

Artículo de Investigación

Metodología para inferir el mapa de desempeño y el consumo de combustible de un motor de combustión interna alternativo

Methodology for inferring the performance map and fuel consumption of an alternative internal combustion engine

Andrés López¹, Francisco Torres¹, Benjamín Pla², Byron Romero¹, Diego Bravo¹

¹ Centro de Investigaciones ERGON, Escuela de Ingeniería Automotriz, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador; 010204; alopezh@uazuay.edu.ec; bromeromgm@es.uazuay.edu.ec; diegobravopitss@gmail.com

² Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, CMT – Motores Térmicos, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España; 460101; benplamo@mot.upv.es

*Correspondencia: ftorres@uazuay.edu.ec

Citación: López, A., Torres, F., Pla, B., Romero, B., & Bravo, D., (2022). Metodología para inferir el mapa de desempeño y el consumo de combustible de un motor de combustión interna alternativo. *NovasinerGía*. 5(1). 43-60. <https://doi.org/10.37135/ns.01.09.04>

Recibido: 10 noviembre 2021

Aceptado: 29 enero 2022

Publicado: 31 enero 2022

NovasinerGía
ISSN: 2631-2654

Resumen: El objetivo de este trabajo fue calcular el consumo de combustible mediante el mapa del motor. Para identificar las zonas de trabajo del motor en su rango de funcionamiento se midió la velocidad, carga del motor, par y potencia. El consumo de combustible fue medido mediante el método gravimétrico y por el sistema de diagnóstico a bordo. Para determinar la relación entre el régimen de giro del motor, la presión media efectiva o el par efectivo y el consumo específico de combustible se desarrolló un algoritmo que relaciona el estado del motor con el consumo de combustible. Se midió el consumo de combustible en tres escenarios de desempeño del vehículo. En el recorrido extra urbano se obtuvo un rendimiento de 4.9 L/100 km, existiendo un aumento del 29% relacionado a los datos del fabricante. Concluyendo que los factores que afectan sustancialmente el rendimiento del motor y que originan un aumento de consumo de combustible son: el combustible y altura sobre el nivel del mar. Así, las zonas de consumo de combustible en el mapa de motor determinan el comportamiento del motor en diferentes lugares de desempeño del vehículo.

Palabras clave: Consumo de combustible, curva de par motor y potencia, dinamómetro de chasis, mapas de motor, motor de encendido provocado, poder calorífico de combustible, presión media efectiva.

Abstract: The objective of this work was to calculate fuel consumption using the engine map. Speed, engine load, torque, and power were measured to identify the working zones of the engine in its operating range. The fuel consumption was measured by the gravimetric method and the onboard diagnostic system. To determine the relationship between engine speed, mean effective pressure or effective torque, and specific fuel consumption, an algorithm was developed that relates engine condition to fuel consumption. Fuel consumption was measured in three scenarios. In the extra-urban route, an efficiency of 4.9 L/100 km was obtained, increasing 29% compared to the manufacturer's data. It was concluded that the factors that substantially affect engine performance and cause an increase in fuel consumption are: fuel and altitude above sea level. Thus, the fuel consumption zones on the engine map determine the engine's behavior in different performance locations of the vehicle.

Keywords: Average effective pressure, chassis dynamometer, engine maps, fuel calorific value, fuel consumption, spark ignition engine, torque curve, power curve.



Copyright: 2022 derechos otorgados por los autores a NovasinerGía.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de una licencia de Creative Commons Attribution (CC BY NC). (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Lista de símbolos/siglas, Unidad			OBD		On Board Diagnostics	-
AMEM	Aproximación al mapa de eficiencia del motor	-	PID	<i>Parameter ID</i>		-
CEC	Consumo específico de combustible	g/kWh	pme	Presión media efectiva		bar
MIL	<i>Malfunction Indicator Light</i>	-	n	Régimen de giro del motor		min ⁻¹
MAP	<i>Manifold absolute pressure sensor</i>	kPa - psi	SAE	Sociedad de Ingenieros Automotrices		-
MCIA	Motor de combustión interna alternativo	-	TPS	<i>Throttle Position Sensor</i>		%
MEC	Motor de encendido por compresión	-				

1. Introducción

Las normativas para hacer frente a emisiones de vehículos con motores de combustión interna alternativos (MCIA), son cada vez más estrictas, sin embargo, la diferencia entre las predicciones (basadas en las pruebas reglamentarias) y el uso de combustible y las emisiones en el mundo real es cada vez mayor. Una forma de aumentar la precisión de las predicciones es utilizar mapas de motor precisos simulados en ciclos de conducción del mundo real (Bishop, Stettler, Molden, & Boies, 2016). El mapa de motor es la representación de las zonas de operación del motor, basado en el régimen de giro del motor, la pme o el par motor y el CEC. Los ciclos de conducción representan el tiempo y la velocidad aplicados para una ruta específica, por la cual se desplaza un vehículo. En la actualidad la tendencia de los fabricantes de motores de combustión interna es ofrecer motores de bajo cilindraje, económicos y menos contaminantes, entre los 1000 a 1600 cm³ de capacidad del motor, que proporcionen mayor potencia y menor consumo de combustible. El funcionamiento del motor se basa en el mapa considerando carga y especialmente el CEC que relaciona la masa de combustible con la energía proporcionada, con ello se pueden adecuar motores para diferentes aplicaciones, como pueden ser motores estacionarios generadores de electricidad, motores para vehículos de carga y de pasajeros, motores para vehículos fabricados en serie y de competición, buscando el mejor rendimiento y eficiencia.

Los mapas característicos de los MCIA de encendido provocado o de compresión, indican el comportamiento del motor según el régimen de giro del motor (min⁻¹), la pme (bar) o el par desarrollado por el motor (Nm) y se relacionan con el CEC (g/kWh). De esta manera se analiza el comportamiento del motor según la carga aplicada y con ello se establecen las zonas de CEC, dichas curvas representan isoconsumo e isopotencia. El mapa de motor impone los parámetros de funcionamiento para las distintas condiciones de operación, se puede modificar en función del desempeño necesario según su aplicación, su diseño se puede orientar para mayor potencia o menor consumo de combustible, también se puede sacrificar la durabilidad de los componentes a cambio de un aumento en las prestaciones (Gismero, 2017). La configuración óptima de un MCIA conduce a diferentes mapas dependiendo del parámetro a determinar, como puede ser el mapa de ignición que indica régimen de giro del motor, con la pme y el avance al punto de ignición en la bujía, otro tipo de mapa es mediante el régimen de giro del motor, la pme y el volumen de inyección de combustible, reproduciendo la forma y la magnitud del uso de combustible y las emisiones observadas por segundo, permitiendo establecer el nivel de emisiones contaminantes generadas y aplicar dispositivos para la reducción de los gases emitidos.

Los mapas de motor generalmente no son proporcionados por todos los fabricantes y en caso de ofrecer dicha información no consideran todas las zonas de funcionamiento y son mediciones realizadas en condiciones de laboratorio, efectuadas a nivel del mar, con

temperaturas controladas, y debido a que se trata de motores que aspiran aire para su funcionamiento la calidad del mismo influye en el rendimiento. Las curvas ofrecidas son simplificadas y no abarcan el rendimiento en condiciones distintas de operación, debido a ello la obtención de mapas de motor requiere de amplios recursos y pruebas exhaustivas para obtener curvas de rendimiento en diferentes situaciones de carga. Mediante los mapas de motor, el análisis del consumo de combustible se aporta al objetivo 13 Acción por el clima, mediante la calibración y modificación del consumo de combustible se puede disminuir la cantidad de emisiones contaminantes que aportan al calentamiento global.

El objetivo de este trabajo fue desarrollar una metodología para inferir una aproximación al mapa de eficiencia de motor y de esta manera identificar regiones de desempeño del motor en diferentes condiciones experimentales. Esta aproximación al mapa de motor facilitara la determinación del consumo de combustible en diferentes condiciones experimentales, entre otros parámetros de interés.

2. Metodología

2.1. Aspectos básicos.

Para comprender el desempeño del MCI es necesario obtener el AMEM, que considera el régimen de giro del motor y la carga del motor y también se incluye la curva de par motor, los mapas de rendimiento pueden tener un impacto significativo en la eficiencia de un motor, una de las principales razones por las que la mayoría de los usuarios u operadores no tienen un mapa de rendimiento creado para sus respectivas aplicaciones de motor se debe a que la creación de un mapa de rendimiento requiere mucho tiempo y recursos, la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE) desarrolló un estándar que muestra el detalle de lo que se requiere para crear un mapa de desempeño o de eficiencia (Keller, 2014).

Para caracterizar correctamente el consumo de combustible y el rendimiento general de un vehículo, es esencial un mapa completo del motor que describa el consumo de combustible del motor en todo su rango operativo, incluido el ralentí, el acelerador completamente abierto, el par motor mínimo y la velocidad operativa máxima. Durante la evaluación comparativa del motor, el Centro Nacional de Tecnología Avanzada (NCAT), ubicado en el Laboratorio Nacional de Emisiones de Vehículos y Combustibles de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) en *Ann Arbor, Michigan* recopila datos de prueba tanto en estado estacionario como transitorios para caracterizar estas diferentes condiciones de operación, utilizando métodos y procedimientos de prueba científicos (Dekraker, Barba, Moskalik, & Butters, 2018)

Dentro de los puntos en la construcción de un mapa de eficiencia de consumo de combustible es establecer el rango de operación que debe cubrirse, esto se hace generando curvas para el par o par máximo y mínimo frente al régimen de giro del motor, para ello se deben considerar los siguientes puntos:

1. Definir el entorno operativo que cubrirá el mapa.

2. Definir la cuadrícula de velocidad y carga para la construcción del mapa de combustible.
3. Generar mapa de consumo de combustible a partir de datos de entrada.
4. Examinar el mapa de combustible resultante y revisar los datos si es necesario.

La figura 1 muestra los puntos a determinar para la obtención del mapa de motor, el mismo fue realizado en un motor Honda Civic 1.5L 2016 y una transmisión CVT, la zona de ralentí indica un funcionamiento a carga baja del motor dentro del par y potencia mínimo, la zona del núcleo del mapa indica una carga baja y media del motor dentro del par y potencia medios, en donde se muestra los puntos de estado estable de funcionamiento del motor, la zona de carga alta indica los puntos de cambio de carga media a carga alta en donde se alcanza el par máximo.

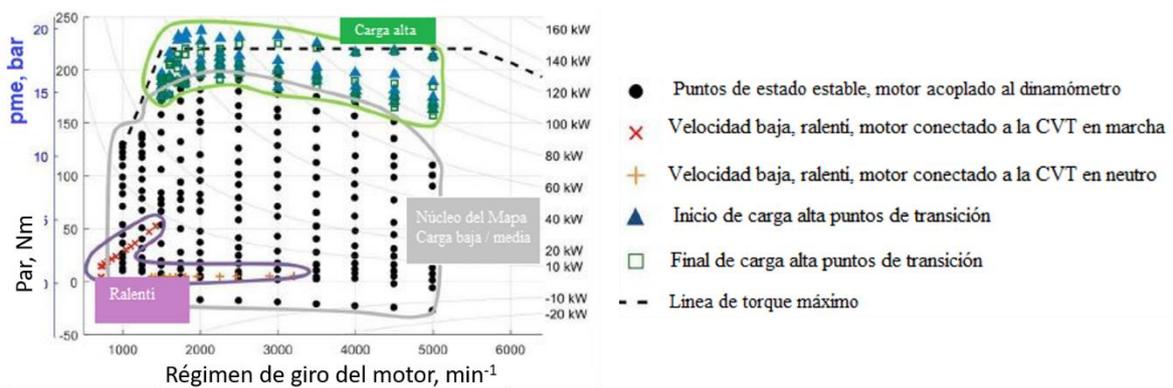


Figura 1: Puntos de datos de prueba de mapeo del motor (Dekraker et al., 2018).

Las curvas características multiparamétricas de una AMEM, indican la variación del CEC en relación a valores fijos de régimen de giro del motor y de la pme, de esta manera se obtienen mapas de motor bidimensionales indicando el comportamiento del motor (Payri & Desantes, 2011).

La figura 2 indica un mapa de motor de encendido provocado (MEP) sobrealimentado de 2000 cm³ donde se indica las zonas de CEC a diferente régimen de giro del motor y pme.

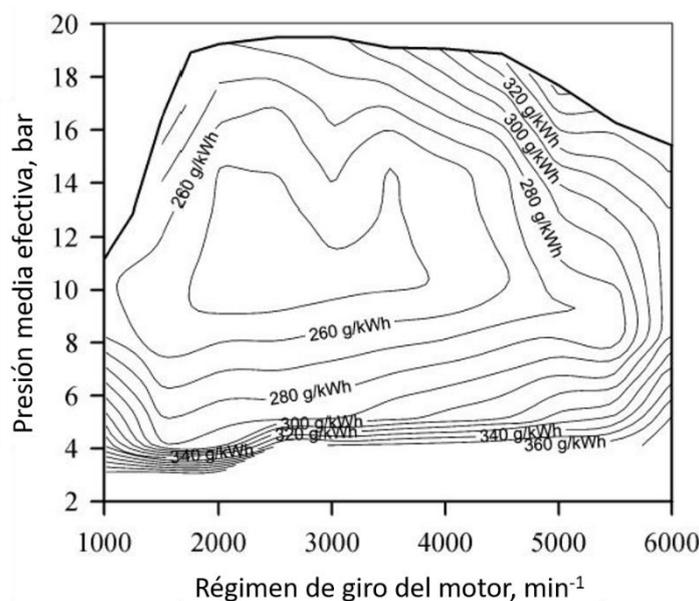


Figura 2: Curvas de isoconsumo de un motor sobrealimentado (Payri & Desantes, 2011).

El CEC del motor por lo general es presentado en un mapa de dos dimensiones, en lugar de expresarlo analíticamente, donde se indica principalmente la eficiencia del motor en relación al CEC y es importante el análisis de funcionamiento para establecer mediante una simulación cual es el comportamiento del motor dependiendo de la carga aplicada (Ben-Chaim, Shmerling, & Kuperman, 2013). La figura 3 indica un ejemplo de mapa de motor, en el cual se expresa la curva de potencia del motor e incluye las zonas de CEC según el régimen de giro del motor. Para determinar la potencia y el par generado por el motor bajo condiciones estándar de funcionamiento, es necesario hacerlo en un dinamómetro de chasis, de lo cual la curva de potencia máxima establece la línea óptima de funcionamiento del motor (Ben-Chaim *et al.*, 2013)

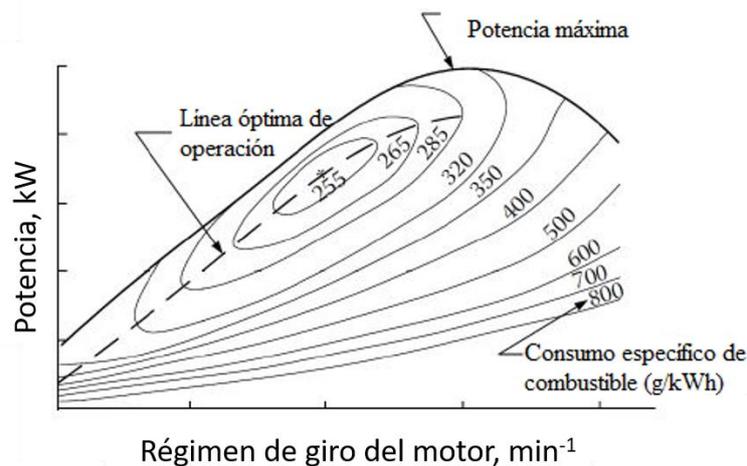


Figura 3: Mapa de motor y consumo específico de combustible (Ben-Chaim *et al.*, 2013).

Para calcular los valores de CEC y la pme es necesario partir de la potencia y par efectivos, los mismos que son determinados en el dinamómetro de chasis, para ello se considera el funcionamiento del motor en condiciones estándar. La tabla 1 muestra las relaciones usadas en los cálculos. El rendimiento efectivo (η_e) (Ecuación (1), Tabla 1), es la relación entre la potencia efectiva (N_e) desarrollada por el motor y el consumo por unidad de masa de combustible (\dot{m}_f) y la potencia térmica del combustible (PCI). La pme (Ecuación (2), Tabla 1) es la presión constante que durante la carrera de expansión producirá un trabajo igual al trabajo efectivo, se basa en N_e para el tipo de motor de cuatro tiempos ($i = 0.5$) por el régimen de giro del motor (n) y por el cilindraje del motor (V_t). El CEC (g_{ef}) (Ecuación (3), Tabla 1) es el consumo de combustible en relación a la potencia producida (Payri & Desantes, 2011). Los valores típicos en un MCI genérico de encendido provocado de η_e es del 35%, el g_{ef} es de 240 g/kWh y pme de 13 bar (Payri & Desantes, 2011).

Tabla 1: Ecuaciones para calcular rendimiento efectivo, presión media efectiva y consumo específico de combustible (Payri & Desantes, 2011).

Relación	Unidad	Ecuación No.
$\eta_e = \frac{N_e}{\dot{m}_f PCI}$	%	(1)
$pme = \frac{N_e}{i n V_t}$	bar	(2)
$g_{ef} = \frac{\dot{m}_f}{N_e}$	g/kWh	(3)

La figura 4 muestra el mapa de un MEC donde al disminuir el régimen de giro del motor, la pme es elevada y se mantiene en la zona de menor CEC de 197 g/kWh (Narayanan, 2011).

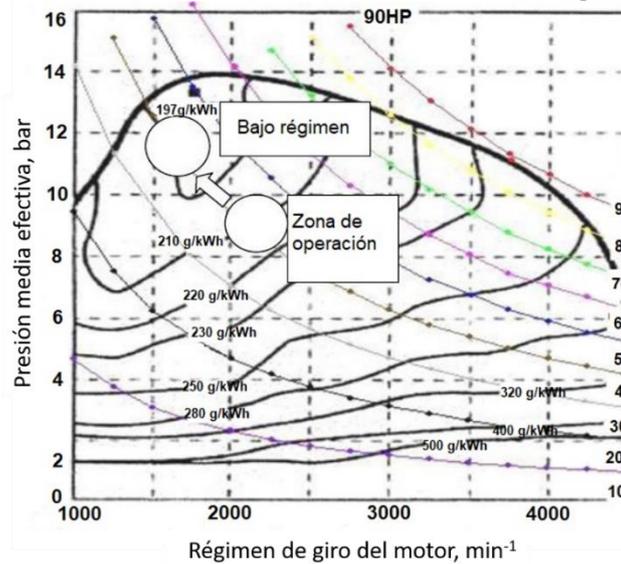


Figura 4: Mapa de un motor de encendido provocado (Narayanan, 2011).

La obtención de los mapas de eficiencia de consumo de combustible en MEP o MEC es mediante datos experimentales, determinando las variables de entrada como es el par, el régimen del motor y la variable de salida es el CEC, en la figura 5 se muestra un ejemplo de un mapa de eficiencia de consumo de combustible en un MEC (He, Tang, & Wang, 2013).

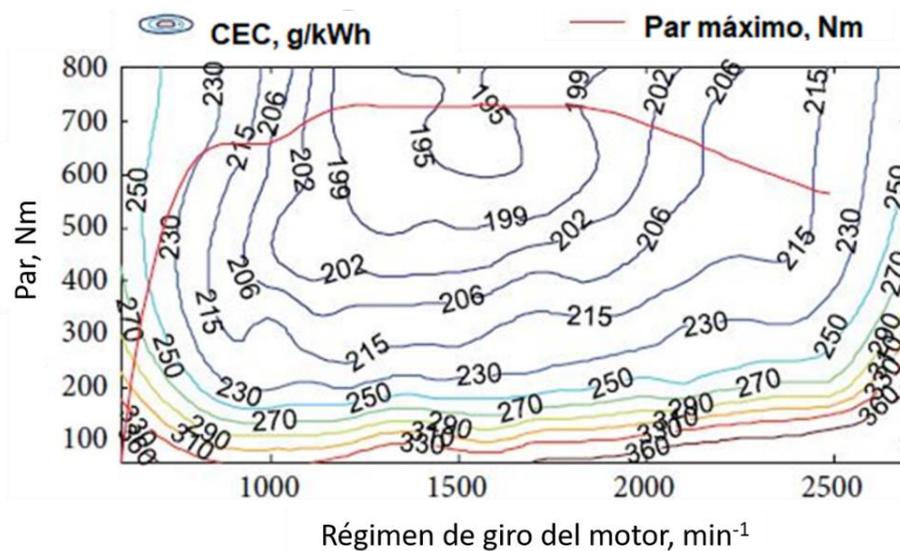


Figura 5: Mapa de consumo específico de combustible en un motor de encendido por compresión (He et al., 2013).

3. Materiales

Los materiales necesarios que se utilizaron en la obtención de los mapas de motor y CEC son:

- (1) Vehículo con MCIA de encendido provocado

El vehículo utilizado es un Kía Picanto, año de fabricación 2019, motor 1250 cm³, uno de los automóviles más vendidos a nivel nacional con 2533 unidades en el año 2019, representado el 6% de ventas en la categoría automóviles que para el año 2019 se comercializaron 54192 automóviles en el Ecuador (Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador, 2020). La tabla 2 presenta las características técnicas del motor que utiliza el vehículo Kia Picanto.

Tabla 2: Características técnicas Kia Picanto (Kia Motors, 2019).

Motor 1.2 CVVT	
Cilindrada, cm ³	1248
Número de cilindros	4
Diámetro x Carrera, mm	71 x 78.8
Relación de compresión	10.5:1
Potencia máxima, kW@ min ⁻¹	62 @ 6000
Par máximo, Nm @ min ⁻¹	122 @ 4000
Consumo, L/100 km	
Urbano	5.9
Extra urbano	3.8
Combinado	4.6
Emisiones de CO ₂ , g/km	
Urbano	137
Extra urbano	89
Combinado	106

(2) Dinamómetro de chasis

El par y la potencia efectivos de un motor se puede medir mediante un dinamómetro de chasis, este equipo tiene un freno magnético que utiliza solenoides de corrientes de Eddy (generadas cuando un conductor atraviesa un campo magnético) para generar resistencia al giro de los rodillos que están conectados por un eje al freno de Eddy, dicho eje es impulsado por las ruedas del vehículo. Este magnetismo se incrementa y se disminuye dependiendo de la corriente aplicada a las bobinas del freno de Eddy, la corriente es medida para realizar el cálculo de cuanto se necesita para generar una fuerza determinada de resistencia, con objeto de frenar los rodillos del dinamómetro (Astudillo, Saldaña & Torres, 2018). Para este estudio se utilizó un dinamómetro de chasis AutoDyn 30 del fabricante SuperFlow (Wisconsin, Estados Unidos), mide la fuerza y potencia efectivos que el motor del vehículo entrega, en la tabla 3 se indican las características técnicas del dinamómetro.

Tabla 3: Características dinamómetro de chasis (Torres, Coello, Rockwood. Vidal, & Inga, 2019).

	Especificación
Marca	SuperFlow AutoDyn 30
Velocidad máxima	362 km/h
Exactitud de control	0.2 km/h
Potencia de rueda máxima (prueba de inercia)	894 kW
Carga máxima del eje	3629 kg
Distancia entre ejes AWD	234-356 cm

(3) Combustible Ecopaís

El combustible utilizado corresponde a la gasolina comercializada en el medio para uso automotriz, que es la gasolina Ecopaís, con un nivel de octanaje de 85 RON (*Research Octane Number*), describe el comportamiento del combustible a bajas velocidades y temperaturas; y un contenido de 5% en volumen de etanol, la tabla 4 muestra un resumen de las características relevantes del combustible Ecopaís.

Tabla 4: Características del combustible Ecopaís (Torres *et al.*, 2019; Quimbita & Guallichico, 2017).

Requisitos	Unidad	Valor
Número de octano (RON)	-	87
Poder Calorífico	kJ/kg	44916.195 -45583.695
Densidad	kg/m ³	749
Presión de vapor	kPa	60
Corrosión a la lámina de cobre (3h a 50° C)	-	1
Contenido de gomas	mg/100 mL	3
Contenido de azufre	%	0.065
Contenido de aromáticos	%	30
Contenido de benceno	%	1
Contenido de olefinas	%	18
Estabilidad a la oxidación	Min	240
Contenido de oxígeno	%	2.7
Contenido de plomo, manganeso y hierro	mg/L	No detectable

4. Adquisición y procesamiento de información

Adquisición de datos mediante OBDII

El sistema OBDII (On Board Diagnostics) es utilizado para realizar un diagnóstico abordo en vehículos, el cuál puede detectar fallos de funcionamiento del motor, debido a que mediante el reconocimiento de mal funcionamiento de los sensores o actuadores que tiene el sistema de inyección de combustible, informa al conductor de fallas en el motor mediante una luz de advertencia MIL (*Malfunction Indicator Light*) ubicada en el tablero de instrumentos. El sistema OBDII transmite los parámetros de funcionamiento de los sensores y actuadores, es decir de un factor físico es transformado mediante la computadora del vehículo a un valor eléctrico, es por ello que se puede obtener datos como el régimen de giro del motor, temperatura del motor, consumo de combustible, nivel de carga, entre otros. Mediante el software Torque-Pro® para Android, que es desarrollado por Ian Hawkins (*Milton Keynes*, Inglaterra), la versión 1.10.120 y actualizado el 16 de junio de 2021, se almacenan los datos en tiempo real de funcionamiento del motor que provee la computadora del mismo y se generan los archivos con los datos de los sensores del motor para ser interpretados en un software de algoritmos matemáticos.

Torque-Pro® permite obtener información sobre multitud de parámetros del motor y del trayecto que está realizando el vehículo. Sin embargo, no todas las variables salen directamente del motor. Para algunas de estas variables, Torque muestra directamente el valor que le proporciona el CAN bus de información del vehículo, con el protocolo OBDII. Para el resto de variables, Torque debe realizar un cálculo por fórmulas para obtenerlas y

mostrarlas (Nespereira & Solé, 2020). Torque puede solicitar información al bus a partir de unos *Parameter ID's* (PID), que son los códigos que se usan para esas solicitudes. Cada parámetro medido por los sensores -físicos o virtuales- del vehículo tiene un PID asociado, estandarizado según el protocolo OBDII (Nespereira & Solé, 2020). La adquisición de los datos de comportamiento del motor mediante el sistema de diagnóstico abordo (OBD) se realizó mediante el dispositivo ELM327 V1.5, fabricado en Ontario, Canadá por ELM Electronics para traducir la interfaz OBD, según normativa ISO 9141, KWP2000 y compatible con SAE J1850 y CAN bus, que permite registrar los parámetros de funcionamiento del motor con valores instantáneos a una frecuencia de 1 Hz, como es el régimen de giro del motor, temperatura de líquido refrigerante (°C), temperatura de ingreso de aire (°C), presión absoluta del colector de aire (*Manifold Absolute Pressure Sensor* MAP, kPa), posición del acelerador (*Throttle Position Sensor* TPS, %), consumo de combustible en el instante de tiempo en que es medido (cm³), velocidad del vehículo (km/h), avance de ignición (grados).

Sistema de alimentación de combustible, de medición y de posición geográfica

Con la finalidad de medir la cantidad de combustible que consume el motor durante las pruebas, se utilizó un sistema de alimentación de combustible paralelo al del vehículo, que consta de una bomba de combustible, un regulador de presión de combustible, un depósito de combustible alternativo y una balanza. De esta manera, se mide el volumen de combustible final, se calcula la masa y con ello determinar el consumo generado. El dispositivo GPS para determinar la posición geográfica del vehículo y la velocidad, sirve para determinar el patrón de movimiento en la ruta urbana, extra urbana y combinada, con ello determinar las zonas de mayor velocidad y de menor velocidad en donde el comportamiento del motor cambia y el CEC también. El dispositivo empleado corresponde a la marca VBOX, modelo Sport, procedente de Buckingham, Reino Unido; puede ser usado como un registrador independiente para medir el rendimiento del vehículo o los tiempos por vuelta, registra datos con una frecuencia de 20 Hz, registro de tarjeta SD, con seis horas de autonomía y una antena GPS, la velocidad (máx - mín) 1800-0.1 km/h y una resolución de 0.01 km/h (Torres *et al.*, 2019).

Medición de par y potencia

Los mapas de eficiencia de CEC necesitan: El par y potencia efectivo del motor, obtenido en un dinamómetro de chasis y el CEC relacionado con el MAP o la carga del motor. Medición de par y potencia efectivos: En el dinamómetro de chasis se obtienen los valores y las gráficas de par y potencia efectivos del motor. Los mismos que están considerados según la normativa ECE R24 bajo condiciones ambientales estándar como es presión atmosférica 0.99 bar, temperatura ambiente de 25°C, temperatura de combustible de 40°C, tipo de combustible CEC RF03A84 (Márquez, 2005). La medición de par y potencia consiste en acelerar al 100% el vehículo en cuarta marcha desde los 40 km/h hasta 130 km/h, de esta forma se obtiene las curvas de par máximo y potencia máxima para cada rango de min⁻¹. Se realizaron 7 pruebas de barrido de datos con 900 s cada una, con la velocidad del dinamómetro limitada a 32, 40, 48, 56, 64, 72 y 80 km/h respectivamente. El objetivo de la

limitación de velocidad es obtener datos en todo el rango de carga del motor y presión del MAP para distintos niveles de min^{-1} .

Rutas urbanas, extra urbana y combinada: Para medir el consumo de combustible del motor se aplicaron dos métodos, el primero mediante la adquisición de MAP (psi), el flujo de combustible (cm^3/min) y el régimen de giro del motor, que informa la computadora del motor mediante el conector OBD II, la aplicación Torque-Pro® y el dispositivo EML327. El segundo método para comprobar el consumo de combustible mediante el método gravimétrico, que consiste en medir el volumen de combustible al inicio de una ruta y luego al final, considerando la masa del combustible y su densidad; para ello se recorrieron tres rutas, una urbana, extra urbana y combinada en la tabla 5 se indican las condiciones de las rutas.

Tabla 5: Datos del recorrido de las rutas.

Ruta	Distancia, km	Tiempo medio de recorrido, min
Urbana	15.02	82
Extra urbana	38.88	36
Combinada	23.68	67

La figura 6, indica las rutas: a) urbana, que implica el centro de la ciudad y la zona de más afluencia de vehículos por motivos de actividades laborales de la ciudadanía, b) extra urbana, que implica la autopista Cuenca - Azogues y c) combinada, que implica rutas por la zona urbana y por las afueras de urbe. En las figuras las zonas de color azul indican velocidades de 60 a 100 km/h, y las zonas de color amarillo a verde indican velocidades de 20 a 59 km/h y las zonas de color rojo de 0 a 19 km/h.

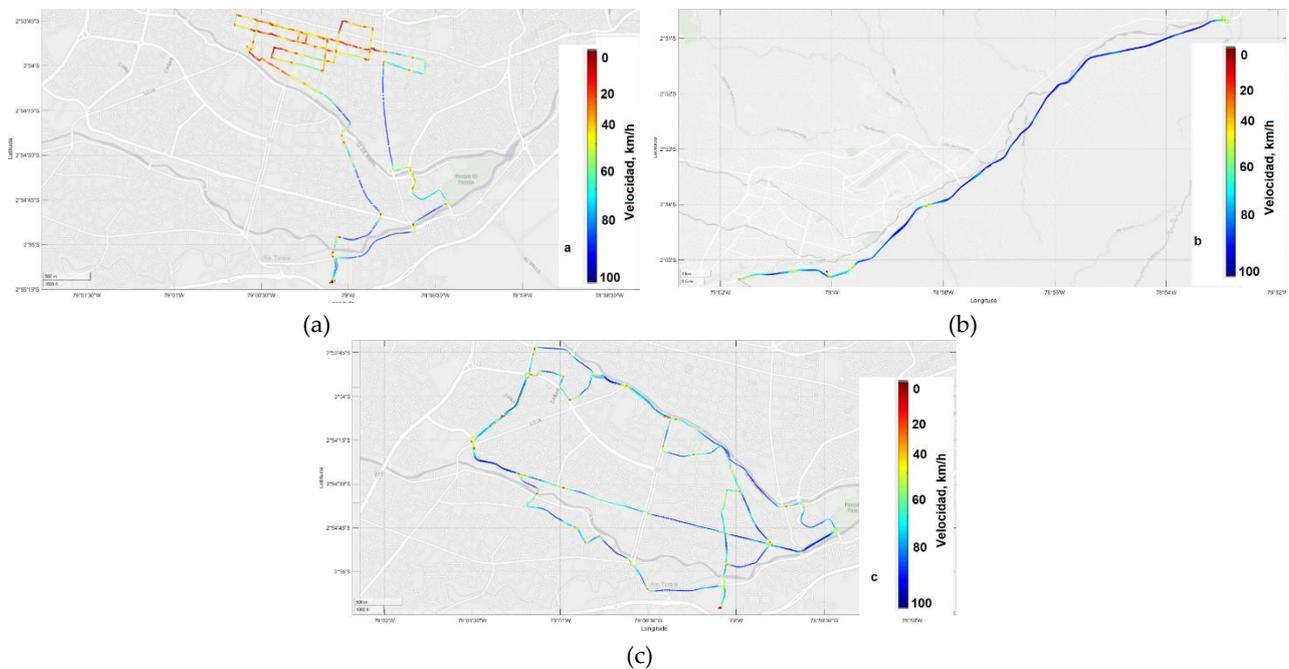


Figura 6: Rutas: a) urbana, b) extra urbana y c) combinada.

La tabla 6, mediante la ecuación (3), lista los valores de CEC según el régimen de giro del motor y la pme en las rutas propuestas.

Tabla 6: Datos de consumo específico de combustible y presión media efectiva.

Ruta	Consumo específico de combustible, g/kWh		Presión media efectiva, bar	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Urbana	466	36	9	4
Extra urbana	477	52	9	4
Combinada	680	45	9	4

El CEC y el valor del MAP aplicado el modelo del mapa de motor en las rutas, se puede observar en la figura 7, de lo cual se obtiene que el régimen de giro del motor en el que se produce el mayor funcionamiento del mismo es de 600 a 3100 min^{-1} . El mayor CEC y el que se mantiene con mayor frecuencia se encuentra en valores de 100 a 300 g/kWh , también se muestra la relación del MAP según el régimen de giro del motor. En la ruta urbana desde velocidad de ralenti hasta 2150 min^{-1} hay más datos que indican la zona de funcionamiento del motor. En la ruta extra urbana la distribución de los datos es más dispersa y con mayor concentración de datos en más de 2000 min^{-1} . En la ruta combinada la distribución de los datos mayor en bajas revoluciones y comparando con el CEC son similares al comportamiento del motor en la misma ruta.

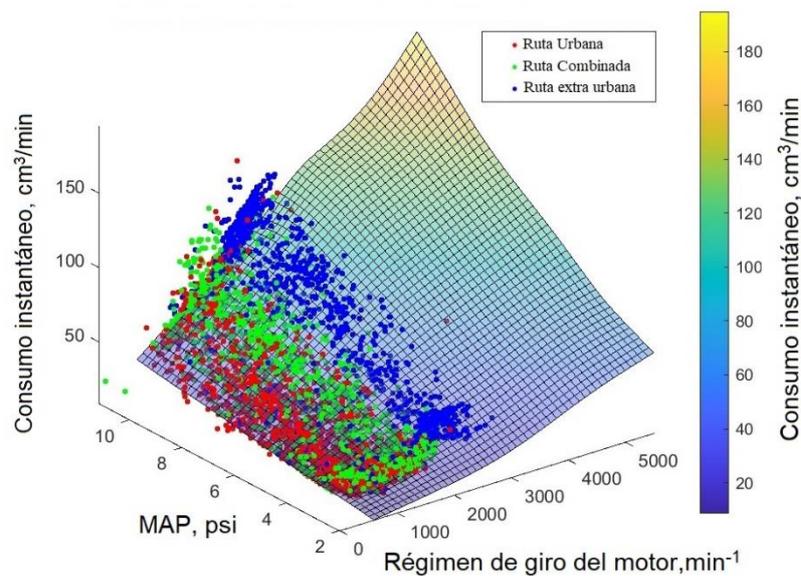


Figura 7: Distribución de datos de consumo de combustible en el mapa de motor.

Mapas de motor: A partir de las pruebas de barridos de datos realizados en el dinamómetro de chasis, que consisten en mantener la velocidad inicialmente a 32 km/h y obtener datos de consumo de combustible, régimen de giro del motor, de MAP y de par y potencia. Continuar con las mediciones a velocidades de 40 km/h , de 48 km/h , de 56 km/h , de 64 km/h , de 72 km/h y finalmente a 80 km/h , una vez obtenidos los datos en cada una de las velocidades se forma una nube de puntos en color rojo, sobre la cual se crea una superficie que representa la media del consumo instantáneo para cada régimen de giro del motor y de MAP. Con ello se obtiene un mapa de motor basado en el régimen de giro del motor, la presión MAP y el consumo instantáneo de combustible, en la figura 8, se muestra el mapa obtenido. Los puntos de color rojo representan el comportamiento del consumo instantáneo de

combustible, en donde a bajas revoluciones se mantiene un consumo de combustible estable, así como también la presión MAP y cuando se produce una aceleración se genera un mayor consumo de combustible, pero los valores de la presión MAP y el régimen de giro del motor se estabilizan en una posición hasta estabilizar el régimen de giro del motor según la demanda de aceleración.

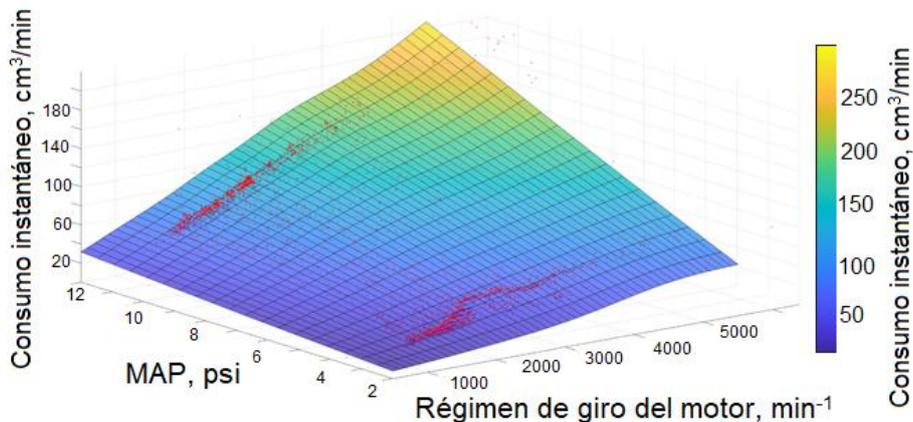


Figura 8: Mapa motor en dinamómetro de chasis.

En la figura 9 se muestra el consumo de combustible mediante los puntos rojo, en el modelo aplicado a la ruta combinada. Cuando existe un cambio de régimen de giro del motor, se estabiliza el MAP, aumenta el consumo de combustible y el régimen de giro del motor se estabiliza.

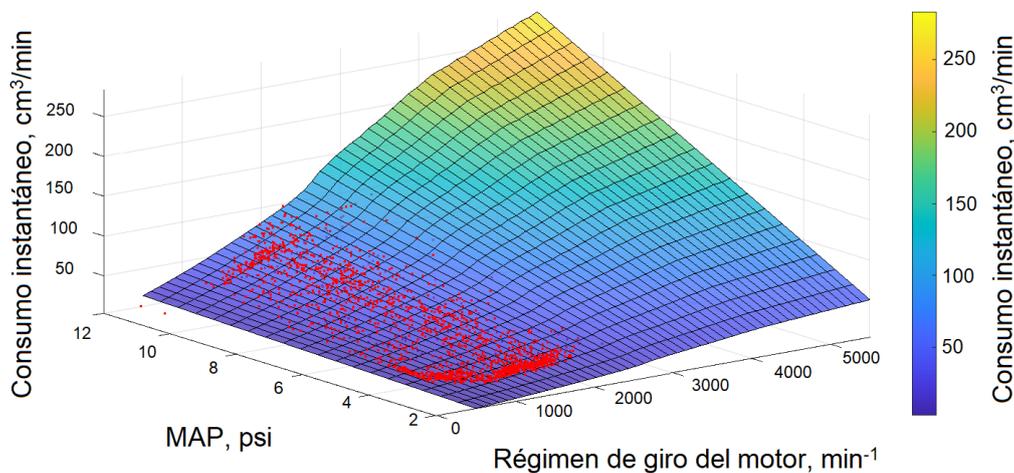


Figura 9: Mapa motor en ruta combinada.

Debido a la variación de los valores de datos del consumo de combustible obtenido por el método de adquisición OBDII y el método gravimétrico, como se indica en la tabla 7, se corrige el mapa de consumo instantáneo inicial en base a las zonas de funcionamiento del motor.

Tabla 7: Datos de medición de consumo de combustible.

Ruta	OBDII, L	Gravimétrico, L	Diferencia, L	Variación entre mediciones, %
Urbana	1.65	1.35	-0.30	-22.22
Combinada	1.87	1.52	-0.35	-23.02
Extra urbana	2.15	1.93	-0.22	-11.40

En base a la distribución de datos según los rangos de min^{-1} , en los mapas obtenidos de cada ruta y comparando la distribución de los puntos rojos entre los mapas, se determina que el porcentaje de datos en ralentí en la ruta urbana llega al 30% y en la ruta combinada alcanza un 26%, a diferencia de la ruta extra urbana donde este porcentaje llega al 7.5%. Los porcentajes de datos de consumo de combustible en ralentí y la diferencia de consumos entre OBDII y el método gravimétrico tienen la misma tendencia, con esto aplicando el modelo y sabiendo que el consumo instantáneo a bajas min^{-1} obtenido desde el OBDII es mayor al real, por lo que, es el punto de partida para obtener el mapa de motor. Las variaciones entre las mediciones de consumo de combustible permiten establecer un valor medio de consumo en base al aumento del régimen de giro del motor, con ello se realiza la corrección del mapa de motor, en la figura 10 se muestra el incremento porcentual que permite la corrección al consumo de combustible según el aumento de régimen de giro del motor.

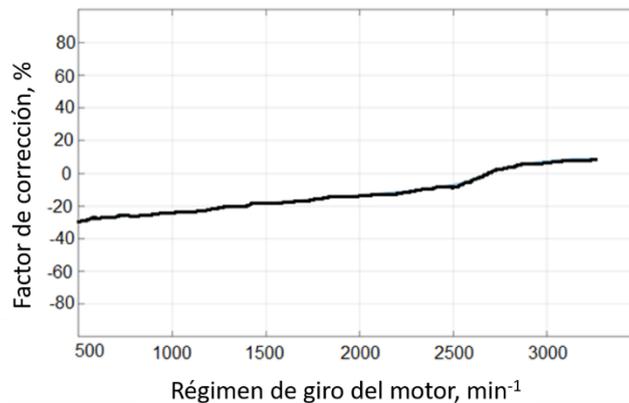


Figura 10: Valores del factor de corrección en función del régimen de giro del motor.

En la figura 11 se indica el diagrama de flujo para inferir el consumo de combustible con el mapa motor, que se obtiene mediante el régimen de giro del motor, el MAP.

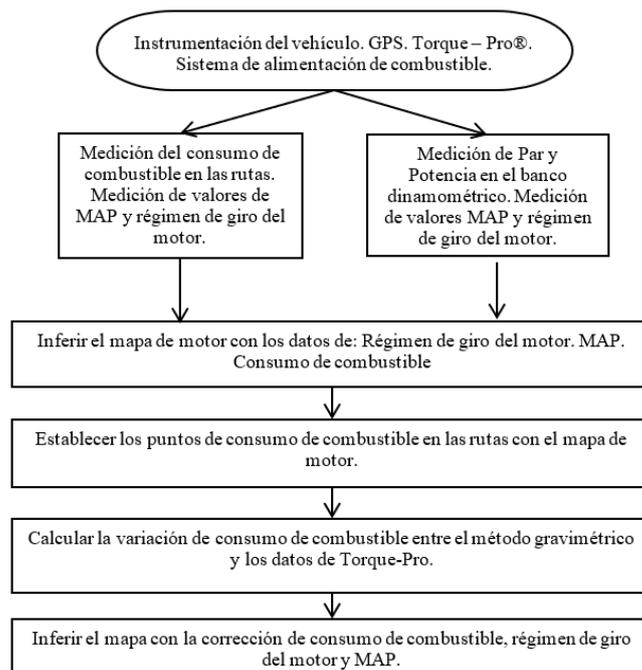


Figura. 11: Diagrama de flujo para inferir el mapa de motor.

5. Resultados

El consumo de combustible en cada una de las rutas, se relaciona con el mapa de motor en función de los valores del MAP y régimen de giro del motor. Para proponer el mapa de motor se corrige el valor de consumo de combustible obtenido mediante el sistema OBDII con el valor de consumo de combustible obtenido en la prueba gravimétrica, dicho valor es la diferencia porcentual expresada en la tabla 7, de esta manera se acerca a los valores reales de consumo de combustible. En la tabla 8 se muestra los valores finales de consumo de combustible para cada ruta, luego de realizar la sumatoria total de los valores obtenidos en OBDII y corregidos, dicho mapa se indica en la figura 12.

Tabla 8: Datos de medición de consumo de combustible corregidos.

Ruta	OBDII, L	Gravimétrico, L	Diferencia, L	Diferencia (%)
Urbana	1.33	1.35	0.02	1.50
Combinada	1.52	1.52	0.00	0.00
Extra urbana	1.92	1.93	0.01	0.520.3

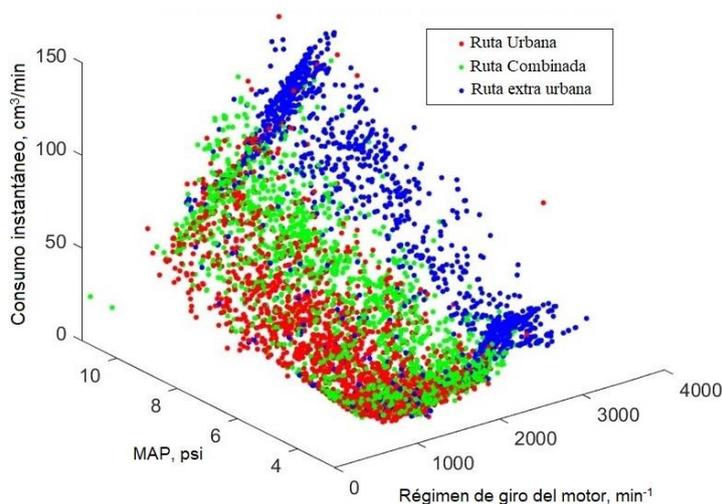


Figura 12: Distribución de datos en las rutas.

Mediante la corrección en el consumo de combustible según el régimen de giro del motor y con los valores del MAP se obtiene el mapa de motor que se muestra en la figura 13.

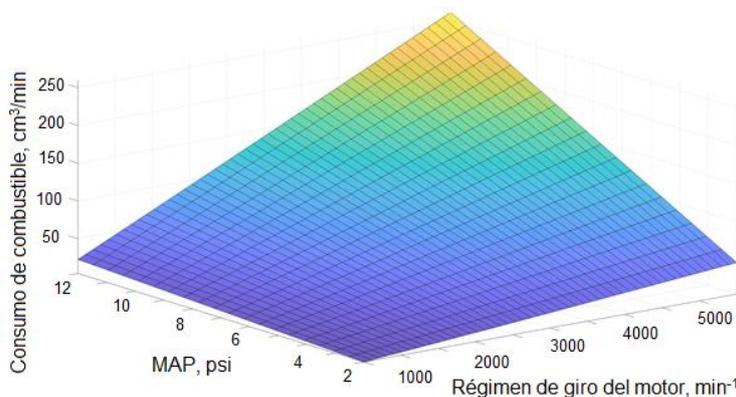


Figura. 13: Mapa motor corregido considerando la variación de consumo de combustible.

La figura 14 muestra como varía el par y la potencia efectiva en función del régimen de giro del motor, determinado en el dinamómetro de chasis, donde la potencia máxima es de 40.2 kW @ 4950 min⁻¹ y el par máximo es de 88.5 Nm @ 3928 min⁻¹. En relación con los valores máximos de par y potencia del fabricante, existe una disminución del 54% con la potencia y del 38%, que se atribuye a la altura sobre el nivel del mar en la medición (2560 msnm), el tipo de combustible y la temperatura ambiente.

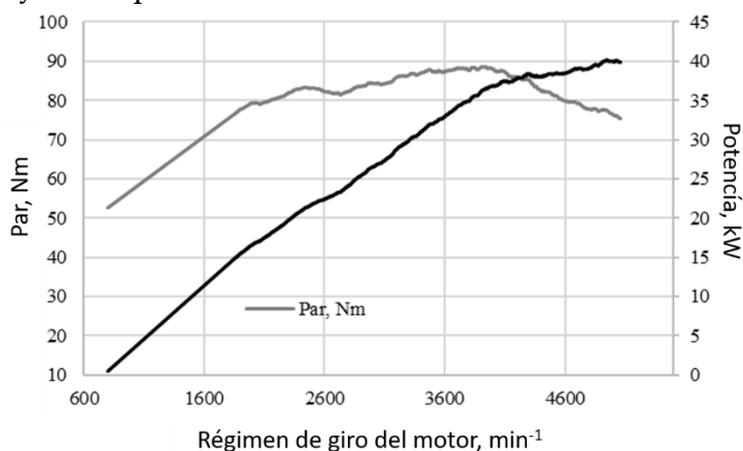


Figura 14: Valores de par efectivo (M_e) y potencia efectiva (N_e) en función del régimen de giro del motor.

La zona de funcionamiento del motor en las rutas es desde el ralentí hasta las 3000 min⁻¹, el CEC presenta valores entre 36 a 680 g/kWh y la pme tiene un valor de 4 a 9 bar, donde los puntos del mapa de motor coinciden con los valores. Relacionando los datos de CEC con el rendimiento del motor en cada ruta se obtuvo que el motor tiene un consumo de combustible de 4.9 L/100 km en la ruta extra urbana, urbana de 8.9 L/100 km y combinada de 6.4 L/100 km. El consumo de combustible en la ruta extra urbana tiene un aumento del 29% con relación a los datos del fabricante, urbano del 51% y combinado de 39%, dichas diferencias pueden ser debidas al tipo de combustible, la medición es realizada a 2560 msnm y en condiciones ambientales y de velocidad diferentes a las que realiza el fabricante.

6. Discusión

Los mapas de motor permiten analizar el consumo de combustible en diferentes zonas de funcionamiento, al analizar cuál es el comportamiento del motor en tres rutas diferentes se constató que desde ralentí hasta las 3000 min⁻¹ es la zona en que el motor funciona más. Los datos que se obtienen mediante el sistema OBDII, como son el MAP, el consumo instantáneo de combustible y el régimen de giro del motor establecen los tres ejes fundamentales para conocer las zonas de funcionamiento del motor, con ello se puede modificar variables como el tiempo de inyección o el adelanto a la ignición para modificar la potencia y el consumo de combustible. Dentro de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS), el objetivo 11 Ciudades y comunidades sostenibles, indica inversiones en transporte público, por lo que, obtener y modificar los mapas de motor ayudará a disminuir el consumo de combustible y con ello disminuir la emisión de gases contaminantes. En Ecuador el consumo de energía en transporte corresponde al 49% de la producción energética y de ello el 44% es el uso de gasolinas y el 44% de diésel. El objetivo 12 producción

y consumo responsable, adecuando mapas de motor para disminuir el consumo sin sacrificar la potencia del motor se disminuirá notablemente la producción y consumo de combustibles fósiles destinados al transporte.

7. Conclusiones

Se obtuvo la AMEM, relacionando carga del motor, régimen de giro del motor y CEC, estableciendo las condiciones de operación en rutas urbanas, extra urbana y combinada, con ello se puede relacionar el estado de funcionamiento del motor según la ubicación en la ruta y saber cuál es el consumo de combustible provocado. Las pruebas dentro de la investigación se realizaron en la Ciudad de Cuenca - Ecuador, ubicada a 2560 msnm, con una temperatura promedio de 15°C, y la densidad del aire aproximada de 0.957 kg/m³ (Avalos & Torres, 2020). El par y la potencia máximos en el dinamómetro de chasis en una ciudad de altura a 2560 msnm, es menor con relación a los valores descritos por el fabricante, existiendo una diferencia en el par de 38% y en la potencia del 54%, dicha disminución puede ser debido a la densidad del aire, temperatura ambiente y el tipo de combustible, más las pérdidas mecánicas por la caja de cambios y diferencial. Para obtener de mapas de motor, basado en el par, potencia, consumo de combustible y MAP, sería importante realizar la investigación a diferentes alturas sobre el nivel del mar y así comparar los mapas de motor obtenidos en ciudades de altura con las ciudades del llano y con ello establecer una diferencia en el comportamiento del motor. Con ello para otra investigación se puede determinar la cantidad de emisiones contaminantes que se generan al simular condiciones reales y cotidianas de funcionamiento de un vehículo.

Contribuciones de los autores

En concordancia con la taxonomía establecida internacionalmente para la asignación de créditos a autores de artículos científicos (<https://casrai.org/credit/>). Los autores declaran sus contribuciones en la siguiente matriz:

	López, A.	Torres, F.	Pla, B.	Romero, B.	Bravo, D.
Conceptualización					
Análisis formal					
Investigación					
Metodología					
Recursos					
Validación					
Redacción – revisión y edición					

Conflicto de Interés

Los autores declaramos que no existen conflictos de interés.

Agradecimiento

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto de investigación: Modelo predictivo de consumo de combustible basado en el mapa de eficiencia del motor.

Los autores desean expresar su agradecimiento especial a las autoridades de la Universidad, de manera especial al Ing. Jacinto Guillén Vicerrector de Investigaciones y al Decano de la Facultad Ing. Andrés López PhD, quienes con su apoyo y convicción en el proyecto generaron los medios adecuados para su desarrollo, al grupo ERGON por la amistad y apoyo incondicional en la realización del proyecto.

Referencias

- Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador, AEADE. (2020). *Anuario 2019*. Recuperado de: https://www.aeade.net/sdm_downloads/anuario-2019/
- Astudillo, C. Saldaña, X. & Torres, F. (2018). Determinación de la variación de consumo de combustible en taxis de Cuenca utilizando vehículos híbridos. *Memorias del 2do Congreso en Nuevos Avances Tecnológicos Aplicados a la Ingeniería*. Riobamba: Ecuador. Recuperado de: <http://cimogsys.esPOCH.edu.ec/direccion-publicaciones/public/docs/books/2021-09-14-160918-2do%20LibroMemorias%20v1.pdf>
- Avalos, G. Torres, F. (2020). *Determinación del rendimiento de combustible de una flota de taxis de 1400 cc en la ciudad de Cuenca aplicando técnicas de Ecodriving*. (Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de Magister en Sistemas Vehiculares). Cuenca, Ecuador: Universidad de Azuay. Recuperado de: <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/10042>
- Ben-Chaim, M. Shmerling, E. & Kuperman, A. (2013). Analytic modeling of vehicle fuel consumption. *Energies*, 6(1), 117–127. <https://doi.org/10.3390/en6010117>
- Bishop, J. Stettler, M. Molden, N. Boies, A. (2016). Engine maps of fuel use and emissions from transient driving cycles. *Applied Energy*, 183. 202-217. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.175>
- Dekraker, P. Barba, D. Moskalik, A. & Butters, K. (2018). *Constructing Engine Maps for Full Vehicle Simulation Modelling*, documento técnico SAE 2018-01-1412, 2018, 1(1), 12. <https://doi.org/10.4271/2018-01-1412>
- Gismero, A. (2017). *Diseño y optimización de la cartografía motor en un vehículo formula SAE*. (Trabajo de Fin de Grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales). Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de: https://oa.upm.es/45307/1/TFG_ALEJANDRO_GISMERO_GALIATSATOS.pdf
- He, H., Tang, H. & Wang, X. (2013). Global optimal energy management strategy research for a plug-in series-parallel hybrid electric bus by using dynamic programming. *Mathematical Problems in Engineering*, 1-12. <https://doi.org/10.1155/2013/708261>
- Torres, F. Coello, M. Rockwood. R. Vidal, E, & Inga, V. (2019). Evaluación del rendimiento

de las gasolinás súper y ecopaís mediante un ciclo típico de conducción para taxis de la ciudad de Cuenca. *Memorias del III Congreso Nacional de Ingeniería Automotriz y Desagregación Tecnológica*. Riobamba: Ecuador. Recuperado de: <http://cimogsys.esepoch.edu.ec/direccion-publicaciones/public/docs/books/2020-01-28-143846-Libro%20Memorias%20Coniadt%202019.pdf>

Keller, J. (2014). A Cost Effective Method to Create Accurate Engine Performance Maps & Updating the Nebraska Pumping Plant Performance Criteria, *Biological Systems Engineering*, 1-100. (Master's Theses). Nebraska, USA: University of Nebraska. Recuperado de: <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1042&context=biosysengdiss>

Kia Motors. (2019). Especificaciones técnicas Kia Picanto. 1.2L. Recuperado de: <http://lisanmotors.com/wp-content/uploads/2017/11/FICHA-TECNICA-KIA-ION-1250-cc.pdf>

Márquez, L. (2005). La Potencia de los Motores. *Agrotécnica*. 40-44. Recuperado de: https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf_Agrotec%2FAgrotec_2005_5_40_44.pdf

Narayanan, A. (2011). DownsPEEDING the Diesel Engine. A Performance Analysis. (Master's Thesis in Automotive Engineering). Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology. Recuperado de: <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/147782.pdf>

Nespereira, A & Solé, M. (2020). Estudio y caracterización de consumo y emisiones de un vehículo europeo. (Trabajo Final de Máster). Barcelona, España: Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona. Recuperado de: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/329680/memoria-ang-msb.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Payri, F & Desantes, J. (2011). *Motores de combustión interna alternativos*. Valencia, España: Reverté, S.A. Recuperado de: https://gdocu.upv.es/alfresco/service/api/node/content/workspace/SpacesStore/130ad267-fe67-4ec7-8363-51b16ffe11a6/TOC_0809_04_01.pdf?guest=true

Quimbita, A. & Guallichico, E. (2017). Determinación del potencial energético y mecánico del motor mazda F2 al utilizar los tipos de gasolina comercial empleados en el Ecuador. (Trabajo de Titulación previo a la obtención de Título de ingeniero Automotriz). Latacunga, Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Recuperado de: <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/13790>