un transductor. Por cálculos se puede determinar el flujo ya que es proporcional a la presión diferencial medida por el transductor [8]. En la Figura 1.4 se puede apreciar un esquema básico de su principio de funcionamiento.

<sup>2</sup> Tomado de la guía del fabricante



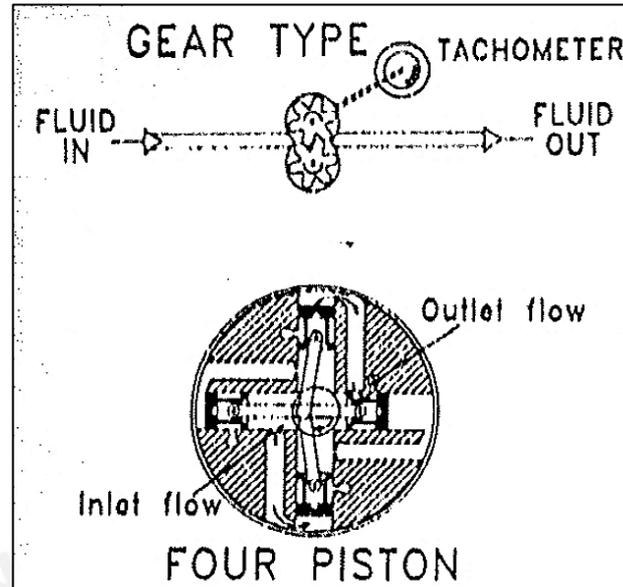


Figura 1.5 – Esquema del medidor de desplazamiento positivo [8]

Otro medidor de flujo volumétrico es el de desplazamiento positivo servo controlado. Estos medidores son construidos de manera similar a los medidores estándar de desplazamiento positivo. Sin embargo, mantienen una diferencia de presión a través de los pistones de tal manera de que no ocurra ningún derrame (*leak*) de flujo, haciendo que este tipo de medidor sea más preciso que el anterior [8]. En la Figura 1.6 se muestra un esquema del principio de funcionamiento del medidor de desplazamiento positivo servo controlado.

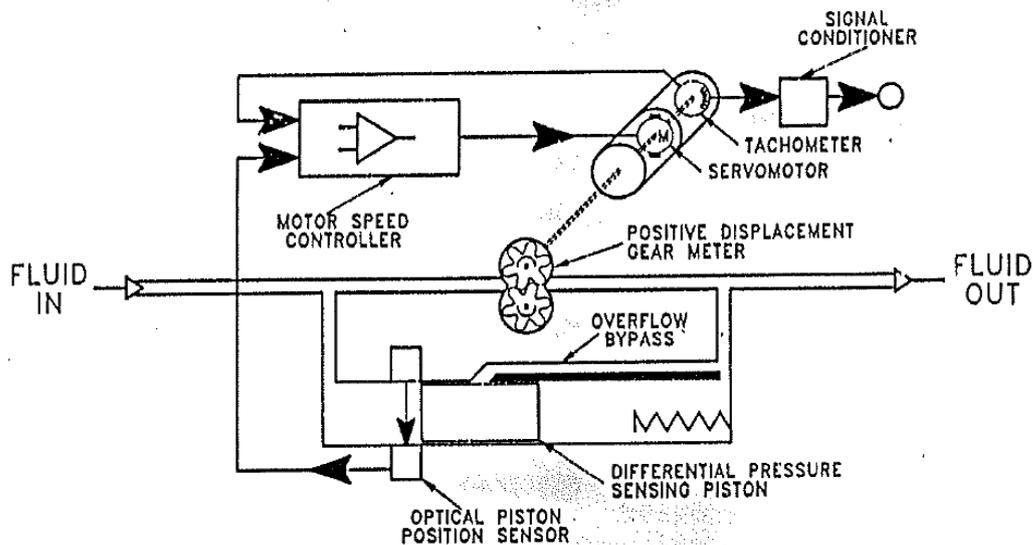


Figura 1.6 – Esquema del medidor de desplazamiento positivo servo controlado [8]

Estos tres últimos métodos de cuantificación del consumo de combustible (puente de Wheatstone, desplazamiento positivo y desplazamiento positivo servo controlado) no son comúnmente empleados en el estudio de las tecnologías del combustible y no se encuentran en muchos proyectos de investigación, por lo cual no se han incluido en la presente comparación experimental.

Finalmente, la adquisición de datos sobre el consumo de combustible del motor se puede realizar a través del propio ECM del motor. En nuestro caso, por ejemplo, empleamos el software *Insite* para el motor Cummins y el software *Electronic Technician* para el motor Caterpillar. Este método determina el consumo de combustible a través del lazo de control programado por la misma marca del motor y ofrece una interfaz en la que es posible establecer la frecuencia con la que se requiere obtener la data. En las Figuras 1.7 y 1.8 se muestran las interfaces de ambos programas.

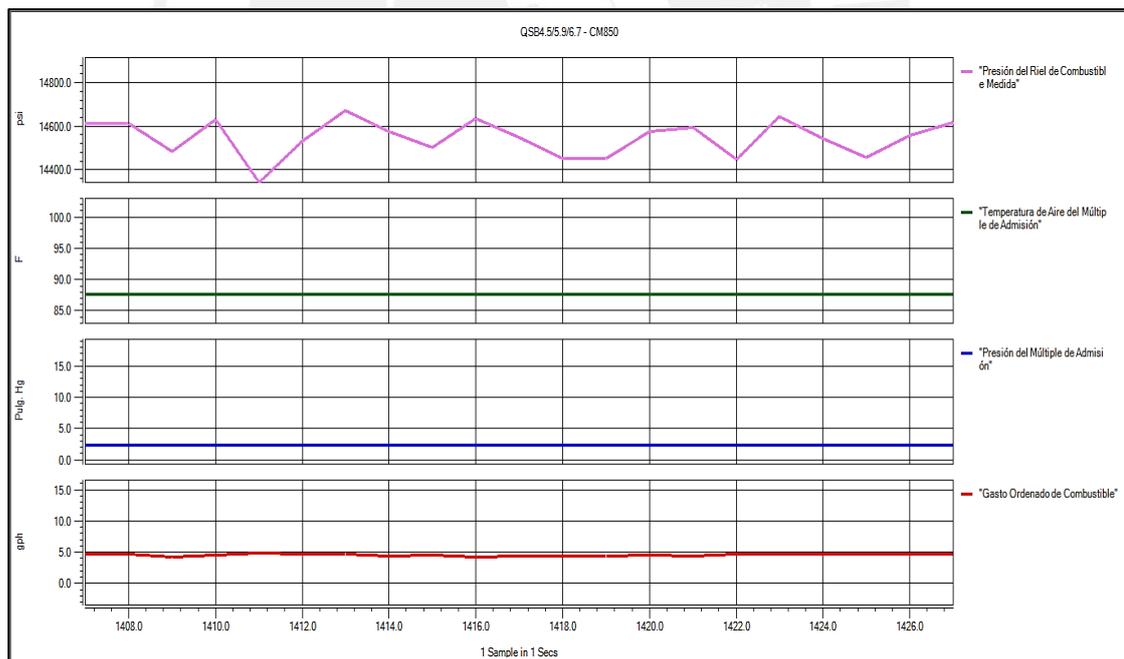


Figura 1.7 – Interfaz de adquisición de data del programa Insite de Cummins<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Tomado del software instalado

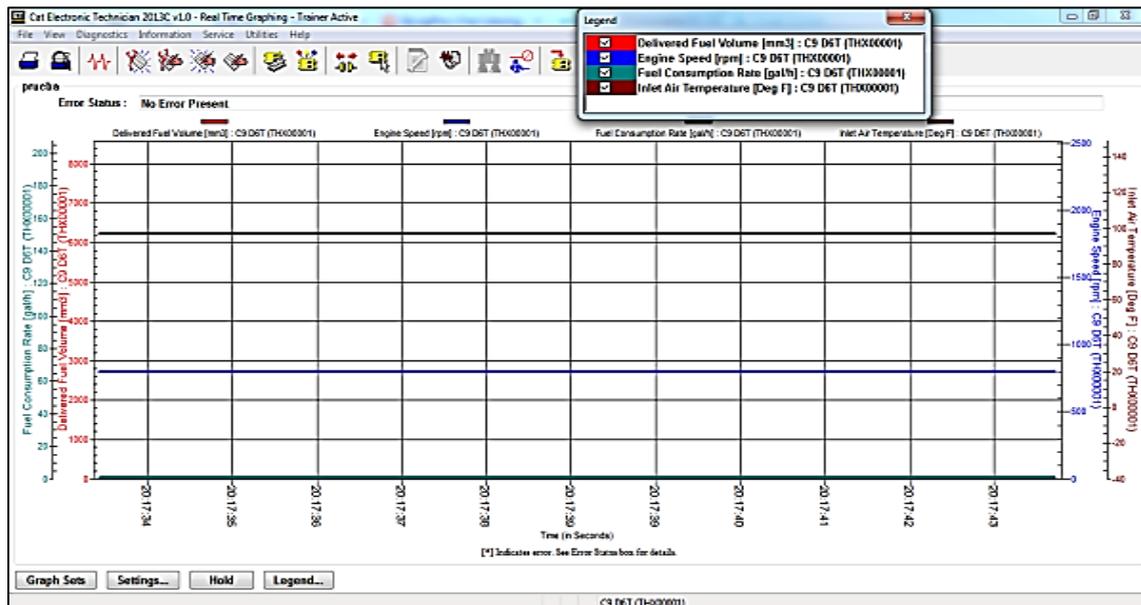


Figura 1.8 – Interfaz de adquisición de data del programa Electronic Technician de Caterpillar<sup>4</sup>

En la literatura técnica también encontramos vasta información sobre estudios relacionados con el análisis del consumo de combustible a través de módulos electrónicos. Ya sea con métodos de medición directos o indirectos, de un motor en un banco de pruebas, en un vehículo sobre dinamómetro de rodillo o sobre condiciones reales de conducción en un circuito determinado, diversos métodos de medición del consumo de combustible se han empleado y contrastado sus resultados. Numerosas técnicas estadísticas se han utilizado para el análisis de resultados, algunas tan complejas que involucran redes neuronales y paquetes estadísticos computacionales. En la mayoría de casos, los autores definen explícitamente el criterio de aceptación de la nube de puntos obtenida de la experimentación para luego analizar (es decir, establecer un límite para la dispersión).

No llama la atención la recurrente realización de este tipo de estudios en la comunidad científica dado que, como hemos mencionado antes, los datos aislados del ECM del motor no son concluyentes y no deben ser considerados en la evaluación de su consumo de combustible [4]. Por tanto, frente a cualquier proyecto de análisis o mejora de alguna tecnología de combustible, es fuertemente recomendado utilizar más de un método de consumo de combustible en simultáneo.

<sup>4</sup> Tomado del *software* instalado





determinar el consumo de combustible: (1) con ayuda de un sensor lambda para las emisiones y un medidor de flujo para el aire de entrada al motor y (2) con dos medidores de flujo volumétrico, uno para la línea de suministro de combustible al motor (de encendido por chispa) y otro para la de retorno.

Es de especial interés el primer método desarrollado por Fonseca et. al. (2012) [2] debido a que, como concluye el trabajo, tiene la ventaja de que los sensores necesarios muchas veces ya se encuentran disponibles en los vehículos. Además, es más sencillo y menos costoso que el segundo método, aunque a costas de prescindir de precisión en la medición (los métodos redujeron la amplitud de la incertidumbre del ECM del motor en 79% y 81% respectivamente).

En detalle, el método mide el flujo volumétrico de aire (litros por segundo) a la entrada del motor y lo convierte a flujo másico (gramos por segundo) según la siguiente ecuación.

$$\left(\frac{P}{r_s T_K}\right) \quad \text{---} \quad (1.2)$$

P: presión del aire admitido (Pa)  
 $r_s$ : constante de gas seco del aire seco (287,05 J)  
 $T_K$ : temperatura del aire (K)

Luego, se puede emplear el flujo másico del aire y el valor lambda medido por la sonda para determinar el valor del consumo de combustible instantáneo según la siguiente formula.

$$(g \text{ amos}) \quad \frac{(g \text{ amos})}{(e \quad co)} \quad (1.3)$$

$\lambda$ : factor lambda  
 RAC: relación aire combustible estequiométrico. Para el diesel, 14.5.

Es notable la sencillez del método tanto en la implementación experimental como en los cálculos posteriores a realizar. Como se ha mencionado previamente, los sensores necesarios para medir la temperatura y la presión del aire a la entrada del motor muchas veces ya se encuentran en los motores a estudiar.

Si bien ambos trabajos fueron realizados en equipos reales y no en motores en bancos de prueba, no consideraron emplear un método gravimétrico de medición del consumo de combustible. Sin embargo, el método gravimétrico resulta el método más común en el análisis del consumo de combustible para equipos en operación. De hecho, es el único método válido en la realización de experimentaciones en equipos en servicio basada en la norma SAE J1321 – Procedimiento para la realización de pruebas de consumo de combustible. El trabajo de Surcel et. al. (2009) [4] aborda el tema de la evaluación de la exactitud y precisión de los ECM de los camiones en base a la norma J1321.

La prueba constó de más de 220 repeticiones, totalizando 22.000 km recorridos utilizando 23 vehículos de prueba. Los camiones fueron equipados con un tanque de combustible el cual era pesado luego de cada recorrido para determinar el peso del combustible consumido. El resultado de la medición gravimétrica se tradujo a consumo volumétrico para ser comparado luego con la información del consumo brindada por el ECM del motor.

El porcentaje de diferencia entre el consumo registrado por el ECM y el consumo real obtenido a través del método gravimétrico se calculó con la siguiente ecuación.

(1.4)

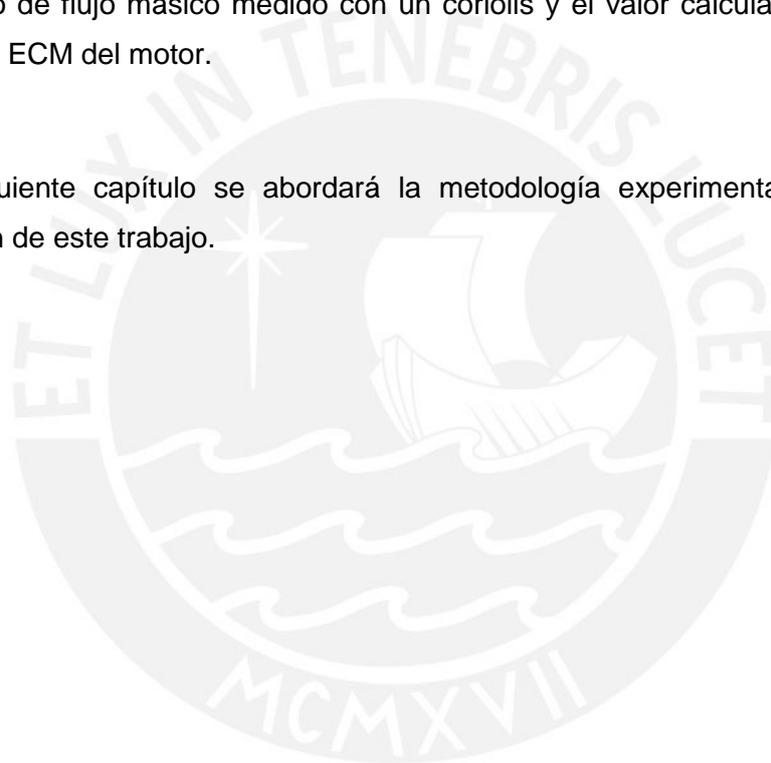
P%: porcentaje de diferencia  
CR: consume registrado por el ECM  
CC: consume calculado a través del método gravimétrico.

Uno de los resultados observados del trabajo fue que para distancias cortas (entre 60km y 100km) la precisión del ECM variaba entre 0.2 y 6.2% mientras que la exactitud variaba entre -10.8 y 10.8%.

Como comentario concluyente, el trabajo de Surcel et. al. (2009) [4] indica que es riesgoso utilizar únicamente los datos del consumo de combustible de los ECM para evaluar el impacto de una tecnología o práctica. Esto se debe a que el consumo de combustible indicado por los ECM se deriva de un algoritmo y no del flujo real, por tanto hay un error inherente con el cálculo.

Como se puede constatar de la revisión de la literatura previa, existen diversas técnicas y estudios que intentan encontrar métodos más precisos para la determinación del consumo de combustible en motores de combustión interna. Este es un tema de creciente importancia a raíz de la criticidad de la economía del combustible y del acelerado desarrollo tecnológico en el mundo. Es en ese sentido al que apunta el presente trabajo de tesis, el cual analizó estadísticamente los resultados obtenidos sobre el consumo de combustible a través de un método gravimétrico, un balance de carbono, considerando la composición del combustible y el resultado de las emisiones, un método de flujo másico medido con un coriolis y el valor calculado por el lazo de control del ECM del motor.

En el siguiente capítulo se abordará la metodología experimental utilizada en la realización de este trabajo.



## 2

### METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Los ensayos se realizaron en el laboratorio de Energía de la PUCP, empleando dos motores de encendido por compresión instalados en un banco de pruebas. Las condiciones atmosféricas de los ensayos fueron las siguientes.

- Presión atmosférica: 101.32 kPa (presión a nivel del mar)
- Temperatura: 24°C inicialmente, hasta llegar a 40°C
- Humedad relativa: 75% inicialmente, hasta llegar a 33%

La experimentación constó de la evaluación del consumo de combustible de dos motores de encendido por compresión a través de cuatro métodos diferentes de adquisición de datos. Se aseguró que la toma de datos fuera realizada de manera simultánea y que factores externos al área de trabajo no afecten la precisión de los resultados.

Para asegurar la repetitividad de los resultados se aseguró que la temperatura del refrigerante y aceite lubricante alcancen condiciones estables. Alcanzados estos valores, se procedió a realizar las mediciones. Para asegurar la fiabilidad de la toma de datos del método gravimétrico, se optó por un intervalo de 3 minutos entre cada toma del registro de la balanza.

#### 2.1. Matriz de ensayos

La matriz de ensayos a considerar para la experimentación debe de ser lo suficientemente grande como para poder obtener suficientes resultados como para lograr un trabajo estadístico y análisis satisfactorios.

### 2.1.1. Matriz de ensayos en el motor Cummins

Para proponer la matriz de ensayos a evaluar en el motor de encendido por compresión marca Cummins de aplicación vehicular, se consultó con experimentaciones pasadas para poder predecir una matriz de ensayos que no genere consumos fuera del rango de confianza del medidor de flujo a emplear (como lo hemos adelantado en el Capítulo 1: Estado del arte).

Analizando experimentaciones pasadas, podemos predecir el consumo de combustible esperado en futuras actividades. Podemos asumir los valores expuestos en la Tabla 2.1 como una aproximación fiable a la realidad (los trabajos completos se pueden encontrar en las referencias [9] y [10]) para las respectivas combinaciones de torque y régimen de giro.

Tabla 2.1 - Consumos de combustible según experimentaciones pasadas en el motor Cummins

Régimen de giro	Torque	Consumo de combustible Diesel	
		kg/h	gal/h
rpm	N.m		
1800	100	7.590	2.305
1800	80	7.030	2.135
1800	60	6.370	1.934
1800	40	5.590	1.697
1800	20	4.870	1.479
1600	100	6.239	1.894
1600	80	5.770	1.752
1600	60	5.780	1.755
1600	40	4.820	1.464
1600	20	4.028	1.223
1400	100	5.066	1.538
1400	80	4.790	1.454
1400	60	4.310	1.309
1400	40	4.080	1.239
1400	20	3.039	0.923

Esta matriz de ensayos presenta quince condiciones en las que el motor podría ser evaluado. Para nuestros fines, sería conveniente contar con mayores puntos de prueba ya que nuestro estudio se basa en el análisis estadístico de los resultados del consumo de combustible a través de cuatro diferentes métodos.

A partir de la tabla anterior, podemos realizar ponderaciones y proponer una matriz de ensayos con cuarenta puntos diferentes. Estos valores aseguraron un volumen de datos lo suficientemente grande como para poder realizar los estudios propuestos. En la Tabla 2.2 se expone la matriz de ensayos propuesta para el motor Cummins.

**Tabla 2.2 – Matriz de ensayos propuesta para el motor Cummins**

Régimen de giro	Torque	Consumo esperado de combustible		Régimen de giro	Torque	Consumo esperado de combustible	
		kg/h	gal/h			kg/h	gal/h
2000	200	12.702	3.857	1800	200	11.173	3.393
2000	180	11.936	3.624	1800	180	10.476	3.182
2000	160	11.169	3.392	1800	160	9.778	2.970
2000	140	10.403	3.159	1800	140	9.081	2.758
2000	120	9.637	2.926	1800	120	8.384	2.546
2000	100	8.820	2.678	1800	100	7.590	2.305
2000	80	8.100	2.460	1800	80	7.030	2.135
2000	60	7.550	2.293	1800	60	6.370	1.934
2000	40	6.340	1.925	1800	40	5.590	1.697
2000	20	5.810	1.764	1800	20	4.870	1.479
1600	200	9.341	2.836	1400	200	7.955	2.415
1600	180	8.766	2.661	1400	180	7.423	2.253
1600	160	8.192	2.487	1400	160	6.892	2.092
1600	140	7.618	2.313	1400	140	6.361	1.931
1600	120	7.044	2.138	1400	120	5.830	1.770
1600	100	6.239	1.894	1400	100	5.066	1.538
1600	80	5.770	1.752	1400	80	4.790	1.454
1600	60	5.780	1.755	1400	60	4.310	1.309
1600	40	4.820	1.464	1400	40	4.080	1.239
1600	20	4.028	1.223	1400	20	3.039	0.923

Podemos notar que los valores esperados caen dentro del rango de confianza del medidor coriolis CMF010M, lo cual nos asegura que la toma de datos se realizará de manera correcta. Los otros métodos de medición del consumo de combustible no presentan limitaciones notables en el rango que pueden medir.

Para las pruebas no se hizo ningún cambio con respecto al ajuste del motor. Es decir, los parámetros de la tasa de inyección de combustible diesel y de compresión no se cambiaron.

En cada par de torque por velocidad, se registraron los siguientes datos:

- Régimen de velocidad del eje cigüeñal
- Torque efectivo del motor
- Hora de la toma de datos en simultáneo
- Peso indicado por la balanza de la galonera de combustible
- Flujo de combustible indicado por el coriolis
- Temperatura de la línea de combustible ingresante a la bomba del motor
- Temperatura del aceite y refrigerante del motor
- Temperatura de los gases de escape
- Emisiones gaseosas: O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> y NO

Cabe mencionar que se realizaron varios ensayos de tal manera que los datos obtenidos en cada condición de operación (torque x velocidad) fueron registrados tres veces, cada uno en una experimentación diferente. Adicionalmente, antes de realizar las mediciones se esperó a que el motor alcance su condición estable.

### 2.1.2. Matriz de ensayos en el motor Caterpillar

Para proponer la matriz de ensayos a evaluar en el motor de encendido por compresión marca Caterpillar de maquinaria pesada, se consultó con experimentaciones pasadas para poder predecir una matriz de ensayos que no genere consumos fuera del rango de confianza del medidor de flujo a emplear (como lo hemos adelantado en el Capítulo 1: Estado del arte).

Analizando experimentaciones pasadas, podemos predecir el consumo de combustible esperado en futuras actividades. Podemos asumir los valores expuestos en la Tabla 2.3 como una aproximación fiable a la realidad para las respectivas combinaciones de torque y régimen de giro. Cabe mencionar que estos valores expuestos son parte de ensayos en el motor y no forman parte de algún trabajo formal.

**Tabla 2.3 - Consumos de combustible según experimentaciones pasadas en el motor Caterpillar**

Régimen de giro	Torque	Consumo de combustible Diesel	
		kg/h	gal/h
rpm	N.m		
2200	290	23.05	7.00
2200	195	17.13	5.20
2200	90	11.20	3.40
2200	10	8.23	2.50
1200	250	7.90	2.40
1200	153	5.60	1.70
1200	60	3.29	1.00

Esta matriz de ensayos presenta siete condiciones en las que el motor podría ser evaluado. Para nuestros fines, sería conveniente contar con mayores puntos de prueba ya que nuestro estudio se basa en el análisis estadístico de los resultados del consumo de combustible a través de cuatro diferentes métodos.

A partir de la tabla anterior, podemos realizar ponderaciones y proponer una matriz de ensayos con veintiún puntos diferentes. Estos valores aseguraron un volumen de datos lo suficientemente grande como para poder realizar los estudios propuestos. En la Tabla 2.4 se expone la matriz de ensayos propuesta para el motor Caterpillar.

Tabla 2.4 – Matriz de ensayos propuesta para el motor Caterpillar

Régimen de giro	Torque	Consumo de combustible Diesel	
rpm	N.m	kg/h	gal/h
2200	200	16.53	4.98
2200	180	15.35	4.66
2200	160	14.16	4.30
2200	140	12.98	3.94
2200	120	11.79	3.58
2200	100	11.20	3.40
2200	90	10.83	3.29
2200	80	10.09	3.06
2200	60	9.34	2.84
2200	40	8.60	2.61
2200	20	7.21	2.18
1200	240	7.59	2.30
1200	220	7.50	2.28
1200	200	6.82	2.07
1200	180	6.14	1.86
1200	160	5.46	1.66
1200	140	5.12	1.56
1200	120	5.49	1.67
1200	100	4.57	1.39
1200	80	4.39	1.33
1200	60	3.29	1.00
1200	40	2.20	0.67

Podemos notar que los valores esperados caen dentro del rango de confianza del medidor coriolis CMF010M, lo cual nos asegura que la toma de datos se realizará de manera correcta. Los otros métodos de medición del consumo de combustible no presentan limitaciones notables en el rango que pueden medir.

Para las pruebas no se hizo ningún cambio con respecto al ajuste del motor. Es decir, los parámetros de la tasa de inyección de combustible diesel y de compresión no se cambiaron.

En cada par de torque por velocidad, se registraron los siguientes datos:

- Régimen de velocidad del eje cigüeñal
- Torque efectivo del motor
- Hora de la toma de datos en simultáneo
- Peso indicado por la balanza de la galonera de combustible
- Flujo de combustible indicado por el coriolis
- Temperatura de la línea de combustible ingresante a la bomba del motor
- Temperatura del aceite y refrigerante del motor
- Temperatura de los gases de escape
- Emisiones gaseosas: O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> y NO

Cabe mencionar que se realizaron varios ensayos de tal manera que los datos obtenidos en cada condición de operación (torque x velocidad) fueron registrados tres veces, cada uno en una experimentación diferente. Adicionalmente, antes de realizar las mediciones se esperó a que el motor alcance su condición estable.

## 2.2. Parámetros de desempeño y emisiones calculados

### 2.2.1. Potencia efectiva

La potencia efectiva que entrega el motor es también conocida como potencia al freno. Se midió en la salida del eje y fue absorbida por el dinamómetro. Esta depende del torque y el régimen de giro:

$$— (2.1)$$

$P$  : Potencia efectiva [kW]

$T$ : Torque al freno [N.m]

$n$ : Régimen de giro [rpm]

### 2.2.2. Consumo de aire húmedo y aire seco

El cálculo del consumo de masa de aire húmedo será determinado a través de un medido de flujo tipo placa orificio. Para ello debemos conocer la densidad del aire en el ambiente, la humedad absoluta del aire y la velocidad del aire a través de la placa

En primer lugar, definiremos la densidad del aire como:

$$\frac{—}{(273 — )} (2.2)$$

: Densidad del aire ambiente [kg/m<sup>3</sup>]

: Presión atmosférica [kPa]

: Constante del aire ambiente [kJ/kg.K]

: Temperatura del ambiente de trabajo [°C]

Para corregir la constante del aire, se introduce la humedad absoluta ( $w$ ) y la constante del aire ambiente quedaría de la siguiente forma.

$$— (2.3)$$

: Constante del aire seco (0,287 kJ/kg.K)

: Constante del vapor de agua (0,46152 kJ/kg.K)

Para calcular la humedad absoluta ( $w$ ) se empleó la siguiente ecuación psicométrica:

$$\frac{w}{(1-w)} = \frac{p_w}{(p - p_w)} \quad (2.4)$$

$w$ : Humedad absoluta [kg/kg]

$p_w$ : Humedad relativa [%]

$p$ : Presión del agua a temperatura ambiente [kPa]

Según Cuisano [13] la  $t_{30}$  se define con:

$$t_{30} = \left( \frac{30}{t} \right) \quad (2.5)$$

$t$ : Temperatura del ambiente de trabajo [K]

Con todo esto se puede calcular el consumo del aire húmedo y aire seco según la siguiente forma:

$$\dot{m}_h = \frac{\dot{m}_s}{w} \quad (2.6)$$

$$\dot{m}_s = \frac{\dot{m}_h}{w} \quad (2.7)$$

$\dot{m}_h$ : Consumo de aire húmedo [kg/h]

$\dot{m}_s$ : Consumo de aire seco [kg/h]

$\rho$ : Densidad del aire ambiente [kg/m<sup>3</sup>]

$d$ : Diámetro de la placa orificio utilizado para medir el flujo de aire húmedo [m]

$w$ : Humedad absoluta [kg/kg]

$v$ : Velocidad del aire en la placa orificio [m/s]

La velocidad del aire húmedo dentro de la placa orificio se calculará según la ecuación de Bernoulli, introduciendo el coeficiente de descarga ( $C_d$ ) de la siguiente manera:



$$\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} = \frac{\rho_a V_a}{\rho_f V_f} \quad (2.14)$$

$$\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} = \frac{\rho_a V_a}{\rho_f V_f} \quad (2.15)$$

Con estas ecuaciones podemos determinar la relación aire/combustible sabiendo que:

$$\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} = \frac{\rho_a V_a}{\rho_f V_f} \quad (2.16)$$

### 2.2.5. Consumo de combustible mediante el análisis de emisiones

Una vez obtenido la relación aire/combustible real a partir del balance de la ecuación del Diesel B5 y el flujo de aire admitido al motor, el consumo de combustible resulta de la división de estos de la siguiente manera.

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{m}_a}{\text{Relación aire combustible calculado}} \quad (2.17)$$

Consumo de combustible por el método del análisis de emisiones

$\dot{m}$  : Flujo másico de aire al ingreso del motor

Relación aire combustible calculado

### 2.2.6. Consumo de combustible por el método gravimétrico

El cálculo del consumo de combustible a través del método gravimétrico en realidad se basa sobre un simple principio: cuánto combustible se gastó sobre determinado intervalo de tiempo. Para llevar a cabo esto, se recomienda esperar en cada punto de prueba a que el motor se estabilice para luego realizar las mediciones.

$$\dot{m}_f = \frac{m}{t_f - t_i} \quad (2.18)$$

$\dot{m}_f$  : Consumo de combustible por el método gravimétrico [g/s]

$m$ : Combustible consumido durante el intervalo [g]

$t_i$  : Tiempo cronometrado inicial del intervalo de prueba [s]

$t_f$  : Tiempo cronometrado final del intervalo de prueba [s]

### 2.2.7. Manejo de las incertidumbres

El manejo de las incertidumbres en los trabajos experimentales es de fundamental importancia; el error siempre está presente cuando se toman medidas experimentales. Es de tal importancia que autores han sentenciado que “no es aceptable presentar datos experimentales sin describir las incertidumbres involucradas” [14].

Una medición, por ejemplo longitud, se puede expresar como sigue:

$$x \pm \Delta x \quad (mm) \quad (2.19)$$

En donde  $x$  representa la mitad de la resolución del instrumento de medida. Podemos trabajar con las incertidumbres relativas según la siguiente relación.

$$\frac{\Delta x}{x} \quad (2.20)$$

A partir de este concepto podemos hallar las incertidumbres de parámetros calculados y funciones complejas, luego de una serie de cálculos.

Considere por ejemplo la siguiente función.

$$f(x) \quad (2.21)$$

Se puede obtener la incertidumbre relativa de la función a partir de la incertidumbre relativa de cada variable independiente involucrada según la siguiente manera.

$$\pm \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2 + \dots} \quad (\%) \quad (2.22)$$

### 3

## IMPLEMENTACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS

Todos los experimentos se realizaron en el banco de pruebas de los motores Cummins y Caterpillar, ubicados en el Laboratorio de Energía de la Sección de Ingeniería Mecánica de la PUCP.

En las siguientes figuras se muestran la configuración experimental implementada para la realización de las pruebas.

Más adelante, se detallarán los equipos de medición y control, acompañado por una serie de figuras para facilitar una mejor comprensión de los ensayos. De la misma manera se detallaran las calibraciones realizadas para los distintos dispositivos de medición y control.

### 3.1. Equipos de bancada

#### 3.1.1. Motor Diesel Cummins

Para unos ensayos se utilizó un motor Diesel de cuatro tiempos de la marca CUMMINS utilizado comúnmente en excavadoras y camiones. Este motor cuenta con un turbo-compresor y sistema de *intercooler*.

A continuación, en la Tabla 3.1 y Figuras 3.1 y 3.2, se presentaran las principales características técnicas y vistas generales del motor utilizado.

Tabla 3.1 - Datos técnicos del motor Diesel marca Cummins

Marca / Modelo	Cummins / QSB6.7
Aplicación	Tracto camión
Sistema de Inyección	Common rail
Cilindrada	6,7 l
Velocidad nominal	2200 rpm

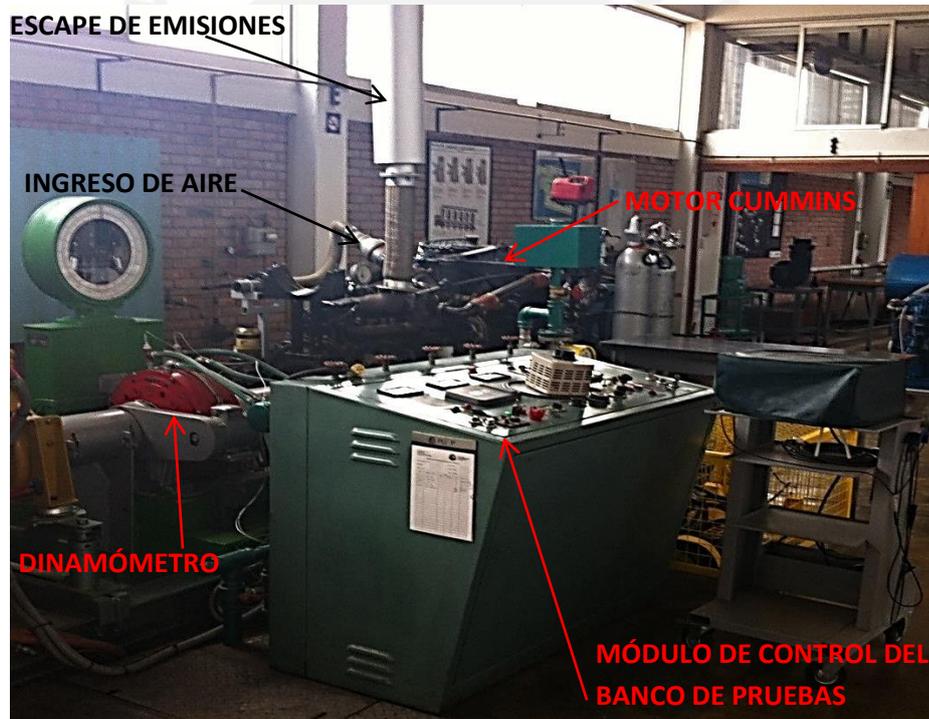


Figura 3.1 – Disposición del motor Diesel Cummins

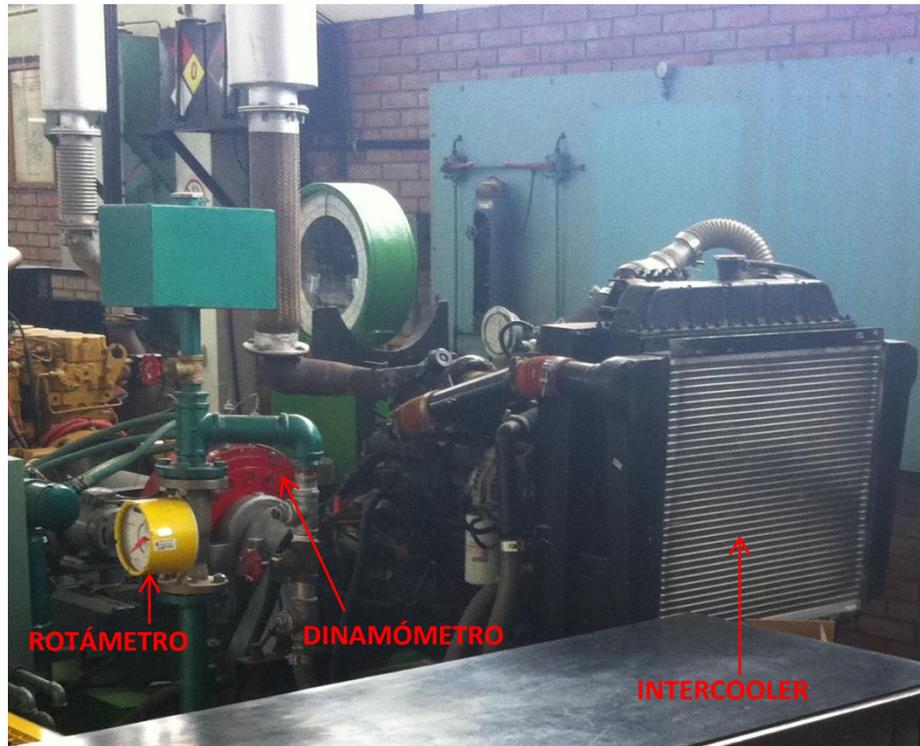


Figura 3.2 – Motor Diesel Cummins

### 3.1.2. Motor Diesel Caterpillar

Para unos ensayos se utilizó un motor Diesel de cuatro tiempos de la marca CATERPILLAR utilizado comúnmente en cargadores frontales. Este motor cuenta con un turbo-compresor y sistema de intercooler.

A continuación, en la Tabla 3.2 y Figuras 3.3 y 3.4, se presentarán las principales características técnicas y vistas generales del motor utilizado.

Tabla 3.2 - Datos técnicos del motor Diesel marca Caterpillar

Marca / Modelo	Caterpillar C6.6 ACERT
Aplicación	Compactadora
Sistema de Inyección	Common rail
Cilindrada	6,6 l
Velocidad nominal	2200 rpm

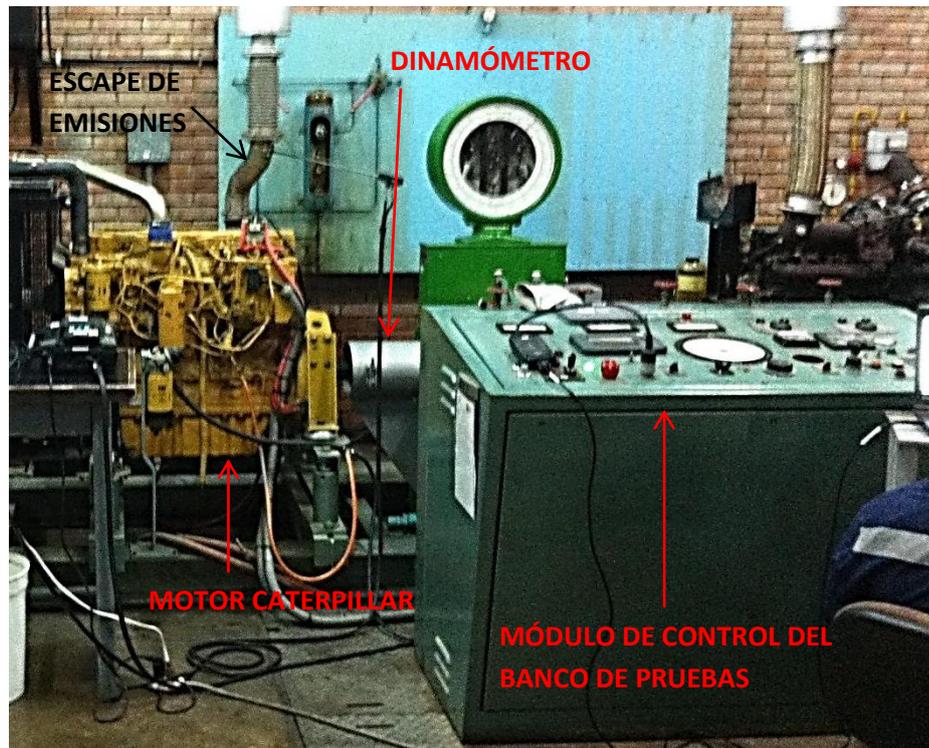


Figura 3.3 – Disposición del motor Diesel Caterpillar

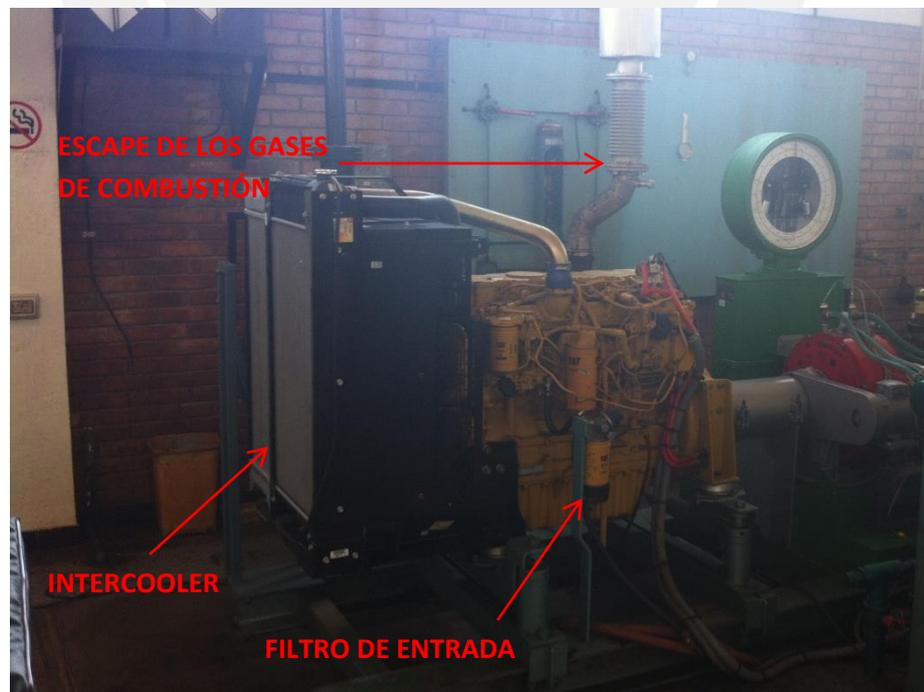


Figura 3.4 – Motor Diesel Caterpillar



velocidad (rpm), regulador de torque o carga de los motores y niveles de presión de aceite y temperatura. Por otro lado, también permite regular el flujo de agua que circula por el estator del dinamómetro.



Figura 3.6 – Panel de control de los motores de banco



Figura 3.7 - Tacómetro digital (izquierda) y regulador de torque (derecha)

## 3.2. Dispositivos de medición y control

### 3.2.1. Medición de aire admitido al motor

Para medir el consumo de aire del motor Diesel se utilizó un medidor del tipo placa de orificio, instalado en la entrada de un cilindro amortiguador de las pulsaciones del aire admitido.

Una placa de orificio es una placa delgada con un agujero en el centro. Normalmente se coloca en un tubo en el que fluye el fluido. Cuando el fluido llega a la placa de orificio, el fluido es forzado a converger para ir a través del pequeño agujero; el punto de máxima convergencia en realidad se produce poco después del orificio en el llamado punto de la vena contracta. Más allá de la vena contracta, el fluido se expande y el cambio de velocidad y presión ocurre una vez más. La medición del consumo de aire fue obtenido a través del registro de la diferencia de presión (antes y después de la placa de orificio) y las condiciones atmosféricas (temperatura, presión y humedad) antes de la placa.

En las Figuras 3.8 y 3.9 se muestran los instrumentos empleados para lograr esta medición.



Figura 3.8 – Tanque amortiguador con placa orificio



Figura 3.9 – Manómetro digital

### 3.2.2. Medidor de flujo másico

Para medir el flujo de diesel que consumió el motor funcionando a los distintos puntos de carga y velocidad se utilizó un medidor del tipo coriolis (Emerson). El medidor de flujo opera basado en el principio de las fuerzas inerciales que se generan cuando una partícula en un cuerpo rotatorio se mueve con respecto al cuerpo acercándose o alejándose del centro de rotación.

En la Figura 3.10 se muestra el medidor de flujo empleado con la identificación de las partes.

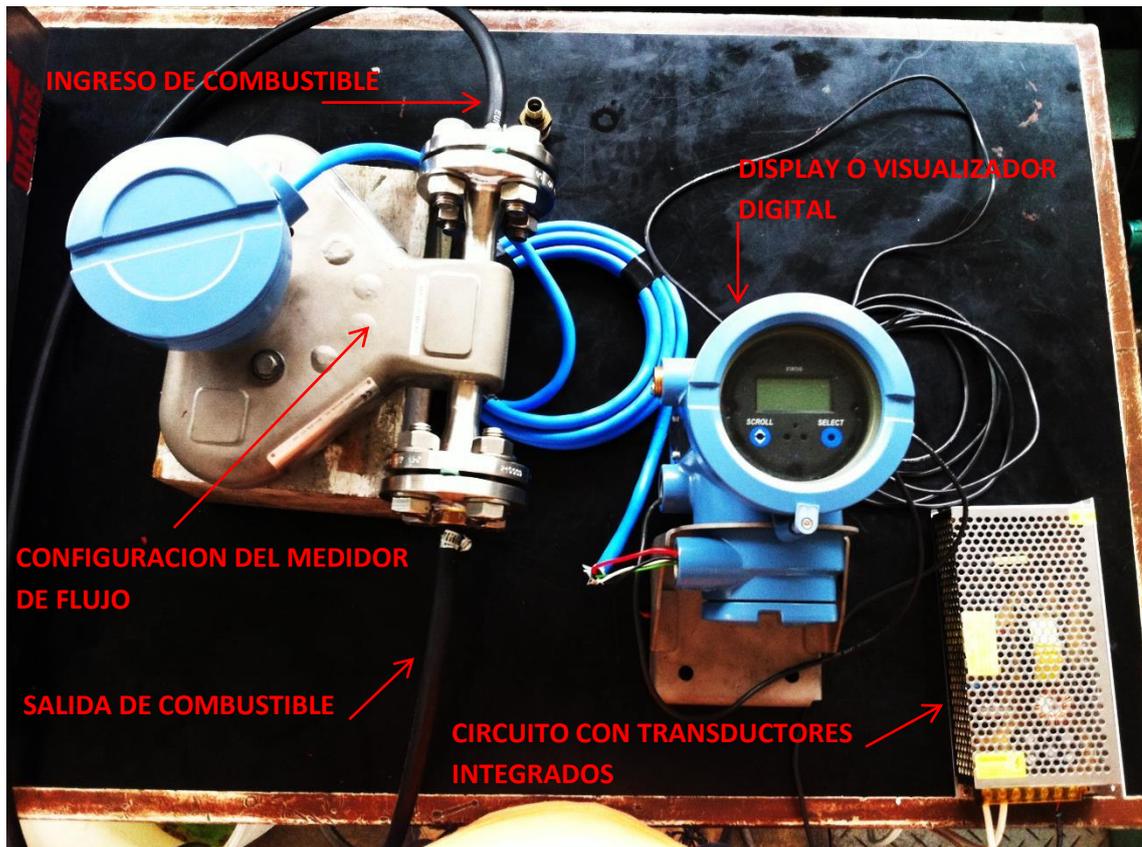


Figura 3.10 – Medidor de flujo másico tipo coriolis CMF010M

### 3.2.3. Medidor de emisiones Testo 350XL

A través de un sistema portátil de la marca Testo, modelo XL 350, fue posible analizar las concentraciones de CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO y NO en los gases de escape.

El sistema portátil Testo comprende:

- el analizador;
- la unidad de control;
- sonda de muestreo del gas de escape;
- cables de conexión y potencia.

La caja de analizadora:

- bomba para el transporte de mostrar los gases de escape;
- unidad de condensación;
- bomba de drenaje de condensado;
- filtros;
- los sensores o células de medición de gases (O<sub>2</sub>, CO, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y HC);
- electrónica Evaluación y almacenamiento.

A través de la sonda de gas, instalado en el tubo de escape del motor, la bomba de transporte obtiene la muestra de los gases para análisis. A continuación, la muestra del gas se lleva a una unidad condensadora, donde el gas es enfriado, causando una precipitación del condensado con baja absorción de NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>. Posteriormente, el condensado es transportado por una bomba peristáltica a intervalos programados, al tanque de condensado situada en la parte inferior de la caja analizadora. Seguidamente, el gas seco pasa a través de un filtro de partículas, donde se retiene el material particulado. El gas filtrado es luego dirigido hacia los sensores de medición de gas. Aquí, una pequeña porción se difunde a través de los diafragmas de los sensores, que envían una señal la cual es proporcional a la concentración del contaminante a la unidad de control, por último, la parte insignificante de gas que no fue utilizado en la medición es liberado [13].

A continuación se presentan los datos técnicos del analizador de emisiones (Figura 3.11 y Tabla 3.4).



Figura 3.11 - Analizador testo 350 XL

Tabla 3.4 - Datos técnicos del analizador de emisiones

Marca / Modelo	Testo / 350 XL
Sensor de CO	Rango de medición: 0 -10.000 ppm Resolución mínima: 1 ppm Incertidumbre: $\pm 10$ ppm (0 - 99 ppm); $\pm 5\%$ (100 - 2.000 ppm); $\pm 10\%$ (2001 - 10.000 ppm)
Sensor de HC	Rango de medición: 100 - 40.000 ppm Resolución mínima: 10 ppm Incertidumbre: $< 400$ ppm (100 - 4.000 ppm); $\pm 10\%$ ( $> 4.000$ ppm).
Sensor de NOX	Rango de medición: 0 - 3.000 ppm Resolución mínima: 1 ppm Incertidumbre: $\pm 5$ ppm (0 - 99 ppm); $\pm 5\%$ (100 - 2.000 ppm); $\pm 10\%$ (2001 - 3.000 ppm).

En el Anexo 6 se muestran los datos completos de la toma de muestras del analizador de gases.

### 3.2.4. Balanza electrónica

Se empleó una balanza electrónica digital para calcular la diferencia (o pérdida) de peso en la galonera de combustible. Se seteó el cero de la balanza estando la galonera con su máxima capacidad de combustible y a partir de ello se registraron las diferencias de peso.

A continuación se presentan los datos técnicos de la balanza (Figura 3.12 y Tabla 3.5).

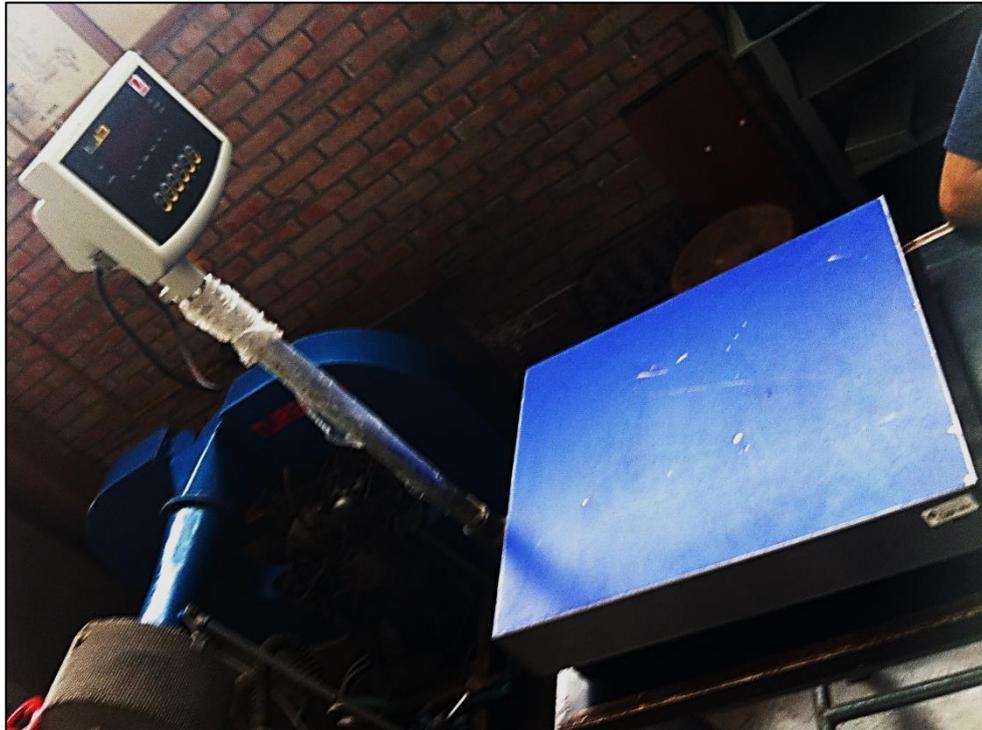


Figura 3.12 – Balanza Ohaus T21P

Tabla 3.5 – Datos técnicos de la balanza Ohaus T21P

Modelo	T21P
Rango completo de capacidad de la bascule	5 a 20 kg o lb
Peso promedio mínimo de la pieza (APW)	0.25d
Unidades de pesaje	Kilogramos, libras
Funciones	Conteo de piezas, pesaje, acumulación de peso, pesaje de comprobación
Rango de puesta en cero de tecla	2%, 5%, 10%, 20% de la capacidad
Calibración de extensión	1 kg o 1 lb a 100% de la capacidad
Rango de temperatura de operación	-10°C a 40°C

### 3.2.5. Cronómetro digital

Para la toma de medición del tiempo, involucrado en el método gravimétrico de consumo de combustible, se empleó un cronometro *Traceable* de *Control Company*, mostrado en la Figura 3.13.



Figura 3.13 – Cronometro *Traceable* de *Control Company*

### 3.2.6. Medición de las condiciones del ambiente

Para la medición de la condiciones del ambiente de ensayo del motor se necesitó de un higrómetro (Figura 3.14), el cual medía la humedad y temperatura del aire de la sala de ensayo.



Figura 3.14 – Higrómetro analógico

### 3.2.7. Programa *Insite* del motor Cummins

Este programa nos proporcionó la información de los valores de medida y calculados por el módulo de control del motor Cummins QSB 6.7 tales como presión en el múltiple de admisión, temperatura de admisión, presión de inyección de diesel, presión en la cámara de combustión, etc.

No obstante, debido a las limitaciones de la licencia académica, apenas fue posible registrar seis variables medidas a través de los sensores del motor:

1. presión del *common rail*;
2. presión en el múltiple de admisión;
3. temperatura en el múltiple de admisión;
4. consumo específico de combustible (consumo ordenado);
5. carga del motor;
6. presión atmosférica.

De estas variables medidas, la que enfocamos nuestra atención fue el consumo ordenado de combustible. La interfaz del programa se presenta en la Figura 3.15.

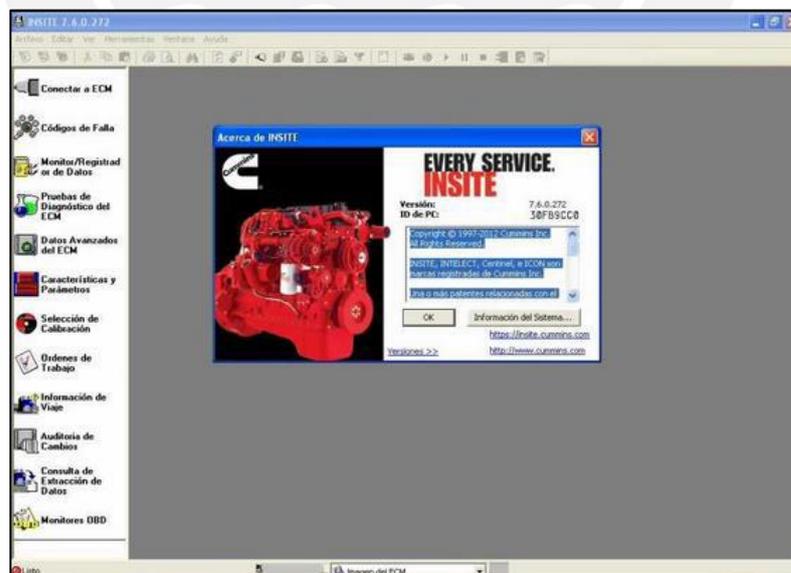


Figura 3.15 - Programa *Insite* de Cummins<sup>5</sup>

<sup>5</sup> Tomado del *software* instalado

### 3.2.8. Programa *Electronic Technician* del motor Caterpillar

Este programa nos proporcionó la información de los valores de medida y calculados por el módulo de control del motor Caterpillar C6.6 Acert tales como presión en el múltiple de admisión, temperatura de admisión, presión de inyección de diesel, presión en la cámara de combustión, etc.

Gracias al *Data Logger* del programa, pudimos monitorear por un lapso de tres minutos para cada par de *torque x velocidad* las siguientes variables:

1. velocidad del motor;
2. volumen de combustible suministrado;
3. presión de múltiple de entrada;
4. presión de aceite del motor;
5. factor de carga del motor;
6. temperatura del refrigerante del motor;
7. volumen de combustible de límite de humo;
8. volumen de combustible de límite de par;
9. presión deseada de riel de combustible;
10. presión atmosférica;
11. temperatura del aire de admisión.

De estas variables medidas, la que enfocamos nuestra atención fue el consumo ordenado de combustible. La interfaz del programa se presenta en la Figura 3.16.

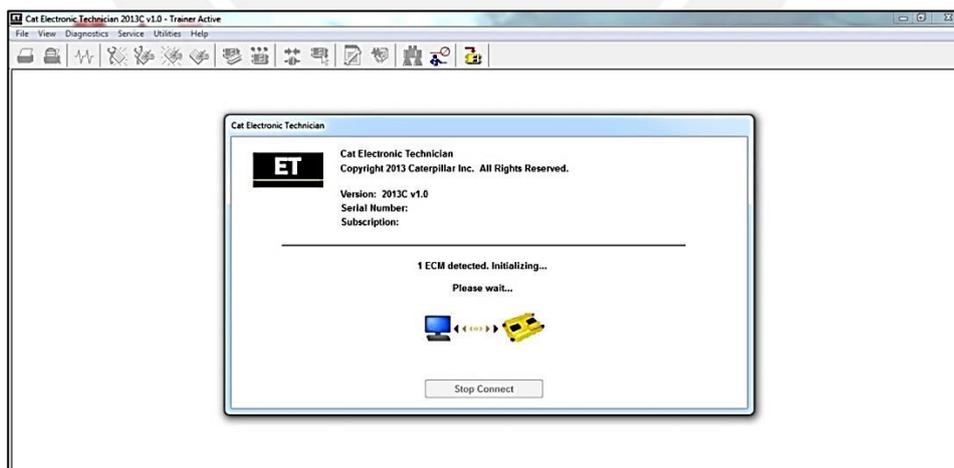


Figura 3.16 – Programa Electronic Technician de Caterpillar<sup>6</sup>

<sup>6</sup> Tomado del *software* instalado

### 3.3. Configuración y conexiones

#### 3.3.1. Esquema del banco de pruebas

Para facilitar la comprensión de la disposición y conexiones realizadas en los motores, se presenta el esquema de la configuración experimental del banco de pruebas en la Figura 3.17. Posteriormente se presentan las evidencias fotográficas de estas conexiones tal como se emplearon durante las experimentaciones.

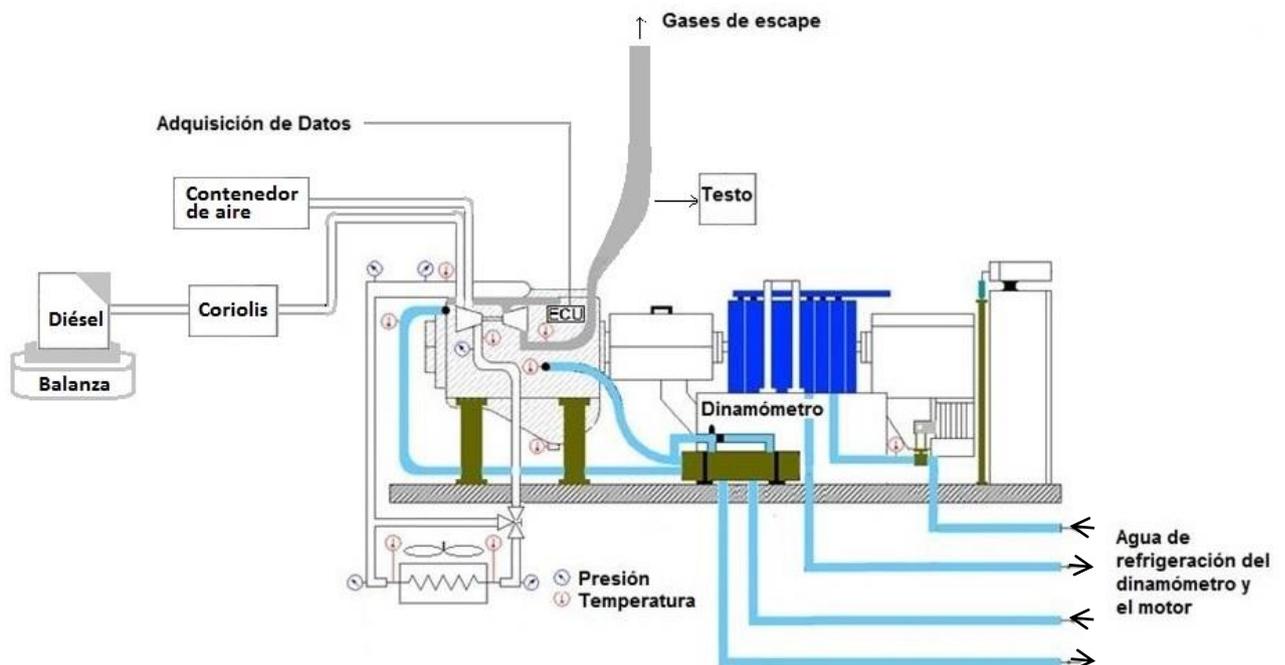


Figura 3.17 - Configuración experimental del motor instalado en banco de pruebas<sup>7</sup>

#### 3.3.2. Toma de aire

Para la toma de aire se empleó un tanque amortiguador conectado con una manguera flexible a la toma de aire del motor. En la Figura 3.18 se señalan los elementos instalados.

<sup>7</sup> Elaboración propia modificada de Cuisano [13]



Figura 3.18 – Conexiones de la toma de aire

### 3.3.3. Retorno de combustible

Se realizaron las conexiones de retorno de combustible de tal manera que reingresen a los filtros de entrada. En las Figuras 3.19 y 3.20 se pueden observar las conexiones realizadas para ambos motores.

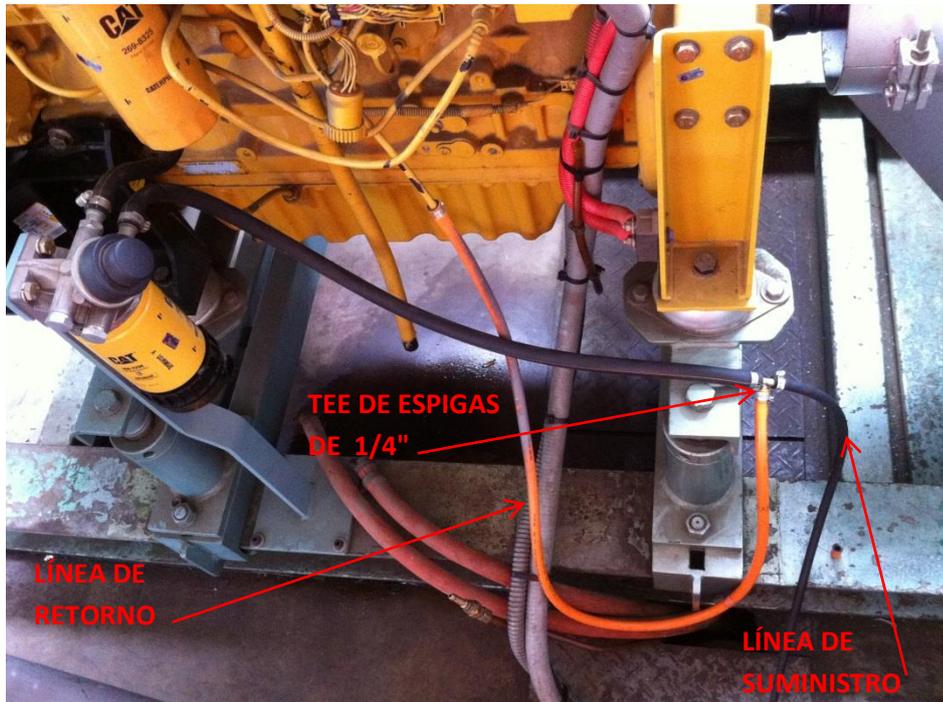


Figura 3.19 – Retorno de combustible en motor Caterpillar

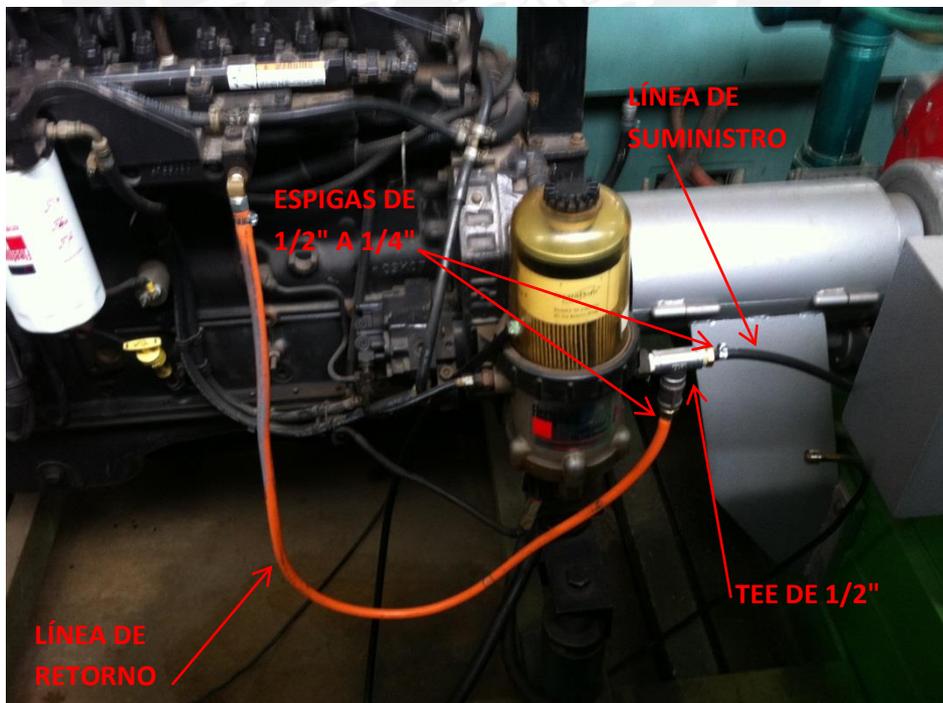


Figura 3.20 – Retorno de combustible en motor Cummins

### 3.3.4. Analizador de gases

La sonda del analizador de gases fue conectada en las conexiones roscadas de media pulgada soldadas en los ductos de escape de los gases de emisión (en el caso del motor Cummins, esta conexión debió instalarse puesto que no se contaba con ella).

En las Figuras 3.21 y 3.22 se muestran el montaje de la sonda en los ductos de escape para los respectivos motores.



Figura 3.21 – Montaje de la sonda del testeo en el motor Caterpillar

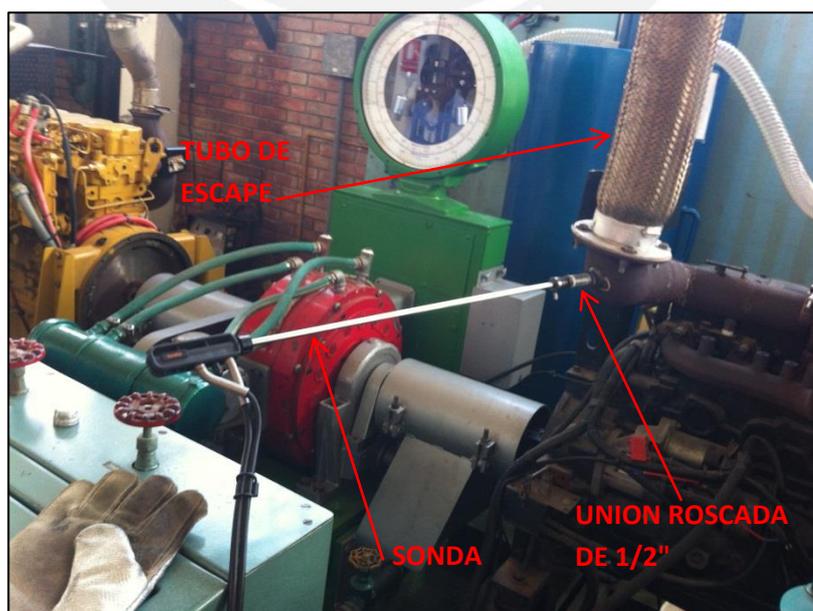


Figura 3.22 – Montaje de la sonda del Testeo en el motor Cummins

### 3.3.5. Suministro de combustible

El suministro de combustible es un punto de medición de tres variables: la variación en el peso de la galonera medido por la balanza, el tiempo entre toma de medidas de la balanza y el flujo másico medido por el coriolis.

Estos dispositivos se dispusieron cercanos unos a otros (sobre la misma mesa). En la Figura 3.23 se muestra el montaje de esta configuración.

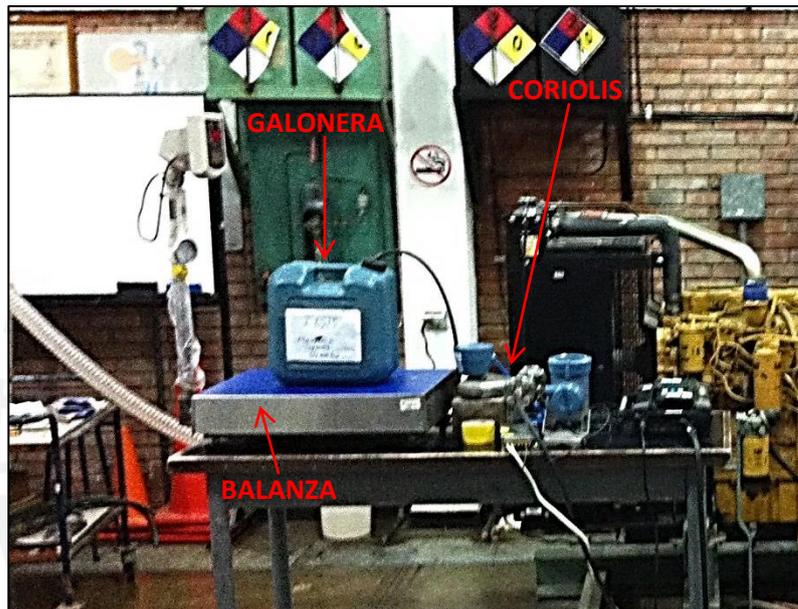


Figura 3.23 – Configuración del suministro de combustible

### 3.3.6. Conexión con los ECM de los motores

Para entablar comunicación con los Módulos de Control Electrónicos de los motores se emplearon laptops con los correspondientes *softwares* requeridos por los motores. Para estas conexiones se emplea un adaptador (*comm adapter*) el cual es brindado por el fabricante para cada motor. En las Figuras 3.24 y 3.25 se muestran los elementos de esta conexión para el motor Caterpillar. En la Figura 3.26 se muestran los elementos de esta conexión para el motor Cummins.

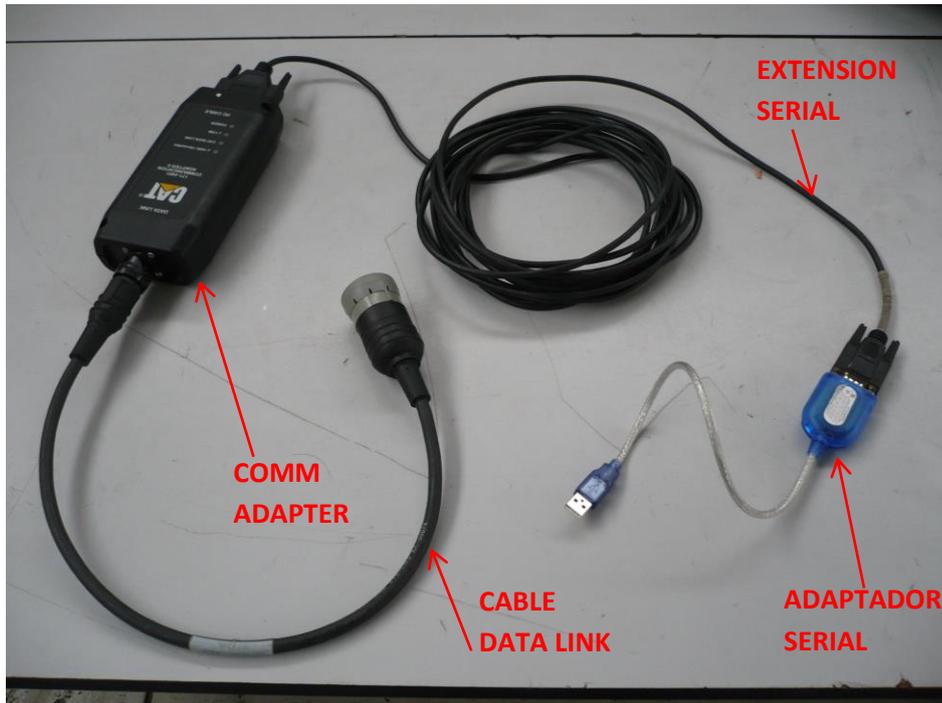


Figura 3.24 – Elementos de conexión al ECM Caterpillar [16]



Figura 3.25 – Conexión al ECM Caterpillar



Figura 3.26 – Elementos de conexión al ECM Cummins

## 4

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se presentarán y analizarán los resultados obtenidos en los ensayos realizados en el Laboratorio de Energía PUCP. Cada subcapítulo inicia con un análisis de los resultados obtenidos y luego presenta los gráficos correspondientes a los motores Cummins y Caterpillar. En el caso del motor Cummins, se mostrarán las gráficas para los cuatro regímenes de velocidad (1400 rpm, 1600 rpm, 1800 rpm, 2000 rpm) y diez niveles de carga (20 Nm, 40 Nm, 60 Nm, 80 Nm, 100 Nm, 120 Nm, 140 Nm, 160 Nm, 180 Nm, 200Nm). En el caso del motor Caterpillar, se mostrarán once niveles de carga (40 Nm, 60 Nm, 80 Nm, 100 Nm, 120 Nm, 140 Nm, 160 Nm, 180 Nm, 200Nm, 220 Nm, 240 Nm) para el menor régimen de velocidad (1200 rpm) y diez niveles de carga (20 rpm, 40 Nm, 60 Nm, 80 Nm, 100 Nm, 120 Nm, 140 Nm, 160 Nm, 180 Nm, 200Nm) para el mayor régimen de velocidad (2200 rpm). En los Anexos 2 – 5 se muestran las planillas de datos obtenidas de las experimentaciones.

Este modo de presentar los resultados será considerado para cada uno de los métodos de medición del consumo de combustible evaluados. En todos los gráficos, el nivel de carga es representado en el eje de la abscisa, mientras que el eje de la ordenada servirá para asociar el parámetro de estudio.

#### 4.1. Consumo de combustible obtenido por el método gravimétrico y el medidor de flujo másico coriolis

En las Figuras 4.1 – 4.6 se pueden observar los consumos de combustible para diferentes cargas y ambos motores empleando los métodos de medición gravimétrico y másico (coriolis). Se han graficado los valores de consumo promedio utilizando líneas continuas (color rojo para el coriolis y color negro para el gravimétrico). Además se han representado, en líneas segmentadas, los límites máximos y mínimos correspondientes a la incertidumbre propia de cada tipo de medición.

A modo de ejemplo, en la Figura 4.1, fue insertada una ampliación de cargas inferiores (de 40 a 45 Nm) del motor Cummins. En esta ampliación se puede apreciar con mayor facilidad el valor medio y las bandas de incertidumbre del consumo de combustible obtenido por el medidor tipo coriolis. Queda evidente, sin duda, el nivel inferior de incertidumbre del medidor coriolis frente al método gravimétrico.

De modo general, en las Figuras 4.1 – 4.6, se puede notar que, en primera instancia, la tendencia de ambas mediciones, y para ambos motores, son las esperadas: el consumo de combustible es creciente conforme aumenta la carga aplicada y el régimen de giro del motor.

El rango de consumo del medidor coriolis está, en gran parte de los ensayos, completamente contenido dentro del rango del método gravimétrico (es decir, entre las bandas de incertidumbre). Esto es particularmente relevante ya que se esperaba que el método gravimétrico resultara ser el más preciso, según se comenta en la literatura científica relacionada. Incluso la norma SAE J1321 – Prácticas recomendadas para la medición de combustible en vehículos pesados – indica reiteradamente que el método gravimétrico es el preferido en la ejecución de dicha norma porque minimiza los errores en la medición [17]. La justificación de esta afirmación radica en que el método gravimétrico se puede hacer tan preciso como uno quiera, tan solo depende del intervalo de tiempo que se le brinde a la toma de datos.

Por ejemplo, para que el método gravimétrico sea tan o más preciso que el coriolis se deberían cumplir que la incertidumbre relativa del método gravimétrico,  $\mu_{cc_g}$ , sea menor que la incertidumbre relativa del coriolis,  $\mu_c = 0,001$ , es decir:

$$\sqrt{\left(\frac{m}{M} - o\right) \left(\frac{m}{M} - t\right)} \tag{4.1}$$

donde:

$$\frac{m}{M} \tag{4.2}$$

$$\frac{m}{M} - o ; \frac{m}{M} - t \tag{4.3}$$

$$\frac{m}{M} - o ; \frac{m}{M} - t \tag{4.4}$$

$$\left(\frac{m}{M} - o\right) \left(\frac{m}{M} - t\right) \tag{4.5}$$

En Tabla 4.1 se tabulan algunas condiciones mínimas que cumplen con lo anterior. Por ejemplo, deben transcurrir 10 minutos y haberse consumido al menos 4,523 kg de combustible para cumplir la desigualdad. Aquí es importante mencionar que, para las condiciones de prueba realizadas, el máximo consumo de combustible reportado fue de 2,667 kg, medido durante 10 minutos. Es decir, la incertidumbre relativa del medidor gravimétrico, para 10 minutos, sería alcanzada con motores de mayor dimensión que podrían alcanzar este nivel de consumo (4,523 kg). Por otra parte, como fue explicado en el capítulo de metodología, el tiempo de medición considerado para las pruebas experimentales fue de 3 minutos, el cual estuvo limitado por los costos asociados al consumo de combustible.

**Tabla 4.1 – Condiciones mínimas para lograr que**

Tiempo (minutos)	Consumo (kg)
9	6,619
9,5	5,207
10	4,523
10,5	4,109
11	3,830
11,5	3,628
12	3,474

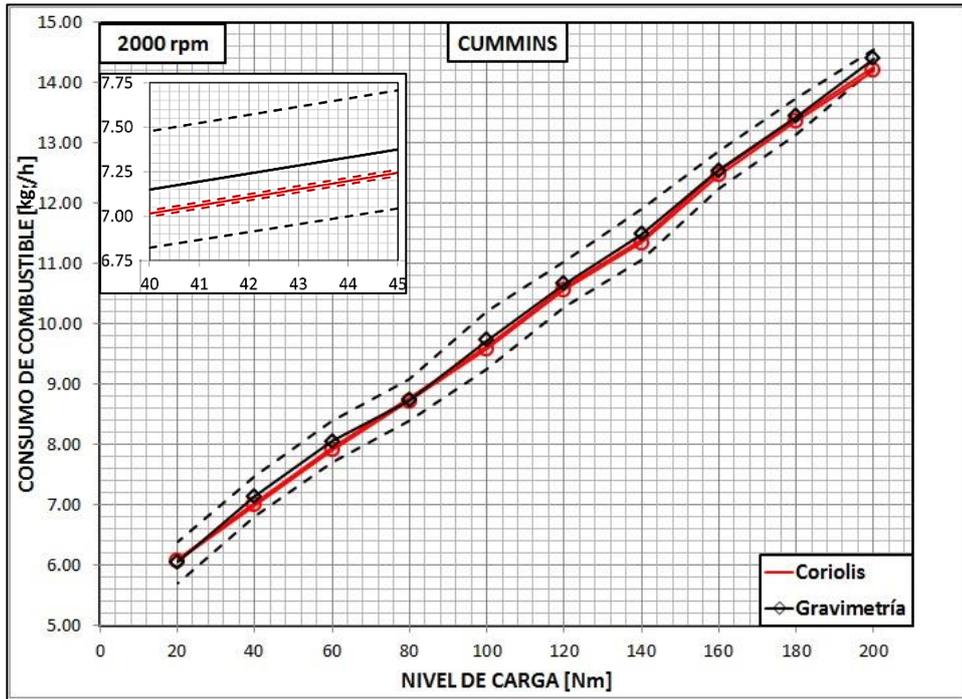


Figura 4.1 – Consumo de Diesel a 2000 rpm / Gravimetría vs Coriolis (Cummins).

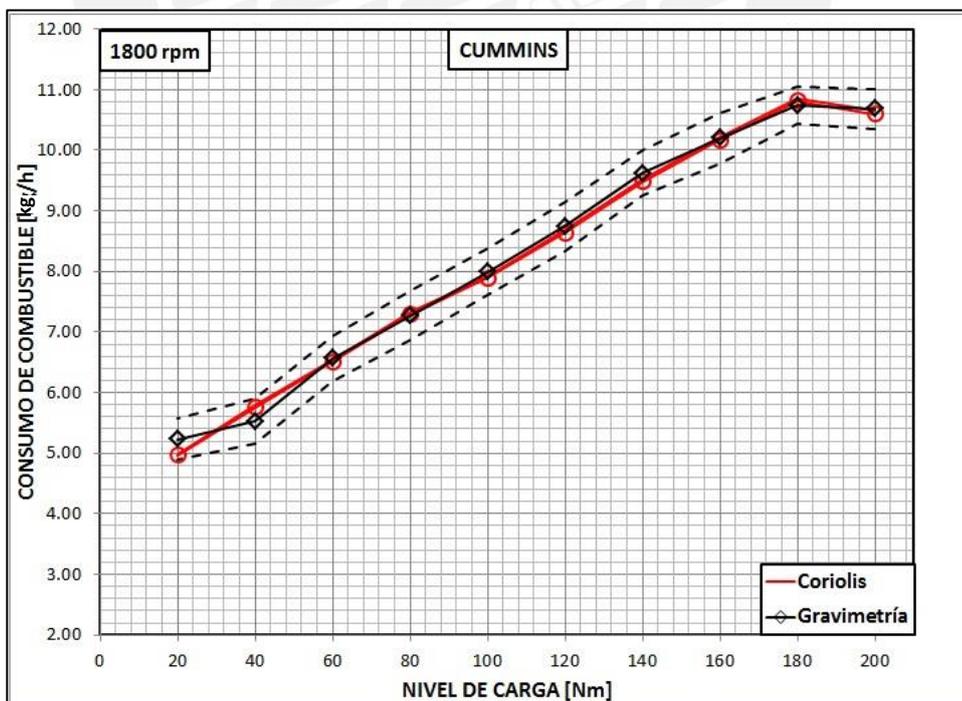


Figura 4.2 – Consumo de Diesel a 1800 rpm/Gravimetría vs Coriolis (Cummins)

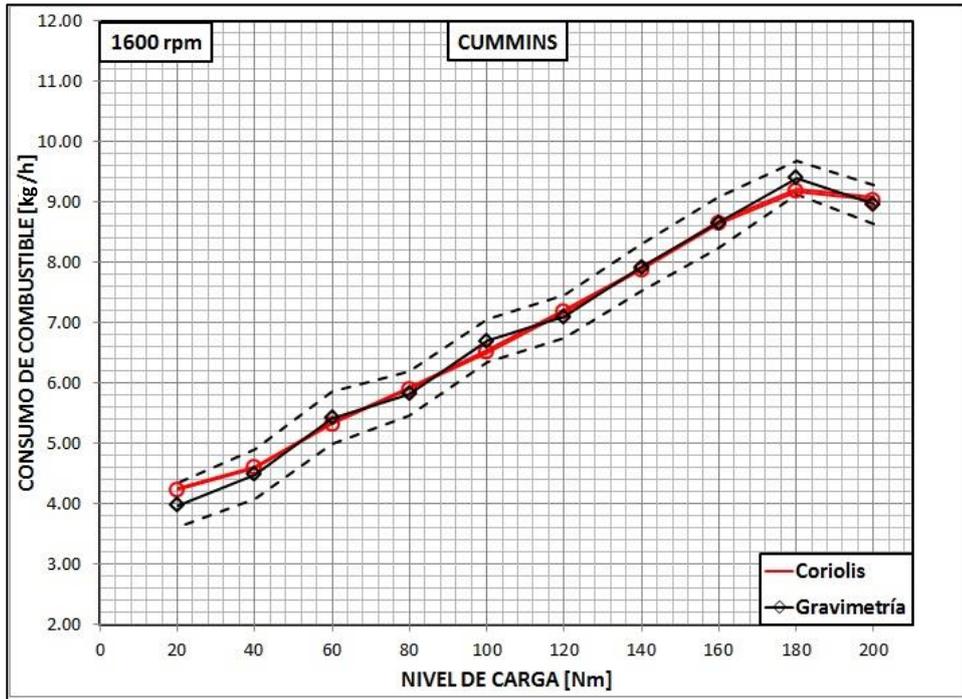


Figura 4.3 – Consumo de Diesel a 1600 rpm/Gravimetría vs Coriolis (Cummins)

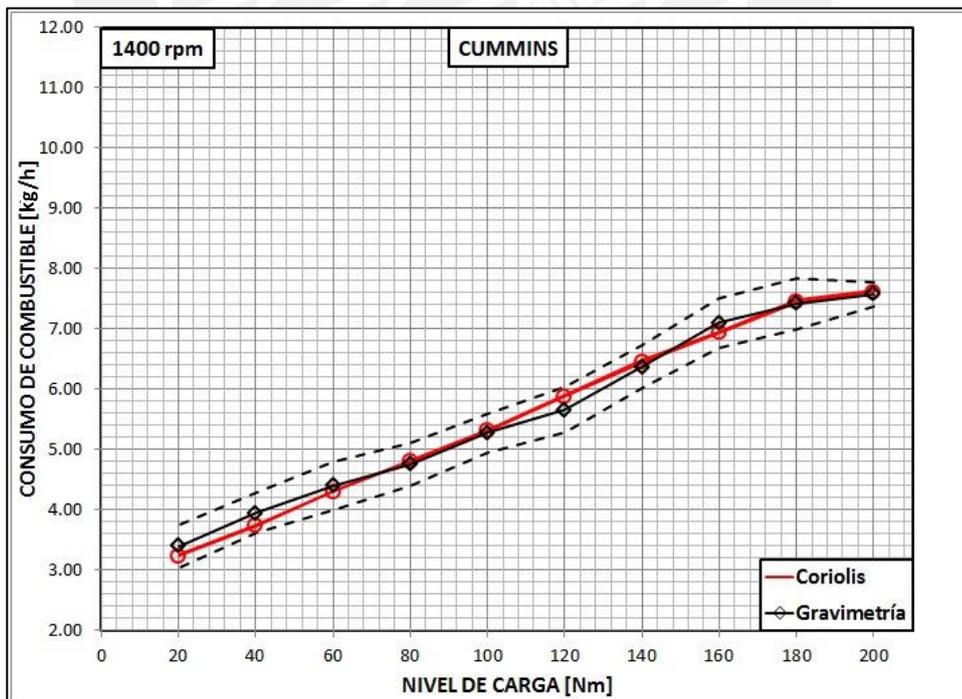


Figura 4.4 – Consumo de Diesel a 1400 rpm/Gravimetría vs Coriolis (Cummins)

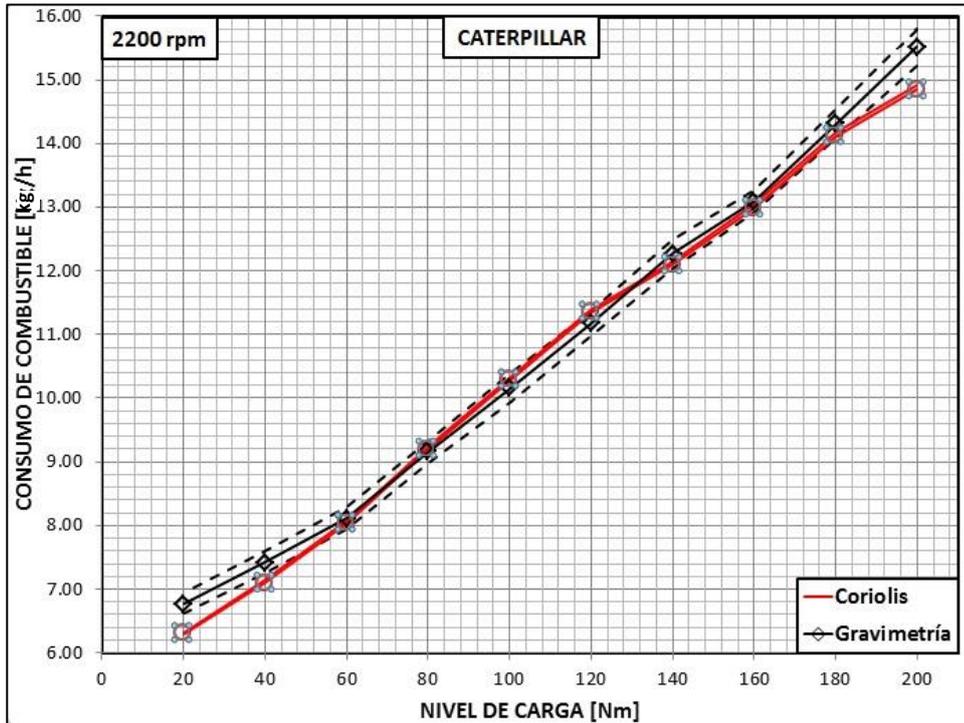


Figura 4.5 – Consumo de Diesel a 2200 rpm/Gravimetría vs Coriolis (Caterpillar)

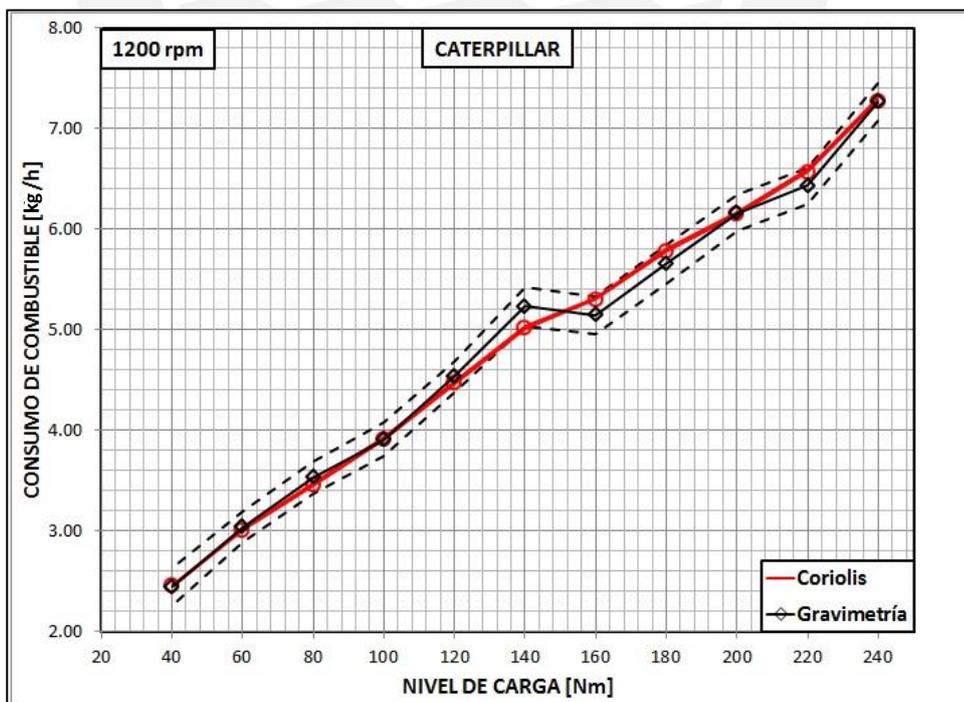


Figura 4.6 – Consumo de Diesel a 1200 rpm/Gravimetría vs Coriolis (Caterpillar)

## 4.2. Consumo de combustible obtenido mediante el balance de carbono y el medidor de flujo másico coriolis

En las Figuras 4.7 – 4.12 se pueden observar los consumos de combustible para diferentes cargas y ambos motores empleando los métodos de balance de carbono y másico (coriolis). Se han graficado los valores promedios y límites máximos y mínimos correspondientes a la incertidumbre propia de cada tipo de medición.

En primera instancia se puede notar que, en estas figuras, la tendencia de ambas mediciones son las esperadas: el consumo de combustible es decreciente conforme la carga y velocidad del motor disminuyen. Sin embargo, la tasa de variación de las curvas del balance de carbono es menos estable que la del medidor coriolis. También, en las Figuras 4.7 – 4.12, se puede notar que la medida obtenida a través del balance de carbono tiende a superar cada vez más a la del coriolis, conforme aumenta la carga del motor. No obstante, en las mayores velocidades y máximas cargas (ver Figura 4.7 y Figura 4.11), las medidas derivadas del balance de carbono tienden a aproximarse a la del método de coriolis.

En definitiva, el método del balance del carbono presenta varias ventajas y desventajas. Dentro de lo positivo, es un método relativamente simple en donde solo se requiere un analizador de gases y un medidor para el consumo de aire. Asimismo, la incertidumbre del método de medición es baja, por lo cual es también una manera confiable de registrar el consumo de combustible. Sin embargo, la complejidad radica en el tratamiento de las mediciones y en los numerosos cálculos y consideraciones que se deben de realizar para llegar a obtener un consumo de combustible más aproximado a la realidad. Por ejemplo, para el presente caso se consideró una composición química del combustible diesel nacional (DB5), basado en una información de la literatura técnica [7]. Además, las concentraciones de los gases de escape, medidas en base seca, no fueron corregidas a base húmeda. También, el medidor de consumo de aire no fue calibrado y el coeficiente de descarga de su placa de orificio fue asumido como a tener un valor constante, siendo que, en verdad, este coeficiente varía en función del número de Reynolds del fluido que atraviesa por el orificio.

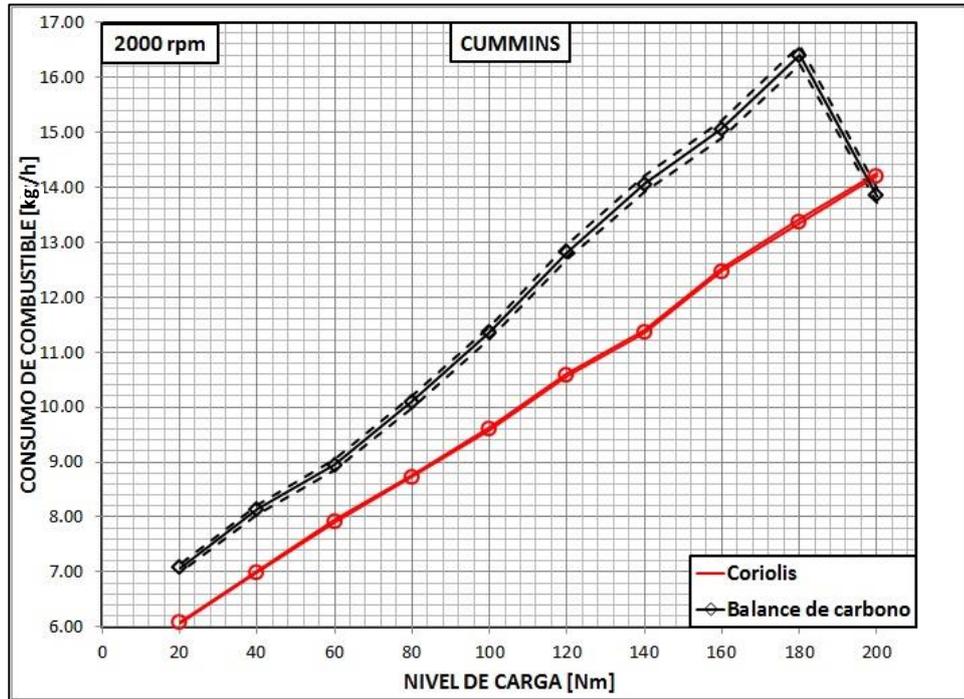


Figura 4.7 – Consumo de Diesel a 2000 rpm / Balance de carbono vs Coriolis (Cummins)

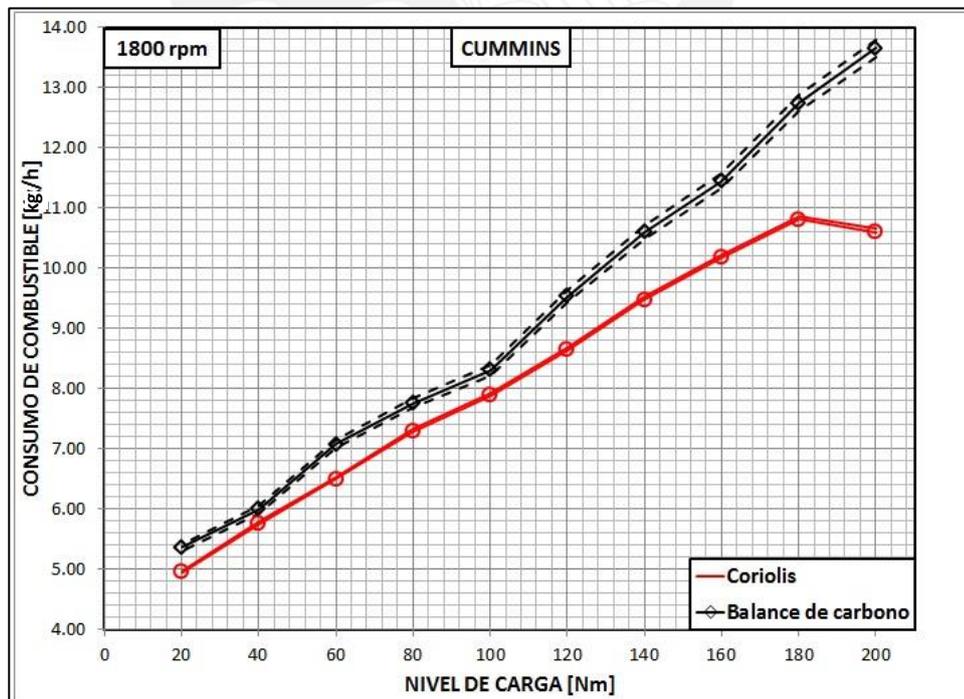


Figura 4.8 – Consumo de Diesel a 1800 rpm / Balance de carbono vs Coriolis (Cummins)

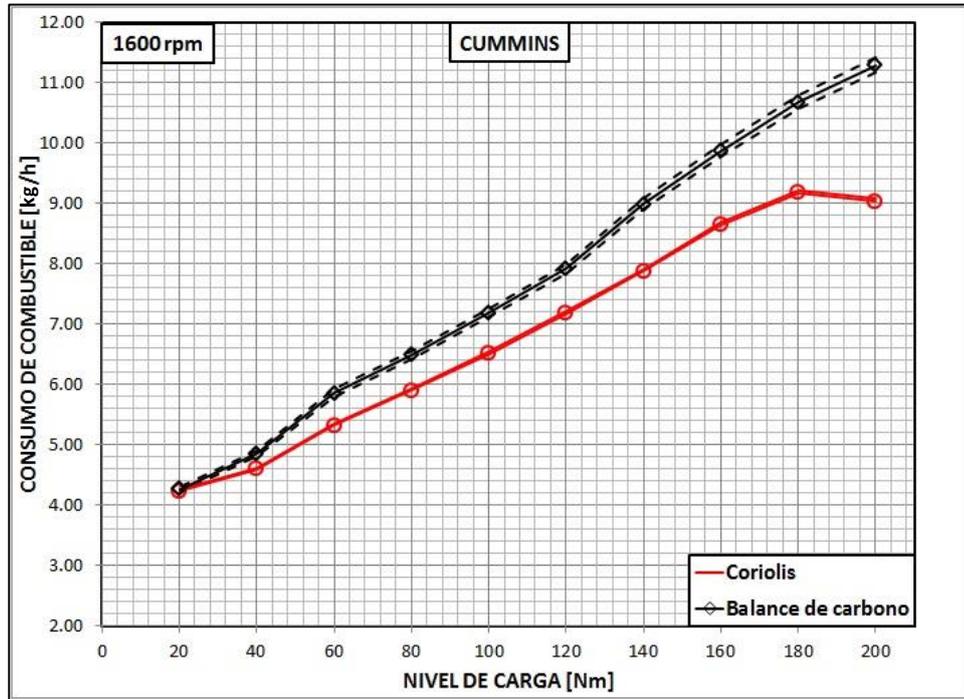


Figura 4.9 – Consumo de Diesel a 1600 rpm / Balance de carbono vs Coriolis (Cummins)

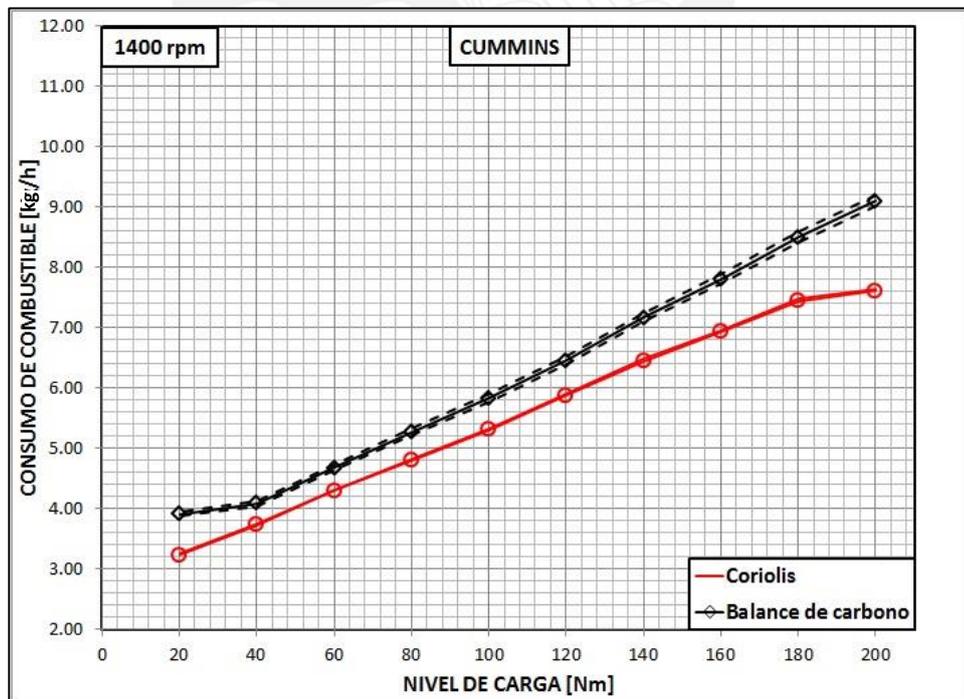


Figura 4.10 – Consumo de Diesel a 1400 rpm / Balance de carbono vs Coriolis (Cummins)

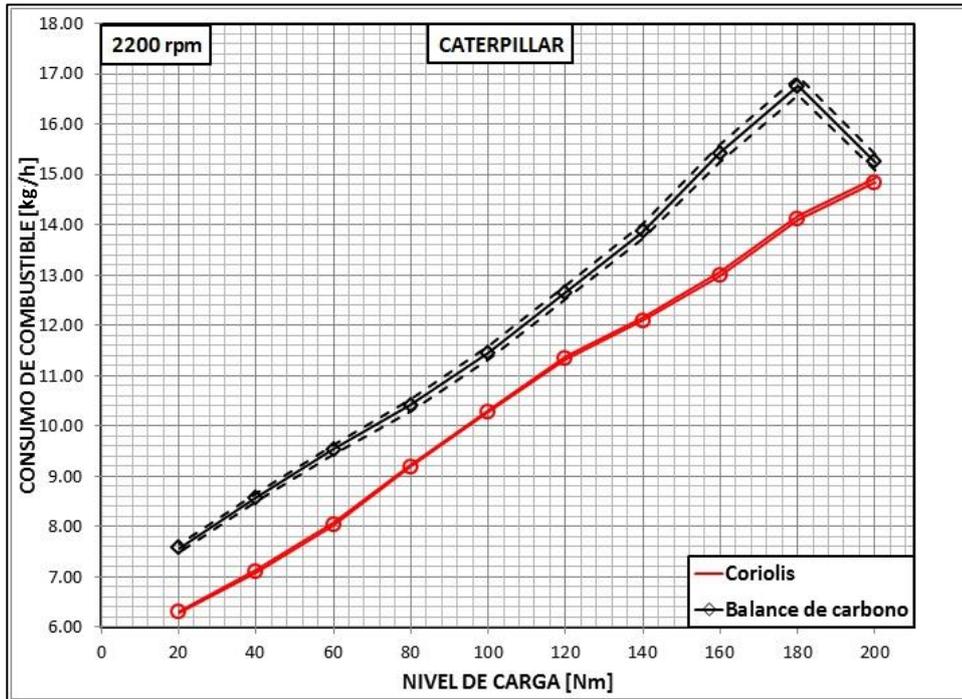


Figura 4.11 – Consumo de Diesel a 2200 rpm / Balance de carbono vs Coriolis (Caterpillar)

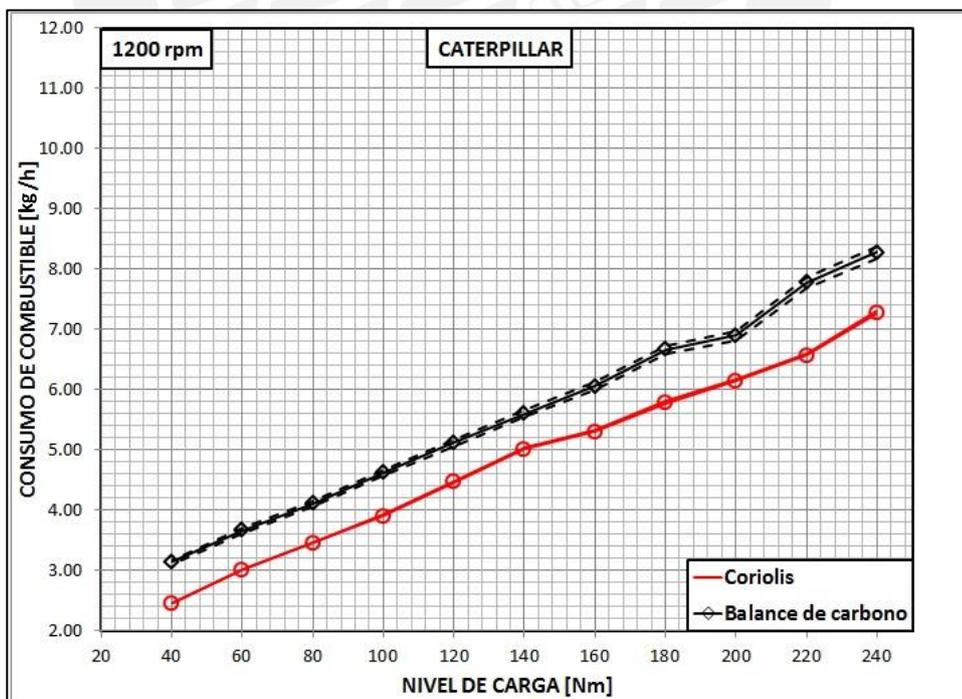


Figura 4.12 – Consumo de Diesel a 1200 rpm / Balance de carbono vs Coriolis (Caterpillar)

### 4.3. Consumo de combustible obtenido a través del ECM del motor y el medidor de flujo másico coriolis

En las Figuras 4.13 – 4.18 se pueden observar los consumos de combustible para diferentes cargas y ambos motores dados por el ECM del motor y por el instrumento coriolis. Se han graficado los valores promedios y los límites máximos y mínimos correspondientes a la incertidumbre propia de cada tipo de medición.

Nuevamente, se puede notar que la tendencia de ambas mediciones son las esperadas: el consumo de combustible es creciente conforme la carga y velocidad aumentan. Sin embargo la incertidumbre del valor calculado por el ECM del motor, especialmente en el caso del Cummins (Figuras 4.13 – 4.16), es muy alta.

Como se menciona en la literatura técnica, los datos relacionados con el consumo de combustible dados por los ECM no son confiables dado que ellos derivan de un algoritmo basado en algunas mediciones (presión de inyección, tiempo de energización de la bobina del inyector, presión de refuerzo del aire de admisión, temperatura del fluido refrigerante, condiciones ambientales, etc.) y no del mismo flujo [18]. Esta característica agrega un error inherente a la determinación del consumo de combustible para fines de análisis de eficiencia y desempeño de maquinarias o flotas vehiculares movidas por motores Diesel.

La fiabilidad de los datos arrojados por el ECM varía entre los modelos de motores de los distintos fabricantes, como podemos corroborarlo en las Figuras 4.13 – 4.18.

La justificación más probable que intenta explicar la razón por la cual las mediciones del ECM del motor Cummins (Figuras 4.13 – 4.16) se encuentran tan distantes de los valores reales (mediciones del coriolis), a comparación del motor Caterpillar, se basa en la propia calibración “desconocida” del ECM. Dado que el consumo de combustible surge de un algoritmo, el error inherente al cálculo puede crecer sustancialmente al modificarse factores del motor sin compensarse estos cambios en la programación del módulo de control del motor. Por ejemplo, alterar la calidad del combustible, modificar las líneas del sistema de admisión y escape, etc. A esto súmase el hecho de que el motor Cummins posee una calibración “modificada” para uso en Laboratorio, debido a los límites de operación del dinamómetro. En fin, existe un conjunto de conjeturas que deberán ser, en principio, consultadas al fabricante de este motor.

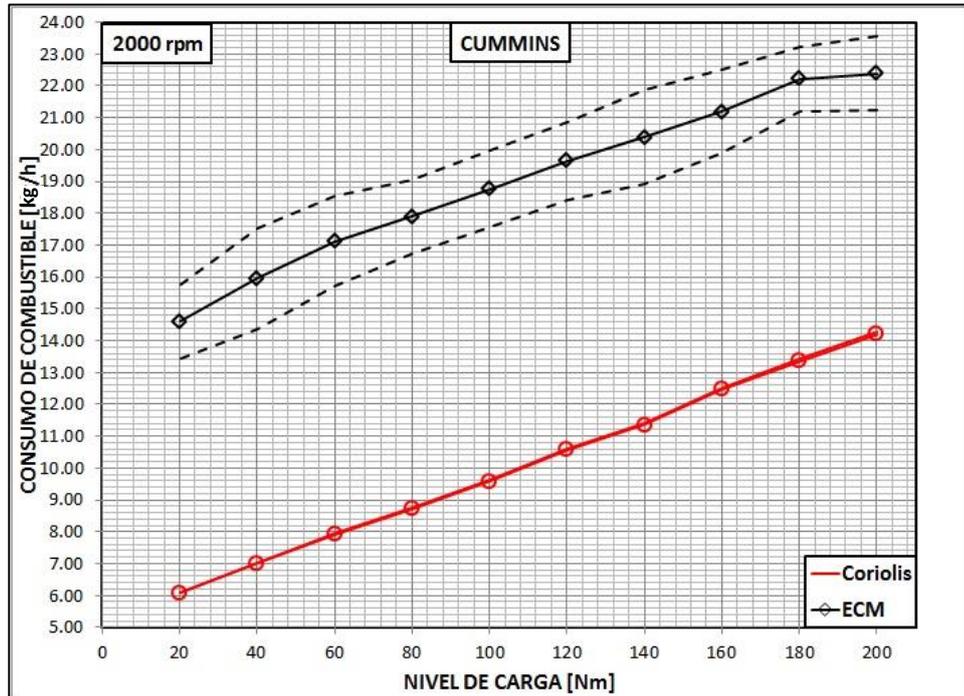


Figura 4.13 – Consumo de Diesel a 2000 rpm / ECM vs Coriolis (Cummins)

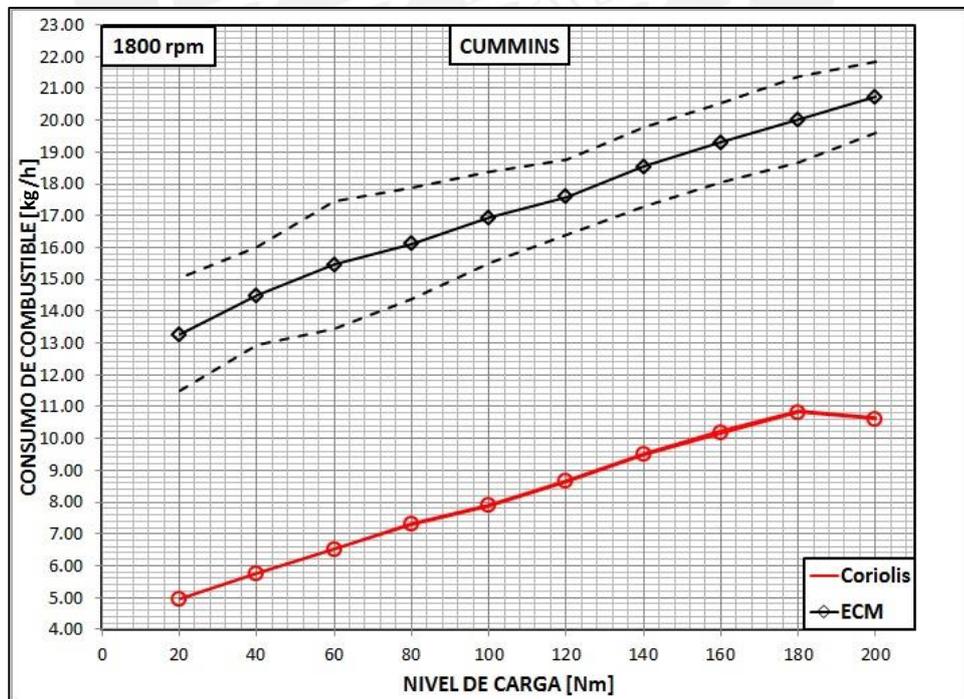


Figura 4.14 – Consumo de Diesel a 1800 rpm/ECM vs Coriolis (Cummins)

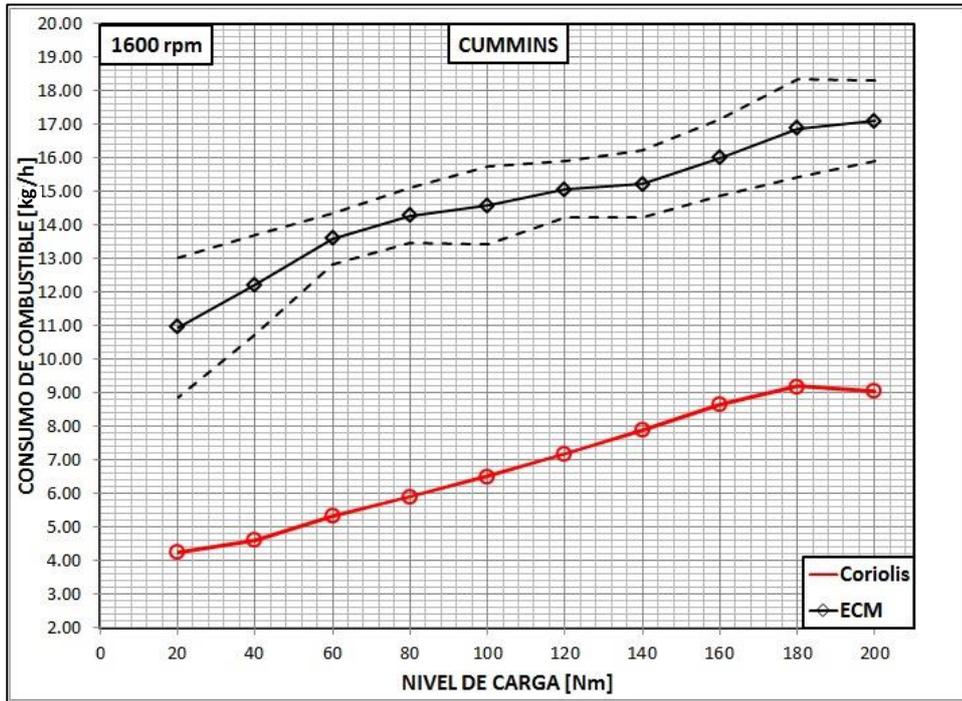


Figura 4.15 – Consumo de Diesel a 1600 rpm/ECM vs Coriolis (Cummins)

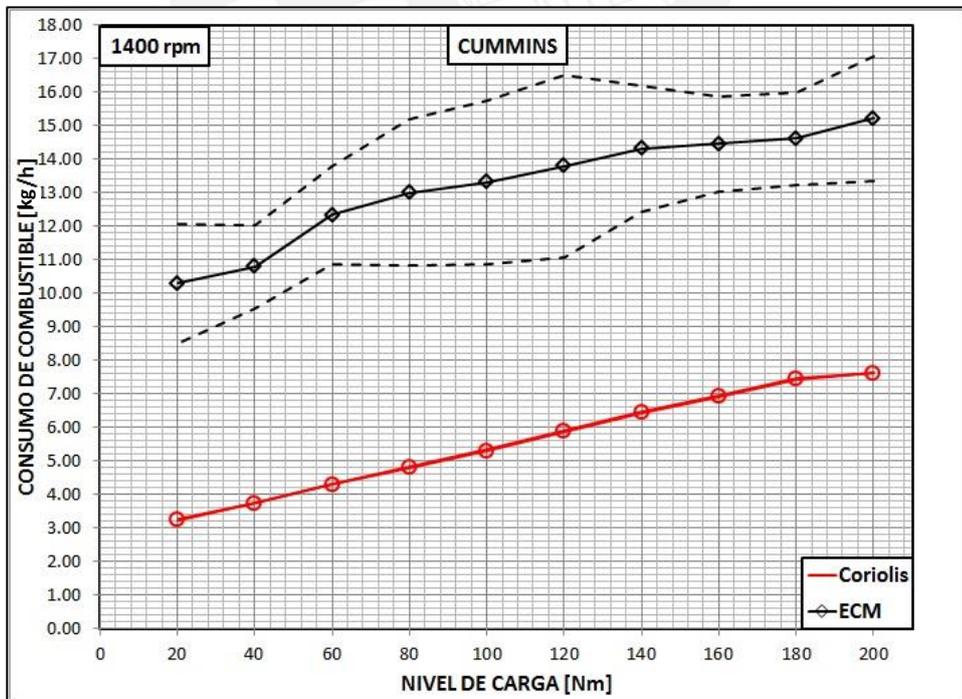


Figura 4.16 – Consumo de Diesel a 1400 rpm/ECM vs Coriolis (Cummins)

En el caso del motor Caterpillar, Figuras 4.17 – 4.18, puede inferirse que para el rango de cargas evaluadas en ambas velocidades, el consumo de combustible calculado por el ECM es aceptable hasta el 50% de carga. Sin embargo, como ya hemos mencionado, la sobre-estimación del consumo es más notable con la mayor aplicada al motor. Para 2200 rpm y 1200 rpm, las máximas diferencia encontradas entre el valor medido por el ECM y coriolis fueron de 13% (en 200 N.m) y 16% (en 200 N.m), respectivamente.

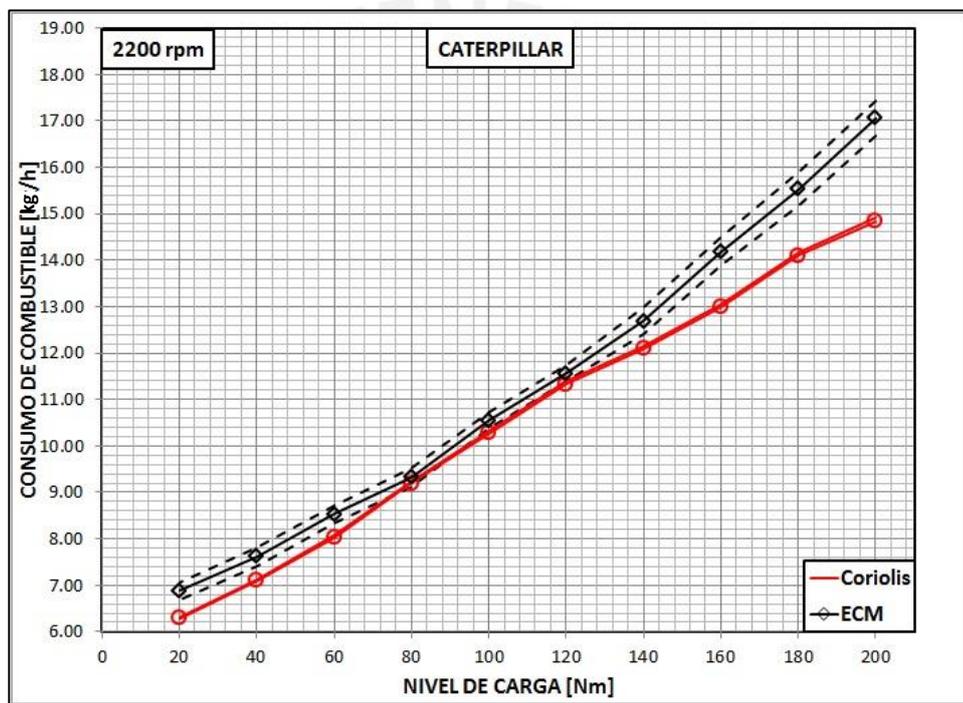


Figura 4.17 – Consumo de Diesel a 2200 rpm/ECM vs Coriolis (Caterpillar)

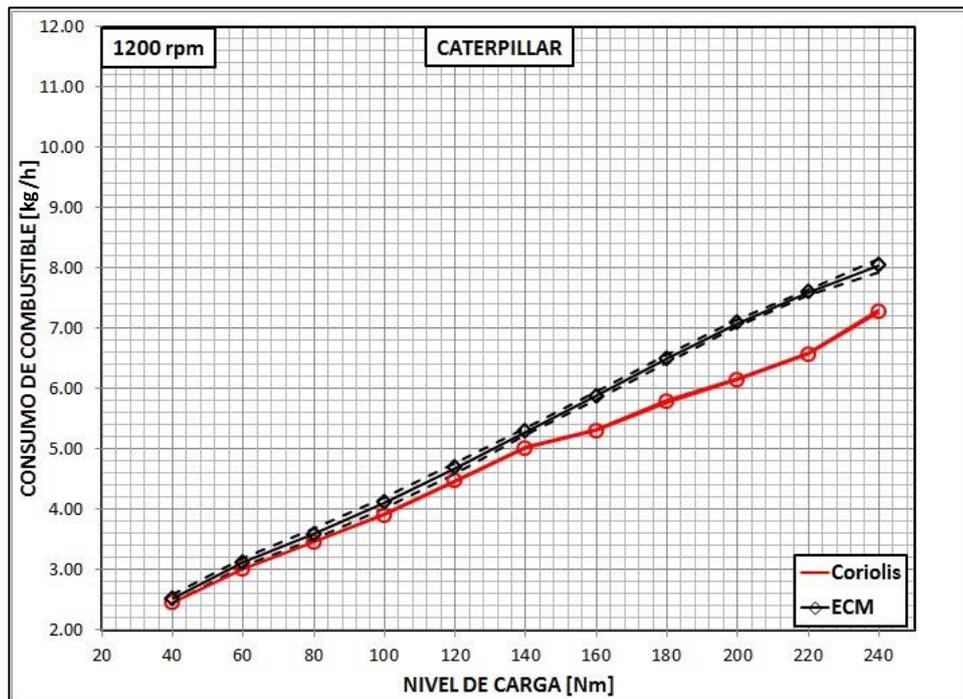


Figura 4.18 – Consumo de Diesel a 1200 rpm/ECM vs Coriolis (Caterpillar)

#### 4.4. Estudio de las incertidumbres en la obtención de la medida del consumo de combustible

En las Figuras 4.19 – 4.24 se pueden observar los comportamientos y tendencias de las incertidumbres relativas de los diferentes métodos de medición del consumo de combustible para diferentes cargas, diferentes velocidades y ambos motores.

La incertidumbre del medidor de flujo másico coriolis viene dada por el fabricante y para nuestro rango de flujo medido la incertidumbre se mantiene baja y constante. Por los resultados previamente discutidos y a partir de las Figuras 4.19 – 4.24, se puede constatar que el método de coriolis representa el más confiable de los considerados en el presente trabajo.

El método del balance de carbono también posee una incertidumbre baja y no presenta una variación significativa respecto al nivel de carga del motor. Cabe señalar que la incertidumbre asociada a este método depende del manejo de los cálculos y

asunciones que se tomen, por lo que se necesita mucho cuidado para asegurar la precisión tanto como la certeza.

La incertidumbre del método gravimétrico de medición del consumo de combustible es alta y con tendencia a disminuir conforme aumenta la carga del motor, debido al mayor consumo de combustible. Como se mencionó, este método se puede hacer tan preciso como uno quiera y como hemos expuesto, a mayores intervalos de toma de datos o mayores consumos de combustible, este método se hace más preciso. Por tanto, como se puede apreciar en las Figuras 4.19 – 4.24, la disminución de la incertidumbre del método gravimétrico conforme aumenta la carga del motor es natural y esperada.

Finalmente, la incertidumbre asociada con los datos obtenidos por el ECM de los motores no sugiere una tendencia clara. No se pueden identificar intervalos crecientes o decrecientes característicos para diferentes niveles de carga. Sin embargo, el motor Caterpillar muestra menores niveles de incertidumbre respecto al motor Cummins.

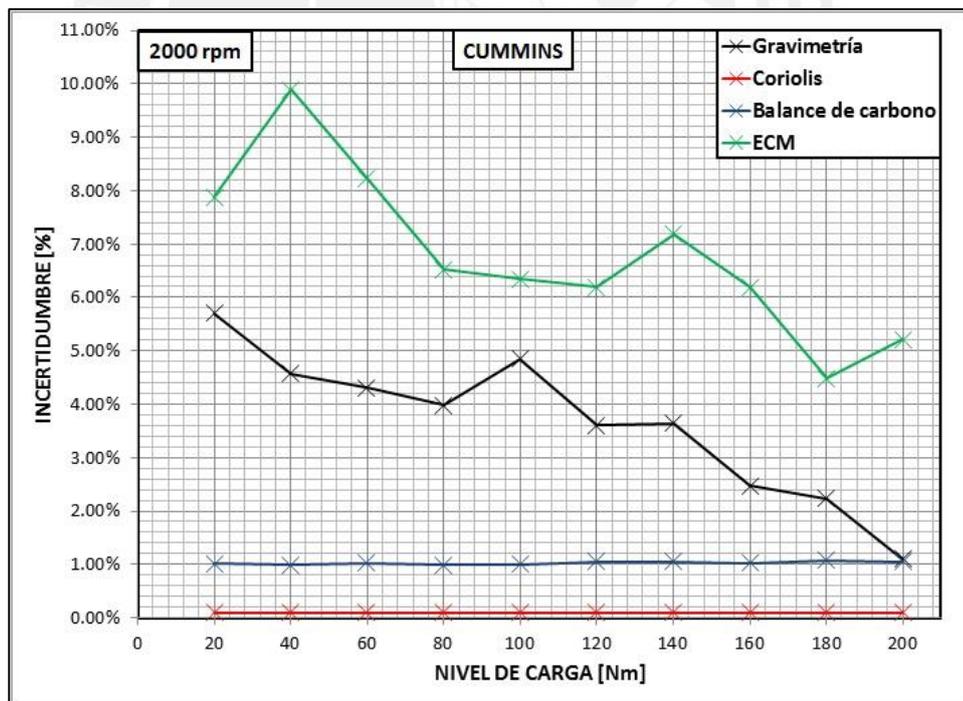


Figura 4.19 – Comportamiento de las incertidumbres a 2000 rpm (Cummins)

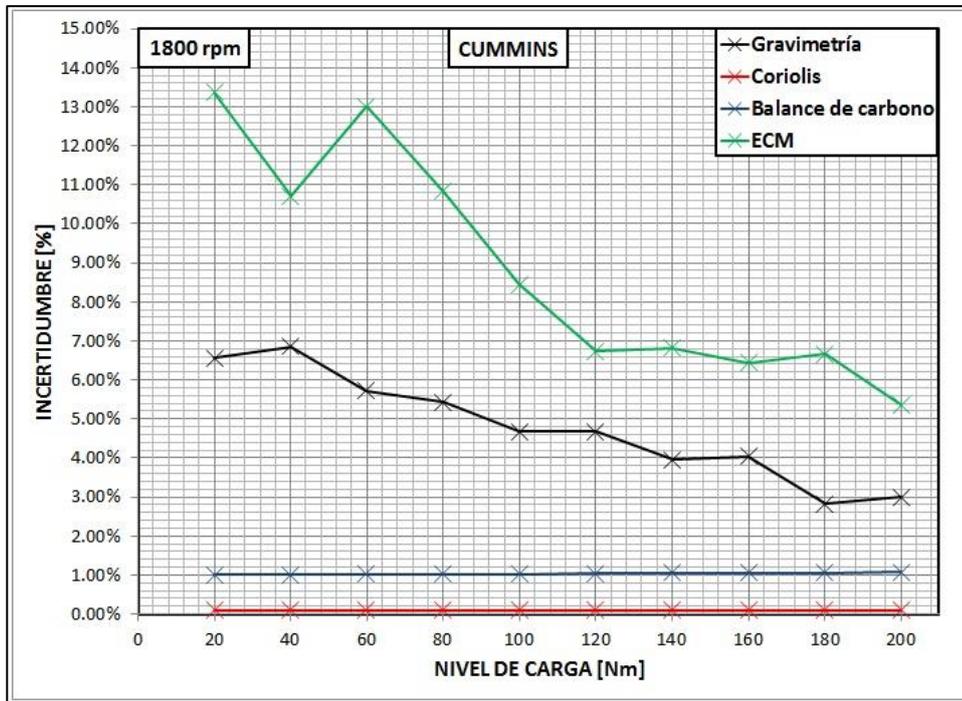


Figura 4.20 – Comportamiento de las incertidumbres a 1800 rpm (Cummins)

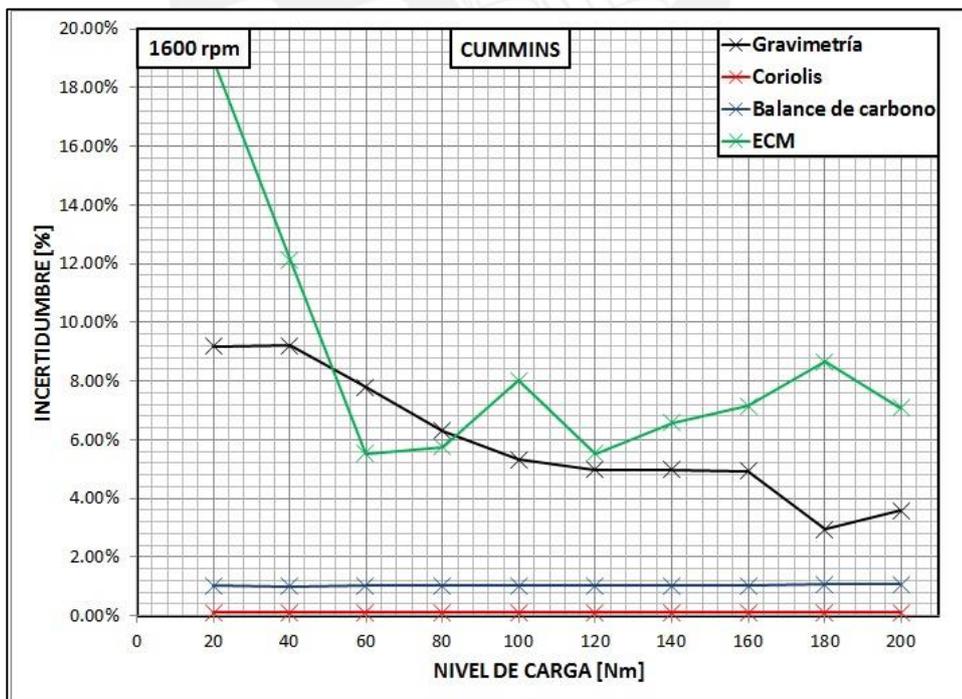


Figura 4.21 – Comportamiento de las incertidumbres a 1600 rpm (Cummins)

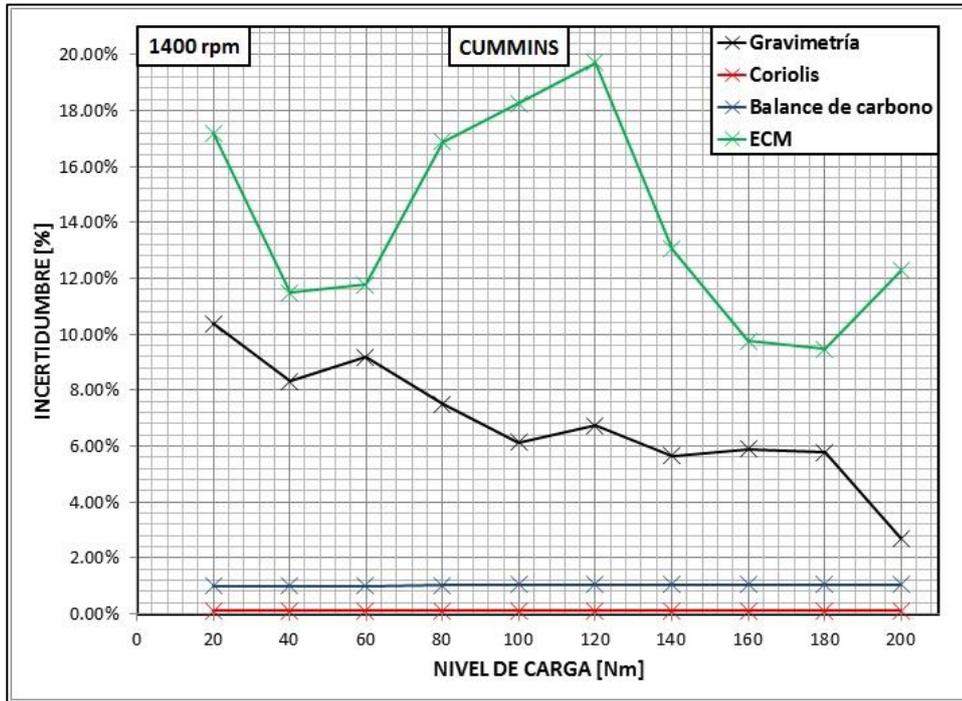


Figura 4.22 – Comportamiento de las incertidumbres a 1400 rpm (Cummins)

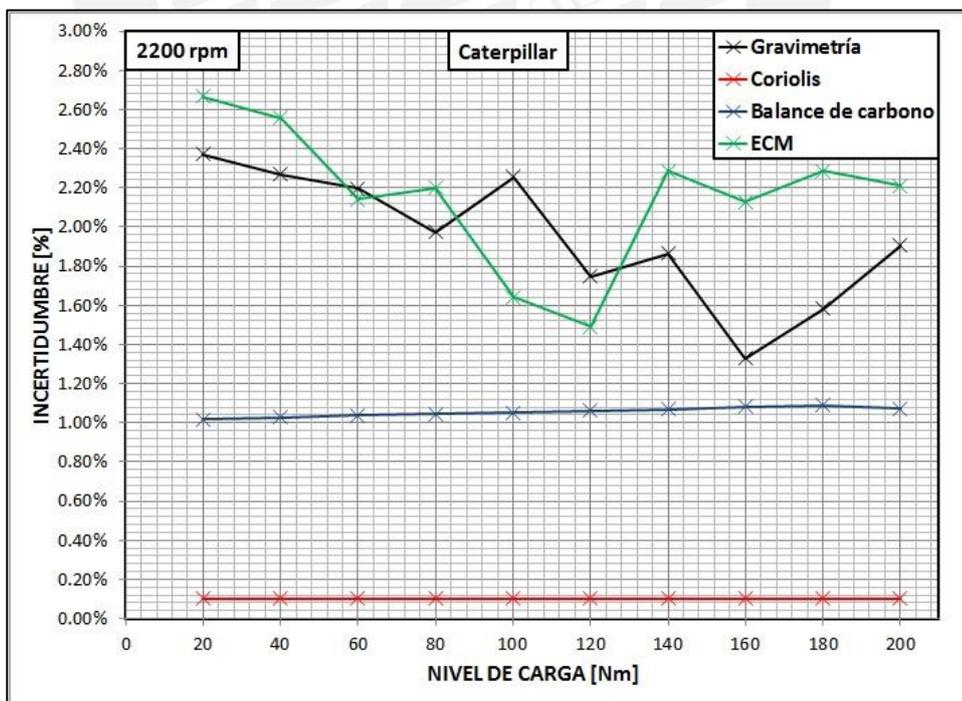


Figura 4.23 – Comportamiento de las incertidumbres a 2200 rpm (Caterpillar)

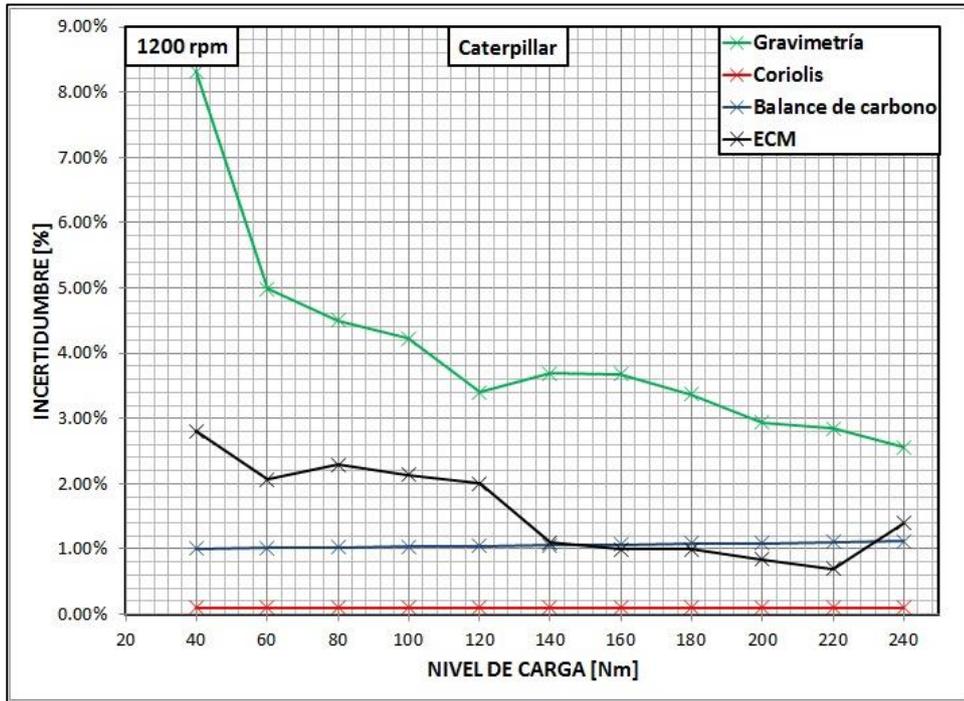


Figura 4.24 – Comportamiento de las incertidumbres a 1200 rpm (Caterpillar)

## CONCLUSIONES

El presente trabajo estudió minuciosamente una extensa cantidad de bibliografía relacionada con el análisis del consumo de combustible en motores Diesel empleando sistemas de medición externos e internos (Módulos de Control Electrónicos). Se logró identificar los instrumentos más utilizados en la industria y experimentaciones, y se logró justificar el porqué del rechazo de otros.

Se implementó el banco de pruebas de motores de encendido por compresión en el Laboratorio de Energía de la PUCP, utilizando dos motores de aplicaciones distintas (Cummins: tracto-camión, Caterpillar: maquinaria compactadora).

Con el fin de analizar correctamente los parámetros principales relacionados al estudio, la metodología experimental consideró el registro simultáneo de todas las medidas relacionadas al consumo de combustible (directo o indirecto).

Se determinaron los parámetros originales del motor y propuso una red de puntos (matriz de ensayos) que resultaron estar contenidos en los rangos más confiables de operación de los instrumentos más críticos (el medidor de coriolis). Luego con esta cantidad de datos se realizaron los análisis estadísticos y de incertidumbre experimental.

Los resultados obtenidos determinaron que el método gravimétrico tiene una incertidumbre ajustable por el usuario a partir de los tiempos de espera entre toma de datos; los ECM de los motores del laboratorio de energía de la PUCP no arrojan información confiable respecto al consumo de combustible; la principal debilidad del método de balance de carbono es la cantidad y complejidad de los cálculos necesarios involucrados en la determinación del consumo de combustible y que el método másico empleando un medidor de coriolis fue para nuestro caso el que arrojó los resultados más confiables.

Al final, se generó una base de datos experimentales bastante interesante, la cual podría ser tomada en cuenta para futuros ensayos de este tipo que busquen evaluar con precisión y certeza los consumos de combustibles de motores de maquinaria pesada o flotas vehiculares. Estos datos se podrán usar para obtener modelos numéricos, con el fin de estimar los consumos de combustible esperados de acuerdo al método de medición del mismo, teniendo en cuenta sus limitantes e incertidumbres relativas propias.

## RECOMENDACIONES

Para poder aumentar la precisión del método gravimétrico de medición del consumo de combustible se recomienda realizar un análisis estadístico previo en el cual se determinen los tiempos entre toma de datos con el objetivo de alcanzar la precisión deseada en la medición. El método gravimétrico es en muchos casos el más simple y más confiable a utilizar en experimentaciones, sin embargo, esto se logra luego de establecer los valores mínimos de tiempo y variación en la balanza mínimos que se deben de alcanzar.

Debido a la sensibilidad de las balanzas que se utilizan en este tipo de experimentaciones, es de suma importancia alejar o eliminar las condiciones externas que puedan afectar el registro de ésta (por ejemplo, vibraciones o superficies de apoyo no horizontales). En nuestro caso, notamos que la turbulencia en el aire generada por el *intercooler* de los motores afectaba severamente el registro de la balanza cuando se colocaban a distancias próximas.

Se recomienda revisar constantemente la calidad de los filtros de los instrumentos analizadores de gases de escape (en nuestro caso el Testo XL 350) a fin de garantizar mediciones precisas y acertadas.

Para facilitar la dinámica de la experimentación se recomienda emplear un registrador de datos que registre cada segundo las mediciones de la balanza, el coriolis y el analizador de gases. De esta forma también se garantiza la simultaneidad en la toma de datos.

Se sugiere revisar el estado de calibración del ECM del motor Cummins dado el gran desfase existente entre los datos reales y el dado por el módulo de control. El hecho de que este desfase sea mucho menor en el motor Caterpillar (el cual se utiliza menos que el Cummins) podría indicar que ha sido el uso y las modificaciones al motor Cummins lo que ha generado directamente esta descalibración.

Como comentario suplementario, recomiendo el énfasis en el trabajo estadístico en la realización de laboratorios regulares en el laboratorio de energía de la PUCP. Sería importante y sumamente provechoso para los alumnos que sepan calcular, interpretar y exponer resultados con sus respectivas incertidumbres para su posterior aplicación en el ejercicio laboral.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Cesvi Mexico. (2005). *El motor Diesel 2da parte*. Vehículos Industriales.
- [2] Fonseca, H., Ferreira, C., & Fernandes, T. (s.f.). *New Methodologies to Measure In Real Time Fuel Consumption of Internal Combustion Engines*. Leiria: Instituto Politecnico de Leiria.
- [3] Deng, J., Maass, B., Stobart, R., Winward, E., & Yang, Z. (2011). *Accurate and Continuous Fuel Flow Rate Measurement Prediction for Real Time Application*. Loughborough: SAE International.
- [4] Surcel, M. (2013). *Testing and Verification Protocol for Engine and Vehicle After-Market Devices*. Canada: Performance Innovation Transport.
- [5] Turton, D. (1979). *Fuel Consumption Measurements - Carbon Balance vs Flow Meter*. US Environmental Protection Agency.
- [7] Rodas, J. T., & Zhunio, J. A. (2008). *Propuesta de implementación de biodiesel como combustible para motores de encendido por compresión con el fin de reducir las emisiones contaminantes en la ciudad de Cuenca*. Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador.
- [8] Kaub, P. (1993). *Selecting the Proper Fuel Flow Meter for Engine Testing*. Detroit: SAE International.
- [9] Triveño, G. (2014). *Análisis del rendimiento y emisiones de un motor de encendido por compresión funcionando en el modo Diesel/gas*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- [10] Mendoza, J. (2014). *Estudio experimental de un motor bi-combustible para el uso de biogás*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- [11] Barbour, C., Clifford, T., Millar, D., & Young, R. (2008). *Fuel Flow Metering for Fishing Vessels*. Penryn: The Sea Fish Industry Authority.
- [12] Frey, C., Rasdorf, W., & Lewis, P. (2010). *Results of a Comprehensive Field Study of Fuel Use and Emissions of Nonroad Diesel Construction Equipment*. North Carolina: Transportation Research Record.

- [13] Cuisano, J. (2006). *Redução das Emissões em Motores Diesel-gás*. Rio de Janeiro: Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- [14] Moffat, R. (1988). *Describing the uncertainties in experimental results*. California: Standford University.
- [15] Laboratorio de Energía (PUCP). (2014). *Guía De Laboratorio De Motor Encendido Por Compresion (MEC)*. Lima: Sección de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ciencias en Ingeniería.
- [16] Amaru, A. (2009). *Manual del estudiante: Electronic Technician*. Lima: Ferreyros CAT.
- [17] SAE International. (2012). *Surface Vehicle Recommended Practice J1321 Fuel Consumption Test Procedure Type II<sup>o</sup>*. SAE International.
- [18] Surcel, M. D., & Michaelsen, J. (2009). *Fuel consumption tests for evaluating the accuracy and precision of truck engine electronic control modules to capture fuel data*. SAE International.

## BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

Ensfield, C., Bachman, J., Erb, A., & Bynum, C. (2006). *Evaluating Real-World Fuel Economy on Heavy Duty Vehicles using a Portable Emissions Measurement System*.

Golosinski, T. S., Hu, H., & Elias, R. (s.f.). *Data mining VIMS data for information on truck condition*.

Haggis, S. F., Hansen, T. A., Hicks, K. D., Richards, R. G., & Marx, R. (2008). *In-Use Evaluation of Fuel Economy and Emissions from Coal Haul Trucks Using Modified SAE J1321 Procedures and PEMS*. Huntsville: SAE International.

Ito, Y., Sukemura, N., Kobayashi, S., & Nakao, Y. (2004). *Patente nº US 6,807,868 B1*. United States of America.

Simms, V., Gandhi, A., & Sommer, C. (2009). *Implementation and evaluation of a coriolis flow meter*. SAE International.

Surcel, M. D., Provencher, Y., & Michaelsen, J. (2009). *Fuel consumption track tests for tractor-trailer fuel saving technologies*. SAE International.

Zietsman, J. (2009). *Fuel Consumption and Emissions Report for Carbon Chain Technologies Limited*. Texas: Texas Transprotation Institute.