



INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA
PASCUAL BRAVO

Acreditados en Alta Calidad

Serie
Investigación

Innovación en la transición energética:

conversión, simulación y diagnóstico

Luis Carlos Olmos-Villalba

Compilador



INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA
PASCUAL BRAVO®

Acreditados en Alta Calidad

Innovación en la transición energética:

conversión, simulación y diagnóstico

621.042
I58

Innovación en la transición energética:
conversión, simulación y diagnóstico. /
Compilado por Luis Carlos Olmos-Villalba
Medellín: Fondo Editorial Pascual Bravo, 2024

106 páginas -- (Serie Investigación)
ISBNe: 978-628-95888-9-7

1. EFICIENCIA ENERGÉTICA
2. SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL
3. FUENTE DE ENERGÍA RENOVABLE
4. TRANSICIÓN ENERGÉTICA

Catalogación en la publicación Biblioteca de Ciencia y Tecnología

**Innovación en la transición energética:
conversión, simulación y diagnóstico**

Serie Investigación
Institución Universitaria Pascual Bravo

Primera edición: junio de 2024
ISBNe: 978-628-95888-9-7

Compilador
Luis Carlos Olmos-Villalba

Facultad de Ingeniería

Coordinación editorial: Johana Martínez Ramírez
Corrección de textos: María Edilia Montoya Loaiza
Diagramación: Leonardo Sánchez Perea

Editado en Medellín, Colombia
Fondo Editorial Pascual Bravo
Institución Universitaria Pascual Bravo
Calle 73 No. 73A – 226 – Tel. (604) 4480520
fondoeditorial@pascualbravo.edu.co
www.pascualbravo.edu.co
Medellín – Colombia

Las ideas expresadas en la obra aquí contenida son manifestaciones del pensamiento individual de sus autores; en esa medida, no representan el pensamiento de la Institución Universitaria Pascual Bravo, siendo ellos los únicos responsables por los eventuales daños o perjuicios que pudieran causar con lo expresado o por la vulneración de los derechos de autor de terceros en los que hubiesen podido incurrir en su creación.



Está prohibido todo uso de la obra que atente contra los derechos de autor y el acceso abierto. Esta obra está protegida a través de la licencia Creative Commons: Reconocimiento-No comercial 4.0 Internacional.

Contenido

Prólogo	5
Magín Lapuerta	
Validación experimental mediante el modelo de Darcy-Forchheimer para la simulación de lechos porosos en OpenFOAM	7
Jhon F. Hincapié Montoya, Jorge M. Ceballos, Andrés David Morales Rojas, Anderson Gallego, Luis C. Olmos-Villalba	
EMAV (OBD-II & GPS Logger): herramienta clave en el diagnóstico y supervisión de vehículos en la transición energética	37
Frank A. Ruiz, Javier D. Londoño, Andrés David Morales Rojas, Duván Arley Blandón, Amada Cristina Rúa	
Conversión de motos convencionales a eléctricas como estrategia para la transición energética. Caso de estudio: Medellín	73
Álvaro Delgado Mejía, Bayron Álvarez Arboleda, Jhon F. Hincapié Montoya	

Prólogo

Tengo el honor de introducir esta colección de textos seleccionados para la convocatoria de «libro resultado de investigación» enmarcada dentro del XVIII Simposio Internacional de Energías Expotecnológica 2023, celebrado en la Institución Universitaria Pascual Bravo, en Medellín, Colombia. Aunque seguramente hay otras personas con gran mérito en la organización de esta iniciativa, celebrada anualmente, a las que pido disculpas, las personas más visibles en la misma son la acogedora profesora Rosalba Ríos y el proactivo joven profesor Luis Carlos Olmos, a los que agradezco el trato recibido y el entusiasmo vertido durante los dos días de mi estancia.

De entre los trabajos presentados, se han seleccionado para este libro tres que cubren campos muy distintos dentro del amplio espectro que supone el inminente cambio de modelo energético al que Colombia debe contribuir con sus recursos tecnológicos, científicos y humanos. Pero este compromiso en contribuir a la transición energética no es lo único que estos tres trabajos tienen en común. Yo destacaría otros cuatro puntos:

- El primero de ellos es que todos sus autores son personal docente e investigador de la Institución Universitaria Pascual Bravo. A todos ellos los conocí en el evento, y todos demostraron entusiasmo por la investigación y por el aprendizaje incesante. Los autores están entrelazados en los tres trabajos, lo cual es indicativo de una saludable predisposición para trabajar en equipo e intercambiar ideas, estatus que por desgracia no suele perdurar en algunas instituciones universitarias en las que acaban formándose grupos cerrados, que desaprovechan la ocasión de interactuar.
- El segundo punto en común es que son trabajos multidisciplinarios, ya que recogen conocimientos de mecánica de fluidos, termodinámica, electrónica, electricidad, ciencia de los materiales, química y estadística, y además combinan el modelado con la teoría y con la experimentación. En mi opinión es en estos trabajos multidisciplinarios en donde pueden encontrarse aspectos innovadores en estas ciencias tan desarrolladas, y por eso el título del libro no es en absoluto pretencioso sino merecido.

- El tercer punto en común es que todos ellos tienen un evidente carácter práctico. La aplicación del modelo de Darcy-Forchheimer (que en mi grupo de investigación hemos aplicado para calcular la permeabilidad en trampas de partículas de motores) se aplica aquí a la combustión en lechos porosos, y se deja una herramienta programada en el código abierto OpenFOAM que seguramente será de gran ayuda para optimizar estos sistemas. El desarrollo de un software en Labview (otro entorno abierto) para la adquisición y visualización de datos de diagnóstico a bordo de vehículos combinados con la geolocalización de estos es un ejemplo más de aplicación inteligente de herramientas para facilitar un desarrollo rápido y visual, en este caso de las soluciones tecnológicas que tengan que venir en el incierto futuro de la automoción. Precisamente una de estas soluciones es la electrificación vehicular, objetivo del tercer trabajo, que de nuevo tiene un marcado carácter práctico, y además es especialmente pertinente en el contexto de Medellín, donde de lo primero que sorprende al visitante es el gran reto que supone el transporte urbano, debido a la complicada orografía, la enorme abundancia de motocicletas y la consiguiente acumulación de contaminantes. En este caso, se propone una solución asequible y se cuantifica su inmediato impacto medioambiental. Además, es previsible que esta solución tecnológica sea especialmente interesante en un país como Colombia cuya electricidad es principalmente de origen hidráulico.
- Un cuarto punto en común es que las tres investigaciones son un punto de partida para posteriores trabajos, donde los autores o sus futuros colaboradores puedan optimizar los desarrollos hasta aquí conseguidos y además puedan hacer uso de las herramientas que quedan a su disposición, y de forma generosa, la de tantos otros.

Estoy convencido de que este libro no se limitará a aumentar el currículo de sus autores (estoy seguro de que no ha sido esa la motivación de sus autores para escribirlo) sino que sus ediciones impresas se desgasten con el uso en los despachos y se llenen de grasa en el laboratorio.

Magín Lapuerta
23 de junio de 2024

Validación experimental mediante el modelo de Darcy-Forchheimer para la simulación de lechos porosos en OpenFOAM

Jhon F. Hincapié Montoya

Institución Universitaria Pascual Bravo,
Facultad de Ingeniería, Departamento de Mecánica,
jhon.hincapie@pascualbravo.edu.co,
ORCID: 0000-0002-0841-8941

Jorge M. Ceballos

Institución Universitaria Pascual Bravo,
Facultad de Ingeniería, Departamento de Mecánica,
j.cebillos728@pascualbravo.edu.co,
ORCID: 0000-0002-0781-2875,

Andrés David Morales Rojas

Institución Universitaria Pascual Bravo,
Facultad de Ingeniería, Departamento de Mecánica,
andres.morales@pascualbravo.edu.co,
ORCID: 0000-0003-2876-8719

Anderson Gallego

Institución Universitaria Pascual Bravo,
Facultad de Ingeniería, Departamento de Mecánica,
anderson.gallego@pascualbravo.edu.co,
ORCID: 0000-0003-2976-8921

Luis C. Olmos-Villalba

Institución Universitaria Pascual Bravo,
Facultad de Ingeniería, Departamento de Mecánica,
luis.olmos@pascualbravo.edu.co,
ORCID: 0000-0001-8660-5534

1. Introducción

Actualmente, Colombia tiene como compromiso la reducción de un 51% de las emisiones de gases de efecto invernadero (en adelante, GEI), para lo cual, aunque se han identificado capacidades, existen aún barreras tecnológicas en sectores claves como el industrial y el residencial que no permiten lograr este compromiso [1]. Dentro de estos dos sectores, los procesos de calentamiento producidos por la combustión, en medio gaseoso o en lecho poroso, son representativos e importantes para disminuir las emisiones GEI [2].

La combustión en lecho poroso es un proceso en el cual el combustible se quema en un medio granulado de partículas sólidas como grava, cerámica, espuma, entre otras, en lugar de un medio gaseoso como en la combustión convencional. Esta tecnología permite un mejor mezclado de combustible y aire, lo que se traduce en una combustión más eficiente y controlada. Al utilizar un lecho poroso, se mejora la mezcla de combustible y aire, aumentando la eficiencia de la combustión y reduciendo las emisiones GEI a la atmósfera. Así, las nuevas tecnologías de combustión en lecho poroso desempeñan un papel clave en la reducción de las emisiones de GEI [3], [4], [5].

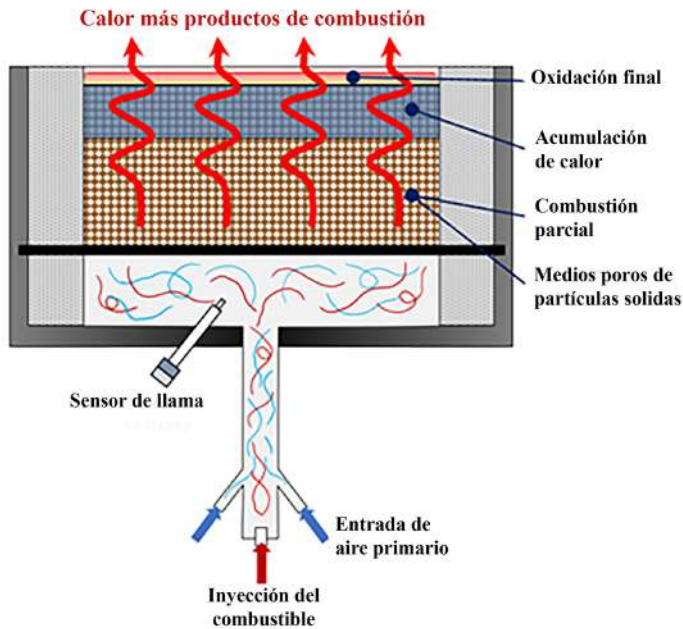
Este proceso de combustión en lecho poroso implica una serie de fenómenos físicos y químicos complejos, para su funcionamiento. La combustión en lecho poroso comprende los siguientes procesos:

- *Preparación del lecho granulado de partículas sólidas:* seleccionar el material poroso sólido basándose en su función para retener el calor y su estructura de espacios interconectados que permiten el flujo a través del medio poroso.
- *Inyección del combustible:* introducir la mezcla de combustible gaseoso y aire al lecho poroso.
- *Combustión parcial:* a medida que la mezcla fluye a través del lecho poroso, se produce una combustión parcial debido a la presencia de oxígeno en los espacios interconectados del lecho, donde se genera calor y productos de combustión.
- *Acumulación de calor:* debido a la combustión parcial, el calor se transfiere al material poroso sólido calentándolo.

- *Oxidación fina:* la combustión completa genera una gran cantidad de calor, más productos de combustión como dióxido de carbono (CO_2), vapor de agua, entre otros. La combustión en el lecho poroso es un proceso eficiente que ofrece, principalmente, una amplia gama de aplicaciones industriales, dada su capacidad para generar calor de manera controlada y eficiente, así como reducir las emisiones de contaminantes, en comparación con otros métodos de combustión [6]. En la figura 1 se muestra un esquema de las partes del proceso de combustión en lecho poroso.

Figura 1

Proceso de combustión en lecho poroso



Para adaptar y transferir esta tecnología a los procesos de calentamiento de la industria colombiana, se necesitan fases de diseño que vayan de la mano de herramientas computacionales, como la mecánica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés). El CFD es una herramienta de simulación que utiliza métodos numéricos y algoritmos para simular y resolver ecuaciones que predicen el comportamiento de los fluidos y las interacciones entre ellos, así como los fenómenos de reacciones químicas

y físicas que ocurren simultáneamente durante la combustión. Las simulaciones de la combustión en lecho poroso constituyen un reto, debido a varios factores complejos que se deben abordar adecuadamente, entre estos, el modelado computacional del medio poroso, la definición de las condiciones iniciales y de contorno, la discretización o mallado del dominio, la resolución numérica, y el análisis de resultados.

Este modelado proporciona una forma eficiente y flexible de abordar problemas que involucran flujos por medio de espacios interconectados, permitiendo, así, una representación más simplificada y realista. En lugar de tener que discretizar o mallar cada detalle del medio poroso o de las geometrías complejas en una simulación, se puede utilizar un enfoque simplificado que se centra en las propiedades macroscópicas del medio poroso, como la permeabilidad y el coeficiente de arrastre. Esto permite reducir de manera significativa la complejidad de la simulación, con lo cual se ahorra tiempo y recursos computacionales [7].

La interacción entre el flujo y el medio poroso dan lugar a pérdidas específicas que deben ser modeladas computacionalmente. Las dos principales son: pérdidas por inercia, en la que se relacionan los cambios de velocidad y presión que experimente el fluido y, pérdidas por viscosidad, que se vinculan con la resistencia al deslizamiento entre el fluido y el medio poroso. En CFD, para representar estas pérdidas se utilizan diferentes modelos, uno de los más comunes es el de Darcy-Forchheimer que refiere la caída de presión con la velocidad del fluido y los coeficientes de permeabilidad y de arrastre.

En este trabajo se determinaron los coeficientes de forma experimental del modelo de Darcy-Forchheimer, midiendo la caída de presión y variando la velocidad del fluido, la longitud del medio poroso, la forma y el material poroso, con el propósito de validar las simulaciones en OpenFOAM, lo que permite una herramienta ágil para el diseño de sistemas de combustión con lechos porosos.

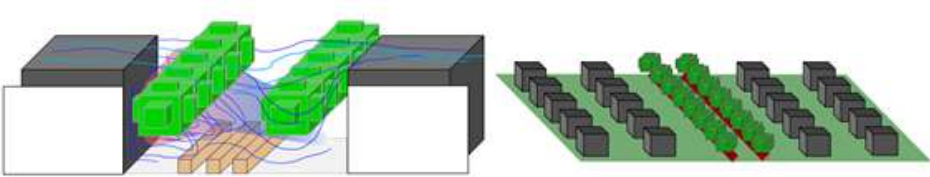
2. Modelamiento computacional de los medios porosos

El modelamiento computacional de los medios porosos tiene aplicaciones en una amplia gama de campos de ingeniería, geofísica, biología, entre otros. Los medios porosos presentan una estructura interna que inciden en la forma en que los fluidos se mueven a través de él. Uno de los ejemplos

más ilustrativos de la modelación de medios porosos es cuando se desea simular la dispersión de fertilizantes o contaminantes a través de los árboles [8], por cuanto son estructuras biológicas complejas que actúan como medios porosos. Representar cada hoja de los árboles en una simulación CFD sería una tarea muy costosa y poco práctica, desde el punto de vista computacional. En su lugar, se pueden utilizar enfoques más simplificados; por ejemplo, considerar los árboles como un medio poroso con propiedades macroscópicas como la permeabilidad y el coeficiente de arrastre. En la figura 2 se representan los árboles con geometrías básicas.

Figura 2

Dominio computación de la representación de los árboles como medios porosos [9]



Otro ejemplo es la simulación computacional del suelo en playas, donde las geometrías pueden ser altamente irregulares y complejas. Simular la interacción entre el agua de mar y la arena de la playa, implica representar la estructura del suelo y predecir cómo discurren los fluidos a través de él. Esto es esencial para prever la erosión costera, la filtración de contaminantes y la recarga de acuíferos.

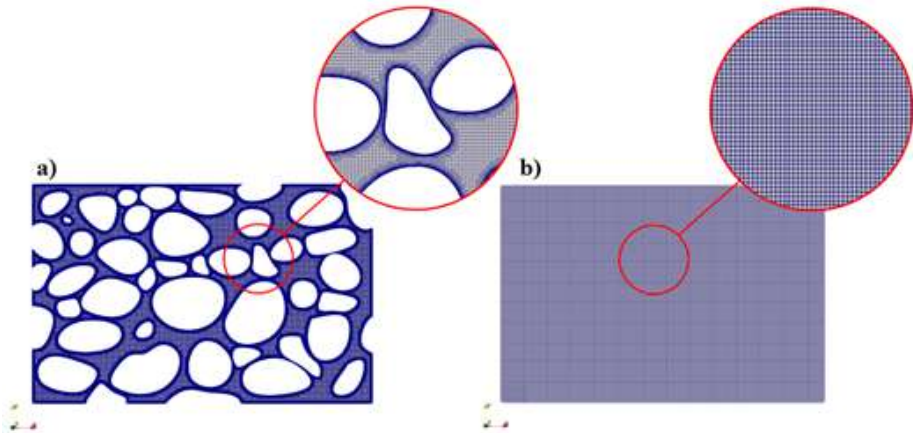
Una de las principales ventajas de la simulación CFD en el modelado de medios porosos es la posibilidad de simplificar las mallas utilizadas en las simulaciones. En lugar de representar individualmente cada partícula sólida del medio poroso, se utilizan técnicas de homogeneización, para reducir la complejidad de las mallas, sin comprometer la precisión del modelo matemático. Esto ahorra tiempo y recursos computacionales, lo que hace que las simulaciones sean más eficientes y precisas, permitiendo obtener información detallada sobre el comportamiento del fluido en el interior del medio poroso —como los perfiles de velocidad, la distribución de presión y la transferencia de calor—.

En la figura 3a se muestra una malla tridimensional que representa un medio poroso con cuerpos sólidos, geometrías variadas y complejas, por

donde corre un fluido. Los cuerpos sólidos están representados por los espacios vacíos en la malla. Para mejorar la precisión de los resultados y poder capturar los fenómenos físicos presentes, se reduce el tamaño de las celdas en las cercanías de las superficies de los cuerpos sólidos. Esto incrementa la densidad de la malla en todo el dominio. Una mayor densidad de malla conlleva un mayor costo computacional, aumentando la complejidad de los cálculos numéricos y el tiempo necesario para resolver el problema. Por otro lado, en la figura 3b se muestra el mismo tamaño del dominio computacional, con un menor número de celdas más estructuradas y alineadas, lo que reduce de modo considerable la complejidad de la malla. Para representar el medio poroso, al dominio se le impone, como datos de entrada, las propiedades macroscópicas del medio; de ahí que se obtenga un ahorro del costo computacional, reduciendo la complejidad de los cálculos numéricos.

Figura 3

Representación de la malla de un medio poroso: a) medio poroso con cuerpos sólidos de geometrías variadas y complejas; b) medio poroso simplificando la malla



3. Modelamiento matemático de los medios porosos

La porosidad es una medida sobre cuánto espacio vacío existe en un material poroso en relación con su volumen total. Estos medios porosos se caracterizan por tener una estructura de espacios interconectados que permiten la circulación del fluido. A medida que el fluido atraviesa los espacios interconectados, experimenta una disminución de la presión, con ocasión de la resistencia que encuentra para moverse a través de ellos. La caída de presión, en razón del flujo por medio de un medio poroso homogéneo e isotrópico, se puede describir utilizando varios modelos matemáticos como el modelo de transporte de soluto, el cual se basa en la solución de la ecuación de transporte de advección-difusión. El modelo de percolación, basado en la teoría de percolación que describe el flujo a través de una red. El modelo de Darcy, fundado en la proporcionalidad del gradiente de presión y la permeabilidad del medio.

El modelo de Darcy es una ecuación matemática que describe el flujo de fluidos a través de medios porosos. El modelo de Darcy para flujos estacionarios y unidireccionales viene dada de la siguiente forma:

$$\frac{\Delta P}{\Delta x} = \frac{\mu}{\kappa_1} V \quad [1]$$

donde,

ΔP [Pa] es el gradiente de presión, Δx [m] es el espesor del medio poroso, μ [Pa.s] la viscosidad dinámica del fluido, κ_1 [m²] es la permeabilidad y V [m/s] es la velocidad del fluido.

La permeabilidad es independiente de la naturaleza del fluido, y depende únicamente de las características o parámetros geométricos del medio. El modelo de Darcy-Forchheimer es una extensión del modelo de Darcy, en el que se tienen en cuenta los efectos no lineales del flujo, a través de medios porosos, flujos a altas velocidades o turbulentos [10]. El modelo de Darcy-Forchheimer introduce términos adicionales que tienen en cuenta las pérdidas de presión, debido a la resistencia viscosa e inercial en el flujo a través del medio poroso. La ley de Darcy-Forchheimer, utilizada para modelar la caída de presión experimentada por un fluido que fluye por un medio poroso, viene dada por:

$$\frac{\Delta P}{\Delta x} = \frac{\mu}{\kappa_1} V + \frac{\rho}{\kappa_2} V^2 \quad [2]$$

donde,

ρ [kg/m³] la densidad del fluido y κ_2 [m] es la resistividad inercial o el coeficiente de arrastre del medio poroso. Las propiedades de los medios porosos, la permeabilidad (coeficiente de Darcy) y el coeficiente de arrastre (coeficiente de Forchheimer), habitualmente se representan de la siguiente forma:

$$d = \frac{\mu}{\kappa_1} \quad [3]$$

$$f = \frac{\rho}{\kappa_2} \quad [4]$$

Donde la ecuación [2] se presenta como sigue:

$$\frac{\Delta P}{\Delta x} = dV + fV^2 \quad [5]$$

Existen multitud de representaciones de la ley de Darcy-Forchheimer, ecuación [5], que utilizan diferentes denominaciones para los coeficientes presentes en el término lineal, V [m/s], y el término cuadrático, V^2 [m²/s²], de las velocidades. Sin embargo, esta representación facilita la comprensión de los resultados presentados en esta aplicación.

4. Caso de estudio: aplicación de bolas de alúmina como medio poroso

Para esta investigación, el caso de estudio se implementó a partir de la siguiente metodología. Primer paso: selección y montaje experimental del medio poroso para la obtención de los valores de permeabilidad y coeficiente de arrastre; segundo paso: configuración de las simulaciones computacionales, discretización (mallado), definición de las condiciones de frontera implementadas y entrada de las propiedades macroscópicas del medio poroso obtenidas experimentalmente; tercer paso: validación de los resultados obtenidos.

4.1 Selección y montaje experimental del medio poroso para la obtención de las propiedades macroscópicas

Para obtener las propiedades macroscópicas del medio poroso, se planteó un montaje experimental en el que se midió la caída de presión para distintas velocidades del fluido. Como medio poroso se utilizaron bolas de alúmina, debido a sus buenas propiedades térmicas, con diferentes tamaños y formas: a) irregulares, b) pequeñas, c) medianas y d) grandes (ver figura 4).

Figura 4

Bolas de alúmina utilizadas a) irregulares b) pequeñas c) mediana d) grandes



Las bolas son utilizadas en diversas aplicaciones industriales debido a sus propiedades térmicas. Son un buen conductor térmico, capaces de transferir calor eficiente en comparación con otros materiales cerámicos, tienen una buena capacidad térmica, pueden almacenar una cantidad significativa de calor por unidad de masa, soportan temperaturas superiores a 1600 °C,

son químicamente inertes y no reaccionan fácilmente con productos químicos a altas temperaturas.

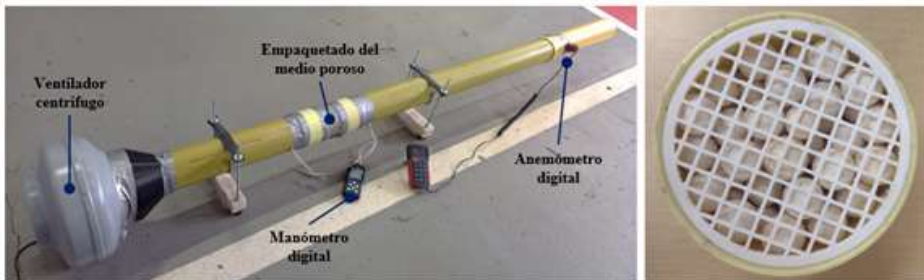
En este caso de estudio se utilizaron diferentes espesores del medio poroso, específicamente, de 7, 10 y 13 cm, para encontrar la relación entre el espesor del medio poroso y las propiedades macroscópicas del medio poroso, la permeabilidad y el coeficiente de arrastre, para cada uno de los diferentes tamaños de las bolas de alúmina propuestos.

El montaje experimental se construyó utilizando tubería de PVC de ocho pulgadas de diámetro. En esta tubería se instalaron los medidores de presión y velocidad. En la sección central de la tubería, se insertó el medio poroso mediante dos uniones de tubería, adaptadas a los diferentes espesores requeridos; además, se fabricaron dos rejillas plásticas diseñadas para facilitar el empaquetado de las bolas de alúmina, para los tres diferentes espesores, facilitando el intercambio entre mediciones, como se observa en la figura 5.

La caída de presión se tomó aguas arriba y aguas abajo del medio poroso, para diferentes velocidades del flujo, con un manómetro digital AR168. La diferencia de presión a través del medio poroso ofrece información acerca de cómo los espacios interconectados afectan la velocidad del flujo en relación con la permeabilidad y el coeficiente de arrastre. Para la medición de la velocidad del fluido, se utilizó un anemómetro digital a la salida del sistema.

Figura 5

Montaje experimental y características del medio poroso de bolas de alúmina



Se utilizó un ventilador centrífugo con variador de velocidad para controlar y ajustar la velocidad del flujo en el montaje experimental. Además, el ventilador centrífugo puede generar succión o inyección (descarga) de aire al sistema dependiendo de su instalación, en la figura 5, el ventilador centrífugo está instalado para generar inyección de aire al sistema. Con el fin de validar las propiedades macroscópicas del medio poroso. La velocidad máxima del ventilador centrífugo indicaba que el número de Match era menor que 0.3 en el montaje experimental, por lo que el fluido se modeló como incompresible y con densidad constante.

4.2 Obtención experimental de los valores de permeabilidad y coeficiente de arrastre

Para la obtención de los valores de permeabilidad y coeficiente de arrastre, ecuación [3] y [4], respectivamente, se midieron ocho puntos de la caída de presión y varió la velocidad del ventilador centrífugo en cada uno de ellos. Estos valores son mostrados en la tabla 1:

Tabla 1

Valores experimentales de las velocidades y las caídas de presión

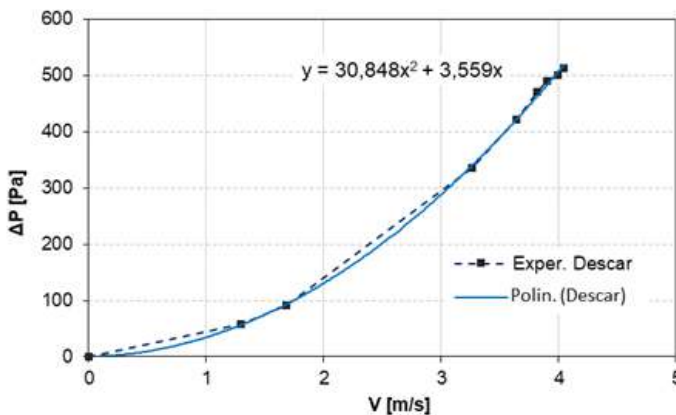
	Espesor 7 [cm]				Espesor 10 [cm]				Espesor 13 [cm]			
	Descarga		Succión		Descarga		Succión		Descarga		Succión	
	ΔP [Pa]	V [m/s]	ΔP [Pa]	V [m/s]	ΔP [Pa]	V [m/s]	ΔP [Pa]	V [m/s]	ΔP [Pa]	V [m/s]	ΔP [Pa]	V [m/s]
Irregulares	58	1,3	134	1,94	22	1,1	63	2,41	161	1,41	156	1,23
	92	1,68	256	2,76	88	2,03	83	2,49	210	1,69	370	2,13
	336	3,26	319	3,44	171	2,71	233	3,09	352	2,2	494	2,33
	422	3,64	504	3,74	378	3,87	300	3,31	364	2,24	541	2,6
	470	3,82	519	3,82	454	4,2	318	3,36	500	2,59	551	2,45
	490	3,9	533	3,82	485	4,35	330	3,38	515	2,62	562	2,38
	500	3,99	543	3,92	502	4,44	342	3,43	528	2,65	570	2,62
	513	4,04	547	3,94	509	4,49	345	3,46	541	2,69	571	2,5
Pequeñas	85	1,82	12	2,03	90	1,64	82	1,42	120	1,55	165	1,85
	352	3,71	122	2,94	255	2,85	163	2,24	292	2,43	311	2,39
	356	3,63	323	3,95	445	3,57	293	2,99	432	2,9	479	3,14
	457	4,1	327	4	475	3,69	470	3,8	480	3,05	525	2,92
	484	4,2	397	4,19	495	3,81	492	3,84	506	3,11	540	2,83
	492	4,35	419	4,22	505	3,82	507	4,01	516	3,14	548	3,33
	508	4,38	430	4,34	517	3,85	538	4,11	521	3,17	557	3,35
	510	4,4	437	4,53	525	3,9	545	4,17	532	3,19	561	3,21

	Espesor 7 [cm]				Espesor 10 [cm]				Espesor 13 [cm]			
	Descarga		Succión		Descarga		Succión		Descarga		Succión	
	ΔP	V	ΔP	V	ΔP	V	ΔP	V	ΔP	V	ΔP	V
	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[m/s]
Medianas	75	2,64	66	2,02	47	1,7	47	1,75	64	1,85	33	1,98
	138	3,55	103	2,53	108	2,54	60	2,14	132	2,57	139	3,06
	330	4,93	321	4,84	272	3,88	116	2,8	292	3,76	371	4,36
	402	5,31	442	5,8	412	4,72	350	4,75	392	4,3	428	4,58
	437	5,63	467	6,06	449	4,94	446	5,45	460	4,63	460	4,82
	460	5,74	492	6,15	468	5,02	485	5,49	483	4,72	472	4,91
	470	5,8	508	6,26	474	5,06	500	5,54	492	4,79	478	4,93
	475	5,85	520	6,35	483	5,09	508	5,65	504	4,83	485	5
Grandes	65	2,55	78	2,36	61	2,16	61	1,83	54	1,59	31	1,9
	80	2,8	129	3,14	125	2,92	114	2,77	143	2,55	175	3,12
	211	4,45	205	4,03	270	4,21	277	4,42	335	3,81	366	3,51
	288	5,13	385	5,45	383	4,91	432	5,46	420	4,21	428	4,28
	352	5,62	445	5,92	432	5,26	480	5,71	447	4,33	455	4,6
	420	6,06	490	5,95	452	5,34	514	5,81	477	4,47	468	4,67
	453	6,33	509	6,07	472	5,46	525	5,86	493	4,55	482	4,52
	464	6,4	518	6,21	481	5,52	529	5,9	508	4,63	493	4,75

Se graficaron en una hoja de cálculo los valores obtenidos experimentales de las velocidades (eje X) y las caídas de presión (eje Y). Mediante una regresión polinómica de grado dos, se encontró una función de aproximación, que aproxima los valores experimentales tomados (figura 6).

Figura 6

Valores experimentales de las velocidades (eje X) y las caídas de presión (eje Y) con su regresión polinómica



Para las bolas de alúmina irregulares con un espesor de medio poroso de 7 cm, la función de aproximación resultante fue: $y = 30,848x^2 + 3,559x$, donde el coeficiente del término lineal se divide por el espesor del medio poroso y la viscosidad dinámica del fluido para obtener el coeficiente de Darcy, $d [1/m^2]$ ecuación [3], y el coeficiente del término cuadrático se divide por el espesor del medio poroso y por la densidad del fluido para obtener el coeficiente de Forchheimer, $f [1/m]$ ecuación [4], los cuales se utilizan en las simulaciones numéricas como propiedades macroscópicas del medio poroso. En la tabla 2 se muestran los valores de los coeficientes de Darcy y Forchheimer para cada una de las bolas de alúmina utilizadas.

Los valores del coeficiente de Forchheimer y el coeficiente de Darcy, mostrados en la tabla 2, son muy variables debido a la naturaleza aleatoria de la geometría y la disposición de las bolas de alúmina; estas pueden tener formas y tamaños diferentes, lo que significa que hay una variación significativa en la estructura interna del medio poroso; además, la posición dentro del medio poroso es aleatoria; es decir, no están dispuestas en un patrón uniforme; por lo tanto, se realizaron dos réplicas más de las velocidades y las caídas de presión, las cuales se muestran en los anexos A y B.

4.3 Configuración de las simulaciones computacionales

En las últimas décadas, el uso de métodos numéricos para resolver problemas en ingeniería ha experimentado un importante crecimiento, destacando la CFD como una de las áreas de mayor desarrollo [11]. El CFD se refiere a un conjunto de métodos numéricos y algoritmos computacionales utilizados para resolver ecuaciones diferenciales. Estos métodos se aplican con el fin de predecir el comportamiento de los fluidos y fenómenos relacionados, que van desde la transferencia de calor hasta el arrastre de partículas sólidas, entre otros aspectos.

Tabla 2

Coefficiente de Forchheimer y Darcy para la descarga y la succión

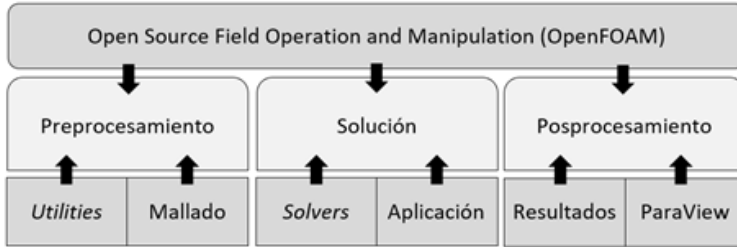
		Descarga		Succión	
		$f [1/m]$	$d [1/m^2]$	$f [1/m]$	$d [1/m^2]$
Irregulares	7 [cm]	731,42	2,66E+06	966,23	-1,68E+07
	10 [cm]	474,89	-710E+06	1177,75	-7,52E+07
	13 [cm]	949,99	9,57E+04	873,10	1,94E+07

		Descarga		Succión	
		$f[1/m]$	$d[1/m^2]$	$f[1/m]$	$d[1/m^2]$
Pequeñas	7 [cm]	638,00	-1,04E+06	912,18	-5,22E+07
	10 [cm]	633,42	-7,14E+06	479,73	6,46E+06
	13 [cm]	720,34	-5,59E+06	485,87	1,92E+07
Medianas	7 [cm]	411,57	-1,45E+07	257,64	9,56E+06
	10 [cm]	333,50	-4,08E+06	282,22	-3,41E+06
	13 [cm]	301,60	-4,03E+06	342,35	-1,38E+07
Grandes	7 [cm]	295,50	-5,37E+06	332,80	-2,91E+06
	10 [cm]	288,34	-4,42E+06	255,29	-1,21E+06
	13 [cm]	329,15	-3,64E+06	303,28	-2,24E+06

OpenFOAM es una herramienta de código abierto, muy utilizada en la simulación numérica de fluidos, que ofrece las mismas prestaciones que los *softwares* comerciales. Su flexibilidad y capacidad para resolver una amplia gama de problemas en ingeniería, lo convierten en una herramienta muy utilizada para solucionar cuestiones relacionadas con medios porosos. OpenFOAM utiliza métodos numéricos para solucionar ecuaciones de dinámica de fluidos, como las de continuidad, Navier-Stokes, turbulencia, entre otras, adaptándolas específicamente para trabajar con medios porosos.

Esta herramienta posee una estructura de trabajo que consta de tres etapas: a) preprocesamiento, b) solución y c) posprocesamiento (figura 7). Para la etapa de solución, OpenFOAM ofrece una gran variedad de *solvers* que permiten resolver problemas de la mecánica del medio continuo tales como: mecánica de sólido, electromagnetismo, reacciones químicas, flujos laminares y turbulentos; además, una gran cantidad de *utilities* que permiten realizar tareas de preprocesamiento y posprocesamiento —como la discretización o mallado de la geometría, y los resultados de posproceso, entre otros—. Una gran ventaja de OpenFOAM es la variedad de *solvers* y *utilities* que posee, ya que los usuarios pueden modificar o ajustar cualquier ejecutable para un caso de estudio específico [12].

Figura 7
Flujo de trabajo para simulaciones en OpenFOAM

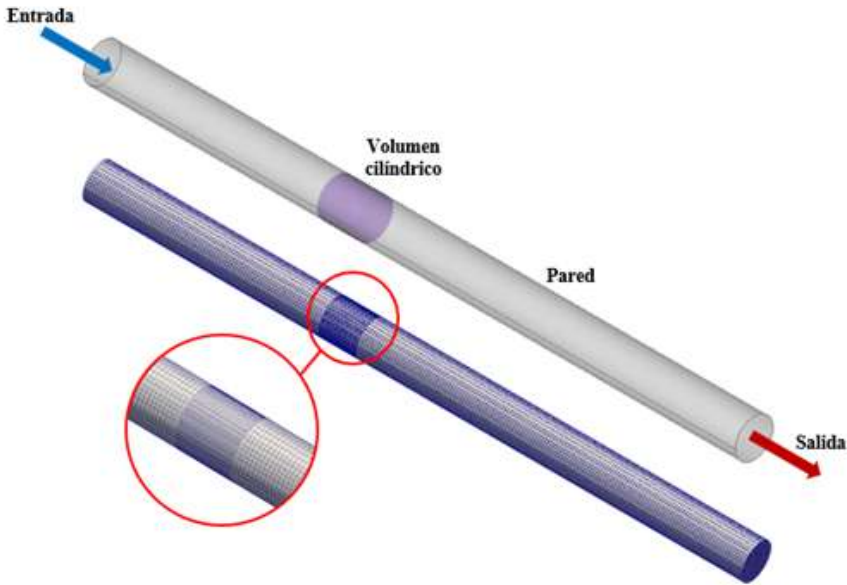


Se realizó una simulación para representar el montaje experimental para validar los valores encontrados de los coeficientes de Darcy y Forchheimer. El dominio computacional del tubo y el medio poroso fue discretizado en la etapa de preprocesamiento. La creación del modelo 3D se ejecutó en el *software* de código libre FreeCAD, donde se dibujó la geometría del tubo y, además, un volumen cilíndrico que representa el medio poroso. Se utilizaron varios archivos de superficie para representar el dominio computacional de la tubería con el fin de implementar las condiciones de frontera en cada una de ellas, como la entrada, la salida y las paredes de la tubería, donde se asignaron las condiciones de frontera. El volumen cilíndrico se seleccionó mediante la *utilities topset* para crear un conjunto de celdas, al cual se le aplicaron las propiedades macroscópicas del medio poroso, obtenidas experimentalmente, y refinar la malla en esa zona para mejorar la precisión de los resultados obtenidos. El mallado del tubo y medio poroso se ejecutó con las *utilities*, *blockMesh* y *snappyHexMesh*, que ofrece OpenFOAM (figura 8).

Las condiciones de frontera sobre las superficies del tubo (entrada, pared y salida) fueron tomadas del trabajo experimental realizado y se representaron en el modelo computacional. A la entrada del tubo se estableció una condición de velocidad constante; a la salida, se impuso una condición de gradiente de presión igual a cero, la cual se utiliza cuando no se dispone de información específica sobre la presión en esa superficie; se supone que la presión en la salida es, aproximadamente, la misma que en las celdas circundantes a la frontera. Por último, en las paredes se definió una condición de no deslizamiento. Cabe agregar que la condición de no deslizamiento plantea que la velocidad del flujo en contacto con las paredes es igual a cero, lo que refleja la idea de que el fluido sobre la superficie no se mueve. Visto así, estas condiciones de frontera son fundamentales para resolver y definir, en su totalidad, el problema.

Figura 8

Dominio computacional del tubo y del medio poroso con refinamiento



Las propiedades macroscópicas del medio poroso se establecen en OpenFoam en el directorio *porosityProperties*, mostrado en la figura 9, donde se especifica que el tipo de modelo matemático utilizado fue Darcy-Forchheimer, y se ponen los coeficientes hallados de manera experimental. Para medios porosos no homogéneos se pueden definir los varios coeficientes de Darcy y Forchheimer en las tres direcciones coordenadas (X, Y, Z). Además, se puede dar una dirección lineal cartesiana (*type cartesian*), al flujo que sale del medio poroso, o una rotación (*type axesRotation*), obteniendo, así, una descripción más realista de las direcciones de fluido. En este trabajo, el flujo es normal al medio poroso y sin rotaciones, debido a que en la parte experimental no se pudieron validar las direcciones del flujo a la salida del lecho poroso [13].

Figura 9

Directorio de OpenFOAM "porosityProperties"

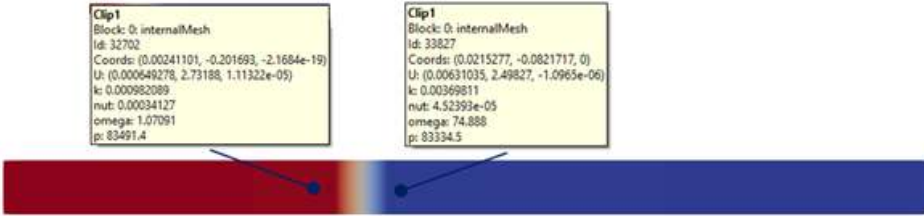
```
type      DarcyForchheimer;
          DarcyForchheimerCoeffs
          {
            d      d [0 -2 0 0 0 0 0] (0.0 2660000 0.0);
            f      [0 -1 0 0 0 0 0] (0.0 731.42 0.0);
            coordinateSystem
            {
              type      cartesian;
              origin    (0 0 0);
              coordinateRotation
              {
                type      axesRotation;
                e1        (0.0 0.0 -1.0);
                e3        (1.0 0.0 0.0);
              }
            }
          }
        }
```

5. Gradiente de presión sobre el tubo con cuerpo poroso

Dado que los gradientes de presión son un indicador para medir la permeabilidad de los medios porosos, en esta investigación se ha utilizado para cuantificar los coeficientes de Darcy y Forchheimer en las bolas de alúmina. El montaje experimental tuvo como objetivo analizar los gradientes de presión y las velocidades a través de un empaquetado de bolas de alúmina con diferentes espesores (tabla 2), con el fin de compararla con los valores obtenidos en las simulaciones por OpenFOAM. En la figura 10 se muestran los valores obtenidos en la simulación aguas abajo y aguas arriba del medio poroso.

Figura 10

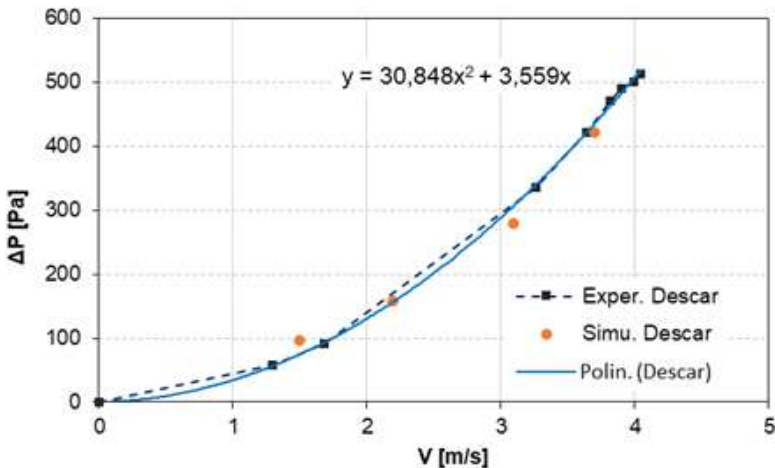
Simulación computacional del medio poroso. Valores obtenidos aguas abajo y aguas arriba del medio poroso



Se introdujeron varias velocidades a la simulación del medio poroso de bolas de alúmina irregulares, y espesor de 7 cm (Figura 11). Los valores de la caída de presión en la simulación se compararon con los obtenidos con la función de aproximación, dando como resultante un error relativo de 6.6% entre los valores. Ahora, un error relativo del 6.6% entre los valores es una información favorable para la validación de las simulaciones, lo cual indica que la simulación es capaz de capturar adecuadamente el comportamiento del medio poroso.

Figura 11

Valores de la simulación de velocidad y caída de presión

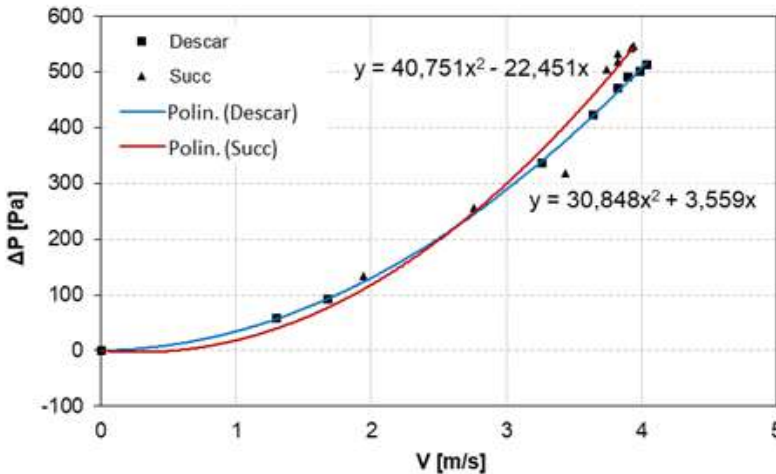


La falta de coincidencia entre los valores obtenidos, mediante experimento, y los resultantes en las simulaciones, utilizando los valores de los coeficientes de Darcy y Forchheimer, se puede justificar por varias razones, siendo la forma geométrica irregular, la aleatoriedad y la disposición de las bolas de alúmina, algunas de ellas. Por estas razones, la forma en que el fluido atraviesa el medio se ve afectado, dando lugar a una amplia gama de valores para los coeficientes de Darcy y Forchheimer encontrados mediante experimentación.

Por último, de forma experimental, se comparó la caída de presión en el medio poroso, cuando se inyecta (descarga) o succiona el flujo en el tubo. Se generaron dos funciones de aproximación; una para la descarga, $y = 30,848x^2 + 3,559x$, y otra para la succión, $y = 40,751x^2 - 22,451x$ (Figura 12); Se obtuvo una diferencia en la caída de presión del 10%. Esta diferencia puede estar relacionada con el desplazamiento del fluido dentro del medio poroso. Cuando hay una descarga, puede haber una mayor acumulación de flujo en ciertas regiones del medio poroso, lo que aumentaría la caída de presión; en cambio, cuando hay una succión, el flujo puede ser más uniforme en el medio poroso, dando lugar a una caída de presión diferente.

Figura 12

Funciones de aproximación para la descarga y la succión del flujo en el medio poroso



Además, las regresiones polinomiales de grado dos, utilizadas para generar las funciones de aproximación, son sensibles a los datos experimentales de entrada, generando funciones de aproximación que se ajusten bien a los datos, que no necesariamente representan, con exactitud, el comportamiento real del flujo a través del medio poroso.

6. Análisis estadístico

Los resultados de este estudio representan una alta incertidumbre, debido a que se congregan diferentes tratamientos que pueden tener efectos particulares y globales dentro de las variables respuesta, razón por la cual un análisis estadístico puede complementar los resultados y entregar una visión más amplia sobre la validez del método experimental usado, las variables involucradas y la validación de la simulación computacional.

Para este trabajo se usó un diseño experimental por bloques donde se involucraron, como factores de entrada, los mostrados en la tabla 3. Aquí se consideran tres fuentes de variabilidad que afecta la variable respuesta: el factor de tratamiento, el factor de bloque, y el error aleatorio. Sin embargo, este diseño de experimentos fue escogido dado la complejidad de aleatorizar completamente los experimentos, ya que el cambio entre los tratamientos tamaño de bolas y longitud de lecho representaban un esfuerzo experimental fortuito, que le pudo haber adicionado error al experimento; lo anterior, consecuencia de la variabilidad que se puede presentar en la fase de empaquetamiento del lecho.

Tabla 3

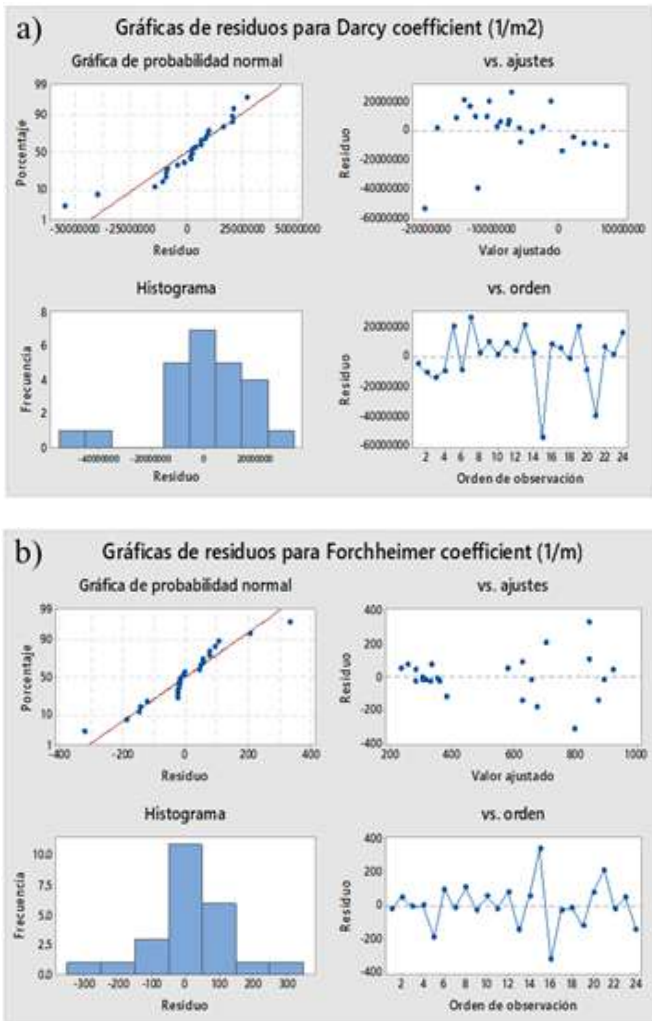
Diseño de experimentos por bloques

Factor	Niveles			
Tamaño de bolas	Grandes	Medianas	Pequeñas	Irregulares
Longitud del lecho [cm]	7	10	13	
Régimen	Succión	Descarga		

De esta manera, se llevó a cabo un análisis de varianza (Anova) teniendo en cuenta los resultados experimentales mostrados en el Anexo 1. Aquí se tomaron en cuenta interacciones de segundo orden y se corrió el análisis usando el programa Minitab. Para ello, se utilizó un modelo lineal general con un nivel de confianza del 95% para todos los intervalos. Luego de obtener

los resultados y su análisis, se encontró que las pruebas de supuestos, mostradas en la figura 13a y figura 13b para los coeficientes de Darcy y Forchheimer, respectivamente, revelan que se cumple el supuesto de normalidad, dado el ajuste de los puntos de probabilidad obtenidos mediante la inversa de la normal estándar, con un ajuste nivel del 90% a la tendencia lineal. Así mismo, la distribución de los puntos dentro del gráfico de ajuste (valor ajustado versus residuos) sin tendencia a aumentar, también apoyan el supuesto de varianza constante.

Figura 13
Graficas de residuos para en análisis Anova



Por otro lado, el análisis de varianza mostrado en las tablas 4 y 5, para los coeficientes de Darcy y Forchheimer, respectivamente, muestran que el tamaño de las bolas para el coeficiente de Forchheimer tiene un impacto en la variable respuesta, ya que el estadístico de prueba (valor p) es superior al 5%, el cual opera para estimar el nivel de confianza del análisis. Los factores adicionales muestran que las medias de tratamiento no tienen alta influencia en las variables de respuesta.

Tabla 4

Análisis de varianza para el coeficiente de Darcy

Fuente de variabilidad	Grados de libertad (GL)	Suma de cuadrados (SC Ajust.)	Media cuadrática (MC Ajust.)	Valor F	Valor p
Régimen	1	1,4472E+19	1,4472E+19	0,32	0,581
Tamaño de bolas	3	3,0910E+19	1,0303E+19	0,23	0,878
Longitud del lecho [cm]	2	8,1306E+19	4,0653E+19	0,89	0,429
Error	17	7,7773E+20	4,5749E+19		
Total	23	9,0442E+20			

Tabla 5

Análisis de varianza para el coeficiente de Forchheimer

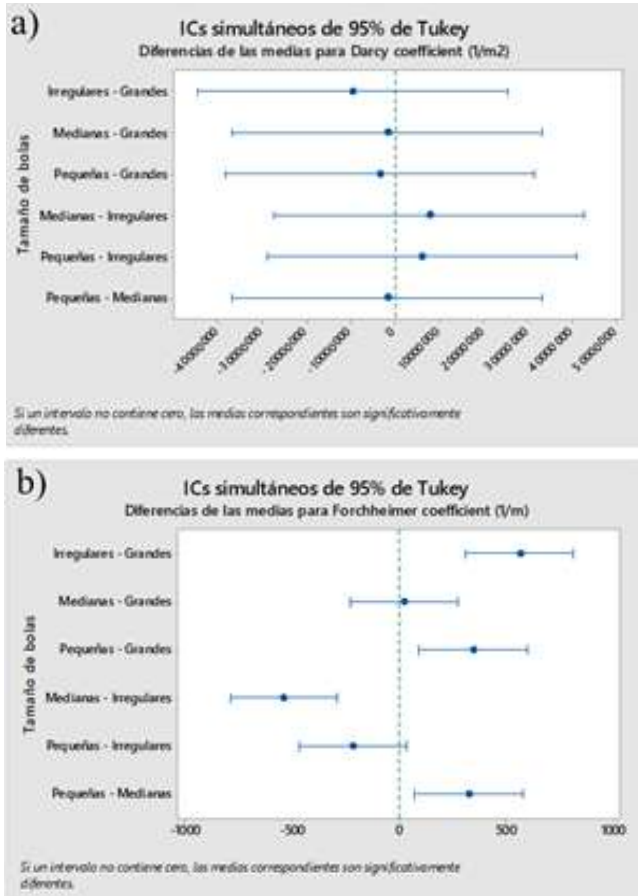
Fuente de variabilidad	Grados de libertad (GL)	Suma de cuadrados (SC Ajust.)	Media cuadrática	Valor F	Valor p
Régimen	1	13101	13101	0,56	0,464
Tamaño de bolas	3	1317650	439217	18,83	0,000
Longitud del lecho [cm]	2	24453	12227	0,52	0,601
Error	17	396455	23321		
Total	23	1751659			

De la misma manera, se empleó un modelo de Tukey de comparaciones de medias para determinar la diferencia en cada uno de los tratamientos, como se muestra en la figura 14a y 14b. Dado el valor p del Anova descrito, se tomó en consideración la influencia del tamaño de las bolas en este caso particular. Como resultado, queda claro que mediante la comparación de medias, solo para el coeficiente de Forchheimer, se muestran diferencias significativas entre tratamientos —como bolas irregulares y bolas grandes; así mismo, entre bolas pequeñas y grandes, bolas medianas e irregulares y, finalmente, entre pequeñas y medianas—; por lo tanto, estos tratamientos tienen efecto discernible sobre la variable de respuesta, en especial, sobre

el coeficiente de arrastre, el cual impacta directamente la caída de presión a través del lecho poroso. No obstante, los demás tratamientos no tienen una clara influencia con los datos obtenidos acerca de los coeficientes analizados.

Figura 14

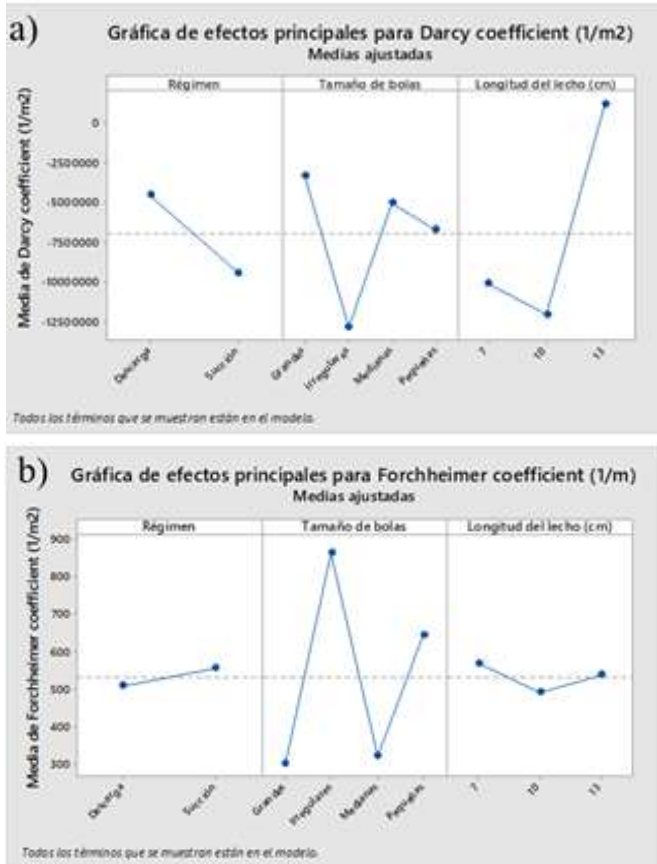
Comparación de medias para los coeficientes de Darcy y Forchheimer teniendo en cuenta el tamaño de bolas



En las figuras 15a y 15b se muestran los gráficos de efectos principales para las variables de respuesta de los coeficientes de Darcy y Forchheimer. Estas muestran que cada uno de los tratamientos tiene un impacto diferencial en la reducción o en el aumento de la variable respuesta; en particular, la

figura 15a muestra que para el coeficiente de Darcy el régimen de descarga maximiza el coeficiente, mientras que el régimen succión trata de reducirlo; adicionalmente, existe un efecto notable para las bolas irregulares, donde el coeficiente se reduce comparativamente con los demás tamaños de bolas, mientras que un efecto contrario se evidencia cuando la longitud del lecho se aumenta hasta 13 cm. Estos efectos no son comparables con lo obtenido para el coeficiente de Forchheimer (figura 15b), ya que el régimen y la longitud del lecho demuestran un efecto nulo sobre la variable respuesta, mientras que el uso de bolas irregulares maximiza el valor del coeficiente.

Figura 15
Gráficas de efectos principales para los coeficientes



No obstante, en la Figura 16 los resultados son limitados cuando se desean comparar interacciones entre factores; es por eso por lo que se usan las gráficas de interacciones entre las medias de cada uno de los tratamientos mostrados en las figuras 16a y 16b. Allí se muestra que para el caso del coeficiente de Darcy (figura 15a), la interacción entre los factores régimen y tamaño de bolas se tiene una diferencia significativa cuando en la succión se usan bolas irregulares; para las demás interacciones se deja notar que no existe diferencia notable; aun cuando se hace una comparativa entre el régimen succión y la longitud del lecho, se observa que una longitud de 13 cm maximiza el coeficiente, mientras la longitud de 7 cm y 10 cm lo llevan a ser mínimo; no obstante, en cuanto a la descarga, no se encuentran diferencias estadísticas. Finalmente, la interacción entre tamaño de bolas y longitud del lecho advierte que se obtiene la mayor diferencia entre los resultados. Esto hace que cuando se trata de bolas irregulares y bolas pequeñas, los resultados varíen significativamente, especialmente donde el coeficiente se maximiza para una longitud del lecho de 13 cm.

Por otra parte, en el caso del coeficiente de Forchheimer (figura 13b), las bolas irregulares muestran los resultados más destacables, por cuanto en este caso siempre trata de elevar el coeficiente a valores máximos, sin importar si se trata de la interacción con el factor régimen o con el factor longitud del lecho. Sin embargo, para este coeficiente, pareciera que el régimen no tiene influencia sobre la variable respuesta, y la longitud del lecho muestra diferencias no tan significativas respecto a lo descrito anteriormente para el coeficiente de Darcy.

Figura 16
Gráficas de interacciones de tratamientos para los coeficientes





7. Conclusiones

Se realizó un estudio de validación experimental y numérica para la obtención de los coeficientes de Darcy y Forchheimer, utilizando para ello simulación computacional con la herramienta OpenFOAM. Los resultados permiten extraer algunas conclusiones sobre el comportamiento de los medios porosos. Las bolas de alúmina, utilizadas como medio poroso, pueden tener formas y tamaños diversos, lo cual representa variaciones significativas en el empaquetado del medio poroso. Algunas bolas pueden ser más grandes o más pequeñas que otras. Estas geometrías diversas de las bolas de alúmina influyen en la forma en que el flujo pasa a través del medio, lo que da lugar a una amplia gama de valores de los coeficientes de Darcy y Forchheimer.

Debido a estas fuentes de variabilidad, es importante reconocer que los valores de dichos coeficientes pueden cambiar sustancialmente de un punto a otro dentro del medio poroso de bolas de alúmina; de ahí que al implementar una metodología experimental o simulaciones numéricas, en aplicaciones que involucran este tipo de medio poroso, es fundamental tener en cuenta esta variabilidad y, en algunos casos, utilizar enfoques probabilísticos o técnicas de caracterización más detallada para obtener los coeficientes.

Con relación a la herramienta OpenFOAM, puede utilizarse para abordar problemas en medios porosos, destacando su capacidad para definir y ajustar las condiciones de frontera y las características macroscópicas del

medio poroso, alcanzando resultados detallados del comportamiento del flujo a través del medio poroso. Esto lo hace ideal para la investigación y las aplicaciones industriales que involucran medios porosos.

Se utilizó un diseño de experimento por bloques, teniendo en consideración tres fuentes de variabilidad: tratamiento, bloque, y error aleatorio. Se aplicó un análisis de varianza (Anova) con un nivel de confianza del 95%, mostrando que el tamaño de las bolas tiene un impacto en el coeficiente de Forchheimer. Se empleó el modelo de Tukey de comparación de medias versus el tamaño de bolas; se encontraron diferencias significativas en el coeficiente de Forchheimer, entre: irregulares/grandes, pequeñas/grandes, medianas/irregulares y pequeñas/medianas. Estos tratamientos tienen un efecto evidente sobre las variables de respuestas, especialmente sobre el coeficiente de arrastre, que influye en la caída de presión del lecho poroso, mientras que otros tratamientos no muestran una influencia clara en los coeficientes analizados.

En cuanto a las figuras de interacciones de tratamiento para los coeficientes, en algunos casos, estas indican diferencias significativas; ejemplo de esto es la interacción entre régimen y tamaño de bolas para el coeficiente de Darcy. Los estudios estadísticos presentan resultados con alta incertidumbre debido a la variedad de tratamientos que pueden afectar las variables respuesta.

En general, para el coeficiente de Darcy, se observa una diferencia relevante en la interacción entre régimen y tamaño de las bolas, durante la succión con bolas irregulares, y la longitud del lecho más favorable observada es la de 13 cm. En el caso del coeficiente de arrastre de Forchheimer, las bolas irregulares, de manera constante buscan elevarlo, con un impacto menor del régimen y la longitud del lecho.

Por último, en este estudio se demuestra la importancia de combinar enfoques experimentales y numéricos, para comprender en profundidad el comportamiento de medios porosos. Complementar entre los datos experimentales y simulaciones numéricas, ofrece una perspectiva más completa y precisa de las propiedades macroscópicas de los medios porosos.

En concreto, los resultados de este estudio son relevantes para una amplia gama de aplicaciones, como la filtración, la absorción y el transporte de fluidos en medios porosos, así como para el diseño y la optimización de sistemas que involucren este tipo de materiales.

8. Referencias

- [1] M. de M. y Energía, *Actualización Plan Energético Nacional (PEN) 2022-2052, Tomo I. Bogotá, Colombia: UPME, 2023.*
- [2] and S.D. H. El-Mahallawy, Fawzy, *Fundamentals and technology of combustion.* Elsevier, 2002.
- [3] L. Olmos-Villalba, B. Herrera, and K. Cacua, “Experimental Analysis of Thermal Efficiency of a Porous/Swirl Burner Applied to Industrial Cooking,” *Indian J. Sci. Technol.*, vol. 11, no. 14, pp. 1–8, 2018, doi: 10.17485/ijst/2018/v11i14/118145.
- [4] B. Herrera, K. Cacua, and L. Olmos-Villalba, “Combustion stability and thermal efficiency in a porous media burner for LPG cooking in the food industry using particles coming from grinding wastes,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 91, 2015, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.08.079.
- [5] K. Cacua, L. Olmos-Villalba, B. Herrera, and A. Gallego, “Experimental evaluation of a diesel-biogas dual fuel engine operated on micro-trigeneration system for power, drying and cooling,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 100, 2016, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.02.067.
- [6] E. N. Militar, “MODELADO CFD DE COMBUSTIÓN DE BIOMASA, SIMULACIÓN,” *Efic. energética y sostenibilidad*, vol. 1, no. 1, pp. 949–960, 2015.
- [7] A. H. Abdulkarim, A. Ates, K. Altinisik, and E. Canli, “Internal flow analysis of a porous burner via CFD,” *Int. J. Numer. Methods Heat Fluid Flow*, vol. 29, no. 8, pp. 2666–2683, 2019, doi: 10.1108/HFF-07-2018-0413.
- [8] S. Education, L. Volume, A. U. Polit, C. U. Polit, and I. Agrarias, “the Analysis of Porous Medium Flows,” vol. 10, no. 1, pp. 261–276, 2017.
- [9] P. E. J. Vos, B. Maiheu, J. Vankerkom, and S. Janssen, “Improving local air quality in cities: To tree or not to tree?” *Environ. Pollut.*, vol. 183, pp. 113–122, Dec. 2013, doi: 10.1016/j.envpol.2012.10.021.
- [10] M. Properties and H. O. Mucosa, “Modelling of Porous Media in OpenFOAM,” no. November, pp. 2–3, 2015.
- [11] B. Andersson, B., Andersson, R., Håkansson, L., Mortensen, M., Sudiyo, R., & Van Wachem, *Computational fluid dynamics for engineers.* 2011.
- [12] O. U. Guide, “Programmers guide,” *JDT Core.*, retrieved from Apr.
- [13] H. E. Hafsteinsson, “Porous Media in OpenFOAM,” *Lecture*, pp. 1–14, 2009.

Anexos

Anexo A

Valores experimentales de las velocidades y las caídas de presión. Replicación 2

	Espesor 7 [cm]				Espesor 10 [cm]				Espesor 13 [cm]			
	Descarga		Succión		Descarga		Succión		Descarga		Succión	
	ΔP	V	ΔP	V	ΔP	V	ΔP	V	ΔP	V	ΔP	V
	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[m/s]
Irregulares	258	2,27	380	2,93	91	1,67	200	1,6	57	1,08	236	1,21
	375	2,73	468	3,26	180	2,01	274	1,9	237	1,77	311	1,43
	460	3,01	521	3,26	321	2,43	381	2,25	270	1,87	515	2,17
	470	3,04	551	3,46	383	2,6	498	2,6	357	2,11	577	2,38
	486	3,09	568	3,49	407	2,66	526	2,62	405	2,22	600	2,4
	508	3,17	582	3,47	425	2,71	542	2,64	440	2,31	611	2,47
	517	3,19	591	3,5	438	2,74	558	2,8	456	2,35	616	2,55
	527	3,22	607	3,58	448	2,77	580	2,87	480	2,4	633	2,49
Pequeñas	207	3,16	277	3,55	98	2,08	68	1,28	154	1,67	143	1,77
	320	3,7	336	3,74	136	2,42	205	2,58	194	1,86	214	2,15
	368	3,92	415	4,04	236	3,08	368	3,39	293	2,3	418	2,9
	399	4,04	453	4,24	305	3,45	414	3,55	325	2,4	477	3,05
	418	4,12	478	4,32	326	3,58	426	3,62	418	2,72	507	3,15
	430	4,18	502	4,4	348	3,67	438	3,75	464	2,75	520	3,25
	447	4,23	527	4,5	360	3,74	449	3,8	506	3,03	534	3,15
	460	4,29	534	4,6	370	3,78	457	3,91	528	3,11	543	3,3
Medianas	45	2,89	6	2,82	82	2,86	74	2,21	47	2,07	37	1,35
	133	3,79	89	3,67	162	3,53	161	3,08	73	2,35	90	2,18
	235	4,6	203	4,55	248	4,13	299	4,15	203	3,32	215	3,3
	300	5,02	212	4,69	345	4,71	445	4,8	322	4,01	382	4,25
	364	5,4	319	4,89	388	4,95	492	5,01	381	4,3	440	4,53
	391	5,58	323	5,45	412	5,08	515	5,1	410	4,45	469	4,74
	413	5,69	395	5,7	434	5,18	525	5,17	428	4,52	493	4,8
	420	5,76	416	5,8	450	5,26	528	5,33	447	4,62	515	4,95
Grandes	58	2,21	70	2,66	14	1,83	79	2,16	85	2,16	62	1,83
	71	2,41	85	2,8	44	2,32	96	2,44	120	2,53	173	2,95
	127	3,19	250	4,45	146	3,4	186	3,25	166	2,99	305	3,8
	241	4,28	353	5,15	279	4,41	301	4,17	201	3,25	350	4,17
	337	4,97	445	5,65	356	4,89	402	4,75	329	4,08	471	4,63
	390	5,33	466	5,96	413	5,2	450	5	386	4,38	500	4,73
	460	5,76	485	6,08	442	5,41	503	5,3	444	4,69	515	4,85
	469	5,8	496	6,2	457	5,49	526	5,56	485	4,89	528	4,9

Anexo B

Valores experimentales de las velocidades y las caídas de presión. Réplica 3

	Espesor 7 [cm]				Espesor 10 [cm]				Espesor 13 [cm]			
	Descarga		Succión		Descarga		Succión		Descarga		Succión	
	ΔP	V	ΔP	V	ΔP	V	ΔP	V	ΔP	V	ΔP	V
	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[m/s]
Irregulares	150	2,45	119	3,22	322	2,15	390	2,22	314	1,5	413	2,05
	298	3	164	3,32	407	2,42	453	2,34	389	2,03	481	2,16
	356	3,15	196	3,37	467	2,58	503	2,42	488	2,27	483	2,3
	378	3,22	212	3,44	495	2,67	521	2,66	505	2,31	515	2,38
	395	3,27	218	3,53	511	2,71	537	2,73	518	2,34	538	2,4
	406	3,32	229	3,47	522	2,74	548	2,79	533	2,37	544	2,42
	414	3,37	230	3,46	533	2,77	554	2,7	543	2,38	545	2,47
	420	3,34	231	3,5	537	2,79	560	2,77	548	2,4	570	2,49
Pequeñas	253	3,27	322	3,57	300	2,85	271	2,7	187	2,58	384	2,56
	401	4,04	368	3,96	383	3,17	423	3,3	252	2,75	440	2,8
	457	4,3	428	4,24	433	3,36	479	3,4	291	2,88	486	2,99
	477	4,39	450	4,37	456	3,44	482	3,53	318	2,95	507	3,01
	495	4,44	462	4,55	473	3,5	503	3,75	328	3	525	3,09
	501	4,48	480	4,56	492	3,58	522	3,79	337	3,03	541	3,15
	506	4,5	486	4,59	502	3,61	536	3,84	349	3,05	551	3,2
	508	4,51	497	4,67	506	3,63	546	3,81	354	3,07	557	3,25
Medianas	243	4,4	50	3,67	185	3,48	154	3,09	223	3,3	176	3,56
	266	4,57	170	4,78	288	4,27	341	4,6	304	3,78	228	3,78
	323	5,02	245	5,32	374	4,79	410	4,77	372	4,14	288	4,13
	368	5,31	307	5,7	408	4,99	455	5,05	405	4,32	315	4,4
	399	5,53	337	5,82	430	5,13	476	5,3	430	4,45	345	4,52
	436	5,73	362	5,93	449	5,25	499	5,47	460	4,58	353	4,58
	452	5,85	372	6,03	471	5,33	514	5,53	482	4,69	369	4,6
	468	5,96	388	6,23	482	5,44	523	5,62	495	4,75	385	4,67
Grandes	187	3,87	124	4,62	123	2,84	234	3,63	193	3,03	81	3,65
	211	4,08	160	4,75	177	3,31	303	4,1	275	3,55	123	3,95
	304	4,67	251	5,36	287	4,17	399	4,5	367	4,09	193	4,50
	351	4,95	278	5,52	375	4,65	451	4,85	406	4,31	220	4,64
	384	5,15	304	5,62	422	4,92	480	5,06	435	4,45	243	4,75
	403	5,27	318	5,7	455	5,09	500	5,22	463	4,56	262	5,6
	424	5,4	330	5,85	472	5,18	513	5,27	482	4,66	272	4,95
	443	5,45	341	5,89	482	5,22	520	5,31	495	4,72	284	4,84

EMAV (OBD-II & GPS Logger): herramienta clave en el diagnóstico y supervisión de vehículos en la transición energética

Frank A. Ruiz

Institución Universitaria Pascual Bravo,
Facultad de Ingeniería, Departamento de Mecánica,
frank.ruiz@pascualbravo.edu.co,
ORCID: 0000-0002-1976-7442

Javier D. Londoño

Universidad de Castilla-La Mancha, E.T.S.
Ingeniería Industrial,
javierdavid.londono@uclm.es,
ORCID: 0000-0003-4722-053X

Andrés David Morales Rojas

Institución Universitaria Pascual Bravo,
Facultad de Ingeniería,
Departamento de Mecánica,
andres.morales@pascualbravo.edu.co,
ORCID: 0000-0003-2876-8719

Duván Arley Blandón

Institución Universitaria Pascual Bravo,
Facultad de Ingeniería, Departamento de Mecánica,
duvan.blandon488@pascualbravo.edu.co

Amada Cristina Rúa

Institución Universitaria Pascual Bravo,
Facultad de Ingeniería, Departamento de Mecánica,
amada.rua586@pascualbravo.edu.co

1. Introducción

En este trabajo se aborda la temática de la adquisición de señales de vehículos de inyección electrónica de combustible (en adelante EFI, por sus siglas en inglés) a través del protocolo del sistema de diagnóstico a bordo de segunda generación (en adelante OBD-II, por sus siglas en inglés) y de los datos de la actividad vehicular mediante dispositivo de posicionamiento global (en adelante GPS, por sus siglas en inglés). El enfoque principal es el diagnóstico automotriz y la supervisión temprana o en tiempo real de los parámetros del desempeño de los motores, que combinada con datos de la movilidad, en determinada región, pueda generar el insumo base para el establecimiento de políticas estatales que generen impacto en épocas de transición energética para el sector automotor.

La metodología empleada se basa en el desarrollo de un sistema electrónico de diagnóstico automotriz, utilizando la interfaz ELM327; un intérprete de OBD-II a RS232, y un dispositivo de geolocalización, para la obtención de datos de operación del motor y de la actividad vehicular. Además, se desarrolló un software de adquisición, visualización y almacenamiento de datos, el cual se ejecuta sobre un microcomputador LattePanda®.

Los resultados obtenidos destacan la creación de un software diseñado en LabView®, el cual integra las señales obtenidas mediante el protocolo OBD-II y los datos de actividad vehicular capturados por el dispositivo GPS. El sistema permite adquirir datos en tiempo real de las variables de operación de los motores, así como el monitoreo de parámetros relevantes del funcionamiento y la eficiencia del vehículo. Los resultados enfatizan la relevancia de esta tecnología en el contexto de la transición energética, proporcionando una herramienta que puede ser utilizada en futuras investigaciones que contribuyan a la promoción de una movilidad más eficiente y amigable con el medio ambiente.

2. El diagnóstico y monitoreo automotriz: una mirada hacia la movilidad sostenible

En el contexto actual de la transición energética, la sostenibilidad ambiental y la reducción de emisiones contaminantes son objetivos prioritarios cuando se habla del parque automotor y de vehículos de combustión interna; por ello, se vuelve cada vez más imperativo contar con sistemas de diagnóstico automotrices que permitan monitorear y supervisar,

de manera eficiente, el rendimiento de estos motores, minimizando su impacto ambiental. La adquisición precisa de señales de vehículos, a través del protocolo de diagnóstico a bordo OBD-II (On-Board Diagnostics) [1], los datos de actividad vehicular mediante dispositivos GPS (Global Positioning System) [2] y el análisis de su movilidad se han convertido en factores clave para garantizar la supervisión de las condiciones de operación, un mantenimiento adecuado de los automotores, una reducción significativa de emisiones de escape y, al mismo tiempo, se posicionan como información esencial para las políticas, en beneficio de una movilidad sostenible y en concordancia con la transición energética del parque automotor.

El protocolo de diagnóstico OBD-II, una norma adoptada en la industria automotriz se ha convertido en un estándar global para la obtención de datos críticos de los vehículos. A través de este protocolo, se pueden acceder y adquirir múltiples parámetros del motor, estos datos, combinados con la información capturada mediante dispositivos GPS, como la posición geográfica, velocidad, tiempo y altura sobre el nivel del mar, proporcionan una visión integral del comportamiento del vehículo en diferentes condiciones, además de una información detallada sobre los hábitos de conducción, las rutas más utilizadas y los tiempos de viaje en diferentes áreas geográficas en tiempo real.

Estos datos son valiosos para identificar áreas con congestión de tráfico, optimizar rutas y horarios, y promover el uso de transporte público o alternativas de movilidad más eficientes [3]. En la búsqueda constante de soluciones integrales para el diagnóstico automotriz y la reducción de emisiones contaminantes, se ha identificado la necesidad de obtener no solo información sobre el rendimiento del motor, sino, también, datos de movilidad y posición geográfica de los vehículos. Estos datos adicionales brindan una perspectiva más completa y permiten establecer patrones y ciclos de conducción regionales [4], lo cual es fundamental para el desarrollo de políticas públicas de movilidad sostenible y el establecimiento de factores de emisión de contaminantes precisos.

En el ámbito internacional, otros autores destacan la importancia de las herramientas de diagnóstico a bordo OBD-II como elemento clave en esta evolución. K. Khorsravina *et al.* [5] destacan la sinergia entre la interfaz ELM327, OBD-II y una aplicación móvil para ofrecer un análisis detallado del rendimiento y consumo eléctrico en vehículos eléctricos. D. Rimpas *et al.* [6] subrayan el papel fundamental de los sensores OBD-II en proporcionar

datos precisos para comprender y optimizar el consumo de combustible, aspecto esencial en la era de la eficiencia energética. Por otro lado, J.-S. Jhou *et al.* [7] muestran la importancia de la computación en la nube para permitir el acceso remoto a datos clave del vehículo, facilitando así la gestión de flotas y la optimización continua de la eficiencia energética. Por su parte, Prachi Yadav & Mr. Peeyush Kumar Pathak [8] realizaron una revisión exhaustiva del estado del arte, indagando acerca del papel crítico que desempeñan los sistemas OBD-II en el monitoreo detallado del rendimiento de los vehículos, vital en la adaptación a tecnologías más sostenibles. Igualmente, Kumar Singh *et al.* [9] combinaron la interfaz ELM327, OBD-II y el Internet de las cosas (IoT, en sus siglas en inglés) para proporcionar una plataforma avanzada para el diagnóstico y la conectividad, siendo esencial en la gestión de vehículos interconectados. A lo anterior se suma un estudio centrado en el análisis de datos de movilidad a través del sistema OBD-II, para comprender tanto el rendimiento técnico del vehículo —como el estilo de conducción y el comportamiento del conductor, crucial para fomentar conductas más eficientes y sostenibles de circulación vial [10], [11]. Finalmente, M. Rykała *et al.* [12] desarrollaron un modelo matemático para estimar el consumo de combustible usando una interfaz OBD-II de bajo costo con el objeto de comprender y optimizar el rendimiento del vehículo en términos del gasto de combustible.

En Colombia, la Ley 1972 de 2019 [13] establece medidas tendientes a la reducción de emisiones contaminantes del aire, provenientes de fuentes móviles que circulen por el territorio nacional. Además, la resolución 0762 de 2022 [14] reglamenta los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes que deben cumplir las fuentes móviles terrestres; por lo tanto, la adquisición y análisis de datos vehiculares es crucial para cumplir con estas regulaciones y contribuir a un ambiente más sano.

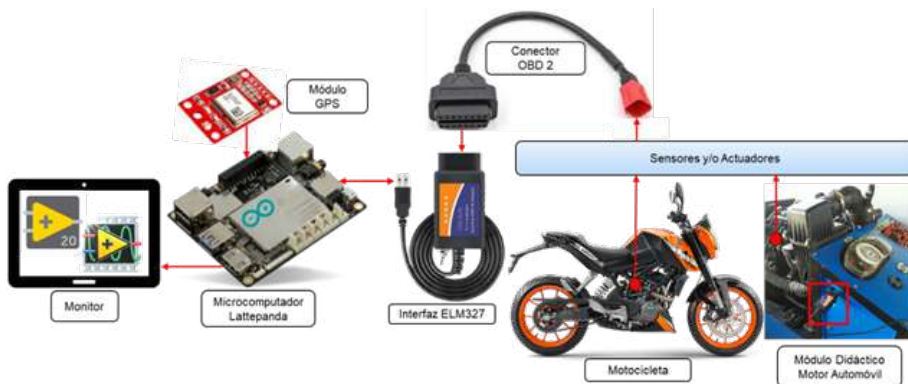
En conclusión, la combinación del protocolo OBD-II, los dispositivos GPS y el análisis de movilidad desempeñan un papel fundamental en el diagnóstico automotriz durante la transición energética. Estas herramientas nos brindan una visión integral del rendimiento de los motores, permitiéndonos optimizar la eficiencia energética, reducir las emisiones contaminantes y diseñar políticas públicas de movilidad sostenible. Al aprovechar estas tecnologías, avanzamos hacia un futuro de transporte más limpio, más eficiente y en armonía con el medio ambiente en esta importante era de transición energética.

En este trabajo, se presenta el desarrollo de una herramienta informática basada en la adquisición de datos sobre vehículos con sistemas de inyección electrónica de combustible (EFI), que tienen implementados protocolos de comunicación OBD-II, y la adquisición de datos de posicionamiento global mediante dispositivos GPS para la captura de la actividad vehicular del automotor con fines de análisis de movilidad.

3. Metodología y diseño de un equipo de medición de actividad vehicular (EMAV)

A continuación, se presenta la metodología para desarrollar el equipo portátil de medición de actividad vehicular (en adelante, EMAV). Este equipo, toma en cuenta la información proveniente de los sensores del mismo vehículo instalados de fábrica y en comunicación con la Unidad de Control Electrónico (ECU), con el propósito de acceder a los datos de operación del automotor en tiempo real, a través de los protocolos de comunicación OBD-II que hacen parte de la calibración en el *software* de la ECU; además, se complementa con la instalación de un dispositivo GPS externo, lo que permite adquirir, de modo simultáneo, tanto la información de funcionamiento del motor, como de la movilidad del vehículo. El esquema general de la instalación experimental se muestra en la figura 1.

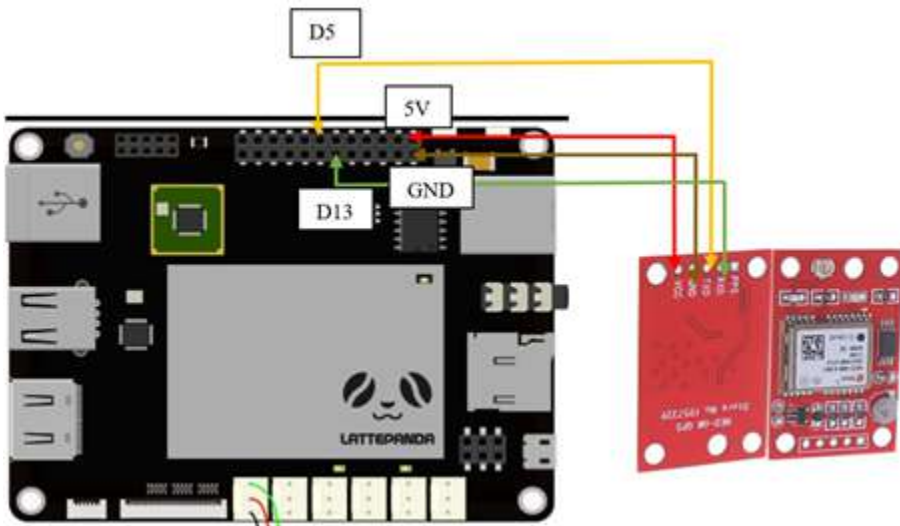
Figura 1
Esquema general de la instalación experimental



Para cada vehículo de prueba se realizó la conexión del dispositivo ELM327 mediante su conector de diagnóstico respectivo; esta interfaz de diagnóstico se conectó, a su vez, mediante cable USB, al microcomputador LattePanda®. El dispositivo GPS se enlazó a los puertos digitales del microcomputador, como se ilustra en la figura 2. Al sistema de cómputo se le instaló la versión 2020 de la plataforma LabVIEW y sobre ella se diseñó la interfaz gráfica para monitorear los datos de cada variable. Para visualizar las variables de funcionamiento del motor y los datos de posicionamiento global, se conectó un monitor externo al puerto de salida HDMI del micro PC. El intercambio de información (solicitudes y respuestas) entre la interfaz OBD-II y el *software*, se realizó mediante el protocolo de comunicación RS-232. Los comandos seriales enviados y recibidos siguieron la estructura establecida por el fabricante del ELM327 en su hoja de datos técnica (datasheet) [15]. Una vez establecida la comunicación y el intercambio de datos de las diferentes variables, se efectuaron tanto pruebas estáticas como dinámicas (en banco de rodillos) para validar el funcionamiento del EMAV.

Figura 2

Conexión del módulo GPS al sistema de cómputo LattePanda



Las mediciones para validar el funcionamiento del equipo fueron llevadas a cabo sobre una motocicleta de inyección electrónica de combustible de referencia KTM DUKE 200, y sobre un módulo didáctico de enseñanza

y aprendizaje de diagnóstico automotriz equipado con el motor del automóvil a gasolina KIA RIO. En la tabla 1, se detallan algunas características técnicas de los vehículos usados.

Tabla 1

Características técnicas de los vehículos usados para validar el EMAV

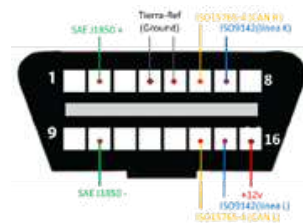
Característica técnica	Motocicleta KTM Duke	Módulo KIA RIO
Tipo	4T, refrigerado por líquido, DOHC	1.4 l DOHC CVVT Dual 16v
Cilindraje	200 cm ³	1368 cm ³
Número de cilindros	1	4 en línea
Potencia Max	25.5 Hp @10000 rpm	99 HP/4000 rpm
Tipo de combustible	Gasolina	Gasolina
Sistema de combustible	Inyección	Inyección multipunto
Año	2019	2019

La comunicación entre los vehículos y el EMAV se realizó mediante el uso de la interfaz ELM327 [15]; se trata de una interfaz de comunicación que interpreta los protocolos OBD-II al estándar de comunicación serial RS-232 mediante comandos o tramas de datos seriales. La interfaz y sus características técnicas se muestran en la tabla 2.

Tabla 2

Características técnicas de la interfaz ELM327

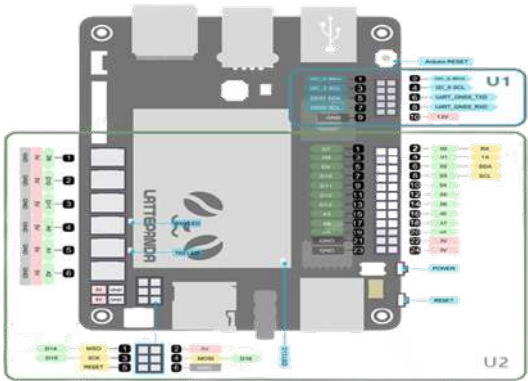
Procesador	ELM327
Protocolos OBDII compatibles	ISO15765-4 (CAN), ISO14230-4 (KWP2000) ISO9141-2 J1850 VPW J1850 PWM
Protocolo de salida	USB
Indicadores LEDs	Power, OBD Tx/Rx, RS232 Tx/Rx
Voltaje de operación	12V
Dimensiones aproximadas	3.75" x 1.7" (95 mm x 43 mm)



Tanto la adquisición de las variables provenientes de la interfaz OBD-II, como los datos del sistema GPS, se gestionan a través de una herramienta de *software* diseñada en plataforma LabVIEW®, la cual muestra y almacena las variables de interés, ejecutándose en un equipo de cómputo LattePanda [16], [17], cuyas especificaciones técnicas más relevantes, su distribución de pines y su aspecto físico se detallan en la tabla 3.

Tabla 3

Características técnicas, distribución de pines y aspecto físico del microcomputador LattePanda

Especificaciones técnicas	Tarjeta LattePanda y su distribución de pines
Procesador Intel Cherry Trail Z8350 Quad Core RAM: 2GB DDR3L Almacenamiento: 32 GB GPU: Intel HD Graphics, 12 EUs @ 200-500 Mhz. USB 3.0 x 1, USB 2.0 x 2 Wi-Fi 802.11n 2.4 G Bluetooth 4.0 Coprocesador Arduino Integrado: ATmega32u4 (Arduino Leonardo) Salida de vídeo: HDMI y MIPI-DSI Voltaje: 5V @ 2A Dimensiones del paquete: 110 x 94 x 30 mm / 4.33 x 3.70 x1.18 “ Peso: 55 g	

Para adquirir los datos de posicionamiento global del vehículo, se usó el dispositivo GPS NEO 6M-V2 [18], el cual es capaz de obtener la localización de un objeto y registrar la latitud, altitud, longitud, fecha, hora y velocidad. Este módulo tiene un diseño compacto y memoria independiente; además, es compatible con el coprocesador ATmega32u4 (Arduino Leonardo) integrado al sistema de cómputo LattePanda. En la tabla 4, se muestran las principales características técnicas del módulo GPS usado.

Tabla 4

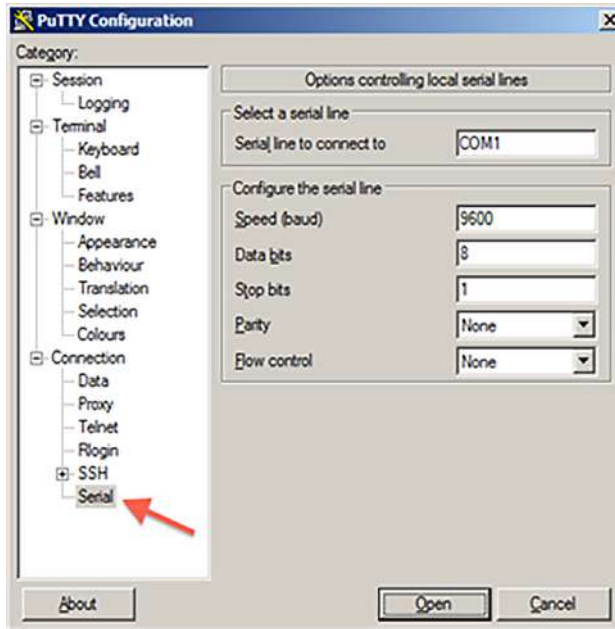
Características técnicas del módulo GPS NEO 6M-V2

Característica Técnica	Módulo GPS
Interfaz: RS232 TTL	
Modelo: GY-GPS6MV2	
Voltaje de alimentación: 3 a 5 V	
Baud Rate por defecto: 9600bps	
Integra Batería MS621FE para soporte de datos. Incluye Antena Cerámica	
Tamaño de la tarjeta: 25 x 35mm	
Tamaño de la antena: 25 x 25 mm	

En el contexto de la comunicación OBD-II, entre un dispositivo terminal y la ECU de un automóvil, los comandos del estándar AT (Attention por sus siglas en inglés), son códigos utilizados en las comunicaciones serie (como RS-232) para controlar y configurar dispositivos. Los comandos AT son utilizados para establecer una comunicación bidireccional entre el dispositivo terminal (como un escáner OBD-II, una computadora o un teléfono inteligente) y la ECU del automóvil. Permiten al dispositivo terminal enviar solicitudes y recibir respuestas específicas relacionadas con el diagnóstico y el monitoreo del vehículo. El estándar OBD-II define una serie de códigos y protocolos que posibilitan que al dispositivo terminal acceder a la información de diagnóstico almacenada en la ECU del automóvil. Los comandos AT son la interfaz que permite a este dispositivo enviar peticiones para recuperar datos sobre el estado del motor, emisiones, sensores y otros sistemas del vehículo.

En la figura 3, se muestra un ejemplo de la configuración serial de la aplicación del software Putty (cualquier otro programa de consola terminal, por ejemplo, el HyperTerminal, se configura de la misma manera) para establecer comunicación con el ELM327.

Figura 3
Configuración serial de interfaz terminal



En la tabla 5 se muestran algunos comandos AT usados para acceder a cierta información del vehículo o, en su defecto, para configuración de parámetros.

Tabla 5
Comandos AT para lectura o configuración de parámetros

Comando AT	Comentario
ELM327 v2.1	Respuesta del dispositivo al establecer comunicación.
AT Z	Reset al circuito integrado.
AT RV	Lectura de voltaje de la batería.
AT CV	Calibración de voltaje leído respecto al voltaje medido por otro instrumento. Ejem: AT CV 1247 1247=12.47v
AT SP0	Selección automática del protocolo de comunicación.

Para solicitar información directamente a la unidad de control electrónica del vehículo, se debe escribir los códigos en formato hexadecimal, siguiendo la regla que a continuación se enuncia:

Se debe tener en cuenta que en la comunicación intervienen dos bytes importantes a diferenciar:

Byte 1: Modo

Describe el tipo de dato requerido

Byte 2: PID

Parámetro de Identificación

En adelante, se usarán los colores azul, rojo y verde para hacer referencia y distinguir al byte 1 (modo de operación) del byte 2 (parámetro deseado) y del dato requerido (valor deseado del parámetro), respectivamente. Los modos de operación asociados al byte 1, se muestran en la tabla 6.

Tabla 6

Modos de operación del ELM327

Modo (HEX)	Descripción	Código respuesta
01	Muestra el dato actual	41
02	Muestra el <i>data frame</i> -Congelado	42
03	Muestra los códigos de falla (DTC)	43
04	Borra los códigos de falla (DTC)	44
05	Resultados de prueba del sensor de O ₂	45
06	Resultados de la prueba. Modo no continuo	46
07	Muestra los códigos de falla pendientes	47
08	Modos de control especial	48
09	Solicita información del vehículo	49
0A	Solicita códigos de falla (DTC) permanentes	4A

En la tabla 7, se muestran los parámetros de identificación (PID´s) más representativos de las variables de desempeño mecánico de un motor de combustión interna, que posee sistemas de inyección electrónica y admite protocolos de comunicación OBD-II; allí se relacionan sus factores de escala y el *offset* asociado para fines de caracterización de las variables.

Tabla 7

PID's más representativos de un motor con sus respectivos offsets y factores de escalamiento

Nombre	PID	Factor	Offset	Unidades
Posición absoluta de la mariposa	11	0,3921568	0	%
Posición absoluta de la mariposa B	47	0,3921568	0	%
Posición absoluta de la mariposa C	48	0,3921568	0	%
Posición del pedal del acelerador D	49	0,3921568	0	%
Posición del pedal del acelerador E	4 ^a	0,3921568	0	%
Posición del pedal del acelerador F	4B	0,3921568	0	%
Flujo de aire del sensor de flujo másico	10	0,01	0	g/s
Temperatura del aire ambiente	46	1	-40	Deg C
Banco 1 - Sensor 1 Lambda	34	3,05E-05	0	
Presión barométrica	PID-33	1	0	kPa
Válvula EGR	PID-2C	0,3921568	0	%
Temperatura del refrigerante del motor	PID-05	1	-40	C
Flujo de combustible del motor	PID-5E	0,05	0	L/h
Temperatura del aceite del motor	PID-5C	1	-40	C
Velocidad del motor	PID-0C	0,25	0	RPM
Sistema de evaporación presión de vapor	PID-32	0,25	-8192	Pa
Tiempo de inyección de combustible	PID-5D	0,0078125	-210	Deg
Entrada del nivel de combustible	PID-2F	0,3921568	0	%
Presión del riel de combustible	PID-23	10	0	kPa
Temperatura del aire de admisión	PID-0F	1	-40	Deg C
Presión absoluta del múltiple de admisión	PID-0B	1	0	kPaA
Número de encendidos desde que los DTC fueron borrados	PID-30	1	0	Count
Posición relativa del pedal del acelerador	PID-5A	0,3921568	0	%
Posición relativa de la mariposa	PID-45	0,3921568	0	%
Voltaje sensor de O ₂ - Banco 1	PID-14	0,005	0	v
Sensor de velocidad del vehículo	PID-0D	1	0	km/h

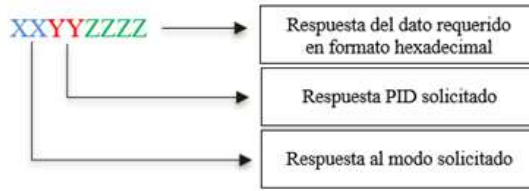
Nota: El PID 00 está reservado para mostrar cuáles PID son soportados en cada modo. El Modo 01 y PID 00 deben ser soportados por todos los vehículos.

La interpretación de la información recibida desde la ECU, a través de la interfaz ELM327, se basa en una decodificación en tres pasos:

- Paso 1: comprender la estructura de los comandos recibidos, que se presenta en la expresión de la figura 4.

Figura 4

Estructura de los comandos recibidos desde la ECU a través de la interfaz ELM327

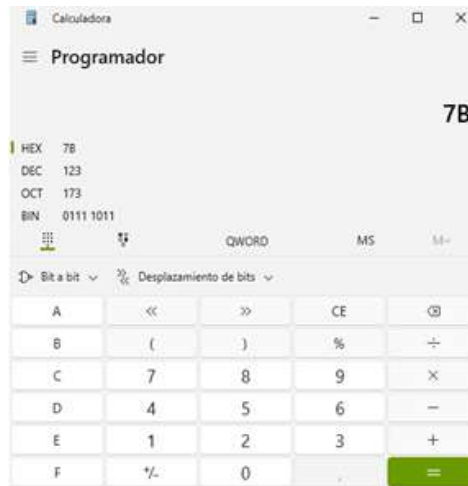


- Paso 2: convertir la respuesta del dato requerido en formato hexadecimal a decimal; para este fin, se muestra la conversión numérica para pasar de números en formato hexadecimal a números en formato decimal, usando la calculadora de programador disponible en el sistema operativo Windows® (figura 5).

Nótese que la conversión del número 7B a decimal, corresponde al 123.

Figura 5

Ejemplo de conversión numérica con la calculadora de programador del Sistema operativo Windows



- Paso 3: con la información de la tabla 7 (*offset*, *factor* y *unidades*) y el número en formato decimal, se aplica la Eq. [1].

$$\text{Dato requerido [Unidades]} = (\text{Respuesta decimal} + (\text{offset})) * \text{factor} \quad [1]$$

A modo de ejemplificar la comunicación de la unidad de control electrónico del motor (ECU), con la interfaz ELM327, a través de un monitor serial, se presentan, a continuación, varios casos en los que se adquiere información de algunas de las variables del motor (tabla 8 a tabla 14).

Solicitud de dato actual de la temperatura del motor (ECT-[°C]). El identificador numérico en formato hexadecimal de este parámetro corresponde al número 0x05.

Tabla 8

Respuesta al modo 01 al requerir el PID 05

Comando enviado	0105	Comentario
Respuesta recibida	41057B	41: respuesta al modo 01 05: se repite el PID solicitado
Dato requerido (hex) ¹	7B	0x7B= 123d, para obtener el dato real se debe restar 40 (ver tabla 7 en la columna del offset).
Dato requerido (dec) ²	83 °C	La temperatura es: 123-40 = 83°C

1 numeración en formato hexadecimal.

2 numeración en formato decimal.

Solicitud de dato actual de la velocidad del motor [rpm]. El identificador numérico en formato hexadecimal de este parámetro corresponde al número 0x0C.

Tabla 9

Respuesta al modo 01 al requerir el PID 0C

Comando enviado	010C	Comentario
Respuesta recibida	410C1AF8	41: respuesta al modo 01 0C: se repite el PID solicitado
Dato requerido (hex) ¹	1AF8	0x1AF8= 6904d, para obtener el dato real se debe dividir entre 4 (ver tabla 7 en la columna del factor de escala).
Dato requerido (dec) ²	1726 rpm	La velocidad del motor es: 6904/4 = 1726 rpm

1 numeración en formato hexadecimal.

2 numeración en formato decimal

Solicitud de dato actual del consumo másico de aire del motor (MAF-[g/s]). El identificador numérico en formato hexadecimal de este parámetro corresponde al número 0x10.

Tabla 10

Respuesta al modo 01 al requerir el PID 10

Comando enviado	0110	Comentario
Respuesta recibida	41101A99	41: respuesta al modo 01 10: se repite el PID solicitado
Dato requerido (hex)¹	1A99	0x1A99= 6809d, para obtener el dato real se debe dividir entre 100 (ver tabla 7 en la columna del factor de escala).
Dato requerido (dec)²	68.09 g/s	El consumo de aire es: 6809/100 = 68.09 g/s

1 numeración en formato hexadecimal.

2 numeración en formato decimal

Solicitud de dato actual de la apertura de la válvula de mariposa (TPS-[%]). El identificador numérico en formato hexadecimal de este parámetro corresponde al número 0x11.

Tabla 11

Respuesta al modo 01 al requerir el PID 11

Comando enviado	0111	Comentario
Respuesta recibida	411134	41: respuesta al modo 01 11: se repite el PID solicitado
Dato requerido (hex)¹	34	0x34= 52d, para obtener el dato real se debe dividir entre 2.5 (ver tabla 7 en la columna del factor de escala).
Dato requerido (dec)²	20.8 %	El porcentaje de apertura de la mariposa es: 52/2.5 = 20.8 %

1 numeración en formato hexadecimal.

2 numeración en formato decimal

Solicitud de dato actual de la temperatura del aire de admisión (IAT-[°C]). El identificador numérico en formato hexadecimal de este parámetro corresponde al número 0x0F.

Tabla 12

Respuesta al modo 01 al requerir el PID 0F

Comando enviado	010F	Comentario
Respuesta recibida	410F51	41: respuesta al modo 01 0F: se repite el PID solicitado
Dato requerido (hex)¹	51	0x51= 81d, para obtener el dato real se debe restar 40 (ver tabla 7 en la columna del offset).
Dato requerido (dec)²	41 °C	La temperatura es: 81-40 = 41°C

1 numeración en formato hexadecimal.

2 numeración en formato decimal

Solicitud de dato actual de la presión barométrica [kPa] del motor. El identificador numérico en formato hexadecimal de este parámetro corresponde al número 0x33.

Tabla 13

Respuesta al modo 01 al requerir el PID 33

Comando enviado	0133	Comentario
Respuesta recibida	413355	41: respuesta al modo 01 33: se repite el PID solicitado
Dato requerido (hex)¹	55	0x55= 85d, para obtener el dato real se debe dividir entre 1 (ver tabla 7 en la columna del factor de escala).
Dato requerido (dec)²	85 kPa	La presión es: 85/1 = 85 kPa

1 numeración en formato hexadecimal

2 numeración en formato decimal

Solicitud de dato actual del consumo de combustible del motor [l/h]. El identificador numérico en formato hexadecimal de este parámetro corresponde al número 0x5E.

Tabla 14

Respuesta al modo 01 al requerir el PID 5E

Comando enviado	015E	Comentario
Respuesta recibida	415E0040	41: respuesta al modo 01 5E: se repite el PID solicitado
Dato requerido (hex)¹	0040	0x0040= 64d, para obtener el dato real se debe dividir entre 50 (ver tabla 7 en la columna del factor de escala).
Dato requerido (dec)²	1.28 l/h	El flujo de combustible es: 64/50 = 1.28 l/h

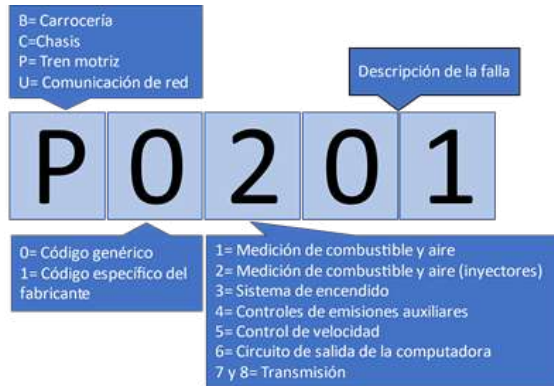
1 numeración en formato hexadecimal

2 numeración en formato decimal

Ahora bien, en la tabla 15 se relaciona un ejemplo de solicitud de información relacionada con los códigos de fallas presentes en el vehículo; nótese que, en este caso, el modo de operación es el 03. Para entender la decodificación de los códigos de falla (DTC, por sus siglas en inglés), se debe tener presente su estructura, la cual se relaciona en la figura 6.

Figura 6

Estructura de los códigos de falla del protocolo OBD-II



Solicitud de códigos de falla presentes en el vehículo.

Tabla 15

Respuesta al modo 03 (códigos de falla-DTC)

Comando enviado	03	Comentario
Respuesta recibida	43013300000000	43: respuesta al modo 03
Dato requerido	0133 0000 0000	Los códigos de falla se deben interpretar por parejas de bytes. 0133= P0133 0000= no representa fallas
Dato requerido	P0133	Circuito sensor de O ₂ con baja respuesta)

Siguiendo con el ejemplo anterior, para determinar si una falla está asociada a la carrocería (B), el chasis (C), el tren motriz (P) o a un problema de comunicación (U), se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Identificar el primer carácter del código **0133**, para este caso el “0”.
- Si el primer carácter es el “0”, entonces la falla estará asociada a un problema genérico del tren motriz (P0).
- Si el primer carácter es el “1”, “2” o “3”, entonces la falla estará asociada a un problema específico del fabricante del tren motriz P1, P2 o P3, respectivamente.
- Si el primer carácter es el “4”, entonces la falla estará asociada a un problema genérico del chasis (C0).

- Si el primer caracter es el “5”, “6” o “7”, entonces la falla estará asociada a un problema específico del fabricante del chasis C1, C2 o C3, respectivamente.
- Si el primer caracter es el “8”, entonces la falla estará asociada a un problema genérico de la carrocería (B0).
- Si el primer caracter es el “9”, “A” o “B”, entonces la falla estará asociada a un problema específico del fabricante de la carrocería B1, B2 o B3, respectivamente.
- Si el primer caracter es el “C”, entonces la falla estará asociada a un problema genérico de comunicación (U0).
- Si el primer caracter es el “D”, entonces la falla estará asociada a un problema específico del fabricante de comunicación (U1).
- Finalmente, una vez identificado el sistema donde se encuentra localizado el tipo de falla, los tres (3) caracteres siguientes (en nuestro ejemplo, 133) hacen referencia al subsistema del vehículo y a la descripción de la falla en particular.

Comunicación GPS

En el ámbito internacional, existen normativas para el trabajo y la interpretación del GPS, una de ellas es la cadena GPRMC; esta es la mínima recomendada. La mayoría de los dispositivos GPS transmiten una cadena que contiene latitud, longitud, velocidad, rumbo, tiempo procedente de los satélites y variación magnética.

A continuación, se muestra un ejemplo de la cadena GPRMC; sus datos se encuentran separados por coma. Se resalta en negrita cada parámetro de interés:

- **\$GPRMC**,195726.000,A,0616.5251,N,07535.2198,W,1.08,183.58,150723,,*0E

El primer valor es la palabra del comando que indica que la frase debe interpretarse como el mensaje del mínimo recomendado.

- **\$GPRMC**,**195726.000**,A, 0616.5251,N,07535.2198,W,1.08,183.58,150723,,*0E

Este valor representa la hora del dispositivo GPS, el tiempo en UTC, con formato “HHMMSS.mmm”,

- \$GPRMC,195726.000,A, 0616.5251,N,07535.2198,W,1.08,183.58,150723,,*0E

El tercer valor representa la intensidad de la señal que viene de los satélites. Cuando se envía un caracter “A”, indica estado Activo, sino, se envía el caracter “V”, el cual indica que no se puede calcular la posición actual.

- \$GPRMC,195726.000,A, **0616.5251**,N,07535.2198,W,1.08,183.58,150723,,*0E

La Latitud es el cuarto valor y representa la distancia actual al norte o al sur del Ecuador. Esta cadena es enviada en el formato “HHM-M.M”, donde HH representa grados decimales y MM.M representa minutos. Separado por una coma, se envía “S” o “N”. Esta sentencia dice que la latitud actual es: “61° 65.251’,N”.

- \$GPRMC,195726.000,A, 0616.5251,N,**07535.2198**,W,1.08,183.58,150723,,*0E

El sexto valor representa la Longitud o la distancia actual al Este o al Oeste del Meridiano de Greenwich. Esta cadena está en formato “HHHMM.M”, donde HHH representa grados decimales y MM.M representa minutos. Separado por una coma, es enviado el séptimo caracter, el cual contiene hacia qué lado del meridiano de Greenwich se midió esa distancia, siendo “E” el este y “W” el oeste. La sentencia mostrada en la línea GPRMC representa que la longitud actual es “75° 35.2198’, W”.

- \$GPRMC,195726.000,A,0616.5251,N,07535.2198,W,**1.08**,183.58,150723,,*0E

Esta cadena de caracteres indica la velocidad actual a la que se está moviendo el dispositivo en tierra, valor que viene dado en *nudos*.

- \$GPRMC,195726.000,A, 0616.5251,N,07535.2198,W,1.08,**183.58**,150723,,*0E

El noveno valor indica la dirección actual en la que se mueve el dispositivo, medido como un “azimut”. Un azimut es un ángulo medido en grados entre 0 y 360, donde 0 representa la dirección Norte, 90 representa Este, 180 hace referencia al Sur y 270 al Oeste.

- \$GPRMC,195726.000,A,0616.5251,N,07535.2198,W,1.08,183.58,150723,,*0E

Esta información referida a la fecha UTC es entregada en formato “DDMMAA”, donde DD representa el día, MM hace referencia al mes y AA se refiere al año.

- \$GPRMC,195726.000,A,0616.5251,N,07535.2198,W,1.08,183.58,150723,,*0E

La suma de control se utiliza para identificar los errores en los datos que se hayan producido durante la transmisión.

A partir de estos datos se encontrará la fecha real, la ubicación espacial y la hora del lugar en donde se encuentre el dispositivo. Para calcular las coordenadas, en busca de la posición del dispositivo en GOOGLE MAPS (ver EQ. [2] y EQ. [3]), lo primero que se debe hacer es convertir estas coordenadas, que se encuentran en formato de grados y minutos, al formato de grados decimales, por cuanto es el formato que recibe GOOGLE MAPS; para tal fin, se divide por 60 los minutos y se le suma este resultado a los grados.

$$\text{Latitud} = 06 + \frac{16.52514}{60} = 6.275419 N \quad [2]$$

$$\text{Longitud} = 075 + \frac{35.21988}{60} = 75.586998 W \quad [3]$$

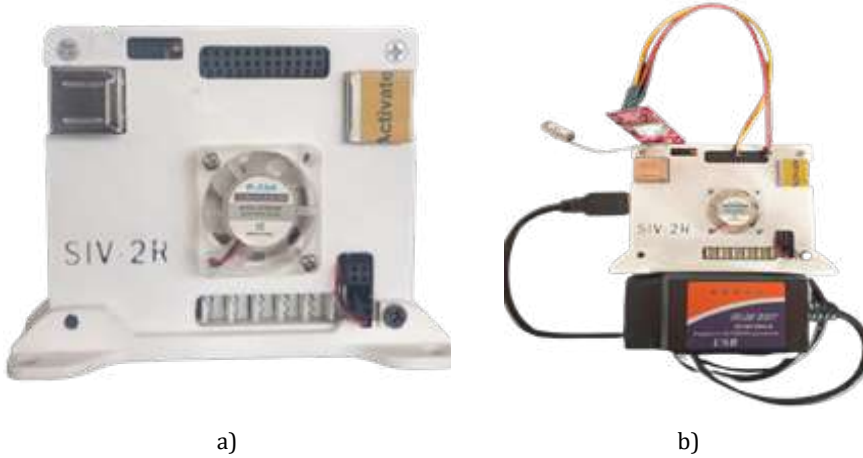
4. Resultados experimentales del desarrollo del equipo de medición de actividad vehicular para automotores equipados con protocolo OBD-II

Los resultados alcanzados en esta investigación, se describen a continuación. En ellos, se evidencia el desarrollo de un equipo electrónico de medición de actividad vehicular para automotores equipados con sistemas de diagnóstico a bordo OBD-II. En la figura 7b, se muestra la disposición final del equipo EMVA, donde se integraron cada uno de los componentes descritos en la sección metodológica (dispositivo GPS e interfaz ELM327). Una caja plástica y fabricada en PL con una impresora 3D se desarrolló con el fin de empaquetar la tarjeta electrónica del microcomputador LattePanda.

Figura 7

a) Sistema LattePanda empacado en la caja plástica impresa en 3D

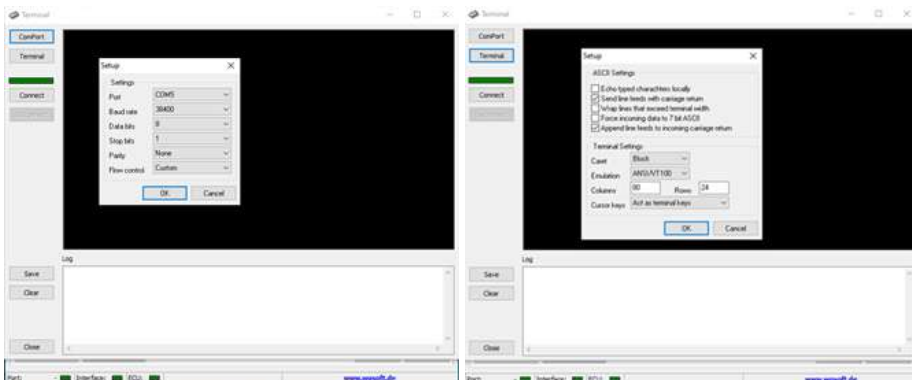
b) Equipo de medición de actividad vehicular



A continuación, se presentan algunas imágenes obtenidas en el proceso de comunicación entre la ECU y la interfaz ELM327 en diferentes módulos didácticos de enseñanza-aprendizaje en Mecánica Automotriz, usando la terminal serial del *software* ScanMaster® para Windows. En la figura 8 se muestra el proceso de configuración de los parámetros seriales para establecer la comunicación entre los dispositivos.

Figura 8

Configuración de la terminal serial para establecer comunicación con el ELM327



En la figura 9, se muestran los módulos didácticos donde se realizaron las mediciones experimentales.

Figura 9

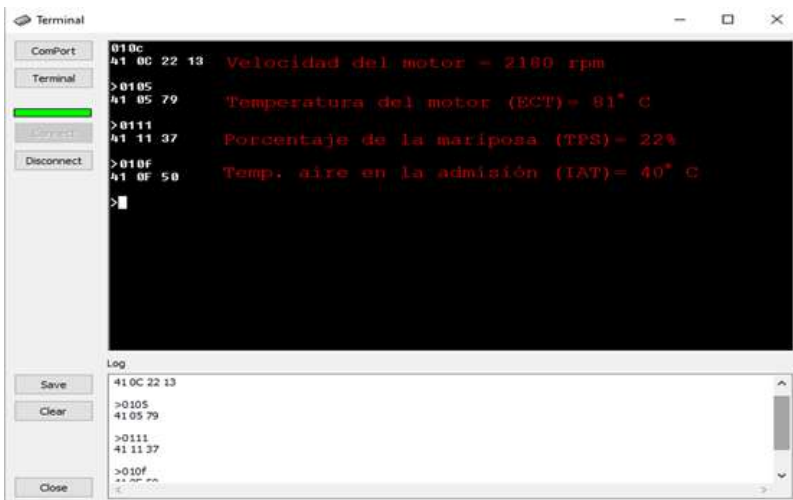
Módulos didácticos con motores en banco de ensayos



En la figura 10 se muestra los resultados de la comunicación establecida entre la interfaz serial y la computadora del vehículo KIA RIO.

Figura 10

Mediciones realizadas sobre motor KIA RIO



En la tabla 16 se ilustran algunos ejemplos más de la comunicación entre la interfaz serial y el motor del módulo didáctico Renault CAPTUR.

Tabla 16

Ejemplos de mediciones experimentales realizadas en el motor del módulo didáctico Renault Captur

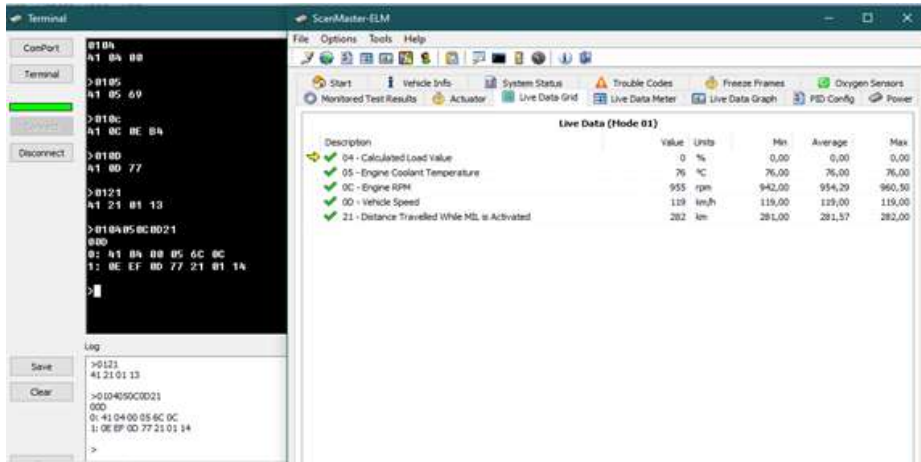
Códigos enviados/ recibidos	Análisis de la respuesta recibida
<pre>010C 41 0C 0D 6D ></pre>	<p>Comando enviado 010C: se pregunta por la RPM Respuesta: 410C0D6D Valor Hexadecimal: 0x0D6D Valor Decimal: 3.437 Valor RPM: $3.437/4=859$ rpm</p>
<pre>0105 41 05 7C ></pre>	<p>Comando enviado 0105: se pregunta por la Temperatura del motor Respuesta: 41057C Valor Hexadecimal: 0x7C Valor Decimal: 124 Valor Temperatura: $124-40=84$ °C</p>
<pre>010D 41 0D 77 ></pre>	<p>Comando enviado 010D: se pregunta por la Velocidad del vehículo [km/h] Respuesta: 410D77 Valor Hexadecimal: 0x77 Valor Decimal: 119 Valor de velocidad: $119/1=119$ km/h Nota: el motor no tenía conectado el sensor de velocidad</p>
<pre>01050C10110F0D 008 0: 41 05 7C 0C 0D 96 1: 0D 77 00 00 00 00 00</pre>	<p>Requerimiento simultáneo de varios PID's (hasta 6 variables soportadas) Comando enviado 01050C10110F0D: se pregunta en su orden respectivo por:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Temperatura del motor (05) • RPM (0C) • MAF (10) • Posición del Acelerador (11) • IAT (0F) • Velocidad vehículo (0D) <p>Respuesta: 008 (Número de bytes disponibles) Respuesta: 0:41057C0C0D96 renglón 0 Respuesta: 1:0D77 renglón 1 Este motor no tenía disponibles los PID's MAF, Acelerador, IAT; por lo tanto, en la trama de datos no envía esa información y sólo responde con las variables disponibles.</p>

En la figura 11 se muestra la respuesta del módulo didáctico KIA RIO, ante los comandos enviados, usando un programa Terminal de comunicación serial, el *software* ScanMaster, y la interfaz ELM327. Al lado

derecho de la figura, se observan los PIDS del motor (04, 05, 0C, 0D, 21) y, al lado izquierdo (pantalla negra), la respuesta del motor ante el envío de comandos individuales y simultáneos.

Figura 11

Respuesta del motor ante requerimientos de información de PID's individuales y simultáneos



5. Desarrollo de software para lectura de variables del motor con ELM327

A menudo, suelen usarse plataformas de programación gráfica orientadas al monitoreo y control de sistemas, para el caso de los procesos de automoción, la adquisición de las variables del desempeño mecánico del motor resulta ser una tarea importante a la hora de realizar un buen diagnóstico automotriz. A continuación, se presenta un algoritmo gráfico para desarrollar software de adquisición de datos con la plataforma LabView®, integrando comunicación serial con un dispositivo ELM327, con el objetivo de monitorear las variables de un motor de combustión interna que incorpora protocolos de comunicación OBD-II. En la figura 12 se muestra la conexión entre la Interfaz ELM327 (USB) y el módulo didáctico de diagnóstico automotriz equipado con el motor de un vehículo KIA RIO.

Figura 12

Conexión de la Interfaz ELM327 con módulo didáctico KIA RIO



En la figura 13 se muestra una sección de código para un ejemplo del establecimiento de la comunicación serial entre el *software LabView* y la computadora del motor (ECU) a través de la interfaz ELM327. En esta figura se enumeran los diferentes procesos para su identificación así:

- Configuración del puerto serial (*visa configure serial port*): 38400 baudios.
- Envío de parámetros de identificación (PID's): se envían ocho solicitudes de información individuales, todas ellas agrupadas en una sola estructura tipo clúster (color rosado). Nótese que cada solicitud viene precedida del modo **01**(muestra el dato actual); seguidamente, el número del PID respectivo.
- El clúster se convierte a un arreglo (*array*), el cual será indexado por la posición del contador (**i**). Este contador define cuál PID es el que se envía por el puerto serial de escritura (*visa write*).
- El PID se concatena (une) con un *enter*.
- Se escriben datos en el puerto serial de escritura (*visa write*).
- Se temporiza un tiempo de retardo en el *buffer* serial para realizar la lectura (*visa read*) del dato requerido (respuesta de la ECU hacia la interfaz).
- Se cierra la comunicación serial (*visa close*).

En la figura 14 se ilustra el diagrama de flujo del algoritmo planteado en la figura 13.

La secuencia de pasos anterior (desde el paso 2 hasta el paso 6) se repite infinitamente, gracias a la implementación de la estructura cíclica While loop. Cada repetición se ejecuta ocho veces (número de PID's requeridos) a través de la estructura *for*.

Figura 13

Diagrama de bloques para el envío de solicitudes de PID's individuales a través del puerto serial usando la plataforma LabView

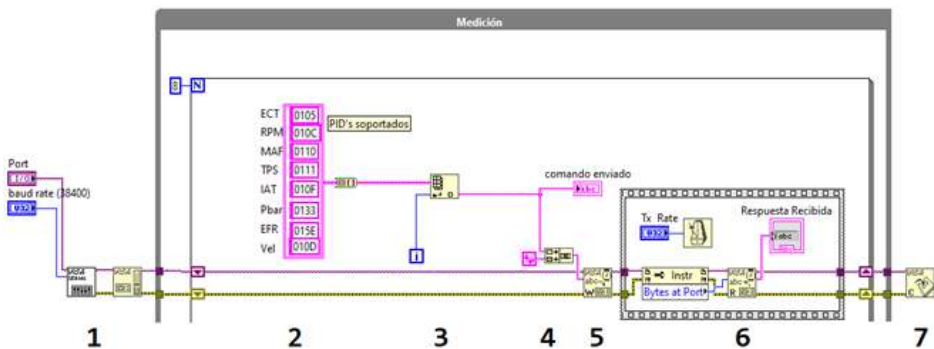
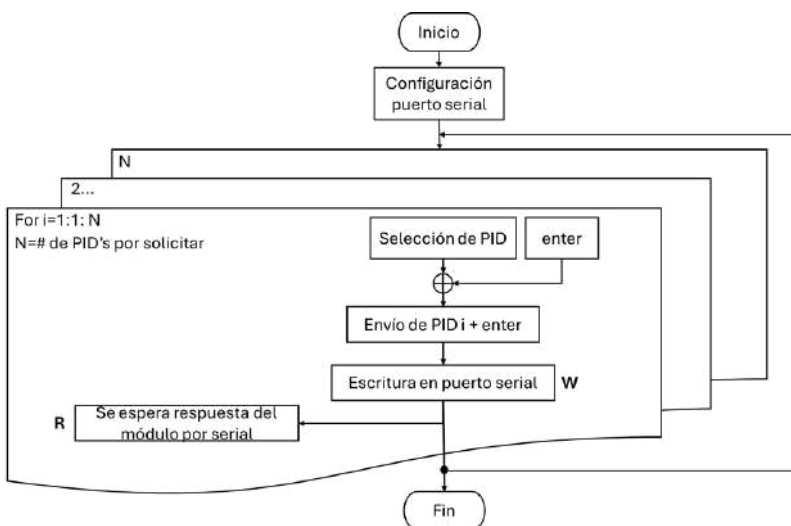


Figura 14

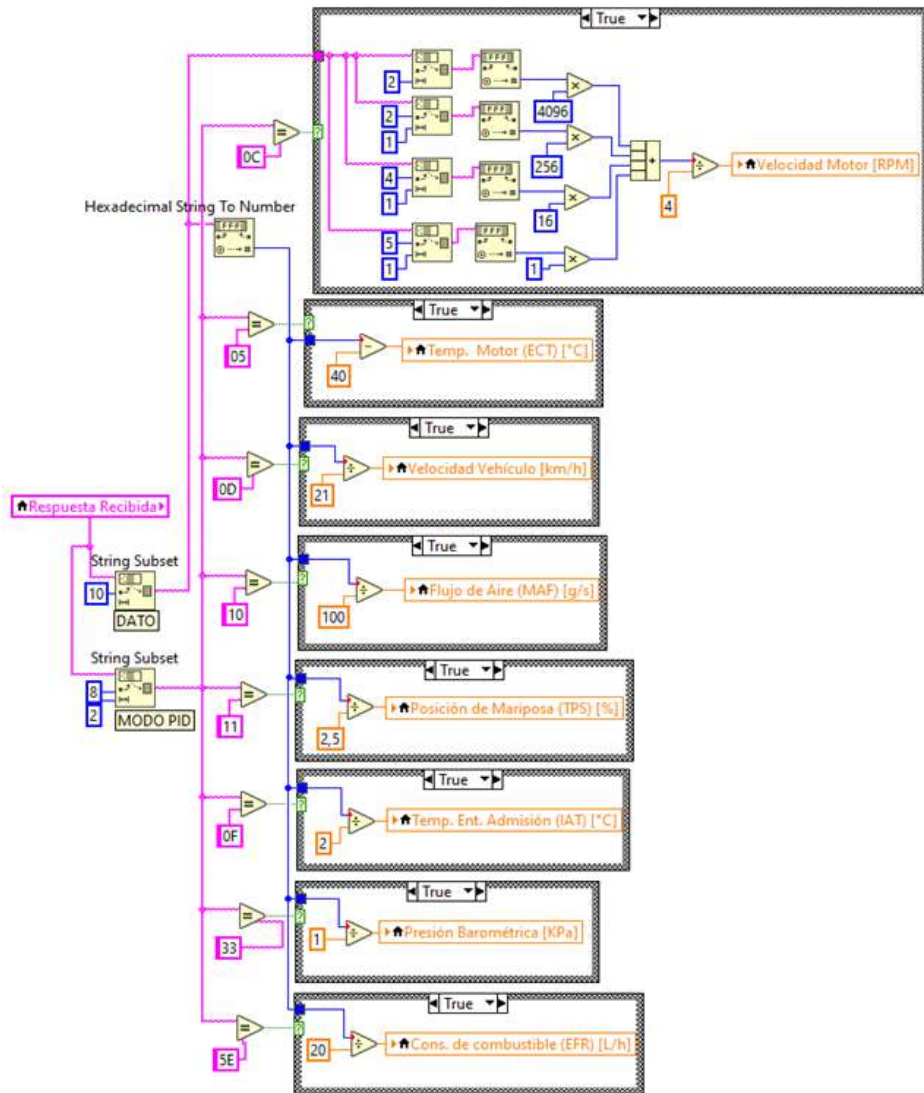
Diagrama de flujo del algoritmo descrito en la Figura 13



En la figura 15, se muestra la forma de decodificar la respuesta enviada por la ECU y, además, presentar las diferentes variables del motor/vehículo en la interfaz de usuario desarrollada en LabView. Nótese como se le aplica el *offset* o el factor de escala (ver tabla 16) a cada variable, dependiendo de la detección del respectivo código del PID.

Figura 15

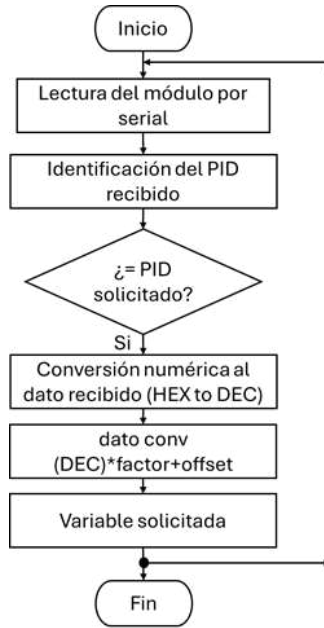
Diagrama de bloques para la lectura e interpretación de los PID's recibidos a través del puerto serial usando la plataforma LabView



En la figura 16 se ilustra el diagrama de flujo del algoritmo planteado en la figura 15.

Figura 16

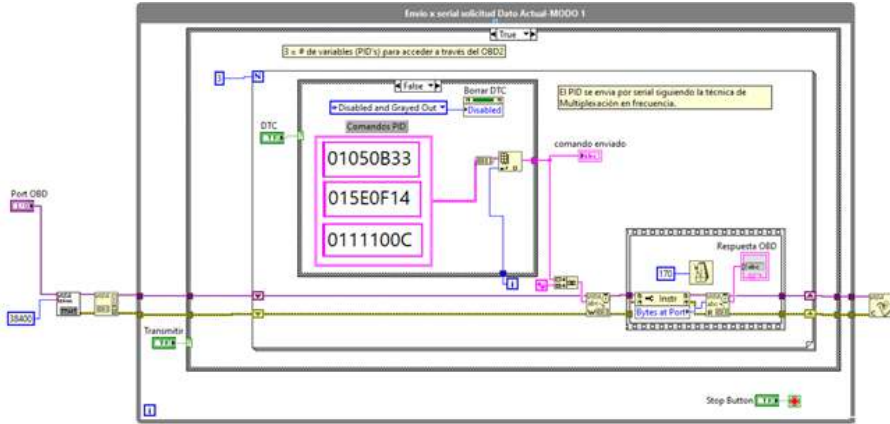
Diagrama de flujo del algoritmo descrito en la Figura 15



La figura 17 muestra un código similar al mostrado en la figura 15, pero en este ejemplo se envían solicitudes de información simultáneas en pequeños paquetes de 3 PID's, para un total de 9 variables adquiridas. Recordar que el ELM327 admite hasta 6 solicitudes de variables de forma simultánea. El primer paquete de datos lo componen los parámetros 0x05 (temperatura del refrigerante del motor), 0x0B (presión absoluta del múltiple de admisión) y 0x33 (presión barométrica). El segundo paquete lo componen los parámetros 0x5E (consumo de combustible), 0x0F (temperatura del aire de admisión), 0x14 (voltaje sensor de O₂). Finalmente, la última solicitud de información la componen los PID's 0x11 (posición absoluta de la mariposa), 0x10 (flujo másico de aire) y 0x0C (revoluciones del motor).

Figura 17

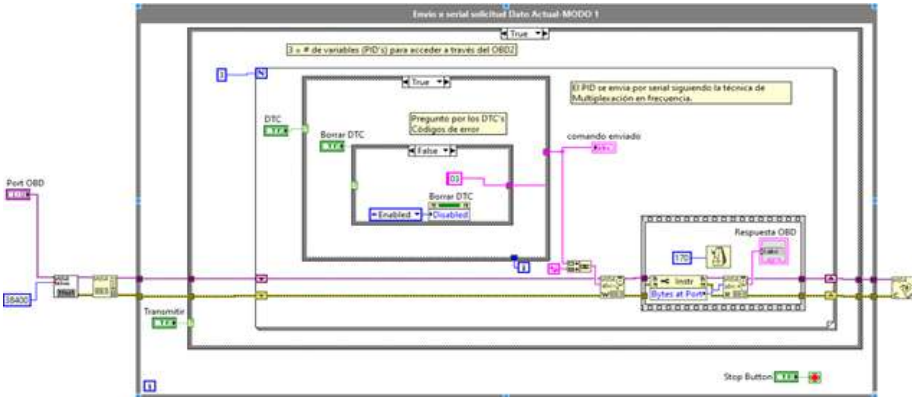
Diagrama de bloques para el envío de solicitudes de PID's simultáneas a través del puerto serial usando la plataforma LabView



En la figura 18, se muestra la forma de preguntar por las fallas actuales del vehículo. Nótese que el modo enviado al puerto serial es el 03 (muestra los códigos de falla DTC).

Figura 18

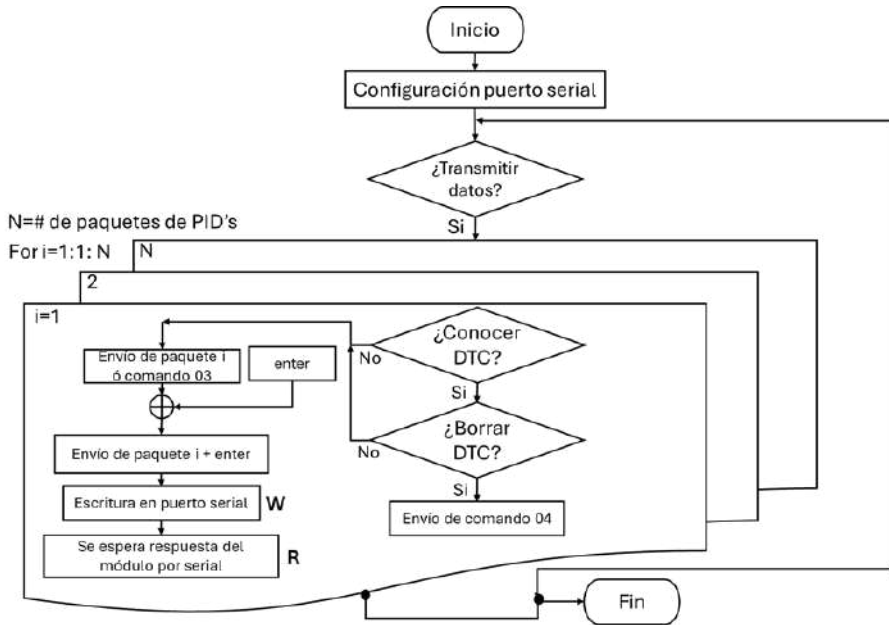
Diagrama de bloques para preguntar por los DTC



En la figura 19, se ilustra el diagrama de flujo del algoritmo planteado para las figuras 17 y 18.

Figura 19

Diagrama de flujo del algoritmo descrito en las Figuras 17 y 18



El *software* de adquisición de datos desarrollado en la plataforma *LabVIEW*, que integra los protocolos de comunicación seriales para interpretar los comandos OBD-II, se muestra en la figura 20. En la interfaz de usuario se pueden observar los valores instantáneos (en formato digital) de variables como la temperatura de entrada en la admisión del motor (IAT) [°C], la temperatura del líquido refrigerante del motor (ECT)[°C], la presión en la admisión [kPa], el valor de voltaje del sensor de oxígeno o sonda Lambda [v], la posición de la válvula de mariposa (TPS)[%], la velocidad del vehículo [km/h] y del motor (RPM), el flujo másico de aire (MAF) [g/s] y el consumo de combustible [l/h]. Entre los datos de posicionamiento global, se cuenta con la latitud, longitud, altura sobre el nivel del mar, fecha y hora. El *software* permite almacenar y exportar los datos medidos a un archivo de texto plano o de Excel®. La aplicación también incorpora la posibilidad de visualizar, respecto al tiempo, las variables antes descritas, permitiendo, de este modo, observar su comportamiento en algún momento determinado de la prueba, a la par que potenciar el diagnóstico de alguna falla presente en el vehículo.

Figura 20

Interfaz de usuario del software de adquisición de datos desarrollado para pruebas de medición de actividad vehicular



En las figuras 21 a 23 se presentan los resultados de la adquisición de datos utilizando el EMAV (OBD-II & GPS LOGGER), en un automóvil Peugeot 206, modelo 2016, equipado con sistema OBD-II, motor diésel con inyección electrónica y con sistema Start & Stop (S&S). En conducción libre se realizaron tres tomas de datos, entre estas, de las variables de velocidad del vehículo (PID 0D), temperatura del refrigerante (PID 05), y revoluciones del motor (PID 0C). Toma de datos 1 (en verde) representa el ciclo más corto con una duración de 210 segundos y una velocidad baja 17 km/h. La toma de datos 2 (en rojo), representa el ciclo medio con una duración de 929 segundos y una velocidad baja 19 km/h. La toma de datos 3 (en negro), representa el ciclo largo con una duración de 1215 segundos y una velocidad alta de 74 km/h. Las tomas de datos 1 y 2 se realizaron con el motor caliente y por la temperatura tiende a ser constante con un máximo de 83 °C, mientras que en la toma de datos 3 se registra todo el proceso de calentamiento del refrigerante hasta alcanzar 83 °C. Respecto a las revoluciones, se puede apreciar la entrada en operación del sistema S&S que apaga el motor cuando la velocidad del vehículo es cero.

Figura 21

Datos de velocidad OBD adquiridos con el PID 010D

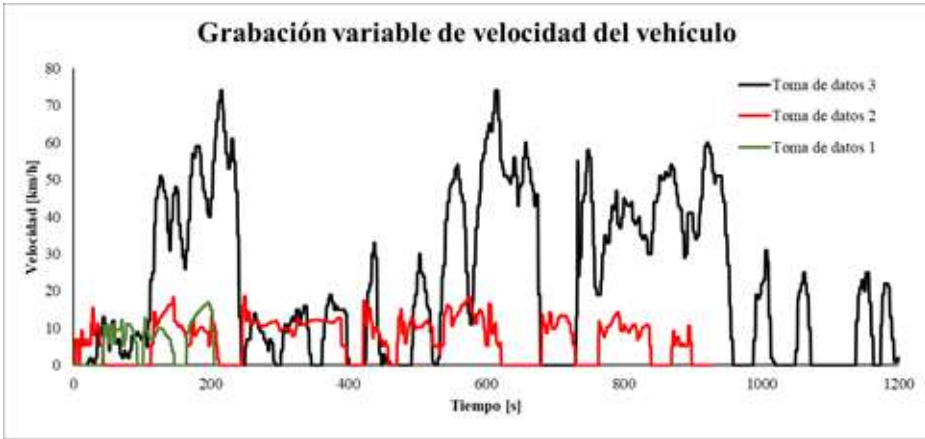


Figura 22

Datos de temperatura de refrigerante del motor OBD adquiridos con el PID 0105

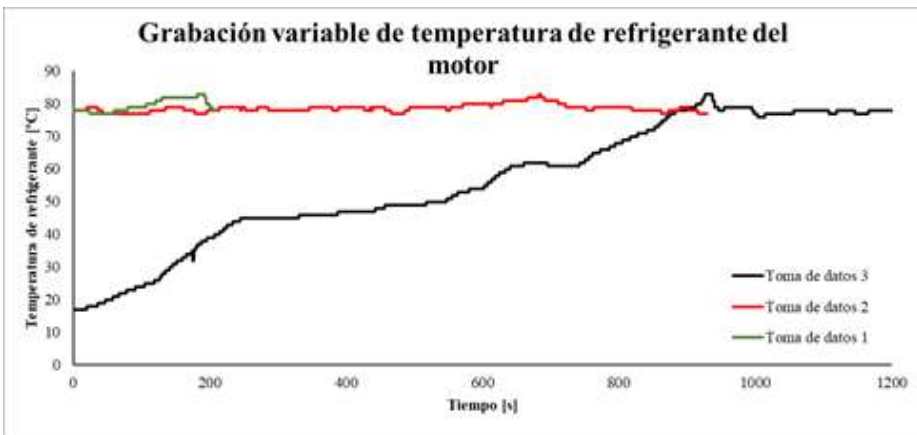
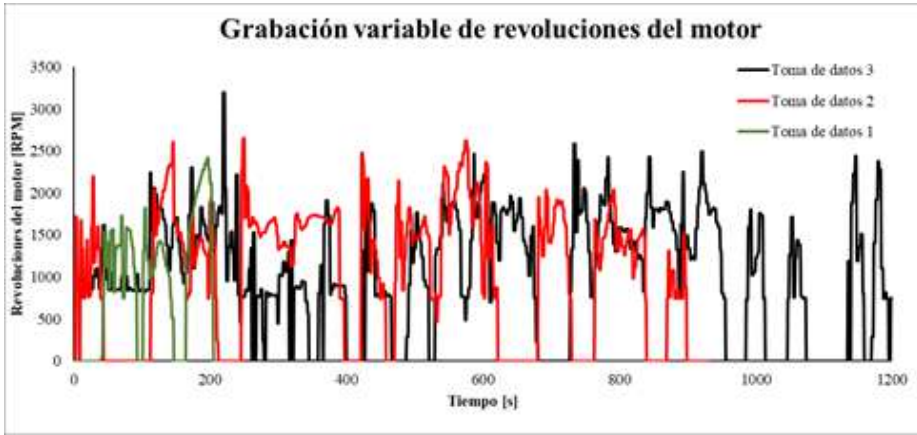


Figura 23

Datos de revoluciones del motor OBD adquiridos con el PID 010C



6. Hallazgos y reflexiones: integración de señales OBD-II y GPS en el diagnóstico automotriz

En esta investigación se mostró la relevancia y eficacia de la adquisición de señales de vehículos de inyección electrónica de combustible, a través del protocolo OBD-II, combinado con los datos de la actividad vehicular obtenidos mediante dispositivos GPS, como herramientas fundamentales para el diagnóstico automotriz y la supervisión temprana, y en tiempo real de desempeño de los motores.

La metodología empleada, basada en el desarrollo de un sistema electrónico de diagnóstico automotriz a partir de la interfaz ELM327 y el uso de y la información un dispositivo GPS, ha posibilitado integrar, de manera efectiva, las señales de los motores de conducción en un *software* diseñado en LabVIEW. Esto ha favorecido la evaluación precisa de parámetros críticos para el rendimiento y eficiencia de los vehículos, ofreciendo realizar un diagnóstico detallado de posibles fallos y problemas mecánicos.

Los resultados obtenidos proporcionan una herramienta informática y de *software* que potencia la supervisión de estos sistemas y posibilita la mejora en la eficiencia energética de los motores, con el objeto de reducir las emisiones contaminantes, contribuyendo así a la transición energética y a una movilidad más sostenible. El uso de este tipo de equipos de medición,

permite supervisar y analizar patrones de conducción regionales, insumos fundamentales para el diseño de políticas públicas de movilidad más eficientes y establecimiento de factores de emisión más precisos.

La implementación exitosa de un dispositivo electrónico para la adquisición y procesamiento de señales vehiculares ha demostrado su utilidad en la recopilación de datos esenciales para el diagnóstico automotriz. Asimismo, se ha mostrado que la interfaz ELM327 y el *software* desarrollado en LabVIEW son herramientas efectivas para integrar y analizar la información obtenida, facilitando una toma de decisiones más informada en el mantenimiento y mejora de los vehículos. Este enfoque se posiciona como una herramienta valiosa para la industria automotriz y para la promoción de un futuro de transporte más eficiente y respetuoso con el medio ambiente.

7. Agradecimientos

Agradecimientos a la Institución Universitaria Pascual Bravo por facilitar los equipos de medición y los vehículos para realizar este proyecto, basado en el trabajo de grado *Desarrollo de un sistema portátil de adquisición de señales y actividad vehicular para motocicletas*, dentro del proyecto titulado «Evaluación experimental del efecto del uso de mezclas gas natural e hidrógeno sobre el desempeño de un MEC en modo dual», identificado con código IN202101.

8. Referencias

- [1] “On-Board Diagnostic II (OBD II) Systems Fact Sheet” *California Air Resources Board*. Accessed: May 12, 2024. [Online]. Available: <https://ww2.arb.ca.gov/resources/fact-sheets/board-diagnostic-ii-obd-ii-systems-fact-sheet#:~:text=OBD%20II%20is%20an%20acronym,and%20medium%2Dduty%20California%20vehicles>
- [2] “What is GPS and how do global positioning systems work?,” GEOTAB. Accessed: May 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.geotab.com/blog/what-is-gps/#:~:text=GPS%2C%20or%20the%20Global%20Positioning,your%20smartphone%20and%20your%20watch>
- [3] AMVA, Factores de emisión de fuentes móviles en el Valle de Aburrá [In Spanish], Medellín, 2019. [Online]. Available: <https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Biblioteca-aire/Estudios-calidad-del-aire/Libro-Factores-de-Emision-AMVA.pdf>
- [4] Gimel and UPME, Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos (FE-COC+) Fase I: Determinación de los ciclos de conducción de fuentes móviles de carretera para Colombia, 2020. Accessed: May 12, 2024. [Online]. Available: https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/Informe_final_FECOC.pdf
- [5] K. Khorsravina, M. Hassan, R. Abdul, and S. Rahman, Integrated OBD-II and Mobile Application for Electric Vehicle (EV) Monitoring System, IEEE 2nd International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems, 2017. doi: 10.1109/I2CACIS.2017.8239058.
- [6] D. Rimpas, A. Papadakis, and M. Samarakou, “OBD-II sensor diagnostics for monitoring vehicle operation and consumption” in *Energy Reports*, vol. 6, pp. 55–63, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.egy.2019.10.018.
- [7] J. S. Jhou, S. H. Chen, W. Der Tsay, and M. C. Lai, “The implementation of OBD-II vehicle diagnosis system integrated with cloud computation technology” in *Proceedings - 2013 2nd International Conference on Robot, Vision and Signal Processing, RVSP 2013*, IEEE Computer Society, 2013, pp. 9–12. doi: 10.1109/RVSP.2013.55.
- [8] P. Yadav, M. Peeyush, and K. Pathak, “On Board Diagnostics (OBD): A Review On Monitoring Vehicle Operations” in *International Conference on Intelligent Technologies & Science (ICITS)*, International Journal of Research and Development in Applied Science and Engineering, 2021.
- [9] S. K. Singh, A. K. Singh, and A. Sharma, “OBD-II based Intelligent Vehicular Diagnostic System using IoT” *International Semantic Intelligence Conference (ISIC'21)*, 2021, pp. 511–515.
- [10] M. Malik and R. Nandal, “A framework on driving behavior and pattern using On-Board diagnostics (OBD-II) tool” *Mater Today Proc*, vol. 80, pp. 3762–3768, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2021.07.376.

- [11] A. E. Campos-Ferreira et al., “Vehicle and Driver Monitoring System Using On-Board and Remote Sensors” *Sensors*, vol. 23, no. 2, Jan. 2023, doi: 10.3390/s23020814.
- [12] M. Rykała, M. Grzelak, Ł. Rykała, D. Voicu, and R. M. Stoica, “Modeling Vehicle Fuel Consumption Using a Low-Cost OBD-II Interface,” *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 21, Nov. 2023, doi: 10.3390/en16217266.
- [13] Congreso de Colombia, Ley 1972 de 18 de julio del 2019. Por medio de la cual se establece la protección de los derechos a la salud y al medio ambiente sano estableciendo medidas tendientes a la reducción de emisiones contaminantes de fuentes móviles y se dictan otras disposiciones. Colombia, 2019, p. 5. Accessed: May 25, 2023. [Online]. Available: https://www.minsalud.gov.co/Normatividad_Nuevo/Ley%201972%20de%202019.pdf
- [14] Ministerio de Ambiente, Resolución 0762 Por la cual se reglamentan los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes que deberán cumplir las fuentes móviles terrestres. Colombia: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022. Accessed: May 25, 2023. [Online]. Available: <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/07/Resolucion-0762-de-2022.pdf>
- [15] Elmelectronics, “ELM327 OBD to RS232 Interpreter” 2005. Accessed: May 12, 2024. [Online]. Available: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/133169/ETC1/ELM327.html>
- [16] J. Londoño, A. Agudelo, and J. Agudelo, “Desarrollo de un equipo portátil de medición de emisiones de material particulado para motocicletas” in *X Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica, Mecatrónica y Automatización*, 2021, p. 34.
- [17] LattePanda, “LattePanda V1 - The Smallest x86 Windows Single Board Computer.” Accessed: May 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.lattepanda.com/LattePanda-v1>
- [18] U-Blox, “NEO-6 series - Versatile u-blox 6 GPS modules” Accessed: May 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.u-blox.com/en/product/neo-6-series>

Conversión de motos convencionales a eléctricas como estrategia para la transición energética. Caso de estudio: Medellín

Álvaro Delgado Mejía

Institución Universitaria Pascual Bravo,
Facultad de Ingeniería, Departamento de Mecánica,
alvaro.delgado@pascualbravo.edu.co,
ORCID: 0000-0003-0867-8249

Bayron Álvarez Arboleda

Institución Universitaria Pascual Bravo,
Facultad de Ingeniería, Departamento de Eléctrica,
balvarez@pascualbravo.edu.co,
ORCID: 0000-0002-6703-4753

Jhon F. Hincapié Montoya

Institución Universitaria Pascual Bravo,
Facultad de Ingeniería, Departamento de Mecánica,
jhon.hincapie@pascualbravo.edu.co,
ORCID: 0000-0002-0841-8941

1. Contexto de la movilidad eléctrica en Colombia

Aunque en la actualidad el ingreso de los vehículos eléctricos (en adelante, VE) en el parque automotor, tanto mundial como nacional, es muy baja, se espera que, para el 2040, de las ventas totales de vehículos, el 57% corresponda a eléctricos y se alcance una cuota de 30% de la flota mundial [1], para lo cual se requerirá de un compromiso serio por parte de las marcas automotrices tradicionales, así como del desarrollo en la tecnología de las baterías, entre otros asuntos, de manera que se reduzca su peso y su costo, y se aumente su autonomía.

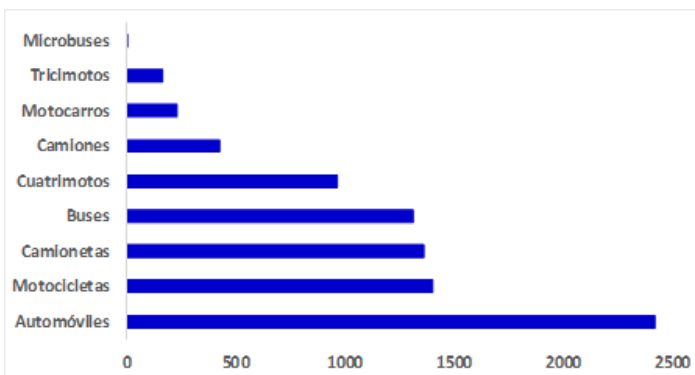
Desde agosto de 2018, el Gobierno nacional implementó las medidas pertinentes encaminadas a consolidar la movilidad eléctrica, particularmente enfocada a los sistemas de transporte público, para garantizar y fomentar la

transición energética y la descarbonización del sector transporte y, de esta manera, mejorar el problema de contaminación atmosférica en las grandes ciudades. Es así como en el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 [2] se fijó como meta, para el año 2022, tener 6600 vehículos eléctricos registrados en el RUNT (Registro Único Nacional de Tránsito), y promover las condiciones que permitan llegar a 600 000 vehículos eléctricos para el 2030. En este sentido, a noviembre 30 de 2021, ya se contaban 5284 vehículos registrados oficialmente en el país, sin enumerar otros 894 correspondientes a motocicletas, tricimotos y cuatrimotos, manejando, entre todos, tecnologías como PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle), BEV (Battery Electric Vehicle) y HEV (Hybrid Electric Vehicle) [3], lo que equivale al triple de lo registrado en 2018.

Para el cierre de 2022, según cifras del RUNT, se habían matriculado 8299 vehículos eléctricos, 1700 más que la meta propuesta, como se ilustra en la figura 1, y también se contaban más de 36 000 vehículos híbridos. Un aspecto importante es que gran parte de los vehículos eléctricos que han ingresado al país han sido destinados para servicio público, particularmente, en el caso de sistemas de transporte masivos, como ocurre en Bogotá, Medellín y Cali; aunque las ventas de automóviles y motocicletas eléctricas han venido aumentando progresivamente sus cifras y los pronósticos indican que esta tendencia se mantendrá. No obstante, para fortalecer esta tendencia de migrar a una movilidad eléctrica, aún deben superarse algunos retos de carácter político, regulatorio y técnico, como el ordenamiento territorial para el desarrollo e instalación de infraestructura de recarga de baterías y el establecimiento de modelos de negocio alrededor de la instalación y prestación de servicios en estaciones de carga [4].

Figura 1

Distribución del parque automotor eléctrico en Colombia para 2022.

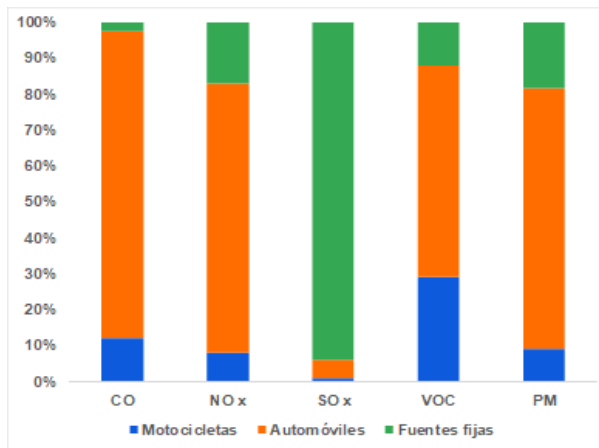


Fuente: Elaboración propia con datos de Registro Único Nacional de Tránsito [5]

Considerando que el sector transporte en Colombia consume el 36% de la energía, la cual proviene, en su mayoría, de combustibles fósiles como la gasolina, diésel y gas natural [1], se ha podido establecer que este sector es responsable de la emisión del 25% de gases de efecto invernadero, y más del 80% de las emisiones de material particulado. Sólo en Medellín y el Área Metropolitana, entre el sector transporte y el sector industrial, se tiene casi que el 100% de emisiones contaminantes, como se puede observar en la figura 2 [6], donde las motocicletas y automóviles son los mayores contribuyentes a este problema. Ante este panorama, y sin abordar la contaminación por la fabricación, uso y disposición final de los componentes eléctricos de estos sistemas automotrices, particularmente de las baterías eléctricas, el manejo de vehículos eléctricos se convierte en una oportunidad para mitigar dichos problemas.

Figura 2

Comparación de las emisiones por sector, en Medellín y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá



Fuente: Elaboración propia con datos de la referencia [6]

En el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 «Colombia Potencia de Vida», una de las metas que se tiene propuesta es la de tener un transporte que sea ambientalmente sostenible, de manera que se llegue a 2.14 millones de toneladas de bióxido de carbono (en adelante, CO₂), mitigadas por el sector transporte, es decir, un 100% más frente a 2021. Para cumplir esta meta,

se plantean estrategias como la promoción de la movilidad eléctrica, así como el uso de fuentes de energías alternativas y renovables. En este contexto, se impulsará el ascenso tecnológico del sector transporte, de manera progresiva, por medio de la movilidad de cero y bajas emisiones en todos los segmentos, medios y modos, la eficiencia energética y la descarbonización del sector transporte, en el marco de una transición energética justa, segura, confiable y eficiente. Para ello, se priorizará y desarrollarán, en la red de infraestructura nacional, proyectos férreos, acuáticos y aéreos que por sus características operativas reduzcan emisiones contaminantes y costos logísticos y de transporte [2].

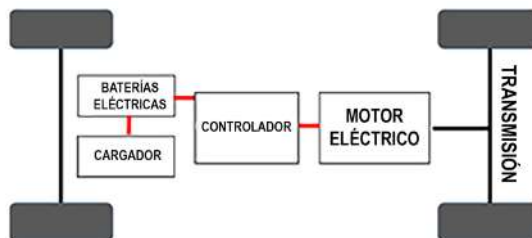
Consecuentes con lo anterior, de lograr dichas metas, se estaría apuntando al logro de algunos objetivos de desarrollo sostenible (ODS), particularmente, al ODS 7 que trata sobre energía asequible y no contaminante; al ODS 13 que trata sobre la acción por el clima y, el ODS 11, que trata sobre ciudades y comunidades sostenibles, aunque, comparativamente, el aporte de Colombia a las emisiones de gases de efecto invernadero es considerablemente menor que el de otros países más desarrollados.

2. Evolución tecnológica de la movilidad eléctrica

Con independencia de la tecnología utilizada, un vehículo eléctrico comparado con uno convencional con motor de combustión, se caracteriza porque todo el tren de potencia de combustión se reemplaza por un tren motriz eléctrico, compuesto por un motor eléctrico, un controlador, un paquete de baterías, un sistema de carga eléctrica y algunos accesorios eléctricos, lo que comúnmente se conoce como «paquete eléctrico», tal como se ilustra en la figura 3, donde dicho esquema es válido tanto para automóviles como para motocicletas.

Figura 3

Componentes de la planta motriz eléctrica en un vehículo



En lo que respecta al motor eléctrico, actualmente se cuenta con dos familias: los síncronos y los asíncronos; los primeros se caracterizan, porque la velocidad de rotación es directamente proporcional a la frecuencia de la red eléctrica que lo alimenta, lo cual significa que tanto el rotor como el campo magnético del estator gira a la misma velocidad, es decir, que están sincronizados, mientras que los motores asíncronos o de inducción están compuestos por un estator y un rotor que puede ser de jaula de ardilla o bobinado trifásico con desfase de 120° ; no obstante, en la actualidad los motores eléctricos más utilizados en aplicaciones automotrices son los de inducción (AC), los sincrónicos de imanes permanentes y los motores tipo *brushless*. Estos últimos se han venido utilizando cada vez más en aplicaciones automotrices, especialmente, en motocicletas, gracias a que utilizan imanes permanentes en lugar de escobillas para crear el campo magnético que hace gira el rotor, lo cual implica que no hay contacto físico entre las escobillas y el rotor, lo que a su vez reduce el desgaste y aumenta la eficiencia energética.

Lo expuesto hasta aquí, sumado a otros aspectos como su reducido tamaño y peso, la facilidad de controlarlos electrónicamente y su capacidad de entregar mayor potencia, los hacen ideales para muchas aplicaciones, incluidas patinetas eléctricas, bicicletas eléctricas, motocicletas y automóviles eléctricos e, incluso, en robótica [7]. Adicionalmente, estos motores se comercializan en rangos de potencias desde 300 W hasta 8 kW, con voltajes de operación entre 24 V y 72 V y tamaño de rim entre 7 y 27 pulgadas, con precios que oscilan entre U\$40 y U\$2000. En la figura 4 se muestra un motor *brushless* típico para automoción, el cual fue utilizado en la conversión de una motocicleta convencional con motor de combustión a funcionamiento 100% eléctrico y cuyas especificaciones se detallan más adelante. La gran ventaja es que la misma rueda es el motor y, por tanto, representa un ahorro en espacio que se puede aprovechar para el alojamiento de las baterías eléctricas.

Figura 4

Motor eléctrico tipo brushless para aplicaciones automotrices



Por su parte, las baterías son las que almacenan la energía que se le entrega al motor para que el vehículo se mueva. Las más utilizadas en aplicaciones automotrices son las de plomo-ácido; se caracterizan por ser pesadas, recarga lenta y, además, el plomo es tóxico; luego aparecen las de níquel-cadmio que tienen un excelente rendimiento a bajas temperaturas, pero son muy costosas y presentan el efecto memoria que disminuye su capacidad de carga; las baterías de iones de litio, LiCoO_2 , que tienen una alta densidad de energía, un mantenimiento nulo y se pueden reciclar; y las de litio-ferro-fosfato, LiFePO_4 , que tienen mayor estabilidad y mayor ciclaje de carga, pero suelen ser muy costosas.

En general, el principal cuello de botella de los sistemas automotrices eléctricos recae en las baterías, ya que mediante estas se determina la cantidad de energía que se puede almacenar y, por tanto, la autonomía del vehículo, es decir la cantidad de kilómetros que se pueden recorrer antes que se agoten. Además, de todos los componentes del kit eléctrico es el más caro; su vida útil promedio abarca hasta 3000 ciclos de carga, lo cual equivale a unos ocho años de vida o 150 000 km, aproximadamente. En la tabla 1 se muestra una comparación de las baterías eléctricas más usadas actualmente en aplicaciones automotrices.

Como se observa, la tendencia es aumentar la densidad de energía (capacidad de almacenamiento) y reducir el peso y el costo, sin afectar la seguridad de las mismas, para lo cual se han venido implementando materiales cada vez más sofisticados, como el litio, el cadmio y el níquel. En la figura 5 se muestra una de las baterías LiFePo4 utilizadas en el trabajo experimental, junto con el cargador eléctrico. Aunque estas baterías tienen dimensiones de 17.3 cm de alto, 35.7 cm de largo y 16.6 cm de ancho, con un peso de 9 kg, resultan ser de mayor tamaño y mayor peso que las baterías convencionales de plomo-ácido (12 cm x 12 cm x 6 cm, y un peso promedio aproximado de 3 kg), su densidad energética supera con creces la de estas últimas. Además, la tecnología actual permite un ciclaje de recarga de batería de más de 3000, lo cual daría una vida útil de superior a seis, años si la motocicleta se usara todos los días, pero también es cierto que la sustitución del paquete de baterías, una vez que cumplan su vida útil, representaría un gasto equivalente al 40% del costo total de una motocicleta eléctrica comercial, aspecto que debe mejorarse para motivar a los usuarios a adoptar esta estrategia de conversión de vehículos.

Figura 5

Batería LiFePo 4 para uso automotriz, con su correspondiente cargador



Tabla 1

Comparación de diversas baterías eléctricas con aplicaciones en la industria automotriz [8]

Tipo	Densidad energética	Capacidad de carga	Vida útil	Costo	Seguridad	Uso automotriz
Li – ion	Alta	alta	Larga	Moderado	Buena	Amplio
Li – Po	Moderada	Moderada	Moderada	Moderado	Buena	Limitado
LiFePo4	Alta	Moderada	Larga	Alto	Excelente	Amplio
NiCd	Baja	Baja	Moderada	Bajo	Pobre	Limitado
NiMHN	Moderada	Moderada	Moderada	Bajo	Buena	Limitado
Na – ion	Moderada	Moderada	(aún en desarrollo)	Bajo	Buena	(aún en desarrollo)

Elaboración propia con base en la información consignada en [8]

Según la forma en que estén configurados los elementos eléctricos, y la forma en que se suministra la energía al motor, los vehículos eléctricos se pueden clasificar así [7]:

- Vehículos eléctricos alimentados por baterías (BEV, por sus siglas en inglés), que actualmente es la más usada, pero que tiene como desventaja la relativa baja autonomía, los altos tiempos de carga, el alto costo y el alto peso y tamaño. Marcas como Nissan, Renault, Tesla, Mitsubishi, Volkswagen y BMW comercializan vehículos eléctricos de este tipo.
- Vehículo híbrido eléctrico enchufable (PHEV, por sus siglas en inglés), los cuales incorporan un motor de combustión y un motor eléctrico, con la diferencia de que en este caso el motor térmico hace las veces de un generador que carga las baterías y también acciona el motor eléctrico encargado de mover las ruedas. Una ventaja es que se puede conectar a la red eléctrica para la carga de las baterías. Una vez cargadas completamente, se apaga el motor a gasolina. En muchos países, estos vehículos son considerados eléctricos y los rige dicha normatividad [9].

Por otra parte, según diversos estudios, como los efectuados por Prause & Dietz [10], que se enfocan en los aspectos sociales de la movilidad eléctrica y sus implicaciones en la movilidad, o el efectuado por Lebrouhi *et al.* [11],

quien presenta una revisión de los problemas actuales de la movilidad eléctrica dirigida a optimizar la fabricación de vehículos eléctricos, dan a entender que las baterías y sus sistemas de carga son uno de los principales cuellos de botella. Por su parte, Goel & Rathore [12] aborda las estrategias a seguir, tanto políticas como tecnológicas y ambientales, con el fin de aumentar la participación de vehículos eléctricos en India.

En el mismo sentido, Capuder *et al.* [13] analizan en detalle los desafíos políticos, económicos, sociales, técnicos, legislativos y ambientales que determinarán la integración de los vehículos eléctricos en la sociedad. De todos estos análisis, se puede inferir que, en el corto y mediano plazo, la industria de vehículos eléctricos afrontará retos y desafíos que permitan masificar su uso; entre ellos, se pueden mencionar:

- Disminuir el peso y aumentar la densidad de energía de los paquetes de baterías, logrando índices de más de 400 Wh/kg.
- Mejorar la eficiencia de la planta motriz, teniendo como centro la transición a MOSFET de carburo de silicio (SiC), con voltajes de 800 V o más. Se proyecta que para 2031, el 10% del mercado maneje este tipo de inversores.
- Aunque actualmente dominan los motores de imanes permanentes, se espera que la próxima generación de motores eléctricos automotrices no tengan imanes, con el reto adicional de que sean atractivos en cuanto a costo y prestaciones.

3. Caso de estudio: motocicleta convencional convertida a funcionamiento VEB

Inicialmente, dentro del marco de un proyecto de investigación, una motocicleta convencional con motor de combustión se convirtió a funcionamiento 100% eléctrico con baterías, para lo cual se retiró todo el tren de potencia de combustión (motor, caja de cambios, sistema de escape de gases de combustión, tanque de combustible, etc.) y se instalaron los diferentes componentes eléctricos (rueda motor eléctrico tipo *brushless*; controlador eléctrico, baterías y accesorios). Las especificaciones técnicas de la motocicleta en la cual se efectuaron las pruebas experimentales, que posteriormente fue sometida a la conversión a funcionamiento 100% eléctrica, se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 2

Especificaciones técnicas de la motocicleta objeto de la conversión

Modelo	Yamaha DT 125
Motor	Monocilíndrico, 2 tiempos, refrigerado por aire
Cilindrada	123 cm ³
Diámetro x carrera	56 mm x 50 mm
Relación de compresión	7.2:1
Potencia	11.5 kW (15 hp) @ 7000 rpm
Torque	15.2 Nm @ 6500 rpm
Capacidad del tanque de gasolina	9.5 L (2.5 galones)
Peso	110 kg

Fuente: https://www.motorcyclespecs.co.za/model/yamaha/yamaha_dt125%2085%20LC.htm

Los elementos eléctricos instalados en la motocicleta, comercialmente conocido como *kit eléctrico*, se detallan en la tabla 3. De ellos, salvo por el motor que es dotación del laboratorio, los demás elementos —como las baterías, el controlador y el cargador eléctrico— fueron adquiridos de acuerdo con el presupuesto disponible. Es importante aclarar que de haber tenido mayor presupuesto, se pudo haber comprado un motor de mayor potencia, conservando el mismo tamaño y prácticamente el mismo peso; por lo que las diferencias en potencia y velocidad máxima no habrían sido tan pronunciadas a favor de la operación en modo combustión, con respecto a la motocicleta convertida.

Tabla 3

Componentes eléctricos instalados en la motocicleta convertida

Kit eléctrico	
Motor eléctrico	Brushless motor, 4 kW, rim 13
Voltaje de operación	48 V
Controlador	6 kW @ 48 V
Baterías eléctricas	4 x LiFePo4, 12 V, 75 Ah
Cargador	Input 110-260 VAC @ 47-63 Hz, output 59.4 VDC, 3A

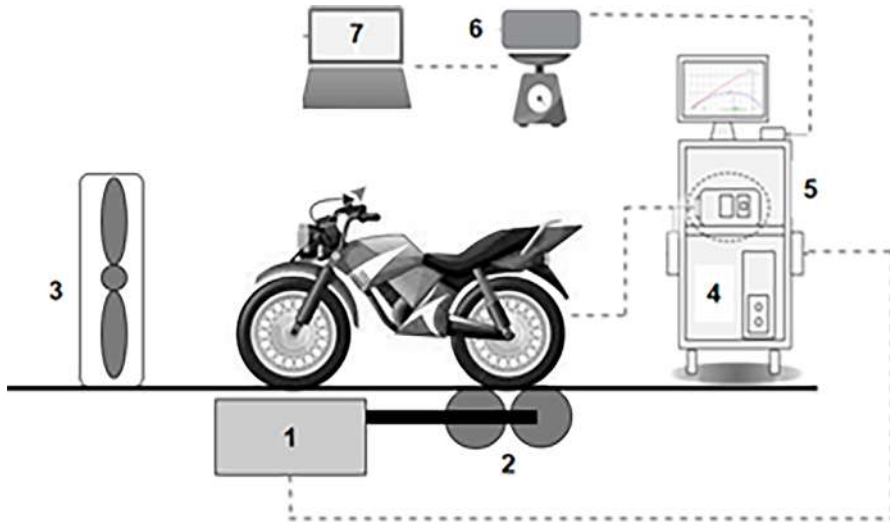
Figura 6

Motocicleta sin el tren de combustión y con el motor eléctrico y las baterías adaptadas



En la figura 6 se muestra la motocicleta en una de sus etapas de conversión, ya sin ningún elemento del tren de combustión, y con el motor eléctrico, el controlador y las baterías acopladas. Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en el Laboratorio de Investigación y Diagnóstico Automotriz de la Institución Universitaria Pascual Bravo. El montaje experimental donde se llevaron a cabo las pruebas experimentales, tanto en operación en modo combustión como en modo eléctrico, se detalla en la figura 7. En dicho esquema, 1 es la unidad de potencia del dinamómetro, 2 son los rodillos del dinamómetro, 3 es el sistema de ventilación, 4 es la unidad de control del dinamómetro, 5 es el analizador de gases de combustión, 6 es el sistema de medición de consumo de gasolina, 7 es el sistema de adquisición de datos.

Figura 7
Montaje experimental donde se efectuaron las pruebas



3.1 Desempeño en modo combustión

Las pruebas de desempeño realizadas con la motocicleta en modo combustión se llevaron a cabo con el fin de determinar la entrega de potencia y torque de la motocicleta en función del régimen de giro (rpm) del motor. A partir de estos valores, surge una gráfica conocida como curva de potencia-torque; de estas, se observa que la motocicleta en modo combustión desarrolla una potencia máxima de 10.8 kW a 8200 rpm, aproximadamente, y un torque máximo de 15 Nm a 7100 rpm. De la misma manera, la prueba de velocidad máxima arrojó un resultado de 112 km/h, mientras que la autonomía medida, con base en los datos de la tabla 4, fue de 18.8 km/l o 68.8 km/gal. Dicha prueba se realizó con la motocicleta, operando a velocidad constante de 60 km/h, en quinta marcha y con un conductor de 68 kg, y con el dinamómetro en modo libre, esto es, simulando un trayecto recto y plano. Para establecer el consumo de combustible, se midió la masa del combustible antes y después de la prueba utilizando una balanza de precisión.

Tabla 4

Parámetros para el cálculo de la autonomía de la motocicleta operando en modo combustión

Variable	Valor
Masa inicial de gasolina	1720 g
Masa final de gasolina	1550 g
Densidad de la gasolina	0.78 kg/l
Tiempo de duración de la prueba	240 s
Velocidad	60 km/h @ 5940 rpm
Peso del conductor	68 kg
Autonomía @ 60 km/h	km/l (69 km/gal)

3.2 Desempeño en modo eléctrico

Para el funcionamiento en modo eléctrico se obtuvo una potencia máxima de 3.49 kW a 413 rpm, y un torque máximo de 231 Nm a 100 rpm (casi desde el arranque) disminuyendo progresivamente a cerca de 100 Nm, a unas 500 rpm. La velocidad máxima obtenida fue de 50 km/h. Se debe destacar la diferencia operativa entre el motor eléctrico empleado y el sistema de combustión interna, ya que funcionan bajo principios físicos completamente diferentes. En la figura 9 se muestra la comparación gráfica de ambos modos de operación, en términos de torque y potencia, en la que se observa claramente la diferencia en potencia a favor de la operación en modo combustión, así como la notable diferencia en torque, esta vez a favor de la operación en modo eléctrico.

En resumen, la operación en modo combustión, da aproximadamente 65% más de potencia que en modo eléctrico, pero, en cuanto a torque, la motocicleta eléctrica da un 94% más que la de combustión. Esta característica es típica de los motores eléctricos, donde el pico de torque, que suele estar entre 200Nm a 300 Nm, se presenta casi que instantáneamente y tiende a permanecer constante hasta que se alcanza la potencia máxima, y luego cae progresivamente para poder sostener la potencia en un nivel prácticamente constante, como se ilustra en la figura 8, en la que se comparan cualitativamente las curvas características de un motor de combustión y uno eléctrico. Mientras tanto, en el caso de los motores de combustión, tanto el torque como la potencia alcanzan sus valores máximos (típicamente,

entre 80 Nm y 150 Nm) a unas revoluciones elevadas, más de 3000 rpm en cualquier caso, lo cual significa que el vehículo debe estar en cuarta o quinta marcha, situación que no siempre podrá tenerse en condiciones de conducción con tráfico real en una ciudad como Medellín.

Por tal razón, las curvas características de torque y potencia de los vehículos con motor eléctrico, los hacen más adecuados para circulación en condiciones de alto tráfico vehicular, por cuanto no se necesita tanta potencia ni velocidades muy altas; al contrario, se necesita más torque en cada arranque, como suele ser el caso de la conducción en hora pico en ciudades grandes, con gran congestión vehicular; en estas, la velocidad de circulación suele bajar a menos de 20 km/h.

Figura 8

Curvas características de desempeño mecánico para motores eléctricos (izquierda) y motores de combustión (derecha)

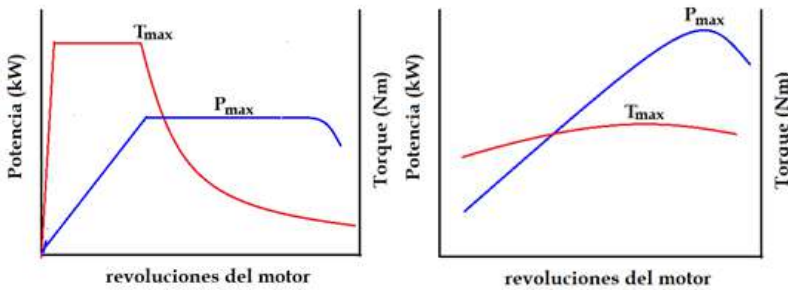
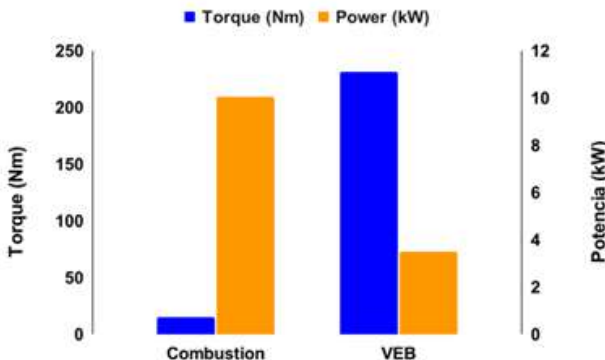


Figura 9

Comparación del torque y potencia máximos alcanzados por la motocicleta en ambos modos de operación



Igualmente, la prueba de autonomía en modo eléctrico se efectuó de manera diferente. Al permitir una velocidad máxima de 50 km/h, en este modo, su autonomía se midió llevando la motocicleta a dicha velocidad, y calculando tanto el tiempo máximo que podía sostener esta velocidad, como el tiempo de descarga hasta el nivel de voltaje recomendado por el fabricante (aproximadamente, el 30% del voltaje nominal), como se detalla en la tabla 5. Así, la motocicleta logró sostener su máxima velocidad durante 56 minutos, mientras que su descarga recomendada se dio 6 minutos después. Por lo tanto, la motocicleta en modo eléctrico lograría recorrer unos 47 km a una velocidad constante de 50 km/h, con un conductor de 68 kg, en terreno plano, lo cual limita su uso a trayectos netamente urbanos; por ejemplo, un viaje entre dos municipios extremos del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, como son Bello e Itagüí, tiene una distancia aproximada de 24 km, por lo que apenas se podría aspirar a hacer un recorrido de ida y vuelta con la motocicleta convertida a eléctrica. No obstante, en el informe de Calidad de Vida Medellín 2020 [14], a partir de datos de la Encuesta origen-destino, se pudo establecer que en un día laboral típico, los desplazamientos al interior de Medellín duraron en promedio 36 minutos y tuvieron una extensión promedio de 6.5 kilómetros, lo cual justifica el uso de motocicletas eléctricas.

Tabla 5

Datos para calcular la autonomía de la motocicleta operando en modo eléctrico

Variable	Valor
Voltaje inicial de las baterías	12 V
Voltaje final de las baterías	3.8 V
Número de baterías	4xLiFePo 12 V
Tiempo de duración de la prueba	3360 s
Velocidad	50 km/h
Peso del conductor	68 kg
Autonomía @ 50 km/h	46.7 km/carga de batería

Los resultados anteriores demuestran que, por el momento, con la tecnología que se tienen actualmente para las baterías de uso automotriz, ya sea una moto eléctrica nueva o una de combustión convertida a eléctrica, tendrá desventaja con respecto a las motocicletas con motor de combustión,

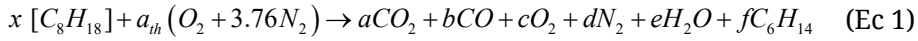
ya que su menor autonomía implica que su uso quede restringido a trayectos al interior de la ciudad, como viajes para ir al trabajo o a la universidad.

No obstante, un aspecto importante a favor de los motores eléctricos es que no se ven afectados por el efecto altitud, que impacta seriamente los motores de combustión interna, por causa del fenómeno según el cual la densidad del aire disminuye en la medida en que se está a mayor altitud sobre el nivel del mar, causando una pérdida de potencia del motor que es proporcional a la elevación, como lo han establecido diferentes estudios [15]. Este aspecto resulta importante, porque significa que el desempeño de la motocicleta eléctrica sería el mismo en ciudades costeras, así como en ciudades ubicadas a grandes elevaciones, como Bogotá o Pasto, lo que en cierta medida representa otra ventaja de este tipo de movilidad.

3.3 Impacto ambiental

Las pruebas de emisiones gaseosas de la motocicleta, operando en modo combustión, se realizaron según lo establece la Resolución 910 de 2008 [16], es decir, en condiciones de ralentí o marcha mínima. Los resultados obtenidos indican que tanto el monóxido de carbono (CO), 0.95% en volumen, y los hidrocarburos sin quemar (HC), 2285 ppm en volumen, se encuentran dentro de los rangos permitidos para motocicletas de dos tiempos (4.5% y 10 000 ppm, respectivamente).

Sin embargo, con el fin de tener un panorama más amplio en cuanto a la contaminación atmosférica causada por la motocicleta en modo combustión, se efectuaron pruebas dinámicas bajo ciclos de conducción, en este caso, el elegido fue el ciclo de conducción para Medellín y el Área Metropolitana [17]. De esta manera, se pueden estimar los índices de emisión para CO, CO₂ y HC (ecuaciones 1 a 4), permitiendo cuantificar la contaminación generada en términos de masa de contaminante emitida por cada kilómetro recorrido ($\text{kg}_{\text{gas}}/\text{km}$) o en términos de masa de contaminante emitida al año ($\text{kg}_{\text{gas}}/\text{año}$) o en términos de masa de contaminante emitida por cada kilogramo de combustible quemado en el motor de combustión ($\text{kg}_{\text{gas}}/\text{kg}_{\text{gasolina}}$), de acuerdo con las ecuaciones siguientes, en las cuales se asumió el iso octano (C₈H₁₈) como hidrocarburo de referencia para la gasolina. La ecuación 1 representa la reacción de combustión entre la gasolina y el aire que da como resultado la emisión de especies gaseosas, algunas de ellas con carácter contaminante, como el monóxido de carbono (CO) y los hidrocarburos sin quemar (HC), que en el presente estudio fueron medidos en base hexánica (C₆H₁₄).



Las ecuaciones 2 a 4 representan la formulación matemática que conduce a los índices de emisión del CO₂ con base al tiempo, a la distancia y a la masa de combustible, respectivamente. La misma formulación se aplica a las otras especies contaminantes teniendo en cuenta sus propiedades termofísicas.

$$I_{CO_2} \left(\frac{kg}{año} \right) = \frac{a \text{ kmol } CO_2}{x \text{ kmol}_{fuel}} \times \frac{44 \frac{kg \text{ } CO_2}{\text{kmol } CO_2}}{114 \frac{kg \text{ } C_8H_{18}}{\text{kmol}_{fuel}}} \times \dot{m}_{fuel} \left(\frac{kg}{h} \right) \times \frac{\text{horas de operación}}{año} \quad (\text{Ec } 2)$$

$$I_{CO_2} \left(\frac{kg}{km} \right) = I_{CO_2} \left(\frac{kg}{año} \right) \times \frac{\text{día}}{\text{distancia de viaje (km)}} \times \frac{año}{365 \text{ días}} \quad (\text{Ec } 3)$$

$$I_{CO_2} \left(\frac{kg}{kg_{fuel}} \right) = \frac{a \text{ kmol } CO_2}{x \text{ kmol}_{fuel}} \times \frac{44 \frac{kg \text{ } CO_2}{\text{kmol } CO_2}}{114 \frac{kg \text{ } C_8H_{18}}{\text{kmol}_{fuel}}} \quad (\text{Ec } 4)$$

Este análisis se llevó a cabo a partir de la autonomía antes calculada de la motocicleta operando en modo combustión, y estableciendo un recorrido promedio diario de 20 km, según lo determinado para distancia promedio de viaje en motos, consignado en el Plan Maestro de Movilidad para el Valle de Aburrá [18]. Para este fin, se programaron en el dinamómetro las coordenadas del ciclo de conducción nativo para nuestra región y se procedió a seguir la parte extraurbana del ciclo; simultáneamente, se procedió a medir las emisiones de CO y de HC, de manera que al final se totalizaron para el intervalo de tiempo que dura la prueba y se obtienen los indicadores de emisión antes mencionados. El resultado se ilustra en las figuras 10 y figura 11, en las cuales se observa que en los picos de aceleración máxima es cuando más CO y HC se produce, lo cual puede explicarse porque el sistema de suministro de combustible a la motocicleta es por carburador, cuya respuesta es menos eficiente y rápida que los sistemas de inyección de gasolina, que cada vez son más frecuentes en motocicletas.

Figura 10

Emisión de monóxido de carbono (CO) durante el recorrido del ciclo urbano del Área Metropolitana del Valle de Aburrá

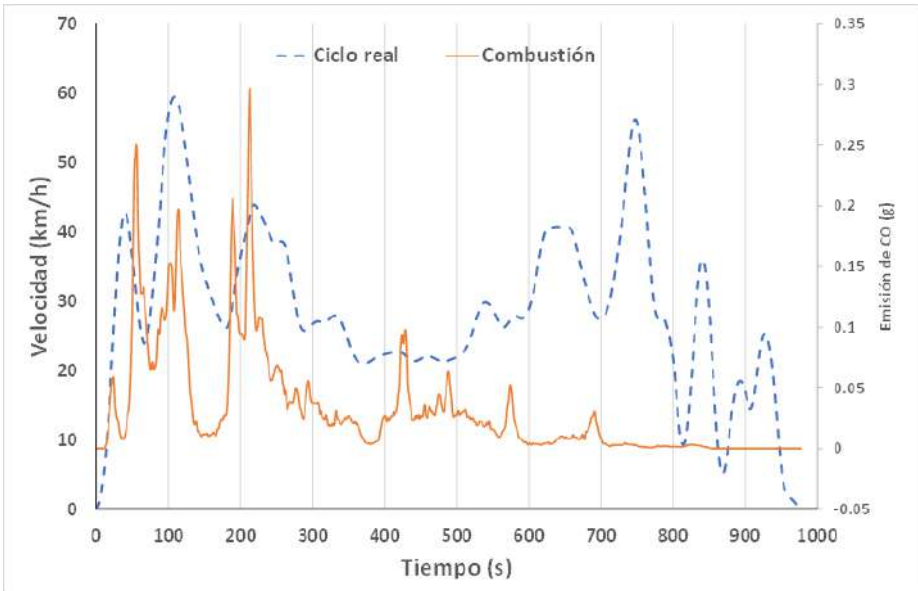
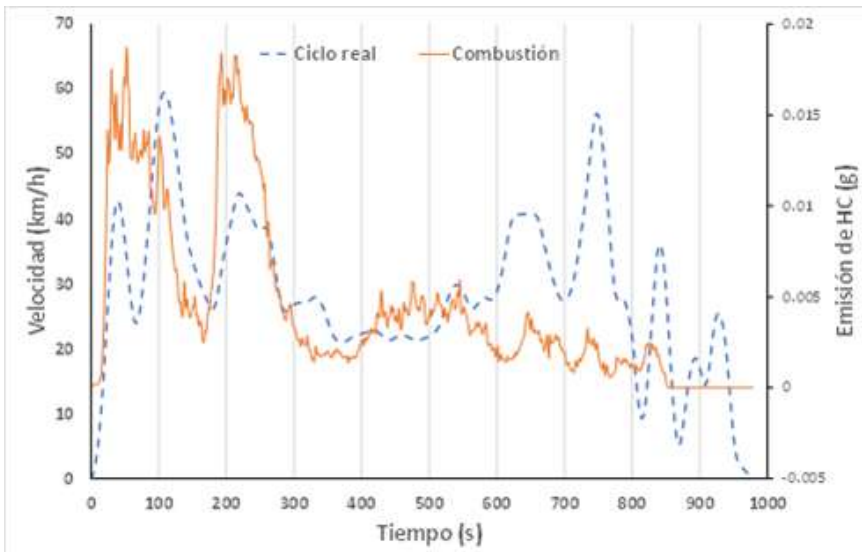


Figura 11

Emisión de hidrocarburos sin quemar HC durante el recorrido del ciclo urbano del Área Metropolitana del Valle de Aburrá



En la tabla 6 se totalizan las masas emitidas de cada contaminante durante el tiempo en que se efectuó el ciclo extraurbano. Como se puede observar, si la motocicleta opera en modo eléctrico dejaría de emitir a la atmósfera 31.7 gramos de CO y 4.4 gramos de hidrocarburos sin quemar, cada vez que se hace el recorrido extraurbano del ciclo; sin embargo, si opera en modo combustión, en el territorio europeo, no cumpliría con la norma EURO 5 ni con ninguna de las anteriores, ya que el límite máximo para el CO es de 1 g/km y de 0.17 g/km para los hidrocarburos sin quemar, lo cual representa otra ventaja para la operación en modo eléctrico.

Tabla 6

Emisiones gaseosas contaminantes de la motocicleta en modo combustión y comparación con la norma europea

	CO	HC	Euro V
Masa total emitida (g)	31.7	4.4	N.A
Índice de emisión (g/km)	4.1	0.6	1 y 0.17

Respecto a la operación en modo eléctrico, a pesar que no se emite ningún contaminante gaseoso nocivo para los seres humanos o perjudiciales para el medio ambiente, hay quienes sostienen que el efecto de la contaminación causada por la fabricación y disposición de las baterías eléctricas, cuando han cumplido su vida útil, puede llegar a ser peor que el efecto de las emisiones gaseosas de los motores de combustión, como lo expone, por ejemplo Requía *et al.* [19] en un trabajo donde analizan los impactos de los vehículos eléctricos sobre el medio ambiente y la salud de los seres humanos. En este sentido, debe aclararse que el alcance del presente estudio no consideró este aspecto de contaminación de las baterías ni de ningún otro componente del kit eléctrico, pero los autores son conscientes de dicho fenómeno.

A continuación, en la tabla 7 se muestran los índices de emisiones de CO, CO₂ y HC con la motocicleta operando solo en modo combustión, ya que en modo eléctrico no genera ningún tipo de emisión gaseosa contaminante. Se tuvieron en cuenta las emisiones que en la actualidad se controlan y penalizan en la norma vigente en nuestro país. Vale aclarar que esta norma establece el modo ralentí para efectuar la medición.

Tabla 7

Índices de emisión para el monóxido de carbono, bióxido de carbono e hidrocarburos sin quemar

	CO	CO ₂	HC
Kg/km	0.0099	0.01473	0.0043
Kg/año	108.3	161.2	47.3
Kg/kg _{gasolina}	0.23	0.35	0.103

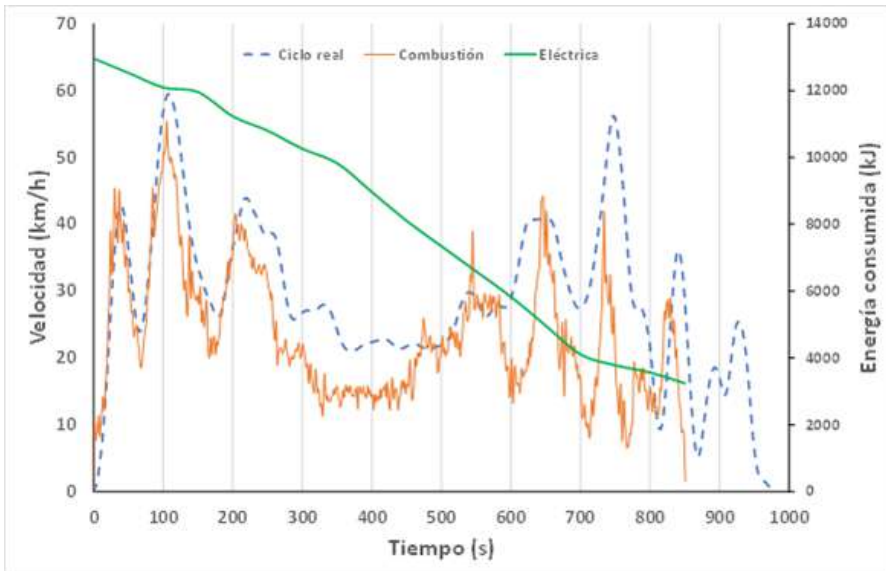
Si se plantea un escenario hipotético en el que el 30% del parque automotor de motocicletas local (cerca de 900 mil motocicletas) se convierte a eléctrico y asumiendo el mismo recorrido promedio diario de 20 km, se tendría un panorama en que se dejarían de emitir anualmente 29 mil Ton de CO y 43 mil Ton de CO₂, contribuyendo a la meta fijada por el gobierno de 2.14 millones de toneladas de CO₂ mitigadas por el sector transporte. Además, se tendría una reducción en el consumo de combustible fósil, que en el caso de Colombia que tiene su matriz energética basada en el recurso hidráulico, lo que a su vez disminuiría la dependencia de estos fósiles.

3.4 Aspectos energéticos de la operación en modo eléctrico

En la figura 12 se muestra el consumo de energía para seguir la parte extraurbana del ciclo nativo para Medellín y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, en ambos modos de operación de la motocicleta. Para el caso de la operación en modo combustión, el consumo de energía se calculó según la ecuación 5, a partir del registro de la masa de gasolina consumida por el motor de la motocicleta, que fue medido con un sensor del tipo *coriolis massflow* y, seguidamente, multiplicando por el poder calorífico de la gasolina, que según las tablas termodinámicas es de 42000 kJ/kg, aproximadamente.

Figura 12

Consumo de energía de la motocicleta operando en ambos modos



$$\text{Consumo de energía (kJ)} = \Delta \text{masa} \times PCi \quad (\text{Ec } 5)$$

En el caso de la operación en modo eléctrico, se monitoreó el voltaje de las baterías, justo a la entrada del controlador, y se registró de forma manual su variación a ciertos intervalos de tiempo, hasta que finalizó la prueba. Teniendo en cuenta que se dispuso de 4 baterías LiFePo 4, de 12 voltios cada una, y con 75 Ah, entonces la energía consumida se calculó de acuerdo con la ecuación 6:

$$\text{Consumo de energía (kJ)} = \# \text{baterías} \times \Delta V \times Ah \times \frac{3600}{1000} \quad (\text{Ec } 6)$$

Donde ΔV es el voltaje nominal de cada batería, en voltios y Ah son los amperio-hora nominales de cada batería; 3600 es el factor para pasar de horas a segundos y 1000 es el factor para pasar de julios a kilojulios.

Por su parte, en la tabla 8 se muestran tres parámetros energéticos relevantes: el potencial energético bruto, el total de energía consumida en el tiempo que duró la prueba, y el porcentaje real de energía consumida. Para el caso de operación en modo combustión, se asume que el tanque de gasolina de la motocicleta está completamente lleno (5.5 litros); para

el caso de operación en modo eléctrico, se asume que las baterías están inicialmente cargadas al 100%. De esta manera, el potencial energético de la motocicleta en modo combustión se determina con la ecuación 7:

$$\text{Potencial energético combustión} = V_{\text{gasolina}} \times \rho_{\text{gasolina}} \times PCi \quad (\text{Ec } 7)$$

Siendo V_{gasolina} el volumen de gasolina almacenado en el tanque de la motocicleta, en litros, ρ_{gasolina} es la densidad de la gasolina, en kg/l y PCi es el poder calorífico inferior de la gasolina, en kJ/kg, haciendo la salvedad de que en Colombia la gasolina que se distribuye comercialmente ya viene mezclada al 10% con etanol y esto hace que el poder calorífico sea levemente menor. Así, con los datos medidos y reemplazando en las ecuaciones 6 y 7, se tiene:

$$\text{Potencial energético combustión} = 5.5l \times 0.78 \frac{\text{kg}}{l} \times 42000 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\text{Potencial energético combustión} = 180180 \text{ kJ}$$

Y para el caso de la operación en modo eléctrico es:

$$\text{Potencial energético eléctrico} = \# \text{baterías} \times V_{\text{nominal}} \times \text{Amperios} - \text{hora}$$

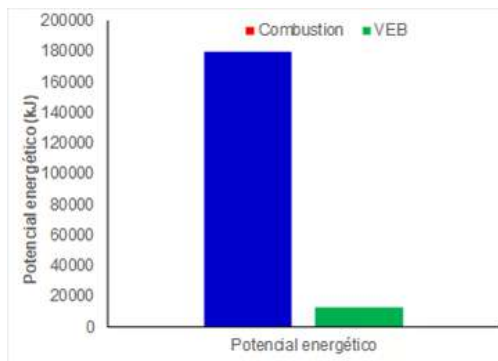
Con los datos de catálogo de las baterías se tiene:

$$\text{Potencial energético eléctrico} = 4 \times 12V \times 75 \text{ Ah} \times \frac{3600 \text{ s}}{h} \times \frac{J}{\text{s} \times V \times A} \times \frac{\text{kJ}}{1000 J}$$

$$\text{Potencial energético eléctrico} = 12960 \text{ kJ}$$

Figura 13

Comparación de los potenciales energéticos de la motocicleta operando en ambos modos de combustión



Según lo ilustrado en la figura 13, la motocicleta en modo combustión tiene casi 14 veces más potencial de energía que la motocicleta en modo eléctrico, lo cual significa que la autonomía será mucho mayor en modo combustión, debido a que en un kg de gasolina se puede almacenar mucha más energía que en una batería de 12 voltios con capacidad para entregar 75 amperios en una hora. No obstante, hay que aclarar que esta limitante de la motocicleta, operando en modo eléctrico, está determinada por el espacio disponible para alojar la cantidad suficiente de baterías, pero, desafortunadamente, para equiparar el mismo potencial energético de la motocicleta en combustión, se necesitarían casi 56 baterías de las que están instaladas actualmente, lo que a su vez, implicaría tener un peso de 400 kg, haciendo imposible, por el momento, que ambos modos de operación manejen potenciales energéticos similares.

Tabla 8

Comparación de consumo energético en el ciclo AMVA extraurbano

	Combustión	Eléctrica	Diferencia (eléctrica vs combustión)
Potencial de energía (kJ)	180180	12960	-167220
Energía total consumida (kJ)	20006	9720	-10286
Fracción consumida (%)	11	75	64

De la tabla anterior se puede establecer que la operación en modo combustión consumió 20 mil kJ de energía, mientras que en modo eléctrico sólo se consumieron 9720 kJ, lo cual daría para pensar que la moto eléctrica es mejor. Sin embargo, el consumo energético en modo combustión solo representa el 11% del potencial energético inicial de la motocicleta, contrario al modo eléctrico en donde el consumo equivale a gastar el 75% de la energía inicial de la motocicleta eléctrica. Esto, simplemente, significa que en modo combustión se podría hacer el recorrido del ciclo extraurbano de ida y vuelta, y sobraría energía, mientras que en modo eléctrico no se podría hacer el doble trayecto, ya que no habría suficiente energía. Nuevamente, esto se debe a que, aunque las baterías utilizadas sean mejores que las de plomo, ya que tienen mayor densidad de energía, en realidad el problema radica en el número de baterías y el espacio disponible para alojarlas, que en el caso de motocicletas se constituye en una limitante importante.

4. Apreciaciones significativas del caso del estudio

En este estudio se llevó a cabo la comparación del desempeño de una motocicleta convencional con motor de combustión, y una motocicleta de combustión convertida a funcionamiento eléctrico con baterías, operando en ambos casos en condiciones estacionarias y en condiciones dinámicas, siguiendo el ciclo de conducción para el Área Metropolitana de Medellín y el Valle de Aburrá. Los resultados se enmarcan dentro de las políticas gubernamentales de transición energética, donde uno de los principales aspectos se concentra en la electrificación del sector transporte y su descarbonización. Puesto en estos términos, las principales conclusiones se resumen así:

- La motocicleta en modo combustión tiene una entrega de torque más progresiva en un rango más amplio de revoluciones de giro. Sin embargo, el torque máximo en modo VEB es 14 veces mayor al modo MCI, lo que le permite una mayor aceleración instantánea y una mayor capacidad de carga. Respecto a la velocidad máxima, se ha establecido que la velocidad media de circulación en los principales corredores viales de la ciudad de Medellín oscila entre 20-25 km/h en condiciones normales de tráfico; no así durante las horas pico (7:00-8:00 y 18:00-19:00) cuando la velocidad media en casi toda la ciudad desciende por debajo de 20 km/h. En ese sentido, la velocidad de la motocicleta eléctrica satisface los requerimientos para desplazamientos en ciudades con alto tráfico vehicular, como Medellín y, en general, las ciudades capitales.
- A pesar que las emisiones contaminantes generadas por la motocicleta en modo combustión, operando en condiciones estacionarias, cumplen con las normas nacionales actuales de emisiones. Su impacto ambiental, visto como masa de contaminante por año y por kilómetro recorrido, permiten dimensionar la magnitud de contaminación generada por todo el conjunto de motocicletas en Colombia. En este sentido, en este estudio se pudo establecer la carga de contaminación que se dejaría de emitir cuando se tiene la operación con la motocicleta en modo eléctrico, aspecto que apuntaría directamente a la mejora de la calidad del aire.
- Abordando el aspecto técnico, cualquier persona que tome la iniciativa de convertir su motocicleta con motor de combustión a funcionamiento eléctrico, deberá adquirir los componentes que conforman

el kit eléctrico. Infortunadamente, estos componentes son importados y su costo está determinado por la tasa de cambio con el dólar, que en el caso de Colombia en 2023 llegó a bordear los COP 5000/dólar. Dependiendo de la cilindrada de la motocicleta a convertir, la inversión en promedio estaría rondando los COP 9 millones, lo que podría desmotivar a los usuarios. Al igual que ocurre con los automóviles eléctricos, las baterías son las que tienen mayor porcentaje en el costo total del vehículo, bien sea de una motocicleta eléctrica comercial o de un kit eléctrico para conversión. Adicionalmente, uno de los grandes problemas que tienen las baterías automotrices son su tamaño y su peso, lo cual las convierte en el principal factor limitante para que las prestaciones de una motocicleta eléctrica sean similares a la de una motocicleta con motor de combustión.

- Pasando a lo que fueron las pruebas experimentales, aparte de las pruebas estacionarias, se encontró que las pruebas dinámicas, siguiendo ciclos de conducción, ofrecen información más valiosa y resultan una alternativa adecuada a las pruebas en ruta; además, permiten tener una aproximación a lo que es el desempeño real de un vehículo circulando por una vía con tráfico. Particularmente al seguir el ciclo de Medellín en su parte extraurbana, se puede afirmar que el desempeño de la motocicleta convertida a eléctrica no alcanza a equiparar el de la motocicleta a combustión, por las razones antes expuestas, que básicamente se reducen a la menor potencia y menor autonomía que, a su vez, depende de la cantidad de energía almacenada en las baterías eléctricas.

No obstante, en lo que concierne al ciclo urbano, el desempeño de la moto convertida da para pensar que es, incluso, más adecuado para esas condiciones de tráfico, en las que se tienen bajas velocidades y aceleraciones y desaceleraciones continuas. De igual modo, las prestaciones mecánicas de la motocicleta convertida a eléctrica, verbigracia, su mayor torque, operación silenciosa, y el hecho de no emitir ningún compuesto contaminante, la hacen más atractiva que la motocicleta de combustión, sumado al hecho de contar con algunos beneficios en impuestos, seguro obligatorio y la exención de la medida de pico y placa a nivel nacional.

- En materia de consumo de energía, a pesar de que la motocicleta eléctrica consumió menos energía que la motocicleta de combustión, para recorrer los 7.7 km del ciclo, proporcionalmente se consumió

el 75% de su energía total inicial, lo cual limita la autonomía de este vehículo y restringe su uso a trayectos al interior de la ciudad. Esto implica un esfuerzo por parte del gobierno para incrementar los puntos o estaciones de carga eléctrica en las ciudades y fuera de ellas.

- En términos de contaminación atmosférica, y sin abordar el aspecto de contaminación por uso y disposición de las baterías eléctricas, se pudo establecer que la cantidad de emisiones de CO y de HC que se dejarían de emitir, operando en modo eléctrico, se convierte en la principal ventaja de estos vehículos.

En resumen, la iniciativa de convertir vehículos con motor de combustión a funcionamiento eléctrico con batería, resulta una estrategia válida que contribuye a la transición energética y al cumplimiento de algunos ODS; además, aportaría a la disminución, de manera preponderante, de las emisiones contaminantes, mejorando la calidad del aire y reduciendo los riesgos asociados a enfermedades por polución, sin que ello signifique adquirir otro vehículo. De la misma manera, cada vehículo eléctrico que rueda por las calles, es un vehículo que no consumirá gasolina, lo que favorece la descarbonización del sector transporte y la dependencia de los energéticos fósiles.

Finalmente, se proponen como trabajos futuros efectuar el mismo análisis, pero en condiciones reales de conducción en carretera, tanto en trayectos urbanos como extra-urbanos. Además, teniendo en cuenta que actualmente en el laboratorio Lida se dispone de motocicletas eléctricas comerciales y motocicletas con motor de combustión de diferentes cilindradas y diferentes sistemas de suministro de combustible (carburador e inyección electrónica), bien se podría llevar a cabo una comparación más amplia que arroje información detallada de la conveniencia o no de migrar a movilidad eléctrica. Aunque la idea de hacer este tipo de conversiones, también se ha practicado en automóviles, ya que, en esencia, la metodología es la misma, por el momento es un trabajo que se proyecta realizar a largo plazo, en razón a que el costo de la infraestructura eléctrica es mayor al que se necesita para convertir una motocicleta, en virtud de que la potencia del motor de un automóvil puede ser diez veces la de una motocicleta.

5. Referencias

- [1] UPME, “Balance energético colombiano-Beco-”, 2021. [Online]. Available: <https://www1.upme.gov.co/informacioncifras/paginas/balanceenergetico.aspx>.
- [2] D. N. de P. (DNP), “Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022,” 2019.
- [3] J. Rosero García, *Avance de la Movilidad Eléctrica en Colombia*. Universidad Nacional de Colombia, 2021.
- [4] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, “Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica,” Bogotá, 2019.
- [5] RUNT, “Parque automotor registrado en RUNT,” 2023. [Online]. Available: <https://www.runt.gov.co/runt-en-cifras/parque-automotor>. [Accessed: 11-May-2023].
- [6] AMVA - Área Metropolitana del Valle de Aburrá, “Actualización inventario de emisiones atmosféricas del Valle de Aburrá - Año 2018,” Medellín, 2019.
- [7] E. A. S. Marín, *Vehículos eléctricos, una opción viable para Colombia*. Editorial Universidad Tecnológica de Pereira, 2022.
- [8] Somoselectricos.com, “Tipos de baterías para coches eléctricos que existen,” 2023. [Online]. Available: <https://somoselectricos.com/tipos-baterias-coches-electricos/>.
- [9] J. M. M. Spuch, “Batería del coche eléctrico: la clave de la nueva movilidad,” *SoyMotor*, 2021. [Online]. Available: <https://soymotor.com/coches/articulos/como-es-la-bateria-del-coche-electrico-984135>.
- [10] L. Prause and K. Dietz, “Just mobility futures: Challenges for e-mobility transitions from a global perspective,” *Futures*, vol. 141, p. 102987, 2022.
- [11] B. E. Lebrouhi, Y. Khattari, B. Lamrani, M. Maaroufi, Y. Zeraouli, and T. Kousksou, “Key challenges for a large-scale development of battery electric vehicles: A comprehensive review,” *J. Energy Storage*, vol. 44, p. 103273, 2021.
- [12] S. Goel, R. Sharma, and A. K. Rathore, “A review on barrier and challenges of electric vehicle in India and vehicle to grid optimisation,” *Transp. Eng.*, vol. 4, p. 100057, 2021.
- [13] T. Capuder, D. Miloš Sprčić, D. Zoričić, and H. Pandžić, “Review of challenges and assessment of electric vehicles integration policy goals: Integrated risk analysis approach,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 119, p. 105894, 2020.
- [14] M. of Medellin, “Medellín Cómo Vamos - Informe de Calidad de Vida: Movilidad y Espacio Público,” Medellín, 2021.
- [15] Z. Liu and J. Liu, “Effect of altitude conditions on combustion and performance of a turbocharged direct-injection diesel engine,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng.*, vol. 236, no. 4, pp. 582–593, Jul. 2021.
- [16] M. Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia, *Resolución 910 del 5 de junio de 2008*. Colombia, 2008, p. 33.

- [17] AMVA - Área Metropolitana del Valle de Aburrá, “Ciclos de conducción de vehículos ligeros y motocicletas para el Valle de Aburrá,” Medellín, 2017.
- [18] AMVA - Área Metropolitana del Valle de Aburrá, “Plan Maestro de Movilidad para el Valle de Aburrá,” Medellín, 2020.
- [19] W. J. Requía, M. Mohamed, C. D. Higgins, A. Arain, and M. Ferguson, “How clean are electric vehicles? Evidence-based review of the effects of electric mobility on air pollutants, greenhouse gas emissions and human health,” *Atmos. Environ.*, vol. 185, pp. 64–77, 2018.

Lista de figuras

Validación experimental mediante el modelo de Darcy-Forchheimer para la simulación de lechos porosos en OpenFOAM

Figura 1	Proceso de combustión en lecho poroso	9
Figura 2	Dominio computación de la representación de los árboles como medios porosos [9]	11
Figura 3	Representación de la malla de un medio poroso: a) medio poroso con cuerpos sólidos de geometrías variadas y complejas; b) medio poroso simplificando la malla	12
Figura 4	Bolas de alúmina utilizadas a) irregulares b) pequeñas c) mediana d) grandes	15
Figura 5	Montaje experimental y características del medio poroso de bolas de alúmina	16
Figura 6	Valores experimentales de las velocidades (eje X) y las caídas de presión (eje Y) con su regresión polinómica	18
Figura 7	Flujo de trabajo para simulaciones en OpenFOAM	21
Figura 8	Dominio computacional del tubo y del medio poroso con refinamiento	22
Figura 9	Directorio de OpenFOAM “porosityProperties”	23
Figura 10	Simulación computacional del medio poroso. Valores obtenidos aguas abajo y aguas arriba del medio poroso	24
Figura 11	Valores de la simulación de velocidad y caída de presión	24
Figura 12	Funciones de aproximación para la descarga y la succión del flujo en el medio poroso	25
Figura 13	Graficas de residuos para en análisis Anova	27
Figura 14	Comparación de medias para los coeficientes de Darcy y Forchheimer teniendo en cuenta el tamaño de bolas	29
Figura 15	Gráficas de efectos principales para los coeficientes	30
Figura 16	Gráficas de interacciones de tratamientos para los coeficientes	31
Anexo A	Valores experimentales de las velocidades y las caídas de presión. Replica 2	35
Anexo B	Valores experimentales de las velocidades y las caídas de presión. Réplica 3	36

EMAV (OBD-II & GPS Logger): herramienta clave en el diagnóstico y supervisión de vehículos en la transición energética

Figura 1	Esquema general de la instalación experimental	41
Figura 2	Conexión del módulo GPS al sistema de cómputo LattePanda	42
Figura 3	Configuración serial de interfaz terminal	46
Figura 4	Estructura de los comandos recibidos desde la ECU a través de la interfaz ELM327	49
Figura 5	Ejemplo de conversión numérica con la calculadora de programador del Sistema operativo Windows	49
Figura 6	Estructura de los códigos de falla del protocolo OBD-II	53
Figura 7	a) Sistema LattePanda empacado en la caja plástica impresa en 3D b) Equipo de medición de actividad vehicular	57
Figura 8	Configuración de la terminal serial para establecer comunicación con el ELM327	57
Figura 9	Módulos didácticos con motores en banco de ensayos	58
Figura 10	Mediciones realizadas sobre motor KIA RIO	58
Figura 11	Respuesta del motor ante requerimientos de información de PID's individuales y simultáneos	60
Figura 12	Conexión de la Interfaz ELM327 con módulo didáctico KIA RIO	61
Figura 13	Diagrama de bloques para el envío de solicitudes de PID's individuales a través del puerto serial usando la plataforma LabView	62
Figura 14	Diagrama de flujo del algoritmo descrito en la Figura 13	62
Figura 15	Diagrama de bloques para la lectura e interpretación de los PID's recibidos a través del puerto serial usando la plataforma LabView	63
Figura 16	Diagrama de flujo del algoritmo descrito en la Figura 15	64
Figura 17	Diagrama de bloques para el envío de solicitudes de PID's simultáneas a través del puerto serial usando la plataforma LabView	65
Figura 18	Diagrama de bloques para preguntar por los DTC	65
Figura 19	Diagrama de flujo del algoritmo descrito en las Figuras 17 y 18	66
Figura 20	Interfaz de usuario del software de adquisición de datos desarrollado para pruebas de medición de actividad vehicular	67
Figura 21	Datos de velocidad OBD adquiridos con el PID 010D	68

Figura 22	Datos de temperatura de refrigerante del motor OBD adquiridos con el PID 0105	68
Figura 23	Datos de revoluciones del motor OBD adquiridos con el PID 010C	69

Conversión de motos convencionales a eléctricas como estrategia para la transición energética. Caso de estudio: Medellín

Figura 1	Distribución del parque automotor eléctrico en Colombia para 2022.	74
Figura 2	Comparación de las emisiones por sector, en Medellín y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá	75
Figura 3	Componentes de la planta motriz eléctrica en un vehículo	76
Figura 4	Motor eléctrico tipo brushless para aplicaciones automotrices	78
Figura 5	Bateria LiFePo 4 para uso automotriz, con su correspondiente cargador	79
Figura 6	Motocicleta sin el tren de combustión y con el motor eléctrico y las baterías adaptadas	83
Figura 7	Montaje experimenta donde se efectuaron las pruebas	84
Figura 8	Curvas características de desempeño mecánico para motores eléctricos (izquierda) y motores de combustión (derecha)	86
Figura 9	Comparación del torque y potencia máximos alcanzados por la motocicleta en ambos modos de operación	86
Figura 10	Emisión de monóxido de carbono (CO) durante el recorrido del ciclo urbano del Área Metropolitana del Valle de Aburrá	90
Figura 11	Emisión de hidrocarburos sin quemarHC durante el recorrido del ciclo urbano del Área Metropolitana del Valle de Aburrá	90
Figura 12	Consumo de energía de la motocicleta operando en ambos modos	93
Figura 13	Comparación de los potenciales energéticos de la motocicleta operando en ambos modos de combustión	94

Lista de tablas

Validación experimental mediante el modelo de Darcy-Forchheimer para la simulación de lechos porosos en OpenFOAM

Tabla 1	Valores experimentales de las velocidades y las caídas de presión	17
Tabla 2	Coefficiente de Forchheimer y Darcy para la descarga y la succión	19
Tabla 3	Diseño de experimentos por bloques	26
Tabla 4	Análisis de varianza para el coeficiente de Darcy	28
Tabla 5	Análisis de varianza para el coeficiente de Forchheimer	28

EMAV (OBD-II & GPS Logger): herramienta clave en el diagnóstico y supervisión de vehículos en la transición energética 37

Tabla 1	Características técnicas de los vehículos usados para validar el EMAV	43
Tabla 2	Características técnicas de la interfaz ELM327	43
Tabla 3	Características técnicas, distribución de pines y aspecto físico del microcomputador LattePanda	44
Tabla 4	Características técnicas del módulo GPS NEO 6M-V2	45
Tabla 5	Comandos AT para lectura o configuración de parámetros	46
Tabla 6	Modos de operación del ELM327	47
Tabla 7	PID's más representativos de un motor con sus respectivos offsets y factores de escalamiento	48
Tabla 8	Respuesta al modo 01 al requerir el PID 05	50
Tabla 9	Respuesta al modo 01 al requerir el PID 0C	50
Tabla 10	Respuesta al modo 01 al requerir el PID 10	51
Tabla 11	Respuesta al modo 01 al requerir el PID 11	51
Tabla 12	Respuesta al modo 01 al requerir el PID 0F	51
Tabla 13	Respuesta al modo 01 al requerir el PID 33	52
Tabla 14	Respuesta al modo 01 al requerir el PID 5E	52
Tabla 15	Respuesta al modo 03 (códigos de falla-DTC)	53
Tabla 16	Ejemplos de mediciones experimentales realizadas en el motor del módulo didáctico Renault Captur	59

Conversión de motos convencionales a eléctricas como estrategia para la transición energética. Caso de estudio: Medellín

Tabla 1	Comparación de diversas baterías eléctricas con aplicaciones en la industria automotriz [8]	80
Tabla 2	Especificaciones técnicas de la motocicleta objeto de la conversión	82
Tabla 3	Componentes eléctricos instalados en la motocicleta convertida	82
Tabla 4	Parámetros para el cálculo de la autonomía de la motocicleta operando en modo combustión	85
Tabla 5	Datos para calcular la autonomía de la motocicleta operando en modo eléctrico	87
Tabla 6	Emisiones gaseosas contaminantes de la motocicleta en modo combustión y comparación con la norma europea	91
Tabla 7	Índices de emisión para el monóxido de carbono, bióxido de carbono e hidrocarburos sin quemar	92
Tabla 8	Comparación de consumo energético en el ciclo AMVA extraurbano	95

En este libro se abordan diferentes aspectos relacionados con la transición energética. En el primer capítulo se determinaron de forma experimental los coeficientes del modelo de Darcy-Forchheimer, validando simulaciones en OpenFOAM para el diseño de sistemas de combustión con lechos porosos. En el segundo capítulo se analiza la adquisición de señales de vehículos EFI y su aplicación en la formulación de políticas estatales durante la transición energética en el sector automotor, ofreciendo una visión completa y práctica de su implementación. Por último, en el tercer capítulo, se presentan los resultados de un estudio sobre movilidad eléctrica en Medellín, destacando ventajas y desventajas de la conversión de vehículos tipo motocicleta a VEB, incluyendo el análisis comparativo del potencial energético y el consumo de energía.

VIGILADA Mineducación

 **IUPascualBravo**
www.pascualbravo.edu.co

Teléfono: 604 448 05 20

Calle 73 # 73a - 226 Robledo, Vía El Volador
Medellín - Colombia



Alcaldía de Medellín
Distrito de
Ciencia, Tecnología e Innovación