



**IMPLEMENTACIÓN DE UNA METODOLOGÍA COMBINADA DE SIMULACIÓN
CFD - MODELO INTERNACIONAL DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO
INVERNADERO (GEM) PARA LA DETERMINACIÓN DE EMISIONES DE DIÓXIDO
DE CARBONO (CO₂) Y RENDIMIENTO ENERGÉTICO PARA VEHÍCULOS EN EL
CONTEXTO COLOMBIANO**

David Zuluaga Castrillón

Trabajo de grado presentado para optar al título de ingeniero mecánico

Asesor

Iván Darío Bedoya Caro (PhD)

Universidad de Antioquia
Facultad de ingeniería
Departamento de ingeniería mecánica
Medellín, Antioquia, Colombia
2023

Cita

Zuluaga Castrillón & Bedoya Caro [1]

Referencia

Estilo IEEE (2020)

[1] D. Zuluaga Castrillón, & I.D. Bedoya Caro, *IMPLEMENTACIÓN DE UNA METODOLOGÍA COMBINADA DE SIMULACIÓN CFD - MODELO INTERNACIONAL DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEM) PARA LA DETERMINACIÓN DE EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂) Y RENDIMIENTO ENERGÉTICO PARA VEHÍCULOS EN EL CONTEXTO COLOMBIANO*, [Trabajo de grado]. Universidad de Antioquia, Medellín. 2023.



Grupo de ciencia y tecnología del gas y uso racional de la energía



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla.

Jefe departamento: Pedro León Simancas.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A mis queridos padres por su apoyo y amor incondicional a lo largo de este viaje académico. A mi hermano mayor que ha sido más que un guía. A mis profesores, por su orientación invaluable. A mis compañeros, por las risas y angustias compartidas. A mi novia, por su constante apoyo y aliento. Con profundo agradecimiento: David Zuluaga Castrillón.

Agradecimientos

El autor agradece al grupo GASURE por la constante disposición de sus miembros en el préstamo y capacitación de equipos, al director de tesis Iván Darío Bedoya por su constante asesoría, paciencia y enseñanza. Al magister Edison Steven Castaño Mesa por su asesoría y enseñanza. A todo el equipo interuniversitario vinculado con esta investigación

El autor agradece el apoyo financiero brindado por Minciencias en el marco del Contrato No. FP44842-218-2018.

El autor también agradece la asesoría técnica en transformación dual-fuel brindada por GNV Motor S.A.S. y la asesoría técnica en medición de emisiones contaminantes brindada por Camilo Bernal de GESOLTEC S.A.S.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	14
ABSTRACT	15
INTRODUCCIÓN	16
I. OBJETIVOS	18
A. Objetivo general	18
B. Objetivos específicos	18
II. MARCO TEÓRICO	19
A. ¿Por qué se inicia la turbulencia?	19
B. Fuerza de arrastre	19
C. Coeficiente de arrastre (drag)	19
D. Capa límite	20
E. Y+ (Altura de la primera celda)	20
F. Esquema de volúmenes finitos	21
G. Ecuaciones que utiliza ANSYS para extraer el coeficiente de arrastre.	21
Ecuación de conservación de masa:	21
Ecuación de cantidad de movimiento:	22
Ecuación de la energía:	22
Ecuación diferencial de la energía interna y cinética:	23
H. Pruebas de desaceleración	24
1. Preparación del vehículo:	24
2. Localización de la pista de prueba:	24
3. Instalación de los sensores:	24

4.	Desarrollo de la prueba:	25
5.	Registro de datos:	25
6.	Cálculos y análisis:	25
I.	Constantes de absorción	25
	OBD (On Board Diagnostic)	27
	¿Qué es?	27
	¿Su historia?	29
	Protocolo CAN	29
	Modelo internacional (GEM)	30
	¿Qué es?	30
	¿Qué datos debo ingresar?	30
	¿Qué datos me entrega?	31
	¿Cómo encuentra el GEM los factores de emisión y eficiencia de combustible?	31
	Modelo de cálculo usado por el modelo GEM	33
	Combustible usado por el modelo GEM	35
III.	METODOLOGÍA	36
	Caracterización del objeto de estudio	36
	Especificaciones del vehículo	37
	Cálculo de y^+	37
	Modelado de la geometría externa del vehículo semi-pesado	38
	Generación del volumen de control	39
	Generación de la malla del volumen de control.	40
	Configuración del programa de simulación.	41
	Elección del modelo:	42
	Materiales:	42

Entrada (Inlet):	42
Salida (Outlet):	42
Pared de la carretera:	42
Pared del túnel:	42
Pared del vehículo:	42
Valores de referencia:	42
Condiciones de operación	43
Controles:	44
Residuales:	45
Inicialización:	45
Cálculo y chequeos:	45
Estudio de independencia de mallado	45
Características geométricas de la malla seleccionada	45
Metodología pruebas Coast Down.	47
Verificación	47
Procedimiento de las pruebas de desaceleración	48
Metodología para la obtención de factores de emisión de pruebas en dinamómetro	50
Montaje del laboratorio móvil en el dinamómetro.	50
Equipos necesarios para la extracción de los factores de emisión	53
Medidor de especies gaseosas:	53
Medidor de flujo de combustible líquido:	54
Medidor de flujo gaseoso:	54
Dinamómetro de rodillos:	55
Estimación de la masa de aire instantánea teórica	56
Medición de la masa de aire instantánea mediante el sistema OBD	58

Rendimiento de combustible	61
Estimación de errores presentes en las pruebas	61
Errores de conducción:	62
Errores sistemáticos propagados:	62
Metodología modelo GEM	64
Categoría del vehículo	64
Empresa manufacturera	64
Año del modelo del vehículo	64
Número de prueba	65
Subcategoría	65
Mapas del motor	65
• Curva del motor a la máxima carga:	65
• Curva de pérdidas mecánicas o “motoring”:	66
• Mapa de combustible del motor al ralentí:	66
• Mapa de combustible del motor:	67
• Mapa de combustible promedio de ciclo transitorio:	67
RPM al ralentí	68
Mapa de la transmisión	68
Configuración del eje motriz	69
Relación del eje motriz	69
Datos del eje motriz	69
Área de arrastre aerodinámica	69
Resistencia a la rodadura del eje de dirección y transmisión	69
Tamaño de la llanta cargada	70
Mejoras de tecnología	70

Características físicas del vehículo	70
IV. RESULTADOS	71
Simulación CFD	71
Estudio de variables	74
Locación	74
Velocidad del vehículo	75
Pruebas de desaceleración	76
Factor de emisión del CO ₂ y consumo de combustible extraído mediante pruebas en dinamómetro	78
Errores de conducción	85
Errores de resultado propagado	85
Modelo GEM	86
Comparativo de resultados obtenidos mediante simulación CFD y las pruebas de desaceleración	88
Comparativo de resultados del Modelo GEM y de las pruebas realizadas en transitorio	89
V. CONCLUSIONES	90
VI. REFERENCIAS	92

LISTA DE TABLAS

TABLA I. PIDS COMÚNMENTE UTILIZADOS EN VEHÍCULOS LIVIANOS.	30
TABLA II. COMPARATIVO DE COMBUSTIBLES UTILIZADOS POR EL MODELO GEM Y EN EL TRANSPORTE COLOMBIANO.	35
TABLA III. PESO Y DIMENSIONES DEL VEHÍCULO OBJETO DE ESTUDIO.	37
TABLA IV. ESPECIFICACIONES DEL MOTOR DEL VEHÍCULO OBJETO DE ESTUDIO.	37
TABLA V. CÁLCULO DEL TAMAÑO DE LA PRIMERA CELDA PARA UN Y+ DE 1 A UNA VELOCIDAD DE 80 KM/H.	38
TABLA VI. ESTUDIO DE INDEPENDENCIA DE MALLADO.	45
TABLA VII. CARACTERÍSTICAS DE RESOLUCIÓN Y PRECISIÓN DEL MEDIDOR DE ESPECIES GASEOSAS CAPELEC.	53
TABLA VIII. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL MEDIDOR DE FLUJO LÍQUIDO.	54
TABLA IX. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL MEDIDOR DE FLUJO GASEOSO.	55
TABLA X. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL DINAMÓMETRO DE RODILLOS.	55
TABLA XI. PIDS UTILIZADOS.	59
TABLA XII. CARACTERÍSTICAS DEL ARDUINO NANO.	59
TABLA XIII. CARACTERÍSTICAS DEL COMUNICADOR MCP2515CAN.	60
TABLA XIV. MAPA DE CONSUMO DEL MOTOR A VELOCIDAD DE RALENTÍ.	66
TABLA XV. MAPA PROMEDIO DE CICLO TRANSITORIO.	68
TABLA XVI. MAPA DE LA TRANSMISIÓN.	68
TABLA XVII. CARACTERIZACIÓN DE LUGARES PRINCIPALES DE COMERCIO EN COLOMBIA.	74
TABLA XVIII. COMPARATIVO DE RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN CFD Y LAS PRUEBAS DE DESACELERACIÓN	88
TABLA XIX. COMPARATIVO DE RESULTADOS DEL MODELO GEM Y LAS PRUEBAS REALIZADAS EN TRANSITORIO.	89
TABLA XX. DIFERENCIAS ENTRE METODOLOGÍAS DE EXTRACCIÓN DE FACTOR DE EMISIÓN	89

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Diagrama simplificado de fuerza [15].	26
Fig. 2. Estructura de los pines OBD. [16]	28
Fig. 3. Interfaz de diagnóstico. [16]	28
Fig. 4. Ciclo de conducción a 55 mph constante. [19].	32
Fig. 5. Ciclo de conducción a 65 mph constante. [19].	32
Fig. 6. Ciclo de conducción ARB. [19].	32
Fig. 7. Flujograma de la metodología seguida para la extracción de factores de emisión en vehículos.	36
Fig. 8. Superficie creada por el ajuste de un contorno a una foto del vehículo.	39
Fig. 9. Superficie simplificada.	39
Fig. 10. Superficie de control de control (túnel de viento).	40
Fig. 11. Mallado resultante del área de control.	41
Fig. 12. Mallado resultante del área aledaña a la superficie del vehículo.	41
Fig. 13. Valores de referencia utilizados en la simulación para una velocidad de 80 km/h.	43
Fig. 14. Métodos utilizados en la simulación.	44
Fig. 15. Controles utilizados en la simulación.	44
Fig. 16. Calidad ortogonal de la malla.	46
Fig. 17. Oblicuidad de la malla.	46
Fig. 18. Relación de aspecto de la malla.	47
Fig. 19. Recorrido para las pruebas.	48
Fig. 20. Altimetría de la ruta.	48

Fig. 21. Perfil de velocidad obtenido en el trayecto Guarne-Marinilla.	49
Fig. 22. Perfil de velocidad obtenido en el trayecto Marinilla-Guarne.	49
Fig. 23. Distribución de los equipos de medición en el vehículo.	50
Fig. 24. Fotografía de montaje del vehículo en el dinamómetro de rodillos.	51
Fig. 25. Esquema de medición en el laboratorio móvil.	52
Fig. 26. Perfil de velocidades de las pruebas realizadas.	56
Fig. 27. Arduino nano.	59
Fig. 28. Dispositivo de comunicación MCP2515CAN	59
Fig. 29. Plano o diagrama de conexiones.	60
Fig. 30. Electrónica y dispositivos de comunicación.	61
Fig. 31. Curva del motor a máxima carga del vehículo objeto de estudio.	65
Fig. 32. Curva “motoring” del vehículo objeto de estudio.	66
Fig. 33. Mapa de consumo del motor en una prueba WTLC.	67
Fig. 34. Residuales de la simulación posterior a las 500 iteraciones para una velocidad de 80 km/h.	71
Fig. 35. Solución de coeficiente de arrastre de la simulación posterior a 500 iteraciones para una velocidad de 80 km/h.	71
Fig. 36. Y+ post-simulación de las fronteras del vehículo.	72
Fig. 37. Contorno de presión alrededor del vehículo posterior a 500 iteraciones para una velocidad de 80 km/h.	73
Fig. 38. Campo vectorial de velocidad alrededor del vehículo posterior a 500 iteraciones para una velocidad de 80 km/h.	74
Fig. 39. Coeficiente de arrastre “Drag” en función de la altura.	75
Fig. 40. Coeficiente de arrastre “Drag” en función de la velocidad.	76
Fig. 41. Fuerza disipada en función de la velocidad.	76
Fig. 42. Comparativo de flujo de aire medido con el OBD y el flujo de aire estimado teóricamente.	78

Fig. 43. Comparativo de flujo de diésel calculado mediante el OBD y el calculado teóricamente.	79
Fig. 44. Perfiles de velocidades de las pruebas realizadas en modo diésel y modo Dual.	80
Fig. 45. Perfiles de porcentaje molar del dióxido de carbono en modo diésel y modo Dual.	81
Fig. 46. Flujo de diésel inyectado en el motor en operación diésel y dual	82
Fig. 47. Comparativo del factor de emisión de CO ₂ a lo largo del ciclo.	83
Fig. 48. Comparativo del factor de emisión del CO ₂ en función del modo de operación del vehículo.	83
Fig. 49. Comparativo del factor del rendimiento de combustible en función del modo de operación del vehículo	84
Fig. 50. Ciclo de conducción (arriba) y errores de conducción (abajo).	85
Fig. 51. Comparativo entre métodos de extracción del factor de emisión y error propagado (arriba), error propagado porcentual (medio) y velocidad del vehículo (abajo).	86
Fig. 52. Factor de emisión del CO ₂ en función del coeficiente de arrastre del vehículo.	87
Fig. 53. Factor de rendimiento de combustible en función del coeficiente de arrastre del vehículo.	87

Siglas, acrónimos y abreviaturas

EPA	Agencia de protección ambiental de Estados Unidos
CFD	Dinámica de fluidos computacional
UNECE	Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa
WLTC	Ciclo de pruebas de vehículos ligeros armonizado a nivel mundial
FE	Factor de emisión contaminante
SE	Factor de emisión contaminante
GEM	Modelo de emisiones de gases de efecto invernadero
OBD	Diagnóstico a bordo
CAN	Controlador de Red de Zona
UPME	Unidad de Planeación Minero-Energética
SAE	Sociedad de Ingenieros de Automoción
GPS	Sistema de posicionamiento global
CARB	Juntas de recursos del aire de california
MIL	Luz indicadora de mal funcionamiento
ARB	Magistrado Ponente
ASME	Asociación americana de ingenieros mecánicos
MAF	Sensor de flujo de masa de aire
NDIR	Infrarrojo no dispersivo
RPM	Revoluciones por minuto
PID	Identificador de parámetros
DTC	Código de diagnóstico de problema

RESUMEN

En este trabajo se presenta una metodología que combina simulaciones de CFD para analizar el flujo de aire alrededor de un vehículo en movimiento y la aplicación de un modelo ampliamente aceptado a nivel internacional, el (GEM), para determinar el consumo de combustible y las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) por kilómetro recorrido en vehículos semipesados en el contexto colombiano.

Las simulaciones CFD se llevaron a cabo en un vehículo comercial, el NHR modelo 2022, el cual estaba equipado con medidores de flujo líquido y gaseoso, así como un analizador de especies gaseosas en los productos de combustión. Este vehículo tenía la capacidad de operar tanto en modo diésel como en modo dual diésel/gas natural. Estas simulaciones permitieron obtener el coeficiente de arrastre (drag coefficient) para el vehículo, el cual se utilizó posteriormente en el modelo GEM para estimar el consumo de combustible específico y las emisiones específicas de CO₂ en diferentes pisos térmicos de Colombia.

Los resultados de esta metodología CFD-GEM se compararon con los obtenidos a través de pruebas experimentales de desaceleración libre y la aplicación del ciclo WLTC en Medellín, Colombia.

Los resultados experimentales revelaron un factor de emisión de CO₂ de $760 \text{ g CO}_2/\text{km}$ y un consumo específico de combustible de $0.08 \text{ gal}/\text{km}$ en modo diésel. Adicionalmente, se realizaron mediciones de variables operativas del motor mediante el OBD para determinar el flujo de aire admitido principalmente, lo cual resultó en un factor de emisión de $616 \text{ g CO}_2/\text{km}$ y un factor de rendimiento de $0.06 \text{ gal}/\text{km}$.

En contraste, las estimaciones obtenidas mediante la metodología CFD-GEM arrojaron valores de $531 \text{ g CO}_2/\text{km}$ y $0.05 \text{ gal}/\text{km}$ respectivamente.

Palabras clave: Emisiones gaseosas, coeficiente de arrastre, CFD, Prueba de desaceleración.

ABSTRACT

This work presents a methodology that combines Computational Fluid Dynamics simulations to analyze the airflow around a moving vehicle and the application of a widely accepted international model, the GEM, to determine fuel consumption and carbon dioxide (CO₂) emissions per kilometer traveled in semi-heavy vehicles in the Colombian context.

The CFD simulations were conducted on a commercial vehicle, the NHR model 2022, which was equipped with liquid and gaseous flow meters, as well as a gas species analyzer in the combustion products. This vehicle had the capability to operate in both diesel and dual diesel/natural gas modes. These simulations allowed for the determination of the drag coefficient for the vehicle, which was subsequently used in the GEM model to estimate specific fuel consumption and specific CO₂ emissions in different thermal zones of Colombia.

The results of this CFD-GEM methodology were compared with those obtained through experimental free deceleration tests and the application of the WLTC cycle in Medellin, Colombia.

The experimental results revealed a CO₂ emission factor of 760 *g CO₂/km* and a specific fuel consumption of 0.08 *gal/km* in diesel mode. Additionally, operational engine variables were measured using OBD to determine primarily the admitted airflow, resulting in an emission factor of 616 *g CO₂/km* and a performance factor of 0.06 *gal/km*.

In contrast, the estimates obtained through the CFD-GEM methodology yielded values of 531 *g CO₂/km* and 0.05 *gal/km*, respectively.

Keywords: Gas emissions, drag coefficient, CFD, Coast-down procedure.

INTRODUCCIÓN

Colombia enfrenta un desafío significativo en términos de eficiencia energética, ya que solo alrededor del 40% de la energía ingresada a su economía se utiliza de manera efectiva, según la Unidad de Planeación Minero-Energética [1]. El sector del transporte es particularmente ineficiente, representando aproximadamente el 40% del consumo total de energía y operando a una eficiencia promedio del 20%. Esto tiene un impacto significativo en el medio ambiente, especialmente en la emisión de gases de efecto invernadero, como el CO₂.

La investigación sobre la medición y control de estas emisiones abarca diversas disciplinas, desde la protección del medio ambiente hasta los esfuerzos realizados por las principales compañías automotrices. Se han observado casos, como el de Volkswagen en Estados Unidos, que han resaltado la necesidad de mejorar los mecanismos de control de emisiones [2].

Ahora esto presenta un reto para los mecanismos de control de emisiones internacionales, ya que, es necesario contar con laboratorios de alto costo para tener una estimación correcta de las emisiones reales de los vehículos [3].

Para abordar este desafío, se emplea una metodología comúnmente utilizada que implica la estimación de emisiones a través de ciclos estandarizados en dinamómetros de rodillos [4]. Sin embargo, esta metodología enfrenta obstáculos, como la determinación de coeficientes de absorción (coeficiente inercial, de rodadura y de arrastre aerodinámico) que pueden variar según diversos factores y que son especialmente únicos para cada automóvil. La obtención de estos coeficientes se utiliza la prueba de desaceleración libre según la norma SAE-J1263 [5].

Otra alternativa para hallar el coeficiente de arrastre uno de los 3 coeficientes de absorción puede ser estimada desde herramientas computacionales como lo es el CFD.

Las simulaciones se tornan importantes por su practicidad y variabilidad, como es posible observar la extracción de parámetros ambientales de vehículos en el uso de modelos de emisión, como el GEM [6], que estiman emisiones de CO₂ y consumo de combustible bajo condiciones específicas de conducción. Sin embargo, estos modelos requieren datos detallados que a menudo son difíciles de obtener de los fabricantes de vehículos.

En el contexto colombiano, no se encontraron investigaciones previas que combinen la simulación de flujo en CFD y el modelo GEM para estimar emisiones y consumo de combustible.

Sin embargo, existen investigaciones similares en otros lugares, como el análisis de modificaciones aerodinámicas en camiones [7] y el estudio de la dinámica de fluidos en vehículos de fórmula SAE [8]

En este estudio, se implementó una metodología de simulación en CFD para analizar el flujo alrededor de un vehículo Chevrolet NHR Modelo 2022 en movimiento. Los resultados de la simulación CFD se utilizaron para determinar el coeficiente de arrastre, que luego se incorporó en el modelo GEM para calcular las emisiones de CO₂ y el consumo de combustible por kilómetro. Estos resultados se compararon con pruebas de desaceleración libre realizadas siguiendo la norma SAE-J1263. Además, se aplicaron pruebas adicionales bajo condiciones de Medellín y se verificó la reproducibilidad del ciclo WLTC en dos tipos de operación del vehículo (diésel y dual), tal como lo han hecho otros autores a nivel del mar como Napolitano, Guido, Beatrice and Giacomo [9]. La extracción de resultados se ha desarrollado siguiendo el reglamento técnico mundial de la UNECE [10]. Además, se debe mencionar que se han seguido dos metodologías para la medición de parámetros en tiempo real una es la estimación del flujo de aire admitido del motor teórico y otra es la medición directa mediante el puerto CAN del vehículo utilizando el OBD.

El comparativo entre estas metodologías y los resultados obtenidos son de gran interés para las partes interesadas en el sector del transporte en Colombia, ya que pueden contribuir a la evaluación de las emisiones de CO₂ y la eficiencia en el uso de combustibles en este contexto.

I. OBJETIVOS

A. *Objetivo general*

Establecer una metodología para la estimación de variables operativas y ambientales de vehículos semipesados en el contexto colombiano usando simulación CFD y modelos de cálculo avalados en el contexto internacional.

B. *Objetivos específicos*

- Establecer las condiciones geométricas del mallado de un vehículo semipesado para el análisis CFD.
- Determinar los parámetros operativos de un vehículo semipesado utilizando la simulación CFD de las fuerzas y fluido-dinámica actuantes para identificar los esfuerzos resultantes a los que son sometidos.
- Implementar un modelo de cálculo avalado internacionalmente para el establecimiento de variables operativas y ambientales de vehículos semipesados a partir de los resultados de la simulación CFD.
- Verificar de manera experimental en comparación con los resultados numéricos obtenidos en un vehículo semipesado en condiciones reales.

II. MARCO TEÓRICO

A. ¿Por qué se inicia la turbulencia?

La turbulencia se inicia por inestabilidades en el flujo causadas por los gradientes de velocidades medias. Estos torbellinos (Eddy) en movimiento, generan nuevas inestabilidades dando lugar a torbellinos más pequeños. El proceso continúa hasta que los torbellinos se hacen lo suficientemente pequeños, y los gradientes de los términos fluctuantes de las velocidades lo bastante grandes, para que el efecto de viscosidad adquiera importancia y se disipe la energía turbulenta en forma de calor. Lo anterior se conoce como cascada de energía.

B. Fuerza de arrastre

Cuando el fluido se transporta sobre una superficie, la superficie se resistirá a su movimiento. En aerodinámica, la “fuerza de arrastre” es la fuerza que actúa en contra de cualquier cuerpo sólido en movimiento en la dirección de las líneas de flujo. La resistencia aerodinámica en un vehículo es la suma de la fricción, la forma y la presión. El desprendimiento de flujo tiene un efecto negativo cada vez mayor a medida que aumenta la velocidad del vehículo, por lo que, cuando se alcanzan altas velocidades, se vuelve indispensable diseñar las componentes aerodinámicas de manera apropiada para reducir su efecto. Comprender la relación entre velocidad y resistencia aerodinámica es importante para calcular el rango de operación del vehículo [8].

C. Coeficiente de arrastre (drag)

El coeficiente de arrastre o “drag” es una cantidad adimensional que se usa para cuantificar la resistencia de un objeto en un medio fluido como el aire o el agua. Es utilizado en la ecuación de resistencia: *Ecuación 1*, en donde un coeficiente de resistencia (C_D) bajo indica que el objeto tendrá menos resistencia aerodinámica o hidrodinámica. El coeficiente de resistencia está siempre asociado con una superficie particular [11].

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho AV^2} \quad (1)$$

Donde F_D es la fuerza de arrastre en [N], ρ es la densidad del fluido en [Kg/m³], A es el área de referencia (área proyectada del objeto obstructor en un plano perpendicular a la dirección del movimiento) en [m²] y V es la velocidad del vehículo en [m/s].

D. Capa límite

Un fluido en movimiento tiene dos comportamientos diferentes, flujo laminar y turbulento. La capa límite pasará de laminar a turbulenta si el número de Reynolds alrededor del cuerpo es suficientemente grande. Las velocidades más grandes, los objetos más grandes y las viscosidades más bajas contribuyen a números de Reynolds más grandes. La turbulencia aparece cuando las fuerzas de inercia son mayores que las viscosas, por lo que el número de Reynolds alcanza un cierto valor que produce algunos fenómenos no estacionarios. La fricción que actúa sobre el perfil aerodinámico reduce la energía cinética del flujo lo que conlleva a que los límites inferiores de la capa límite dejan de moverse mientras que las capas superiores continúan en movimiento provocando la separación del flujo y creando zonas de turbulencia. Estas zonas turbulentas hacen que el fluido sea más difuso, lo que aumenta el transporte de masa y el intercambio de “momentum” y energía. La turbulencia muestra físicamente la generación de vórtices según la teoría de Kolmogorov de 1941 que dice que la interacción extrae energía de la corriente y la transforma en energía interna para deformar las partículas del fluido, y esta es la razón por la que el flujo turbulento disipa más energía que el flujo laminar [8].

E. Y+ (Altura de la primera celda)

Varios factores determinan la calidad y la fiabilidad de los resultados de la simulación CFD, uno de ellos es Y+, definido como una longitud adimensional; la cual es una distancia perpendicular desde el punto más cercano a la pared donde se evalúa la velocidad de fricción (U_*), este parámetro se emplea para describir la resolución de la malla perpendicular a la pared solididad en estudio, matemáticamente se puede definir según la *Ecuación 2*.

$$Y_+ = \frac{U_* x dy}{\nu} \quad (2)$$

En esta ecuación, U_* es la velocidad de fricción en [m/s], dy es la distancia de la pared al punto donde se calculan los datos en este caso en [m] y ν es la viscosidad cinemática del fluido en [m²/s].

La velocidad de fricción puede definirse, según la *Ecuación 3*.

$$U_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad (3)$$

En esta ecuación, τ es el esfuerzo de corte en la pared en [Pa] y ρ es la densidad del fluido en [kg/m³]. [12].

F. Esquema de volúmenes finitos

Para resolver numéricamente todas las ecuaciones planteadas en una simulación, se utiliza el método de volúmenes finitos. El volumen computacional se divide en volúmenes más pequeños llamados celdas. Empleando la ley de Gauss, las derivadas parciales que expresan un principio de conservación, como “*div u*”, se pueden reescribir en cada celda como una contribución algebraica.

La ecuación gobernante, expresada en las ecuaciones diferenciales parciales, se reformula en un conjunto de ecuaciones algebraicas lineales en cada celda computacional. Por lo general, estas ecuaciones se resuelven numéricamente de manera iterativa. El precio de dividir el volumen total en volúmenes pequeños, y por lo que se llama discretización del dominio, es la introducción de un error numérico en la solución. Es importante controlar la magnitud del error después de haber obtenido una solución. Se puede demostrar que este error disminuye a medida que el tamaño de la celda se acerca a cero. Por lo tanto, una disminución suficiente del tamaño de la celda a menudo reducirá el error de manera adecuada. Por otro lado, reducir demasiado el tamaño de la celda creará un elevado número de celdas, lo que aumentará el esfuerzo computacional requerido y posiblemente resultará en tiempos de simulación prohibitivos [13].

G. Ecuaciones que utiliza ANSYS para extraer el coeficiente de arrastre.

El programa utilizado se remite a las siguientes ecuaciones para encontrar el flujo de aire completamente desarrollado y posteriormente encontrar que fuerzas está sufriendo el fluido gracias a la interferencia del vehículo, encontrando así presiones, áreas y fuerzas, para posteriormente encontrar el coeficiente de arrastre [14].

Ecuación de conservación de masa: El principio de conservación de la masa nos dice que la masa contenida en un volumen finito no varía con el tiempo, matemáticamente expresado así:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_f} \rho dV = 0 \quad (4)$$

Aplicando el teorema de transporte de Reynolds y el teorema de Gauss en la *Ecuación 4* se obtiene la ecuación de continuidad en su forma conservativa en *Ecuación 5*:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (5)$$

La ecuación de conservación de la masa se denomina ecuación de continuidad. El primer término representa la variación temporal de la masa por unidad de volumen y el segundo término es el flujo convectivo de masa por unidad de volumen.

Ecuación de cantidad de movimiento: La ecuación de cantidad de movimiento que rige la dinámica de los fluidos deriva de la segunda ley de Newton, que establece que la variación de la cantidad de movimiento de un objeto está originada por las fuerzas que actúan sobre él. Aplicando este principio físico al volumen de control, se obtiene la conservación de cantidad de movimiento:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_f} \rho \vec{v} dV = \int_{V_f} \vec{f}_v dV + \int_{S_f} \vec{f}_n dS \quad (6)$$

Donde \vec{f}_v representa la fuerza por unidad de volumen que actúa sobre la partícula fluida y \vec{f}_n representa la fuerza por unidad de superficie que actúa sobre un elemento de S_f (Donde también V_f es la velocidad final).

Aplicando el teorema del transporte, el teorema de Gauss y la Ley de Stokes. Se obtiene la ecuación de conservación de movimiento en la *Ecuación 7*:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \rho \vec{f}_m \quad (7)$$

El primer término de la ecuación representa la variación temporal de cantidad de movimiento y el segundo término es el flujo convectivo de cantidad de movimiento. El segundo término de la ecuación expresa las variaciones de cantidad de movimiento anteriores causadas por las diferencias de presiones, los esfuerzos viscosos en el movimiento fluido y los efectos de las fuerzas másicas por unidad de volumen.

Ecuación de la energía: El primer principio de la termodinámica establece que la variación de energía de un sistema se debe al trabajo de las fuerzas que actúan sobre él y al flujo de calor intercambiado con el exterior y generado, o consumido, por el sistema. Considerando la energía total por unidad de un volumen al aplicar el principio de conservación se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_f} \rho \left(e + \frac{1}{2} v^2 \right) dV = \int_{V_f} \vec{f}_v \cdot \vec{v} dV + \int_{S_f} \vec{f}_n \cdot \vec{v} dS + \int_{V_f} Q_r dV \quad (8)$$

Donde \vec{f}_v representa la fuerza por unidad de volumen que actúa sobre la partícula fluida, \vec{f}_n representa la fuerza por unidad de superficie que actúa sobre un elemento dS de S_f y Q_r representa el término fuente o sumidero de energía, generación por unidad de volumen.

Si se aplica el Teorema del Transporte, la ley de Fourier y la Ley de Stokes para obtener la ecuación diferencial de la energía, además de aplicar de forma análoga a las ecuaciones de masa y momento el Teorema de Gauss se obtiene la siguiente expresión, la *Ecuación 9*:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{1}{2} v^2 \right) \right] + \nabla \cdot \left[\rho \left(e + \frac{1}{2} v^2 \right) \vec{v} \right] &= \rho \frac{D}{Dt} \left(e + \frac{1}{2} v^2 \right) \\ &= \rho \vec{f}_m \cdot \vec{v} + \nabla \cdot (-p\vec{v}) + \nabla \cdot (\vec{\tau} \cdot \vec{v}) - \nabla \cdot \vec{q} + Q_r \end{aligned} \quad (9)$$

Para el primer miembro, el primer término expresa la variación local de la energía total por unidad de volumen y flujo convectivo de energía total, que pueden agruparse para formar la derivada sustancial de la energía total por unidad de volumen, en el último término de la ecuación se tiene el trabajo realizado por los flujos másicos, el trabajo de las fuerzas de presión, por unidad de volumen y tiempo, el flujo difusivo o molecular de calor por unidad de volumen y el término de generación de calor por unidad de volumen debido a la radiación y a las reacciones químicas que puedan acontecerse.[14]

Ecuación diferencial de la energía interna y cinética: La *Ecuación 9* para la energía total se suele separar en dos partes, una para la energía interna, y otra para la energía mecánica. Para obtener la ecuación de la energía cinética se puede multiplicar escalarmente la ecuación de momento: *Ecuación 7* por \vec{v} .

$$\rho \frac{D}{Dt} \left(\frac{1}{2} v^2 \right) = -\vec{v} \cdot \nabla p + \vec{v} \cdot (\nabla \cdot \vec{\tau}) + \vec{v} \cdot \rho \vec{f}_m \quad (10)$$

Para obtener la ecuación de la energía interna, basta con restar a la *Ecuación 10* y la *Ecuación 9*. Obteniendo la siguiente expresión:

$$\rho \frac{De}{Dt} = -p \nabla \cdot \vec{v} + \vec{\tau} : \nabla \vec{v} - \nabla \cdot \vec{q} + Q_r \quad (11)$$

Por último, para el cálculo del coeficiente de arrastre el programa se remite a todas las ecuaciones mencionadas anteriormente para encontrar un flujo totalmente desarrollado en todas las

zonas y encontrar la fuerza de arrastre que presentan las superficies seleccionadas, posterior a encontrar esta fuerza se remite a una integración numérica de superficie considerando los efectos de la presión y fricción del fluido para encontrar el coeficiente de arrastre en toda la superficie seleccionada.

Es importante destacar que el modelo matemático utilizado por “Fluent” para calcular el coeficiente de arrastre depende del tipo de flujo (laminar o turbulento) y del modelo de turbulencia seleccionado, ya que estos factores influyen en la forma en que se modela la interacción entre el fluido y el objeto en la simulación.

H. Pruebas de desaceleración

La prueba de desaceleración (“coast-down”) según la norma SAE-J1263 se utiliza para determinar la resistencia al avance de un vehículo en movimiento. La prueba consiste en la desaceleración de un vehículo de motor en una pista recta y plana, a partir de una velocidad inicial determinada, hasta llegar a una velocidad final establecida por la prueba, con el motor desembragado, determinando el tiempo que toma el vehículo en completar el delta de velocidades y la distancia recorrida durante la desaceleración. El ensayo permite determinar los coeficientes de resistencia a la rodadura y aerodinámica que presenta el automotor al realizar desaceleración libre en ruta.

A continuación, se resumen los pasos generales para llevar a cabo esta prueba:

- 1. Preparación del vehículo:** Se debe asegurar que el vehículo esté en condiciones óptimas y tenga los neumáticos inflados correctamente. Se debe verificar que los frenos estén en buen estado y no haya ningún problema mecánico.
- 2. Localización de la pista de prueba:** Buscar una pista de prueba adecuada y segura que cumpla con los requisitos de la norma SAE-J1263, sin niebla y sin lluvia, seca, limpia y lisa, con una inclinación de la pista menor a 1% y una velocidad del viento menor a 3m/s. Debe ser lo suficientemente larga y plana para permitir que el vehículo se desacelere completamente.
- 3. Instalación de los sensores:** Colocar los sensores necesarios en el vehículo para medir la velocidad, la aceleración y otros parámetros relevantes durante la prueba. Estos

sensores pueden incluir un velocímetro, un tacómetro, un acelerómetro, un GPS, entre otros.

4. **Desarrollo de la prueba:** El vehículo, con un rodaje de al menos 3000 km, limpio y con las ventanas y cualquier cubierta del sistema de aire acondicionado cerradas, se carga con la masa de referencia de acuerdo con los requisitos de la prueba específica, y se conduce hasta una cierta velocidad, luego se lleva a “neutra”. La velocidad máxima suele ser superior a 100 km/h, pero esto depende del ciclo de certificación; por ejemplo, en Europa es de 130 km/h y en Estados Unidos de 75 mph (120.7 km/h). Después de seleccionar “neutra” y desacoplar el motor del tren de transmisión, el vehículo comienza a disminuir su velocidad debido a la fricción y la resistencia aerodinámica.
5. **Registro de datos:** Durante el proceso de desaceleración, registrar los datos proporcionados por los sensores instalados. Estos datos pueden incluir la velocidad en intervalos regulares, la aceleración, la distancia recorrida, el tiempo transcurrido, entre otros.
6. **Cálculos y análisis:** Utilizar los datos recopilados para realizar los cálculos requeridos por la norma SAE-J1263. Estos cálculos pueden incluir la resistencia al avance, la resistencia a la rodadura, la resistencia aerodinámica, la eficiencia del sistema de transmisión, etc.

Es importante tener en cuenta que estos son pasos generales y que la norma SAE-J1263 proporciona detalles específicos sobre los procedimientos de prueba, los equipos requeridos, los parámetros a medir y los cálculos a realizar.

I. Constantes de absorción

Para la comprensión de los fenómenos físicos que ocurren con un vehículo en movimiento sobre una carretera es necesario realizar un balance de fuerzas en el vehículo, ver Ilustración 1, se obtiene la siguiente ecuación:

$$F_T = F_r + F_a + F_{gr} + F_{in} \quad (12)$$

La fuerza de rodadura (F_r) se define como:

$$F_r = c_{fr} W \cos\theta = c_{fr} m_v g \cos\theta \quad (13)$$

Depende del coeficiente de fricción entre la rueda y la pista (c_{fr}), la masa del vehículo (m_v), la aceleración de la gravedad (g) y la inclinación de la pista (θ).

La fuerza de arrastre (F_a) se define como:

$$F_a = \frac{1}{2} \rho_a c_d A_f V^2 \quad (14)$$

Depende de la densidad del aire (ρ_a), del coeficiente de arrastre (c_d), del área frontal del vehículo (A_f) y de la velocidad (V).

La resistencia debida al ángulo de inclinación de la pista es:

$$F_{gr} = W \sin \theta = m_v g \sin \theta \quad (15)$$

Por último, la inercia del vehículo se estima como:

$$F_{in} = \left(m_v + \frac{\sigma}{r_w^2} \right) \frac{dV}{dt} = \left(1 + \frac{\sigma}{m_v r_w^2} \right) m_v a \quad (16)$$

Depende de la inercia rotacional del motor σ , la masa del vehículo, el radio de las ruedas r_w y de la aceleración del vehículo a .

En la **Fig. 1** se puede observar la distribución de las fuerzas actuantes sobre un vehículo en movimiento.

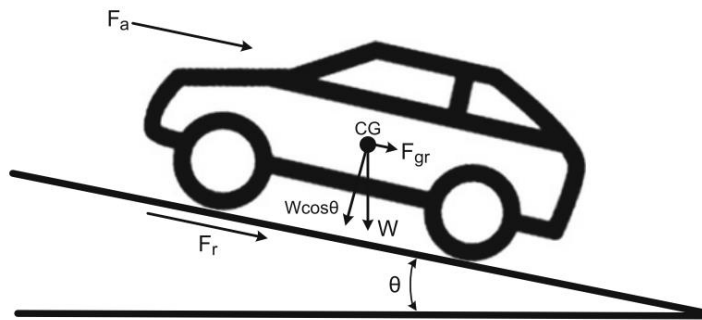


Fig. 1. Diagrama simplificado de fuerza [15].

Con base a lo anterior, el balance de fuerzas en el vehículo es:

$$F_T = c_{fr}(V) m_v g \cos \theta + \frac{1}{2} \rho_a c_d A_f V^2 + m_v g \sin \theta + \left(1 + \frac{\sigma}{m_v r_w^2} \right) m_v \frac{dV}{dt} \quad (17)$$

La ecuación anterior puede ser transformada en:

$$F_T = b_0 + b_1 V + b_2 V^2 + m_v \frac{dV}{dt} \quad (18)$$

Las constantes b_0 , b_1 y b_2 dependen de la fuerza de rodadura, la resistencia debida al ángulo de inclinación de la pista y a la fuerza de arrastre, respectivamente. Dado que las pruebas de desaceleración se realizan en pistas con muy poca inclinación, la resistencia debida al ángulo de inclinación F_{gr} se hace igual a cero.

Durante la prueba de desaceleración la ecuación se transforma en:

$$F_r + F_a = -m_v \frac{dV}{dt} \quad (19)$$

OBD (On Board Diagnostic)

¿Qué es?

OBD (On Board Diagnostics) es un sistema de diagnóstico a bordo en vehículos (automóviles, autobuses y camiones). Actualmente se emplean los estándares OBD-2 (Estados Unidos), EOBD (Europa) y JOBD (Japón) que aportan un monitoreo y control completo del motor y otros dispositivos del vehículo. Los vehículos pesados poseen una norma diferente, regulada por la SAE, conocida como J1939 [17]. En la **Fig. 2** se puede observar la estructura de los pines del OBD y en la **Fig. 3** se logra ver la interfaz física de diagnóstico OBD.

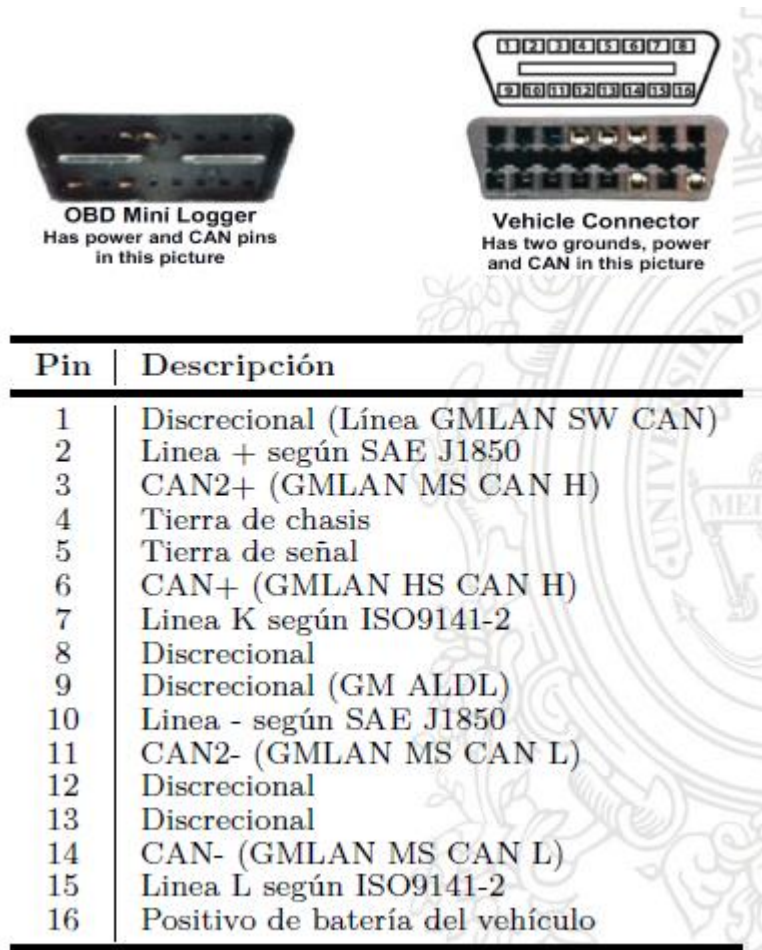


Fig. 2. Estructura de los pines OBD. [16]



Fig. 3. Interfaz de diagnóstico. [16]

¿Su historia?

Para reducir la contaminación del aire, la "California Air Resources Board" (CARB) determinó en 1988 que todos los automóviles a gasolina contaran con OBD (On Board Diagnostics), que controlara los límites máximos de emisiones y además un autocontrol, el On Board Diagnostics de componentes relevantes de las emisiones de gas a través de dispositivos de mando electrónicos. Para que el conductor detecte un mal funcionamiento del OBD se impuso la obligación de tener una lámpara que indique fallos (MIL - Malfunction Indicator Lamp).

Medidas más estrictas en los límites de emisiones en 1996 llevó a la creación del OBD 2. En Europa se introdujo el OBD ajustándose al OBD-2 americano. Desde 1996 el OBD 2 es un requisito legal para automóviles nuevos en Estados Unidos. Con base en esta regla americana se impuso en los noventa la inclusión de sistemas de diagnóstico también para los automóviles destinados al mercado europeo.

En Europa, según la Directiva 98/69EG, los automóviles a gasolina del año 2000 en adelante, los motores diésel de 2003 en adelante, y los camiones de 2005 en adelante tienen que estar provistos de un OBD. La interfaz estándar del OBD-2 no solamente es utilizada por el fabricante para sus funciones avanzadas de diagnóstico sino también por aquellos que van más allá de lo que la ley exige.

La siguiente etapa planeada es el OBD-3, en el que los propios automóviles se comunican con las autoridades si se produce un empeoramiento de las emisiones de gases nocivos mientras está en marcha. Si esto sucede se pedirá, a través de una tarjeta indicativa, que se corrijan los defectos. [16].

Protocolo CAN

Los mensajes son una cadena de bytes en sistema hexadecimal. El sistema hexadecimal tiene 16 dígitos que van desde el 0 hasta la F. En binario, cada dígito se llama bit que representa apagado/encendido (0 o 1). Un byte es un grupo de 8 bits. Un dígito hexadecimal representa 4 bits, por ejemplo, 0xF (\$F) está representado por 1111, o 0xDA (\$DA) está representado por 1101 1010.

- Byte 1: Prioridad.
- Byte 2: Identificador de las unidades de control (ECU).

- Byte 3: Modo de prueba.
- Byte 4: Identificador de parámetros (PID).

Para un vehículo liviano EURO IV los PIDs disponibles son 27, sin embargo, los más comúnmente utilizados pueden ser observados en la **TABLA I**.

TABLA I. PIDS COMÚNMENTE UTILIZADOS EN VEHÍCULOS LIVIANOS.

PID	Descripción	Mín.	Máx.	Unidad	Formula
1	Estado monitores de DTC borrado				
2	DTCs almacenados de un evento				
3	Estado sistema combustible				
4	Carga calculada motor.	0	100	%	100A/255
5	Temperatura de refriger.	-40	215	°C	A-40
0A	Presión comb.	0	765	kPa	3A
0B	Presión Abs. De Adm.	0	255	kPa	A
0C	Velocidad del motor	0	16383.75	rpm	(256A+B)/4
0D	Velocidad del vehículo	0	255	Km/h	A
0E	Tiempo de avance	-64	63.5	°BTDC	(A/2)-64
0F	Temperatura de adm.	-40	215	°C	A-40
10	Flujo de aire de Adm.	0	655.35	g/s	(256A+B)/100
11	Posición del acelerador	0	100	%	100A/255
33	Presión baro. Abs.	0	255	kPa	A
46	Temperatura de aire amb.	-40	215	°C	A-40
5C	Temperatura de aceite	-40	210	°C	A-40
5E	Flujo total de combustible	0	3212.75	L/h	(256A+B)/20

Modelo internacional (GEM)

¿Qué es?

GEM es un modelo de emisiones vehiculares desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) para estimar las emisiones de gases contaminantes y de gases de efecto invernadero de vehículos en funcionamiento.

¿Qué datos debo ingresar?

- # Simulación
- Clase del vehículo
- Mapas del motor

-
- RPM al ralentí
 - Mapas de la transmisión
 - Configuración del tren motriz
 - Relación final del eje
 - Mapas del eje
 - Área aerodinámica de arrastre
 - Resistencia a la rodadura del eje de tracción
 - Resistencia a la rodadura del eje de dirección
 - Tamaño de la llanta cargada

¿Qué datos me entrega?

- Fecha de simulación
- Valores brutos de emisiones de CO₂ (gCO₂/ton-mile)
- Valor bruto de consumo de combustible (gal/1000ton-mile)
- Valores límites de emisiones según la familia del vehículo (FEL)

¿Cómo encuentra el GEM los factores de emisión y eficiencia de combustible?

Posterior a ingresar los mapas e información solicitada por el GEM, los resultados producidos por el GEM incluyen procesos posteriores para calcular el valor ponderado final. El GEM produce gramos de CO₂ ponderados por ciclo/tonelada-milla y galones/1,000 toneladas-milla resultado que incorpora las ponderaciones del ciclo de manejo del ciclo transitorio ARB **Fig. 6**, ciclo de crucero de estado estable de 55 mph **Fig. 4** y ciclo de crucero de estado estable de 65 mph **Fig. 5**. [19].

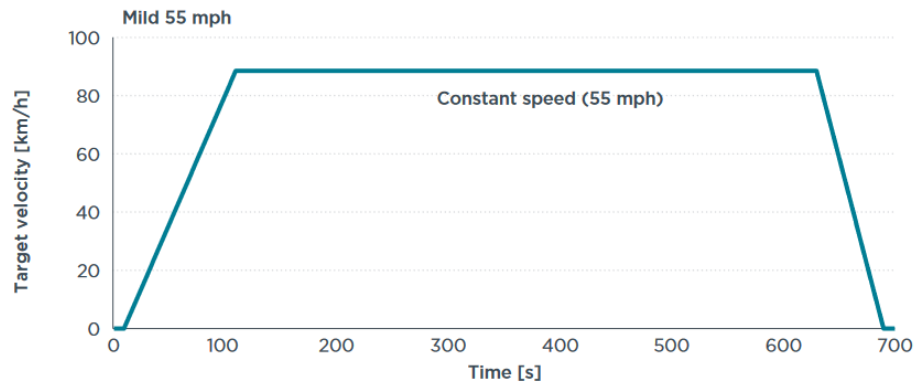


Fig. 4. Ciclo de conducción a 55 mph constante. [19].

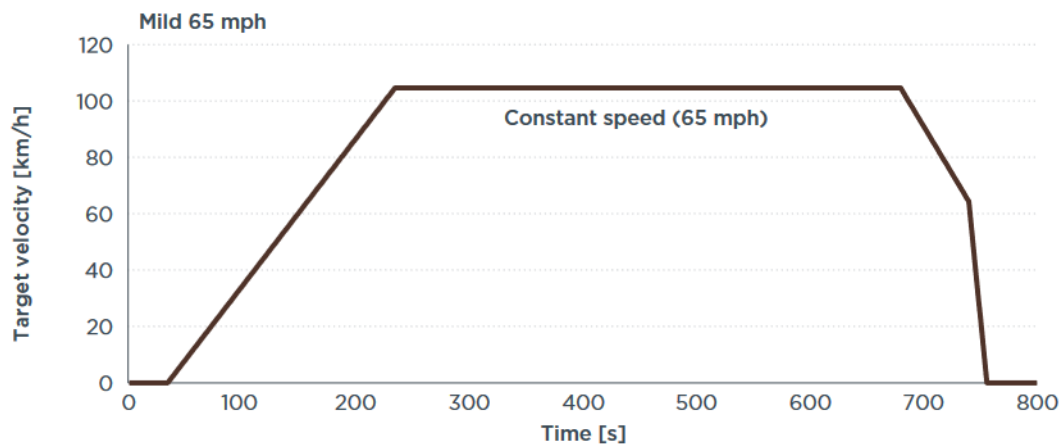


Fig. 5. Ciclo de conducción a 65 mph constante. [19].

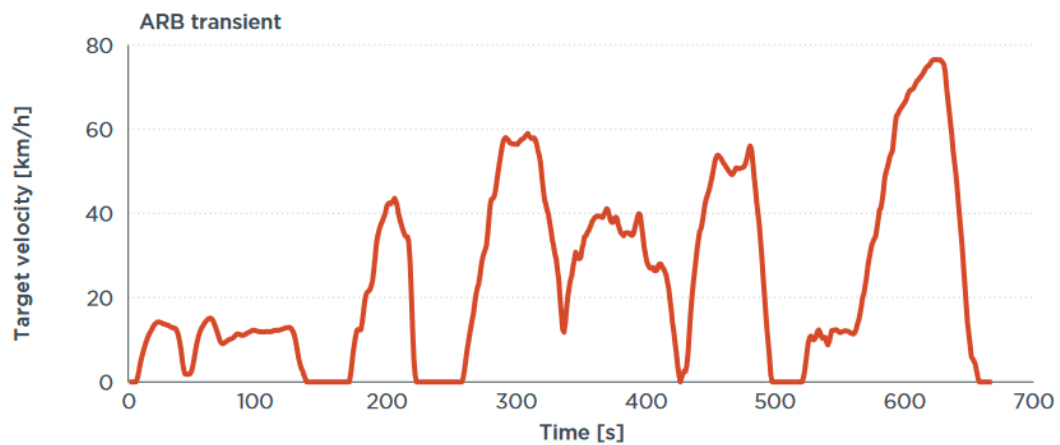


Fig. 6. Ciclo de conducción ARB. [19].

Modelo de cálculo usado por el modelo GEM

Con los parámetros ingresados el modelo hace una serie de cálculos para hallar todas las potencias consumidas por el vehículo punto a punto en los ciclos y hacer el siguiente balance de energías [20]:

$$P_{res} = P_{roll} + P_{air} + P_{acc} + P_{grad} + P_{transm} + P_{aux} \quad (20)$$

Donde P_{roll} es la potencia demandada o consumida por la Resistencia a la rodadura, P_{air} es la potencia consumida por la Resistencia al aire, P_{acc} es la potencia consumida por la aceleración del vehículo, P_{grad} es la potencia consumida gracias a los gradientes de la carretera, P_{aux} es la potencia consumida por los auxiliares, P_{transm} es la potencia consumida por las pérdidas de la transmisión. Las ecuaciones de cada potencia consumida se presentan a continuación.

$$P_{roll}: m_{veh} * g * (F_{ro} + F_{r1} * v_{veh} + F_{r4} * v_{veh}^4) * v_{veh} \quad (21)$$

Donde:

m_{veh} : Es la masa total del vehículo incluyendo la carga.

F_{ro}, F_{r1}, F_{r4} : Son los coeficientes de resistencia a la rodadura.

v_{veh} : Es la velocidad del vehículo.

g : Es la aceleración de la gravedad.

$$P_{air}: C_d * A_{cr} * \frac{\rho_{air}}{2} * v_{veh}^3 \quad (22)$$

Donde:

C_d : Es el coeficiente de arrastre aerodinámico del vehículo.

A_{cr} : Es el área frontal del vehículo.

ρ_{air} : Es la densidad del aire.

$$P_{acc}: (m_{veh} + m_{rot,eq}) * a_x * v_{veh} \quad (23)$$

Donde:

$m_{rot,eq}$: Masa equivalente de la inercia rotacional de las partes móviles de la transmisión, motor, llantas. Se calcula a partir de las relaciones de transmisión e inercias

a_x : Es la aceleración del vehículo.

$$P_{grad}: m_{veh} * g * \frac{\Delta h}{\Delta x} * v_{veh} \quad (24)$$

$$P_{transm}: A_0 * (P_{differential} + P_{gear,i}) \quad (25)$$

Donde:

A_0 : Es el factor de ajuste de pérdidas por transmisión del vehículo.

$$P_{aux}: P_0 * P_{rated} \quad (26)$$

Donde:

P_0 : Es la relación de potencias entre la consumida por los auxiliares y el motor.

P_{rated} : Es la potencia nominal del motor.

Posterior a calcular las potencias consumidas, y tener la potencia que el motor debe desarrollar para que el vehículo siga en movimiento según las condiciones del ciclo es necesario calcular las RPM del motor para ubicar el punto específico de consumo en los mapas ingresados por el usuario en el programa.

El cálculo para ubicar las RPM del motor es el siguiente:

$$n_{eng} = v_{veh} * 60 * i_{axle} * i_{gear} * \frac{1}{2 * r_e * \pi} \quad (27)$$

Donde:

i_{axle} : Relación de transmisión del eje.

i_{gear} : Relación de transmisión del engranaje actual.

r_e : Radio efectivo de rodadura.

El GEM simula estos 3 ciclos **Fig. 4-Fig. 6** calculando el valor de combustible utilizado gracias a los mapas entregados del motor el programa cuenta con características físico-químicas de varios combustibles preestablecidos donde se tiene densidad, fracción de carbón presente en el combustible y gCO₂ por galón. Gracias a estos datos es posible extraer el factor de emisión del CO₂ y la eficiencia de combustible en el promedio de estas 3 pruebas.

Combustible usado por el modelo GEM

El comparativo de las propiedades del combustible utilizado por el modelo GEM y el utilizado en Colombia [21] y [22] pueden ser apreciado en la **TABLA II**:

TABLA II. COMPARATIVO DE COMBUSTIBLES UTILIZADOS POR EL MODELO GEM Y EN EL TRANSPORTE COLOMBIANO.

Tipo de diésel	GEM	Colombia	% Diferencia
Densidad energética [KJ/Kg]	43.10	43.83	1.70%
Fracción másica del carbono	0.87	0.86	1.83%
[g CO ₂ /galón]	10180	10144.91	0.34%

III. METODOLOGÍA

La metodología desarrollada en este informe se aprecia esquemáticamente en la **Fig. 7** donde se visualiza los dos caminos principales para la extracción de factores de emisión.

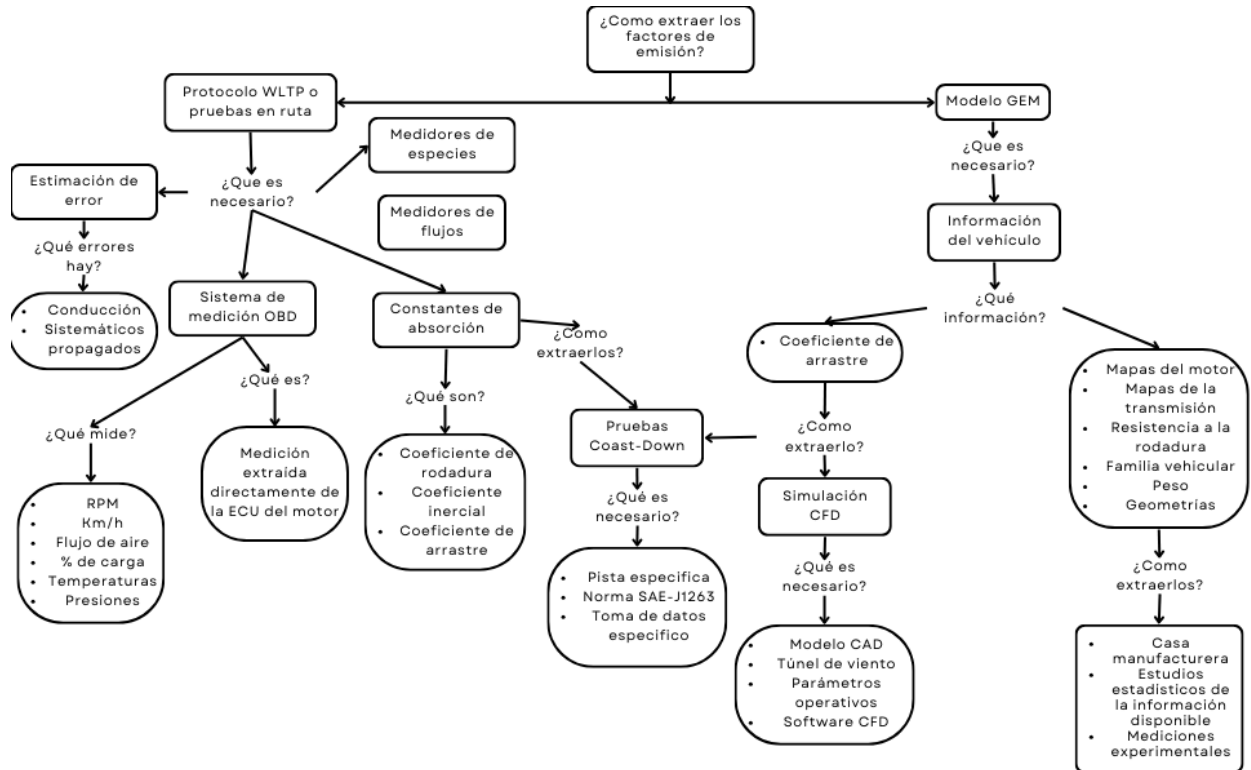


Fig. 7. Flujograma de la metodología seguida para la extracción de factores de emisión en vehículos.

Caracterización del objeto de estudio

El vehículo objeto de estudio es seleccionado gracias a su gran representación en el contexto de transporte de carga urbano y rural en Colombia, ya que, este vehículo es ampliamente utilizado en la industria de transporte de alimentos, cargas medias y cárnicos con 2471 unidades en el país [23].

Especificaciones del vehículo

Las dimensiones y capacidad del vehículo objeto de estudio pueden observarse en la

TABLA III:

TABLA III. PESO Y DIMENSIONES DEL VEHÍCULO OBJETO DE ESTUDIO.

Dimensiones	
Longitud total	5.4 [m]
Altura total	3 [m]
Ancho total	2.1 [m]
Área frontal	6.37 [m ²]
Pesos	
Peso total	3520 [Kg]

Las especificaciones del motor del vehículo necesarias para el análisis de la combustión y emisiones gaseosas emitidas por éste pueden apreciarse en la **TABLA IV**.

TABLA IV. ESPECIFICACIONES DEL MOTOR DEL VEHÍCULO OBJETO DE ESTUDIO.

Especificaciones del motor	
Marca/Código	ISUZU 4JH1-TC
Desplazamiento	3000 [cc]
Potencia	104 @ 2800 [hp @ rpm]
Número de cilindros	4
Torque plano	23.5 @ 1400-3200 [kg-m @ rpm]
Nivel de emisiones	Euro IV
Combustible	Diésel

Cálculo de y+

Con el fin de captar todos los fenómenos de capa límite del fluido para el flujo externo a través del automóvil se requiere calcular el Y+ utilizando la calculadora online de “Volupe” [24] Obteniendo los resultados apreciados en la **TABLA V** para una velocidad de 80 km/h a condiciones de 25°C y 101.325 kPa.

TABLA V. CÁLCULO DEL TAMAÑO DE LA PRIMERA CELDA PARA UN Y+ DE 1 A UNA VELOCIDAD DE 80 KM/H.

Parámetros de ingreso	
Velocidad	22.22 [m/s]
Densidad	1.2 [kg/m ³]
Viscosidad dinámica	1.8e-5 [kg-m/s]
Longitud característica	5.4 [m]
Y+ deseado	1
Parámetros de salida	
Viscosidad cinemática	1.5e-5 [m ² /s]
Reynolds	8019961.5
Altura de la primera celda	1.9e-5 [m]

Modelado de la geometría externa del vehículo semi-pesado

Posterior a tener todas las dimensiones, definiciones y cálculos preliminares se procede a ingresar al programa para la creación de la malla del volumen de control.

Para tener un modelo 3d con las mismas características del camión NHR, se procedió a hacer la metodología de calcado de foto en el programa de diseño “SpaiceClaim”, la escala fue 1:1. El resultado del desarrollo de la superficie del vehículo mediante la metodología de calcado de foto se puede observar en la **Fig. 8**.



Fig. 8. Superficie creada por el ajuste de un contorno a una foto del vehículo.

Posteriormente en el programa “Design Modeler” [25] se procede a simplificar la superficie de manera que más adelante no se presenten puntos de estancamiento en las simulaciones, obteniendo como resultado la superficie presentada en la **Fig. 9**:

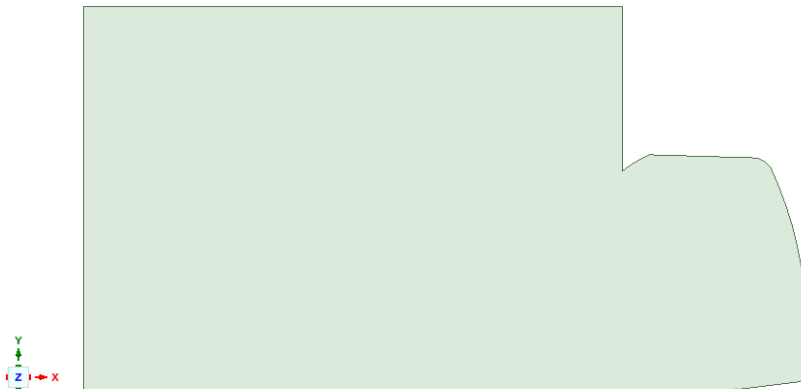


Fig. 9. Superficie simplificada.

Generación del volumen de control

Después de obtener la superficie se procede a realizar el túnel de viento con la herramienta “Enclosure” de “Design modeler” donde las dimensiones se dan gracias a las siguientes normas:

- Área transversal: El área frontal del vehículo de $6,34 \text{ m}^2$ no debe ser mayor al 5% del área de la sección transversal del túnel [26] esto con el fin de evitar efectos de bloqueo. Se establece un túnel con un área trasversal de 140 m^2 .

- Longitud: La longitud del túnel de viento debe garantizar que el fluido antes y después del objeto de interferencia no tenga efectos de bloqueo en el flujo gracias a este. Por lo tanto, es recomendado como mínimo que el túnel antes y después del vehículo tenga 5 veces su longitud. [7] y [26].

Los valores seleccionados para el túnel de viento fueron 6 veces aguas arriba y 12 veces aguas abajo del vehículo. El resultado del área de control con sus dimensiones geométricas máximas y fronteras principales puede ser observada en la **Fig. 10**.

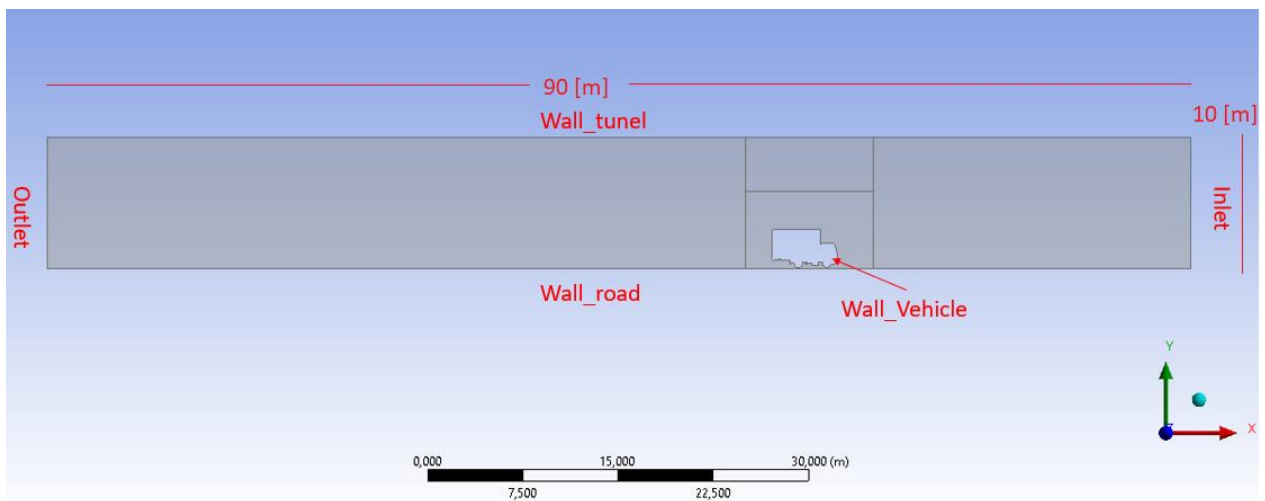


Fig. 10. Superficie de control de control (túnel de viento).

Por último, mediante la herramienta “Boolean” del “design modeler” se extrae la geometría del vehículo al túnel de viento, esto para que el programa entienda que este “hueco” es la geometría de interferencia en el túnel de viento. También se hace una partición de la superficie mediante la herramienta “Slice” para poder desarrollar la función de organizar la malla en zonas o superficies “mapeables¹” mediante la herramienta “Face meshing” para tener una malla más estructurada.

Generación de la malla del volumen de control.

Para el mallado del túnel de viento se utiliza el programa “Meshing” donde se logra una malla estructurada con preferencia de mallado para el software “Fluent”[27], posteriormente se hacen las simulaciones refinando el tamaño de esta cerca de la superficie exterior del camión, ya

¹ Del inglés “Mapeable” que significa las caras del dominio computacional las cuales pueden ser organizadas con elementos tetraédricos para mejorar su calidad. Es necesario que estas caras estén delimitadas por cuatro bordes.

que los fenómenos de turbulencia ocurren allí. Gracias a la herramienta de mallado “Inflation” se le da el tamaño vertical de la primera celda requerido por el problema calculado anteriormente en la TABLA V. Luego, en las fronteras de la superficie, se le da un número de divisiones correspondiente para que la relación de aspecto sea máxima de 100 y gracias a esto y al “Face meshing” hecho en las caras “mapeables” tener una buena calidad de malla que genere una rápida convergencia y resultados aproximados a la realidad. En las **Fig. 11** y **Fig. 12** puede observarse la malla resultante:

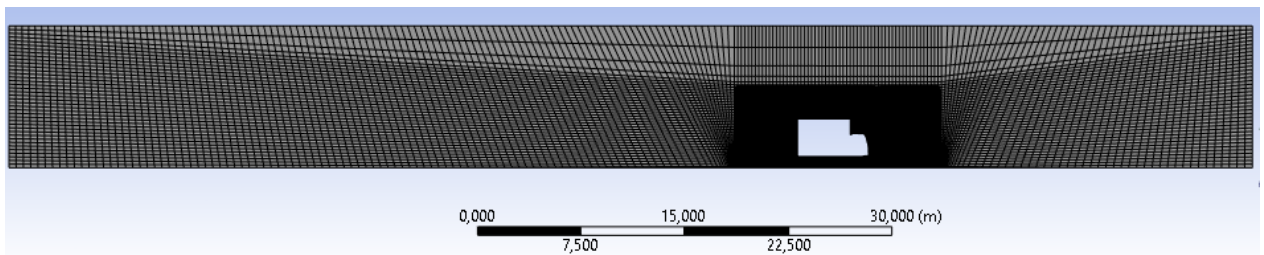


Fig. 11. Mallado resultante del área de control.

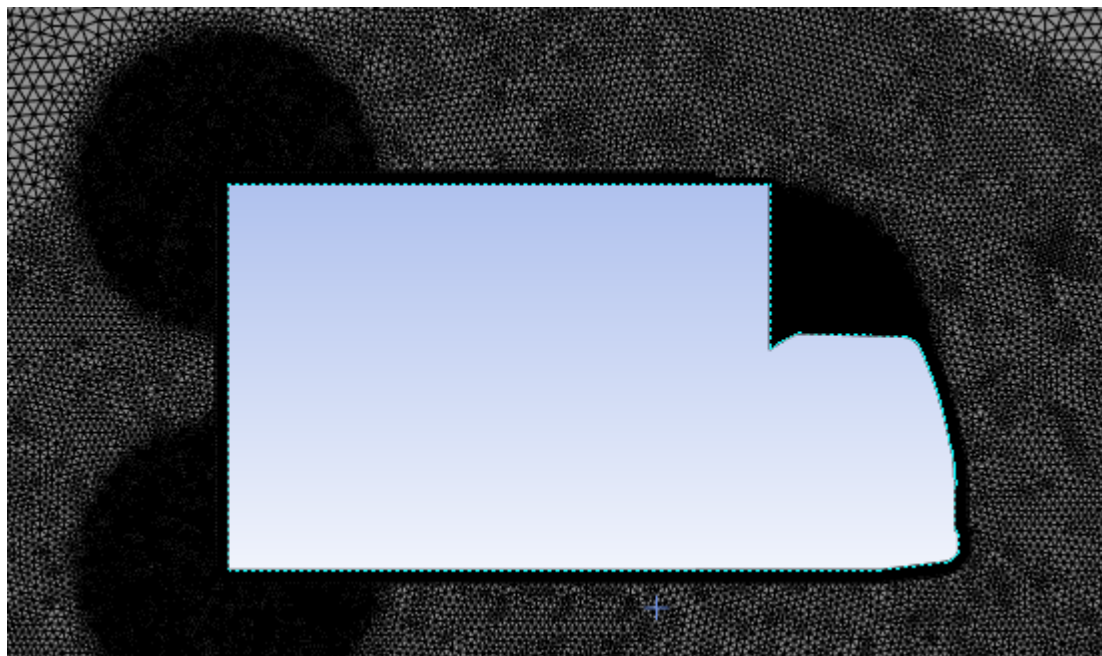


Fig. 12. Mallado resultante del área aledaña a la superficie del vehículo.

Configuración del programa de simulación.

Posteriormente se ingresa al programa “Fluent” para establecer las configuraciones adecuadas para lograr una simulación bajo condiciones de funcionamiento real.

Elección del modelo: En este paso se elige el modelo viscoso apropiado para describir los fenómenos de turbulencia que ocurren en el volumen computacional. El modelo k-Omega SST es el modelo más recomendado por distintos autores [7] y [28].

Materiales: En la configuración de los materiales es donde se le dan las especificaciones al fluido que será aire como gas ideal incompresible, además de esto la viscosidad se cambia de constante a una condición llamada “Sutherland” que es más adecuada para este caso. Para esto es necesario activar la ecuación de la energía. El material de la superficie se deja por defecto, ya que, este no tiene ningún efecto en el tema a estudiar.

Entrada (Inlet): En esta condición de frontera se establece las condiciones de entrada del fluido al área o superficie de control tales como presión de entrada, velocidad y dirección del fluido. Posteriormente se configura una intensidad de turbulencia del 5% con base al modelo k-Omega SST y un diámetro hidráulico de entrada que es la altura del túnel de viento de 13.25 m. Para las características termodinámicas de la entrada se establece una temperatura de 300 K.

Salida (Outlet): En esta condición de frontera se establece las condiciones de salida del fluido del área o superficie de control donde se tiene una salida de presión.

Pared de la carretera: Esta condición es especialmente importante, ya que, es la que predice el movimiento relativo de la autopista o ruta sobre el vehículo, esta condición es una pared móvil con la misma velocidad y dirección de la del fluido. Cabe resaltar que la pista tiene una condición de no deslizamiento.

Pared del túnel: Gracias a que en la realidad no se tiene una frontera física encima de un vehículo cuando este está rodando por la carretera se establece que la frontera superior del túnel es una frontera estacionaria con una condición especial para que allí no haya fenómenos de capa límite o turbulencia.

Pared del vehículo: Para hacer que el vehículo sea el objeto obstructor del fluido en el volumen de control es necesario realizar una condición de no deslizamiento en todas las paredes del vehículo.

Valores de referencia: En la **Fig. 13** se pueden apreciar los valores de referencia del sistema, es necesario aclararle al programa que estos valores de referencia se computan desde la entrada y la zona de referencia es toda el área de control.

Reference Values	
Area [m ²]	6.368132
Density [kg/m ³]	1.176655
Depth [m]	1
Enthalpy [J/kg]	0
Length [m]	5.435
Pressure [Pa]	0
Temperature [K]	300
Velocity [m/s]	22.22
Viscosity [kg/(m s)]	1.84618e-05
Ratio of Specific Heats	1.4
Yplus for Heat Tran. Coef.	300

Fig. 13. Valores de referencia utilizados en la simulación para una velocidad de 80 km/h.

Condiciones de operación: Aquí se le da principalmente la presión atmosférica al problema, la gravedad no será objeto de estudio para el problema.

Métodos: La configuración de los métodos utilizados en la simulación puede apreciarse en la Fig. 14.

The image shows a software interface for simulation settings. It is divided into two main sections: 'Pressure-Velocity Coupling' and 'Spatial Discretization'.
Under 'Pressure-Velocity Coupling', the 'Scheme' is set to 'Coupled' and the 'Flux Type' is 'Rhie-Chow: momentum based' with an 'Auto Select' checkbox checked.
Under 'Spatial Discretization', the following settings are shown:
- Gradient: Least Squares Cell Based
- Pressure: Second Order
- Momentum: Second Order Upwind
- Turbulent Kinetic Energy: Second Order Upwind
- Specific Dissipation Rate: Second Order Upwind
- Energy: Second Order Upwind
At the bottom, the 'Pseudo Time Method' is set to 'Global Time Step'.

Fig. 14. Métodos utilizados en la simulación.

Controles: Estos valores se dejan por defecto en el modelo. Pueden ser apreciados en la **Fig. 15.**

The image shows a panel titled 'Pseudo Time Explicit Relaxation Factors'. It contains several input fields with the following values:
- Pressure: 0.5
- Momentum: 0.5
- Density: 1
- Body Forces: 1
- Turbulent Kinetic Energy: 0.75
- Specific Dissipation Rate: 0.75
- Turbulent Viscosity: 1
- Energy: 0.75

Fig. 15. Controles utilizados en la simulación.

Residuales: En esta configuración se disponen las condiciones de los residuales para la convergencia de la simulación, se plantean residuales con la magnitud de 10^{-12} para todas las ecuaciones, esto con el fin de reducir la incertidumbre de la solución.

Inicialización: En esta configuración se procede a plantear una configuración estándar con inicialización en todas las zonas del área de control.

Cálculo y chequeos: Posterior a darle al programa un numero de iteraciones y un time step por defecto, se procede a observar los residuales y la definición seleccionada (Coeficiente de arrastre). La simulación converge cuando estas dos graficas mencionadas toman un valor asintótico, si aún estos fluctúan es necesario aumentar el número de iteraciones.

Estudio de independencia de mallado

Con el fin de garantizar la convergencia de la simulación y calidad del mallado sin que se vea comprometido el costo computacional es necesario realizar un estudio de independencia de mallado.

Según la **TABLA VI**, se nota que existe realmente poca variación en los resultados, aunque se hayan realizado tres mallas diferentes en las cuales la relación de elementos en proporción es superior a 1.3 tal como lo indica la asociación de ingenieros [29]. La variable de estudio es el coeficiente de arrastre para el cálculo de los errores relativos. Cabe resaltar que las simulaciones para la independencia de mallado se hicieron a condiciones del nivel del mar.

TABLA VI. ESTUDIO DE INDEPENDENCIA DE MALLADO.

Malla	Numero de celdas	Rango Y+	Cd	Errores
Burda	479413	0-1.8	0.38	1%
Media	668376	0-1.8	0.39	3%
Fina	889607	0-1.8	0.38	0%

Características geométricas de la malla seleccionada

En las **Fig. 16-Fig. 18** se presentan las características de la malla burda, ya que con esta se realizarán las simulaciones.

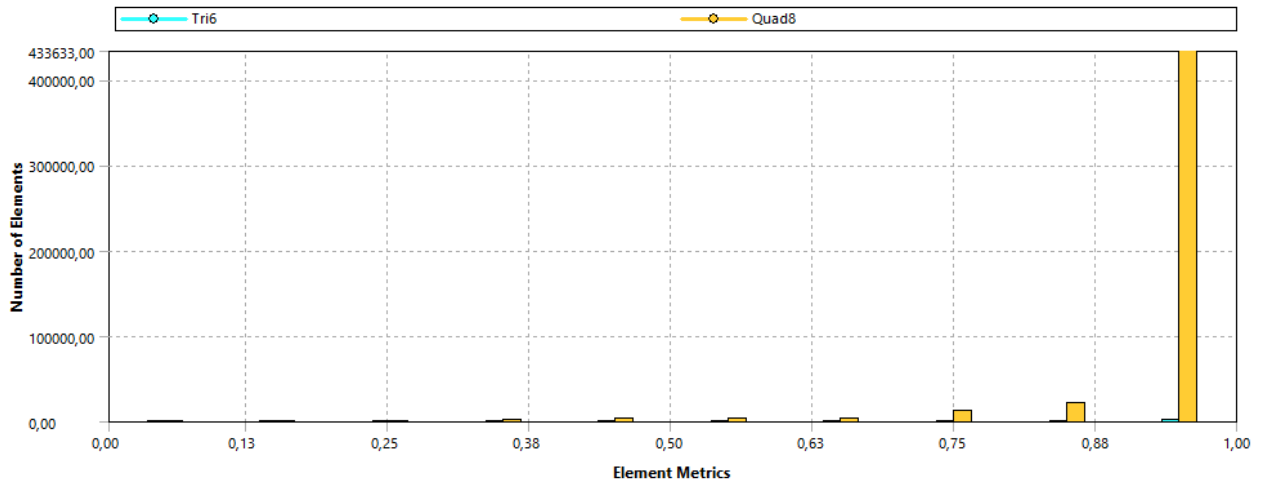


Fig. 16. Calidad ortogonal de la malla.

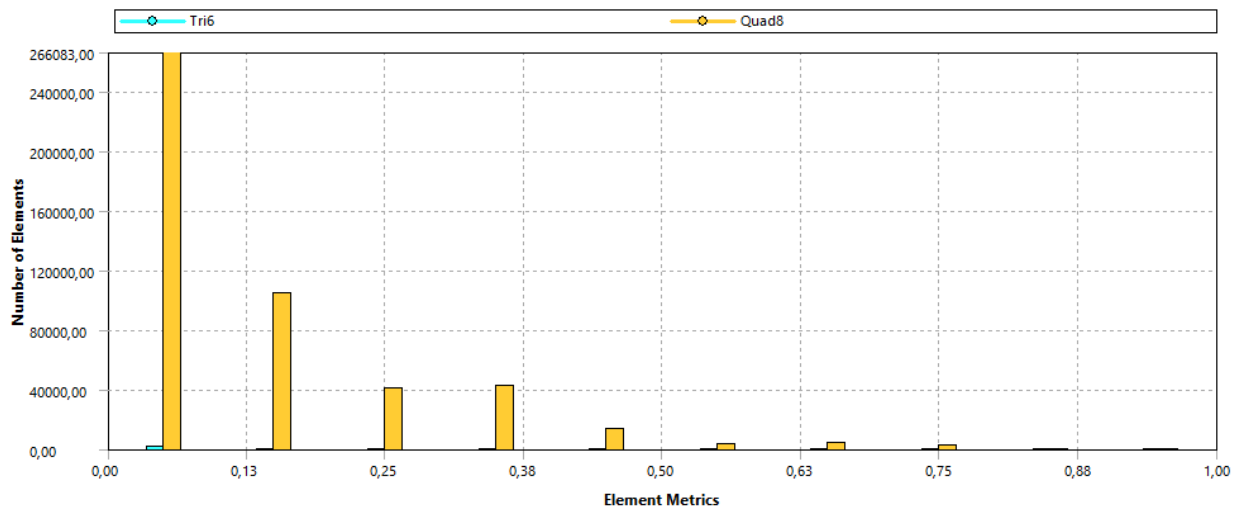


Fig. 17. Oblicuidad de la malla.

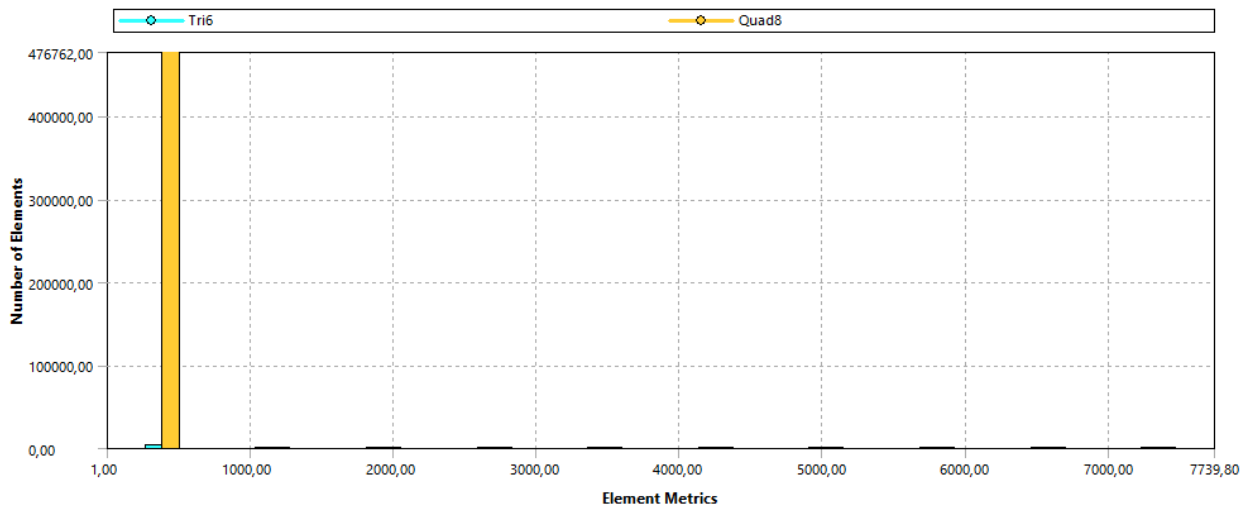


Fig. 18. Relación de aspecto de la malla.

Metodología pruebas Coast Down.

Para realizar estas pruebas es necesario realizar una verificación de ciertos aspectos para garantizar la certeza de los datos recolectados según la norma SAE J1263.

Verificación

- Vehículo: Calentar el vehículo (> 30min a >80 km/h), revisar luces, revisar frenos, revisar fluidos, verificar extintores, cinturones de seguridad, labrado original de las llantas (> 75%), uso de las llantas (>160 km), verificar altura de suspensión, verificar alineación y balanceo. El vehículo debe superar los 6450 km de recorrido (anotar el kilometraje actual).
- Pista: verificar condiciones sin niebla y sin lluvia, seca, limpia y lisa. inclinación de la pista (< 1%).
- Ambientales: Temperatura ambiente entre 5°C y 32°C, velocidad del viento (<16 km/h) al inicio y al final de la pista, velocidad del viento perpendicular al recorrido (<8 km/h).
- Realizar pruebas de a pares en dirección opuesta (5), evitar cambios de carril, capacitar al conductor (objetivos generales de la prueba, procedimiento, procedimientos de seguridad, cancelación de prueba).
- Dependiendo de la longitud de la pista es posible fragmentar la prueba.
- Medir variables ambientales al inicio y final de la pista de pruebas.
- Desconectar o dejar inoperante el sistema de acondicionamiento de aire del vehículo y otros equipos auxiliares como sistemas de iluminación y entretenimiento.
- Realizar recorrido piloto a lo largo de la pista a una velocidad constante entre 40 km/h y 60 km/h, registrar las variaciones de nivel de la pista con un OBDII o sistema GPS.

- Ajustar la presión de los neumáticos de acuerdo con las recomendaciones del fabricante o a las especificaciones de la etiqueta del neumático.
- Las mediciones deben realizarse a una altura aproximada de 70 cm de la pista de ensayos.
- Realizar los ensayos con el tanque de combustible y demás fluidos llenos.

Procedimiento de las pruebas de desaceleración

Posterior a entender estas definiciones y estudiar la norma SAE-J1263, se procede a realizar las pruebas de desaceleración.

Las pruebas se realizaron en la autopista Medellín- Bogotá entre los municipios de Guarne y Marinilla el 9 de agosto de 2022 entre las 10 p.m. y las 12:00 a.m. La ruta seguida durante la prueba puede apreciarse en la **Fig. 19**.



Fig. 19. Recorrido para las pruebas.

El mapa de altimetría de la ruta se muestra en la **Fig. 20**. Se debe anotar que en el porcentaje de inclinación promedio es 1.2%.



Fig. 20. Altimetría de la ruta.

Se obtuvieron los valores de velocidad guardados en un escáner vehicular conectado al puerto OBDII en cada una de las pruebas. Los valores extraídos pueden apreciarse en las **Fig. 21** y **Fig. 22**.

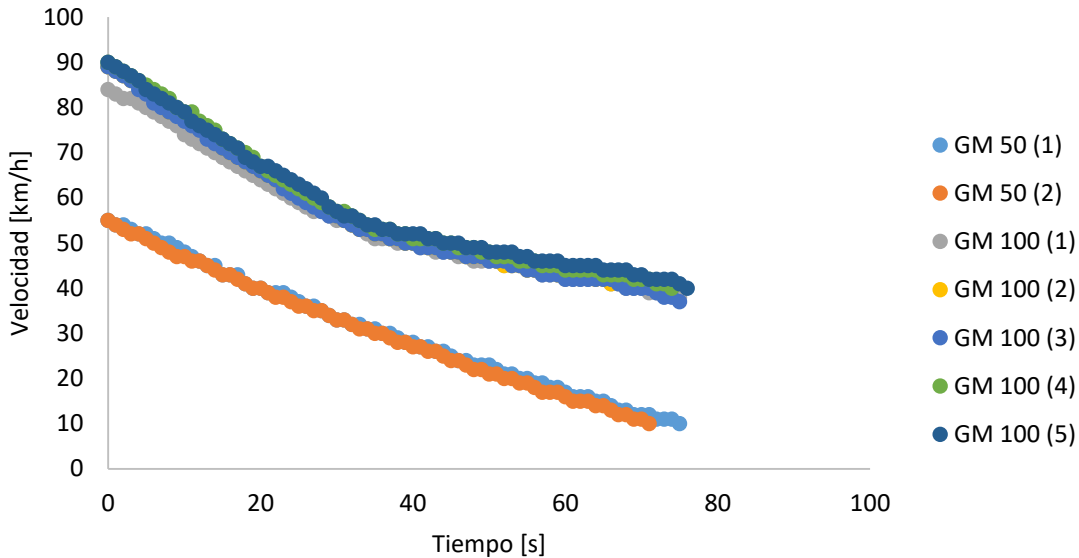


Fig. 21. Perfil de velocidad obtenido en el trayecto Guarne-Marinilla.

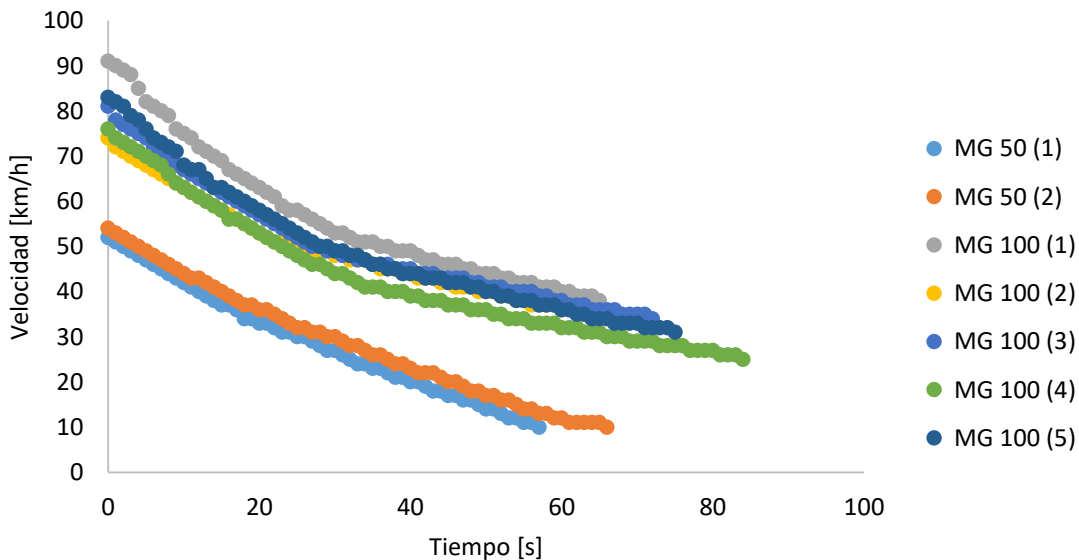


Fig. 22. Perfil de velocidad obtenido en el trayecto Marinilla-Guarne.

Para más información acerca del procedimiento de extracción de la fuerza de oposición en función de la velocidad remitirse al capítulo de libro [30]

Metodología para la obtención de factores de emisión de pruebas en dinamómetro

Para lograr extraer los factores de emisión de las especies gaseosas es necesario primero extraer los datos de los equipos de medición ya sea en estado estacionario o transitorio. Posteriormente se debe hacer un post-procesamiento y análisis de los datos, donde, mediante ecuaciones termodinámicas, es posible llegar a los resultados deseados.

Montaje del laboratorio móvil en el dinamómetro.

Inicialmente se ha verificado el estado mecánico del motor, analizando también la estanqueidad en el ducto de escape para corregir cualquier tipo de fugas o recirculación de aire que puede afectar las lecturas de los analizadores de gases. Se han instalado adaptadores en el ducto de escape que permitan el acceso rápido de las sondas de los analizadores a utilizar y el uso de un termopar tipo K que posibilite la lectura de la temperatura de los gases de escape. Los analizadores de gases se han calibrado de acuerdo con las recomendaciones de los fabricantes.

En la **Fig. 23** es posible observar la distribución de los equipos de medición dentro del camión. En la **Fig. 24** puede apreciarse el montaje del vehículo en el dinamómetro de rodillos.

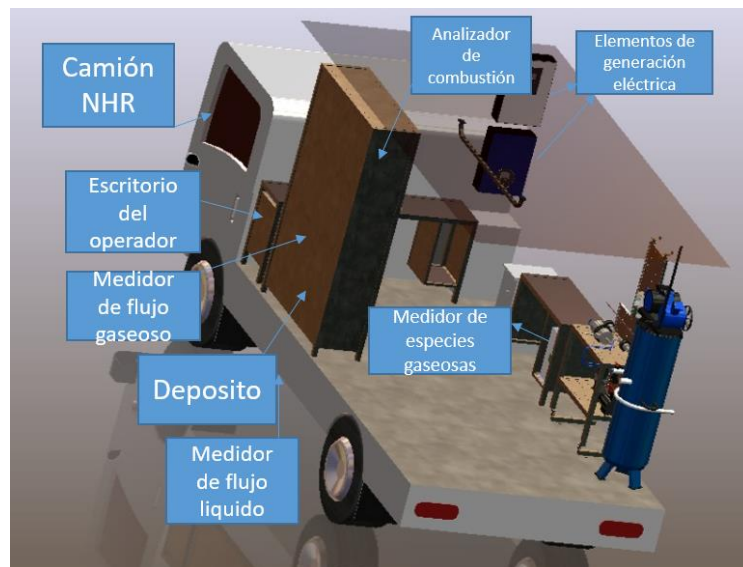


Fig. 23. Distribución de los equipos de medición en el vehículo.



Fig. 24. Fotografía de montaje del vehículo en el dinamómetro de rodillos.

Una vez anclado el vehículo en el dinamómetro, es sujetado al piso mediante 4 eslingas de seguridad, además se desactiva el control anti derrape una vez se accionan los rodillos. En todas las pruebas se necesitaron un conductor para el vehículo, un operador para el equipo de medición de material particulado, así como un operador el equipo de especies gaseosas y dos operadores en el dinamómetro; uno para el control del dinamómetro por medio del software y otro en la parte de seguridad y operación de los accesorios del dinamómetro, como ventiladores de convección para el motor del vehículo y dinamómetro. En total 6 operarios son necesarios para las pruebas realizadas. Los periodos de tiempo de espera entre cada réplica están alrededor de 15 a 20 minutos ya que la operación del dinamómetro así lo indica con el fin de evitar sobrecalentamientos.

En la **Fig. 25** Es factible observar el esquema de medición de emisiones contaminantes en un dinamómetro de rodillos, donde se distingue un flujo de gases de escape extraídos para realizar mediciones de especies gaseosas, así como otro flujo destinado a la medición de material particulado. Además de estas mediciones en el escape, se requiere también la medición de flujos líquidos y gaseosos que ingresan al motor. Es importante destacar que el medidor de flujo líquido debe contar con una conexión para el retorno, ya que los motores diésel modernos no inyectan la totalidad del combustible hacia el riel de inyección, sino que hay un cierto porcentaje variable que retorna al tanque.

En el esquema, también se puede apreciar un flujo continuo de información desde los medidores hacia una unidad de análisis, y esto es posible gracias a la utilización de una tarjeta de adquisición y programación que se integra con interfaces gráficas a través de LabView.

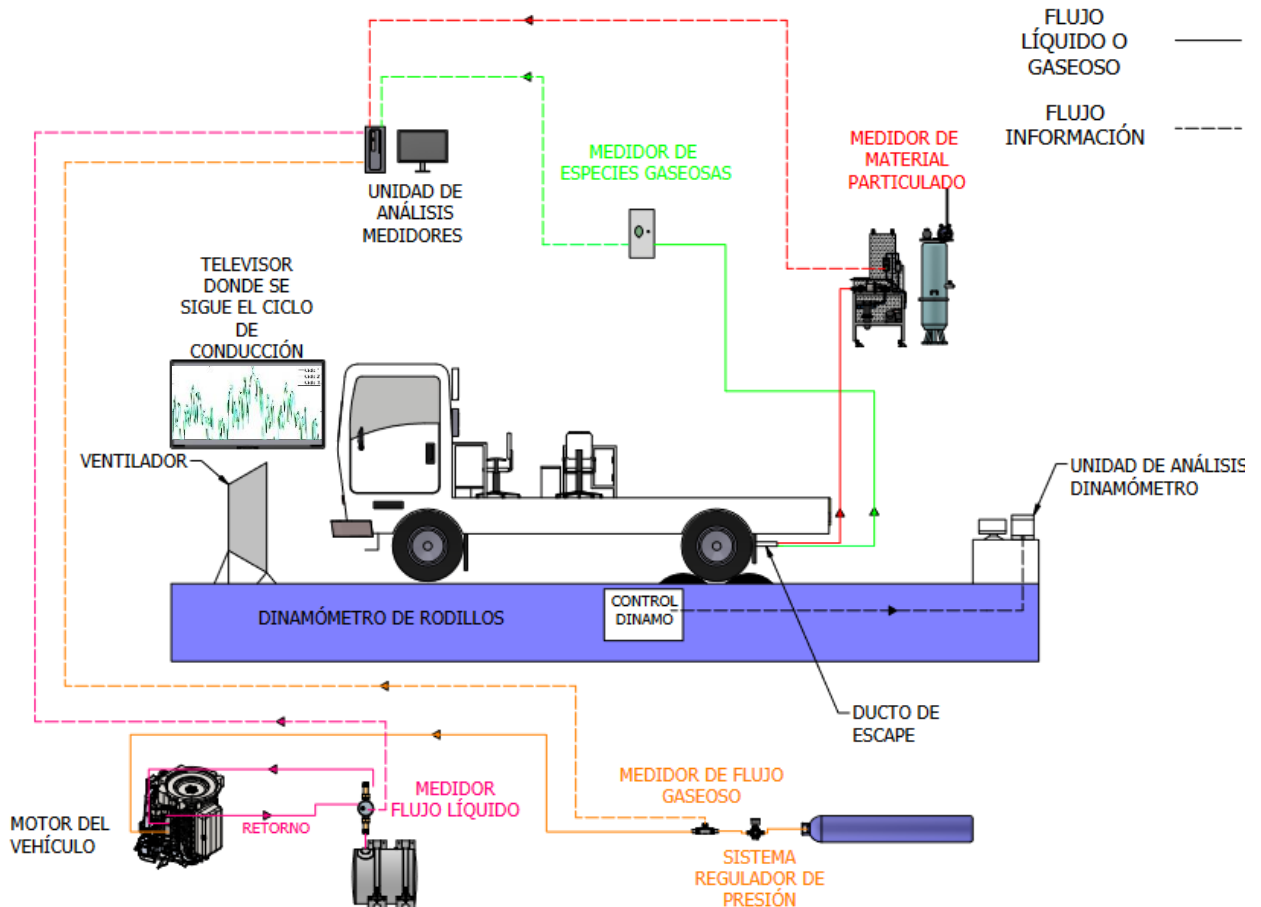


Fig. 25. Esquema de medición en el laboratorio móvil.

El protocolo a seguir, para la extracción de información de los medidores es el siguiente:

Chequeos: Antes de empezar cualquier medición es necesario chequear que todos los equipos se encuentren con las conexiones, filtros, ajustes, sujeciones y limpieza correcta.

Sincronización de relojes: Es necesario sincronizar los relojes de la unidad de análisis del dinamómetro y de los medidores, ya que, al momento de realizar un análisis de combustión y emisiones es preciso que las variables se encuentren en fase.

Calentamiento de equipos: Para preservar la integridad de los equipos de medición y del dinamómetro de rodillos, se recomienda seguir las indicaciones de los manuales de operación, que sugieren un período de calentamiento previo antes de iniciar las mediciones.

Medición y monitoreo: En el momento de la medición es de vital importancia que cada equipo tenga un operario capacitado para monitorear su estado, errores que salgan en su interfaz gráfica, temperaturas de operación y cualquier solicitud emergente que resulte en la operación de estos.

Seguridad: Es indispensable que los operarios se encuentren capacitados en seguridad en pruebas de dinamómetro de rodillos, y tengan el equipamiento necesario para estas pruebas: mascarilla, bata u overol, botas de seguridad y protector de oídos.

Análisis de los datos y extracción de los factores: Para obtener los factores de emisiones y los datos de eficiencia en el consumo de combustible a través de las pruebas en el dinamómetro, se emplearon los siguientes equipos de medición:

Equipos necesarios para la extracción de los factores de emisión

Medidor de especies gaseosas: Para la medición de especies gaseosas, se utilizó un analizador de gases CAPELEC a bordo del vehículo, con un sistema de filtros incorporados y un programa de adquisición de datos en tiempo real para su uso en motores diésel y en pruebas en transitorio, respectivamente. El equipo censa la concentración de 5 gases, monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrocarburos sin quemar (base propano), oxígeno (O₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x). Para la medición de O₂ se tiene una celda electroquímica, mientras que para los demás gases se tiene una única celda que opera bajo el principio de “infrarrojo no dispersivo” (NDIR por sus siglas en inglés). Las características principales del equipo de medición pueden apreciarse en la **TABLA VII**.

TABLA VII. CARACTERÍSTICAS DE RESOLUCIÓN Y PRECISIÓN DEL MEDIDOR DE ESPECIES GASEOSAS CAPELEC.

Parámetro	Valor
Rango, resolución y precisión- medidor de CO	0% a 15% vol., 0.01% vol., 0.03% vol. o 3%
Rango, resolución y precisión- medidor de CO ₂	0% a 25% vol., 0.1% vol., 0.4% vol. o 4%
Rango, resolución y precisión- medidor de HC	0 a 20000 ppm 1 ppm., 10 ppm. o 5%
Rango, resolución y precisión- medidor de O ₂	0% a 25% vol., 0.01% vol., 0.1% vol. o 3%
Rango y resolución - medidor de NO _x	0 a 5000 ppm, 1 ppm
Tiempo de respuesta [s]	28 s para O ₂ <5s para los demás

Temperatura de operación recomendada [°C]

-10 a 55

Medidor de flujo de combustible líquido: Este es un medidor de caudal de efecto hall, en el cual se tiene una primera cavidad de volumen fijo por el cual atraviesa el fluido que viene desde el tanque de combustible hasta el riel de inyectores y una segunda cavidad de volumen j_0 por el cual atraviesa el fluido que viene de los inyectores al tanque de combustible o retorno. Cuando el fluido llena alguna de las cavidades genera que se mueva un elemento metálico, el cual es detectado por un sensor de proximidad que genera una señal de voltaje indicando que ha atravesado un determinado volumen de líquido por el medidor. Dado que, en un motor diésel, no todo el combustible que llega al riel de inyectores se inyecta al interior del cilindro, sino que una porción se retorna al tanque, el medidor genera un pulso de volumen neto teniendo en cuenta las señales de los sensores de proximidad para la línea tanque-inyectores y la línea inyectores-tanque. En la **TABLA VIII** es posible apreciar las principales características del medidor de flujo líquido.

TABLA VIII. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL MEDIDOR DE FLUJO LÍQUIDO.

Parámetro	Valor
Flujo volumétrico min/máx. [l/h]	50/250
Pulsos por litro	80
Presión nominal/máxima de combustible [MPa]	0.2/2.5
Viscosidad cinemática del fluido min/máx. [mm ² /s]	1.5/60
Temperatura de operación [°C]	-40 a 85

Medidor de flujo gaseoso: Se instaló un medidor de marca Aalborg, este medidor opera bajo el principio de caída de presión en un conducto con restricción de área, en donde el área de la restricción y antes de la restricción son conocidas. De este modo, la caída de presión es proporcional a la velocidad del flujo que pasa por la restricción, y conociendo el coeficiente de descarga y el área de la restricción, el flujo másico se calcula como:

$$\dot{m}_{gas} = CdAV_{gas}\rho_{gas} \quad (28)$$

Donde m_{gas} es el flujo másico de combustible gaseoso, Cd y A es el coeficiente de descarga y el área de la sección transversal, respectivamente, en la zona de restricción del medidor, V_{gas} es la velocidad del gas (proporcional a la caída de presión) y ρ_{gas} es la densidad del gas, para lo cual el medidor cuenta con un sensor de presión y temperatura de ingreso y una base de datos interna de gases, para hacer el cálculo de esta variable. Las características principales del equipo se pueden apreciar en la **TABLA IX**.

TABLA IX. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL MEDIDOR DE FLUJO GASEOSO.

Parámetro	Valor
Flujo volumétrico min/máx. para aire [ml(estándar)/min]	501/1000
Caída de presión máxima para aire [psi]	7
relación de rechazo	200 a 1
Tiempo de respuesta medio [ms]	10
presión máxima del gas a la entrada del medidor [psig]	120
Temperatura de operación [°C]	-40 a 85

Dinamómetro de rodillos: El dinamómetro de rodillos utilizado en las pruebas es de marca Mustang para desempeño automotriz correspondiente a la serie 150 y en la **TABLA X** se proporcionan los principales datos técnicos que indica el fabricante.

TABLA X. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL DINAMÓMETRO DE RODILLOS.

Denominación	MD-150
Potencia máxima	1200 [hp]
Potencia máxima de absorción	625 [hp]
Inercia	630 [lbs]
Velocidad máxima	165 [mph]
Peso en el eje	6000[lbs]

En la **Fig. 26** puede observarse los perfiles de velocidad de las 3 pruebas realizadas bajo el ciclo internacional WTLC.

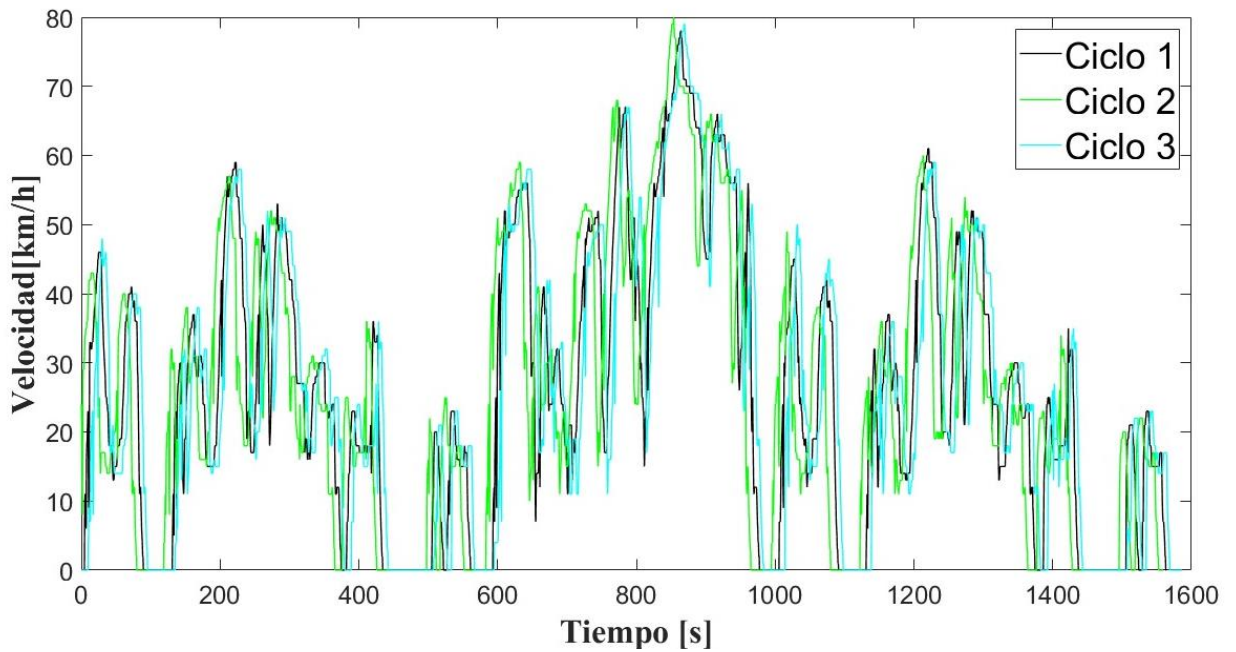


Fig. 26. Perfil de velocidades de las pruebas realizadas.

Usando MATLAB es posible organizar y analizar las variables necesarias para el análisis de la combustión del vehículo. Para la obtención de los factores de emisiones de las especies gaseosas y el rendimiento de consumo de combustible se procede de dos maneras distintas: realizando un estimativo de flujo de aire en función de la velocidad del motor y con las condiciones geométricas de los cilindros, o bien realizando una medición directa del flujo de aire extraída del protocolo CAN y sistema OBD del vehículo mediante programación en Arduino y una interfaz gráfica desarrollada en LabView.

A continuación, se presentan ambas metodologías:

Estimación de la masa de aire instantánea teórica

Debido a que no se tiene una medida instantánea del combustible o del aire admitido es necesario recurrir a un cálculo de masa de aire teórica en función de la velocidad del motor:

$$v_{desplazado} = v_{total}/z \quad (29)$$

$$v_c = v_{desplazado}/(r_c - 1) \quad (30)$$

$$v_{max} = v_c + v_{desplazado} \quad (31)$$

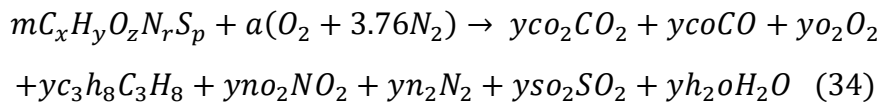
$$m_{aciclo} = ((n * P * v_{max} * 0.9)/(R_{aire} * T_{medellin})) \quad (32)$$

$$\dot{m}_{aire} = m_{aciclo} * RPM * (1/120) * z \quad (33)$$

Donde v_{total} es la cilindrada del vehículo, z es el número de cilindros del motor, r_c es la relación de compresión del motor, n es un factor que depende si el turbo está activo², P es la presión de admisión, $T_{medellin}$ es la temperatura de admisión, R_{aire} es la constante de gas para el aire y RPM es el régimen de giro del motor.

Gracias a los datos provenientes del analizador de gases es posible plantear una ecuación general de la combustión:

La ecuación de reactivos y productos en operación diésel es la siguiente:



De la cual resulta el siguiente sistema de ecuaciones resultantes del balance de cada especie en particular:

$$\%N_2: yN_2 = 100 - (HC + CO + CO_2 + O_2 + NO_x) \quad (35)$$

$$\%C: m = \frac{3 * HC + CO + CO_2}{n_c diesel} \quad (36)$$

$$\%SO_2: ySO_2 = m * n_s diesel \quad (37)$$

$$\%N: a = \frac{NO_x + 2 * yN_2 - (m * n_N diesel)}{7.52} \quad (38)$$

Donde $n_c diesel$ es el número de moles de carbono en el diésel, $n_N diesel$ es el número de moles de nitrógeno en el diésel, $n_s diesel$ es el número de moles de Azufre en el diésel y HC, CO, CO_2, NO_x, O_2 es el porcentaje molar de cada especie provenientes del analizador de gases. Con este sistema de ecuaciones es posible encontrar los términos faltantes, necesarios para continuar con el análisis.

Con el fin de encontrar el flujo de combustible teniendo ya el flujo teórico de aire, es necesario calcular el dosado relativo con la información proveniente del analizador de gases.

$$ath_{real} = a/m \quad (39)$$

$$FAR_{diesel} = ath_{real} * M_{aire} / M_{Diesel} * 4.76 \quad (40)$$

$$phi_{Diesel} = (1/FAR_{diesel}) / (1/lambda_{Diesel}) \quad (41)$$

Donde M_{aire} es la masa molecular del aire y M_{Diesel} es la masa molecular del diésel.

² Cuando el turbo está activo en la masa de aire por ciclo se tiene un factor de dos veces esta presión de admisión.

De la ecuación de dosificación relativa podemos despejar el flujo volumétrico de combustible de la siguiente forma:

$$\dot{m}_{combustible} = \phi_{Diesel} * (1/FAR_{Diesel}) * \dot{m}_{aire} \quad (42)$$

Posterior a hallar el flujo de combustible se puede encontrar el flujo de gases y por lo tanto los factores de emisión de cada especie de la siguiente manera:

$$\dot{m}_{gases} = \dot{m}_{combustible} + \dot{m}_{aire} \quad (43)$$

$$SE_{especie} = (X_{especie} * \dot{m}_{gases} * 3600 * 1000)/(km_{recorridos}) \quad (44)$$

Dado que la masa cambia cuando este dispositivo esté activo es necesario calcular los factores de emisión con y sin turbo, para posteriormente asignarle unos porcentajes de peso a estos. Gracias a la recolección de datos del dinamo es posible saber en tiempo real la velocidad del motor, y ver en cuanto porcentaje de la prueba el turbo este encendido (RPM iguales o superiores a 2000). Entonces el cálculo de los factores de emisión serían los siguientes:

$$E_{especie} = SE_{especie_{turbo}} * \%Encendido_{turbo} + SE_{especie_{sin\ turbo}} * (1 - \%Encendido_{turbo}) \quad (45)$$

Medición de la masa de aire instantánea mediante el sistema OBD

Mediante el protocolo CAN y el sistema OBD del vehículo ubicado en la parte inferior de la cabrilla es posible extraer información de mucha utilidad tal como lo indica la norma [18]. Esto permite determinar cómo útiles un total de 9 de los 27 PIDs disponibles. Estos seleccionados, reúnen algunas de las variables más importantes y necesarias para el análisis y métodos de cálculo necesarios posterior a la medición de emisiones, tales como carga del motor, presión barométrica, velocidades del motor y del vehículo, además flujo másico de aire y temperaturas. Estos pueden ser observados en la **TABLA XI**.

PID	Descripción	Mín.	Máx.	Unidad	Formula
04	Carga calculada motor.	0	100	%	100A/255
05	Temperatura de refrig.	-40	215	°C	A-40
0B	Presión Abs. De Adm.	0	255	kPa	A
0C	Velocidad del motor	0	16383.75	rpm	(256A+B)/4
0D	Velocidad del vehículo	0	255	Km/h	A
10	Flujo de aire de Adm.	0	655.35	g/s	(256A+B)/100
23	Presión riel iny. Directa	0	655350	kPa	10(256A+B)
33	Presión baro. Abs.	0	255	kPa	A

46	Temperatura de aire amb.	-40	215	°C	A-40
----	--------------------------	-----	-----	----	------

TABLA XI. PIDS UTILIZADOS.

A continuación, se presentan los dispositivos de comunicación y electrónicos utilizados para la recepción de los datos arrojados por el sistema OBD del vehículo. En la Fig. 27 y Fig. 28 pueden observarse los dispositivos electrónicos, sus características pueden apreciarse en las TABLA XII TABLA XIII; adicionalmente el diagrama de conexiones utilizados puede verse en la Fig. 29.



Fig. 27. Arduino nano.

Voltaje	2.7V	5.5 V
Corriente	5 mA	
Soporta	CAN 2.0B	
Velocidad CAN	1 Mb/s	
Interface	SPI (10 MHz)	
Temperatura	-40°C	85°C
Dimensiones	45 mm x 33mm	

TABLA XII. CARACTERÍSTICAS DEL ARDUINO NANO.



Fig. 28. Dispositivo de comunicación MCP2515CAN

Voltaje de alimentación	7 a 12 VDC
E/S Digitales	14

Entradas análogas 8

TABLA XIII. CARACTERÍSTICAS DEL COMUNICADOR MCP2515CAN.

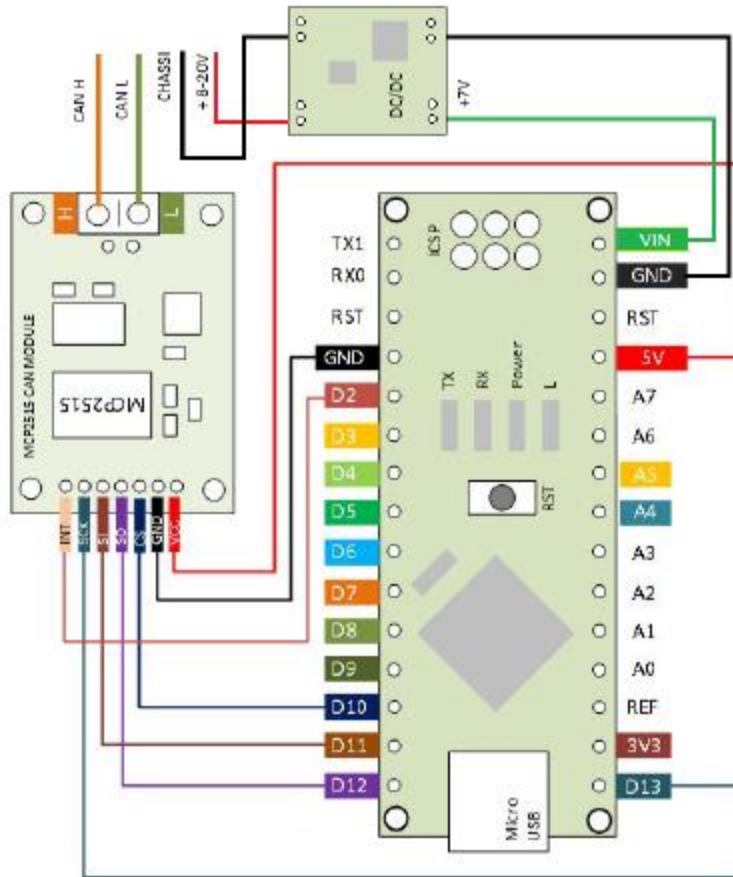


Fig. 29. Plano o diagrama de conexiones.

En la **Fig. 30** es posible observar la interfaz física del sistema de adquisición de datos, pueden verse los cables CAN H (verde), CAN L (naranja), relacionados a los pines 6 y 14, respectivamente, del conector OBD de 16 pines. La alimentación se realiza directamente por el puerto mini USB del Arduino Nano, por este puerto se hace el envío de información al computador vía serial. Para facilitar la conexión física entre estos módulos se usó en una baquelita perforada de una sola capa mediante un conector DB9 serial.



Fig. 30. Electrónica y dispositivos de comunicación.

Posterior a la adquisición de datos se procede a realizar los mismos cálculos observados en la metodología de estimación de la masa de aire teórica, simplemente, que este flujo ya es un dato de medición.

Rendimiento de combustible

Posterior a encontrar los factores de emisión de especies contaminantes provenientes del carbono como lo son HC , CO Y CO_2 se procede a encontrar el factor de rendimiento del combustible como lo indica la [10] mediante una formula estipulada para motores Diesel de baja capacidad o automóviles de la familia “Light-Duty Truck”:

$$FC_{Diesel} = \frac{1}{10 * CWF * \rho_{Diesel}} (CWF * SE_{HC} + 0.429 * SE_{CO} + 0.273 * SE_{CO_2}) \quad (46)$$

Donde:

CWF : Es la fracción en masa del carbono en el combustible, para el biodiesel B10 utilizado en las pruebas es 0.858.

Estimación de errores presentes en las pruebas

Por último, para garantizar la repetividad del ciclo es necesario estimar errores debido a múltiples factores como lo son

Errores de conducción: En esta clase de error se compara segundo a segundo la velocidad del vehículo y la velocidad del ciclo extraído del reglamento técnico mundial. Este error se debe más que todo a la capacidad del piloto a seguir el patrón de conducción indicado.

Errores sistemáticos propagados: Este procedimiento se construyó según [31]. Existen fuentes de incertidumbres que afectan el valor verdadero de un mesurando de forma constante, este tipo de incertidumbres son conocidas como incertidumbres sistemáticas. Estas incertidumbres se relacionan con las resoluciones de los equipos de medición. Ahora, para la extracción de los factores de emisión y consumo de combustible de un vehículo es necesario realizar cálculos a partir de estos datos tomados por los medidores y a estos resultados se les atribuye una incertidumbre. Donde se procede de la siguiente manera para encontrar estas incertidumbres de un resultado utilizando el método de propagación por medio de series de Taylor:

$$u(R) = \sqrt{\sum_{i=1}^I \left(\frac{\partial R}{\partial \bar{X}_i} u(\bar{X}_i) \right)^2} \quad (47)$$

Dónde: R , es el cálculo del resultado $u(R)$, es la incertidumbre del resultado, $u(\bar{X}_i)$, es la incertidumbre sistemática del equipo de medición involucrado en el cálculo del resultado y \bar{X}_i es la fuente de incertidumbre o equipo de medición.

Para el cálculo para el error de factor de emisión del CO₂ es el siguiente:

Se calcula el error propagado del cálculo de las moles de diésel mediante estequiometria:

$$r_m = \frac{1}{nC_{Diesel}} (3r_{hc} + r_{co} + r_{co2}) \quad (48)$$

Donde $r_{especie}$ = La resolución del equipo para medir determinada especie, estas pueden ser apreciadas en la TABLA VII.

Posteriormente se procede a hallar los errores propagados en los porcentajes molares de N₂, SO₂ y H₂O, además de encontrar el error propagado en el cálculo de las moles de aire de la siguiente manera: TABLA VII

$$r_{n2} = r_{nox} + r_{hc} + r_{co} + r_{co2} + r_{o2} \quad (49)$$

$$r_{so2} = r_m * nS_{Diesel} \quad (50)$$

$$r_{h2o} = \frac{r_m * nH_{Diesel} + 8r_{hc}}{2} \quad (51)$$

$$r_a = \frac{r_{nox} + 2r_{n2} + r_m + nN_{Diesel}}{7.52} \quad (52)$$

Donde nH_{Diesel} es el numero de moles de hidrogeno en el diésel.

Después de haber hallado los errores propagados en la estimación de porcentaje molar de cada especie, se haya el error propagado en las moles de cada especie y el error propagado en el número de moles totales de la siguiente manera:

$$r_{n_{especie}} = \frac{r_{especie}}{m} + \frac{\%_{especie} * r_m}{m^2} \quad (53)$$

$$r_{n_{totales}} = \sum r_{n_i} \quad (54)$$

Posterior al cálculo de moles totales se procede al cálculo del error propagado en la estimación de la masa molar de los humos de la siguiente manera:

$$r_{M_{humos}} = \sum \frac{r_{n_{especie}} * M_{especie}}{n_{totales}} + \sum \frac{n_{especie} * M_{especie} * r_{n_{totales}}}{n_{totales}^2} \quad (55)$$

Más tarde, es posible estimar el error propagado tanto del porcentaje molar de las especies y el porcentaje másico siguiendo el próximo procedimiento:

$$r_{Y_{CO2}} = \frac{r_{n_{CO2}}}{n_{totales}} + n_{CO2} * \frac{r_{n_{totales}}}{n_{totales}^2} \quad (56)$$

$$r_{X_{CO2}} = r_{Y_{CO2}} * \frac{M_{CO2}}{M_{humos}} + Y_{CO2} * \frac{r_{M_{humos}}}{M_{humos}^2} \quad (57)$$

Posteriormente, ya que, para la estimación de flujo de combustible es necesaria la estimación del dosado absoluto, es necesario medir la propagación del error en este cálculo de la siguiente manera:

$$r_{ath_{real}} = \frac{r_a}{m} + a \frac{r_m}{m^2} \quad (58)$$

$$r_{FAR_{Diesel}} = r_{ath_{real}} * \frac{M_{aire}}{M_{Diesel}} * 4.76 \quad (59)$$

$$r_{m_c} = MAF * \frac{r_{FAR_{Diesel}}}{FAR_{Diesel}^2} + \frac{r_{MAF}}{FAR_{Diesel}} \quad (60)$$

$$r_{m_{cteórico}} = m_{aciclo} * r_{RPM} * (1/120) * z \quad (61)$$

$$r_{m_{combustible}} = \frac{r_{m_c}}{1000} \quad (62)$$

$$r_{m_{aire}} = \frac{r_{MAF}}{1000} \quad (63)$$

Donde se tiene que MAF es el flujo de aire medido por el OBD y r_{RPM} es la incertidumbre en la medición del régimen del vehículo.

Posteriormente se procede a calcular el error propagado en el cálculo de flujo de gases.

$$r_{m_{gases}} = r_{m_{aire}} + r_{m_{combustible}} \quad (64)$$

Con la estimación de los anteriores parámetros ya es fácil estimar el error propagado en el cálculo del factor de emisión del dióxido de carbono con la siguiente ecuación:

$$r_{SECO_2} = \frac{r_{XCO_2} * m_{gases} * 3600 * 1000}{km_{recorridos}} + \frac{X_{CO_2} * r_{m_{gases}} * 3600 * 1000}{km_{recorridos}} + \frac{X_{CO_2} * m_{gases} * 3600 * 1000 * r_{km}}{km_{recorridos}^2} \quad (65)$$

Donde r_{km} es la incertidumbre en la medición de los kilómetros recorridos.

Metodología modelo GEM

La metodología para la simulación del vehículo semipesado fue desarrollada en función de las indicaciones dadas por el manual usuario del modelo GEMv4.0 fase 2.[32]

Categoría del vehículo

En esta sección se tienen tres opciones de vehículos que pueden analizarse en el modelo los cuales son: Tipo tráiler, tipo tractor y vehículos vocacionales. Según esta categoría vehicular los datos de entrada y sus rangos también como los valores arrojados por el modelo cambian. El vehículo Chevrolet NHR 2022 entraría en la categoría vehicular vocacional.

Empresa manufacturera

En esta sección se especifica la empresa que produjo el vehículo, para este caso es Chevrolet.

Año del modelo del vehículo

En esta sección se especifica el año del modelo del vehículo, para este caso es 2022.

Número de prueba

El modelo cuenta con la capacidad de correr varios sistemas o configuraciones al mismo tiempo, por esto es necesario especificar el número de prueba, dado que para este caso solo se corre una configuración se asigna el número de prueba 1 (Sample_1).

Subcategoría

Gracias a su peso y capacidad de carga, el vehículo se clasifica en la subcategoría vehicular "Camión ligero de carga pesada", y debido a sus atributos, se emplea para la circulación en entornos urbanos. Por lo tanto, en el modelo, se identifica al vehículo con la denominación LHD_U.

Mapas del motor

Los mapas son construidos bajo las recomendaciones de la norma 40 CFR 1036,535, los mapas necesarios para la simulación bajo el modelo son:

- **Curva del motor a la máxima carga:** Gracias a la información brindada por la EPA de mapas de motores comerciales estudiados previamente es posible generar unas tendencias de porcentajes para la carga y RPM de motores con características similares al objeto de estudio, para así construir con las características propias de carga y velocidad del motor 4JH1 de ISUZU un mapa a máxima carga.

En la **Fig. 31** es posible observar la entrega de par del motor donde se encuentran resultados esperados, ya que, el fabricante en la ficha técnica reporta una entrega de máximo par posterior a los 1400 RPM.

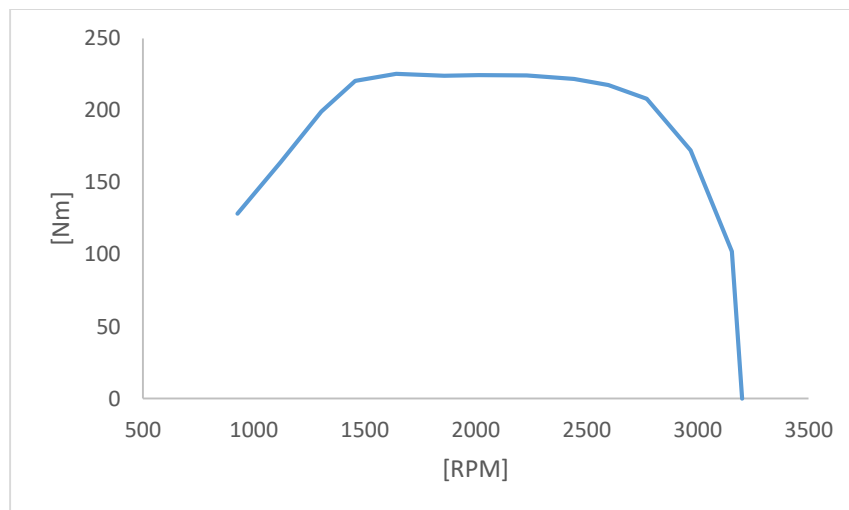


Fig. 31. Curva del motor a máxima carga del vehículo objeto de estudio.

- **Curva de pérdidas mecánicas o “motoring”:** Debido a la imposibilidad de medir estas pérdidas en un dinamo capacitado para esta prueba se hace el mismo procedimiento indicado para la curva a máxima carga.

En la **Fig. 32** es posible observar la curva de pérdidas mecánicas del vehículo, que como se puede esperar, crecen con la velocidad del motor. La pérdida mayor se da a las 3200 RPM la cual corresponde al 23.71% del par máximo.

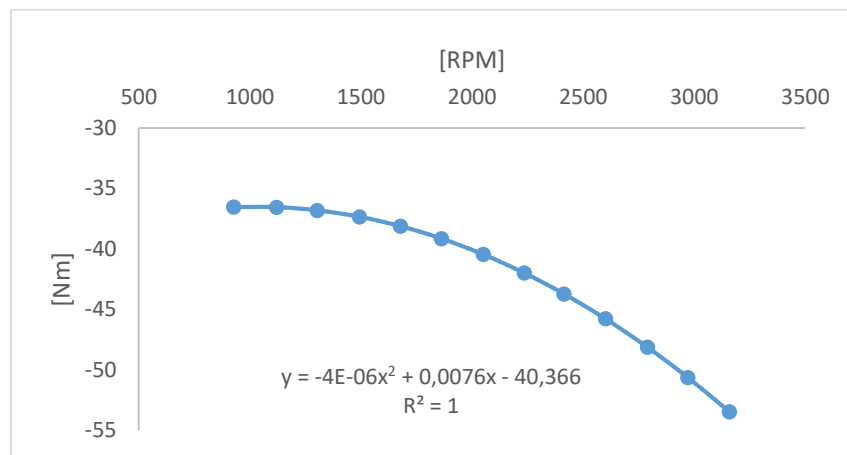


Fig. 32. Curva “motoring” del vehículo objeto de estudio.

- **Mapa de combustible del motor al ralentí:** Gracias a los artefactos de medición de emisiones instalados en el camión y el estudio de la fisicoquímica de la combustión es posible encontrar estos flujos a las cargas establecidas en la información brindada por la EPA (0 y 100 Nm).

Los resultados obtenidos mediante medición en tiempo real para el motor al ralentí pueden ser observados en la **TABLA XIV**.

TABLA XIV. MAPA DE CONSUMO DEL MOTOR A VELOCIDAD DE RALENTÍ.

RPM	Nm	g/s
705	0	0.22
745	0	0.22
705	100	0.28
745	100	0.29

- **Mapa de combustible del motor:** El procedimiento para los flujos de combustible instantáneos es el mismo seguido que para el mapa al ralentí. Para más detalles dirigirse a la metodología para la obtención de factores de emisión, allí se describe las ecuaciones y artefactos de medición utilizados.

Esta curva fue extraída gracias a mediciones hechas en el laboratorio LIDA de la Institución Universitaria Pascual Bravo, se promediaron 3 ciclos internacionales WTLC. Siguiendo el perfil de velocidades mostrados en la **Fig. 26**. Cabe resaltar que en estos resultados ya se tienen en cuenta las pérdidas mecánicas apreciadas en la **Fig. 33**.

Mapa de consumo de combustible ciclo WLTC

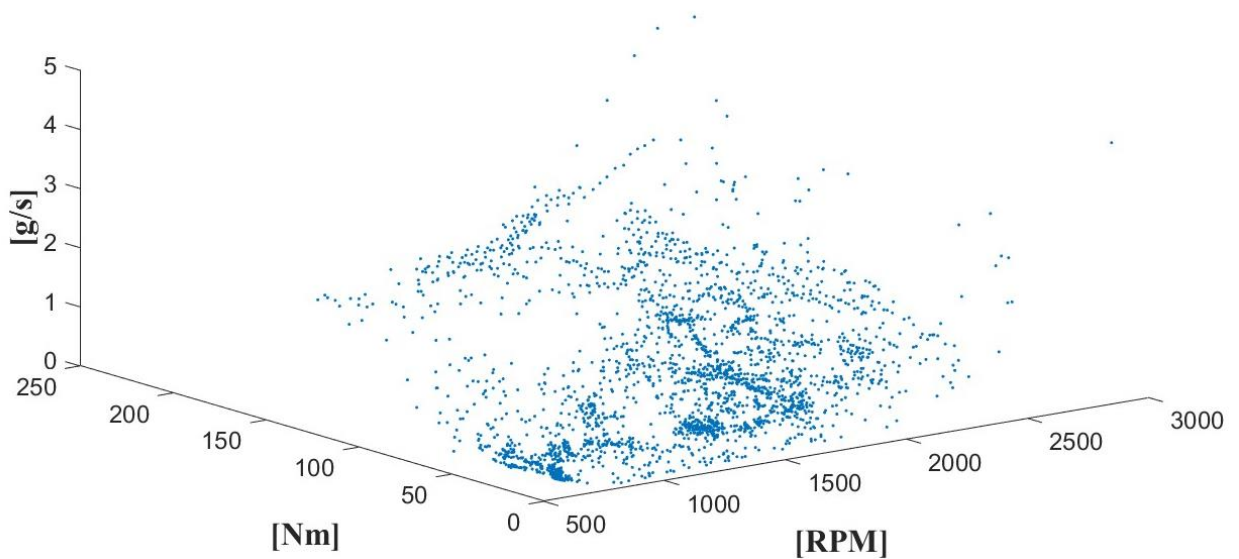


Fig. 33. Mapa de consumo del motor en una prueba WTLC.

- **Mapa de combustible promedio de ciclo transitorio:** Este mapa es extraído de promediar la información de los motores con características similares brindados por la EPA. Este puede ser apreciado en la **TABLA XV**.

Estos mapas son guardados como un formato de texto separado en un archivo distinto al de la simulación, pero en la misma localización o carpeta. Este formato será llamado dentro del archivo de la simulación.

TABLA XV. MAPA PROMEDIO DE CICLO TRANSITORIO.

kWh	rev/m	gramos	RPM	Nm
3.45	2.44	429.24	750.67	35.68
5.42	2.45	637.17	755.17	51.46
3.43	2.44	417.83	750.45	35.67
5.31	2.45	614.54	753.86	51.18
3.53	2.44	448.1	750.37	35.95
5.42	2.44	628.05	752.48	50.82
3.59	2.44	455.46	750.36	36.12
5.47	2.44	642.57	752.22	50.59

RPM al ralentí

Esta medida es tomada según la norma 40 CFR 1036,510. Esta característica propia del motor es extraída de los manuales del fabricante del motor ISUZU 4JH1 (725 ± 10 RPM).

Mapa de la transmisión

Este mapa es construido gracias a las recomendaciones de la norma 40 CFR 1037,520(g)(1). Donde deben ingresarse en una tabla los datos de numero de cambio, relación de los engranajes y el torque de entrada limite. En el caso del vehículo de estudio se tiene una caja de transmisión manual de 5 cambios. Esta información fue extraída de la ficha técnica del vehículo el código de la caja de transmisión es MSB5S. El mapa puede ser apreciado en la **TABLA XVI**.

Este mapa al igual que los mapas del motor es guardado en un formato de texto que posteriormente será llamado en el archivo de la simulación.

Los resultados para el mapa de la transmisión extraídos de la ficha técnica del vehículo fueron los siguientes:

TABLA XVI. MAPA DE LA TRANSMISIÓN.

#	Relación	Nm
1	5.02	225.55
2	2.68	225.55
3	1.59	225.55
4	1	225.55
5	0.77	225.55

Configuración del eje motriz

Esta característica es medida según la norma 40 CFR 1037,520(g)(2), donde se establece los ejes móviles y de tracción del vehículo. Para el caso de la NHR 2022, la configuración del eje motriz es 4x2.

Relación del eje motriz

Esta relación es medida según la norma 40 CFR 1037,520(g)(3), para el vehículo objeto de estudio esta información fue extraída de los manuales de operación entregados por el fabricante donde esta relación es: 5,125 que corresponde a la relación final de eje.

Datos del eje motriz

Esta información es extraída según la norma 40 CFR 1037,560. Por la poca información entregada por el fabricante del vehículo y al ser información de entrada opcional, esta característica no es especificada.

Área de arrastre aerodinámica

Esta característica del vehículo es medida según las normas 40 CFR 1037,520(m) y 40 CFR 1037,537, la cual es la multiplicación del coeficiente de arrastre y el área frontal proyectada en el plano perpendicular a la dirección de desplazamiento. Sin embargo, dado que se tiene como referencia un vehículo representativo para la categoría vehicular esta área se ingresa al modelo como un delta entre el valor de referencia del vehículo por defecto utilizado por el modelo, $3,40 \text{ m}^2$ y el valor específico calculado del vehículo a modelar.

Resistencia a la rodadura del eje de dirección y transmisión

Esta característica de las llantas es medida según la norma 40 CFR 1037,520(c), Dado que ambos ejes tienen la misma configuración de llantas (llantas 205/75R17,5) es el mismo coeficiente para ambos, por lo tanto, el procedimiento a seguir es único y es el siguiente:

Se extrae de los manuales del fabricante de las llantas la resistencia a la rodadura (TRRL). El cual para las llantas en cuestión es de: $5,45 \frac{\text{Kg}}{\text{ton-m}}$. Según la norma para llantas comercializadas para camiones ligeros (“light duty trucks”) se usa como entrada para el modelo $TRRL * 0,87 = 4,7415$.

Tamaño de la llanta cargada

Esta característica es medida según la norma 40 CFR 1037,520(c), donde se toma la medida del diámetro exterior de la llanta 765 mm, esta medida se expresa en pulgadas 30,118”, posteriormente esta medida se multiplica por “pi” para tener una medida en pulgadas sobre revoluciones 94,62 “/rev, después de este dato se tendrá en cuenta el factor de conversión del número de pulgadas por milla 63360 “/mile; para por último paso tener un numero de revoluciones por milla dividiendo este factor de conversión por el número de pulgadas por revolución $\frac{63360}{94,62} = 670 \frac{rev}{mile}$.

Mejoras de tecnología

- Estas medidas son tomadas gracias a la norma 40 CFR 1037,520.
- Limitador de velocidad (MPH o NA).
- Toma de fuerza delta de combustible [g/ton-mile].
- Reducción de peso [Lb].
- Ralentí neutral [Y/N]
- Start-Stop [Y/N].
- Apagado automático de motor [Y/N].
- Controles inteligentes [%].
- Accesorios de carga [%].
- Sistema de presión de llantas [%].
- Otras mejoras [%].

Dado que el automóvil no viene equipado con ninguna de estas mejoras, esta información no es especificada en el modelo.

Características físicas del vehículo

Debido a que la estimación de emisiones se hace teniendo en referencia un vehículo representativo según la EPA para cada categoría vehicular, para la categoría donde se encuentra el camión NHR que es la categoría vocacional de un vehículo urbano de carga ligero. Las características físicas para esta categoría son:

- Área frontal del vehículo: 3,86 m²

- Peso total del vehículo: 7257 kg
- Carga máxima del vehículo: 3,5 ton
- Inercia del motor: 2.79 kg * m²
- Potencia consumida por los accesorios eléctricos: 500 W
- Potencia consumida por los accesorios del motor: 1000 W

IV. RESULTADOS

Simulación CFD

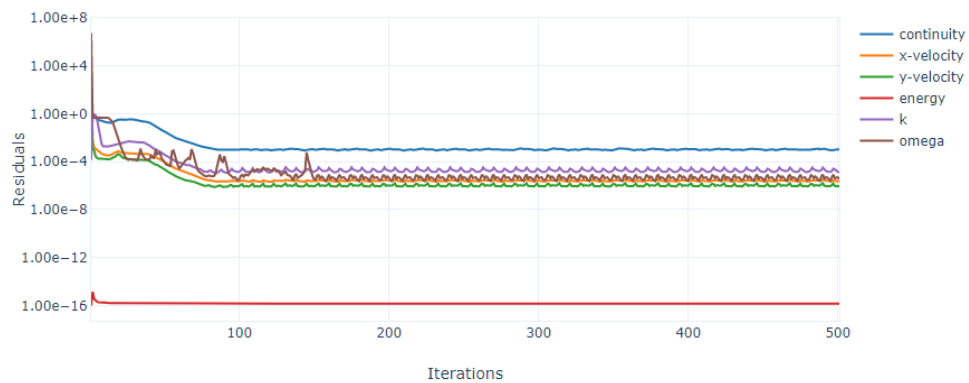


Fig. 34. Residuales de la simulación posterior a las 500 iteraciones para una velocidad de 80 km/h.

Es posible apreciar en las **Fig. 34** y **Fig. 35**, que los residuales y la variable alcanzaron valores convergentes en aproximadamente las 200 iteraciones, a partir de allí estos toman valores asintóticos.

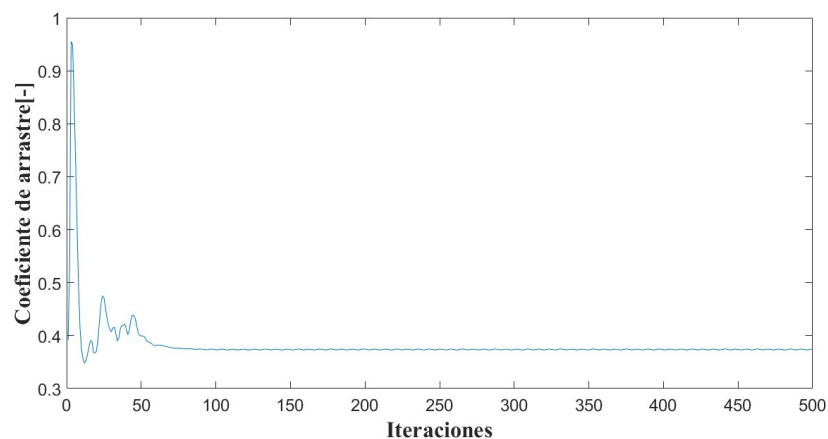


Fig. 35. Solución de coeficiente de arrastre de la simulación posterior a 500 iteraciones para una velocidad de 80 km/h.

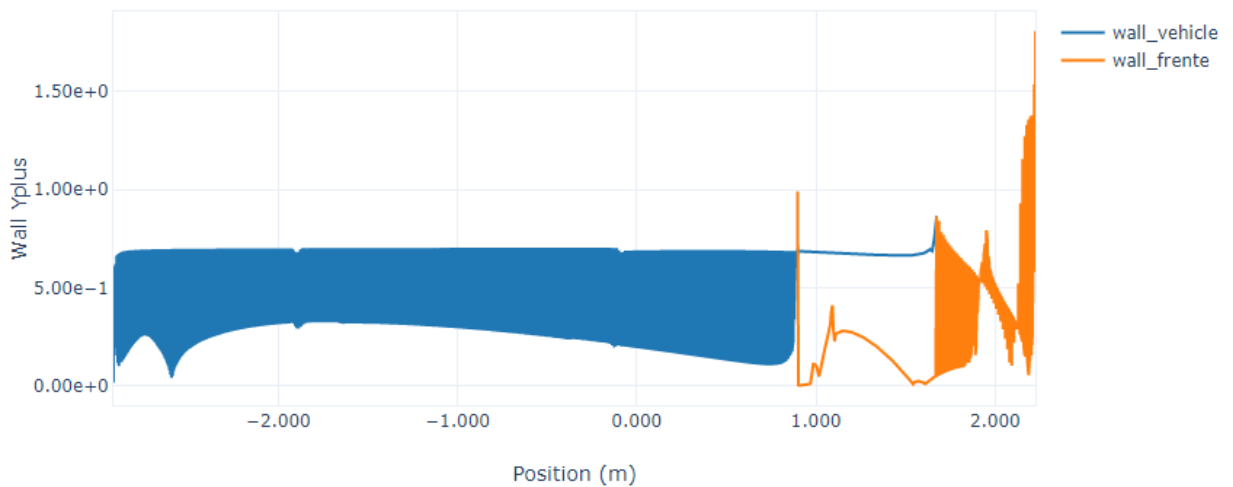


Fig. 36. Y+ post-simulación de las fronteras del vehículo.

Los resultados para el Y+ a lo largo del camión pueden observarse en la **Fig. 36**. Para un vehículo terrestre, un buen camino a seguir para saber si el modelo cumple es verificando que los términos de Y+, los cuales expresan el cumplimiento de la ley de pared, se mantengan dentro del rango de valores entre 35 y 350 [33]. Sin embargo, es necesario que este valor sea lo más cercano a 1, para así describir los fenómenos de ruptura de capa límite entre la frontera de la superficie del vehículo y el fluido.

Los resultados de perfiles de presión y velocidad obtenidos bajo simulación pueden ser apreciados en las **Fig. 37** y **Fig. 38**. Cabe resaltar que para estos resultados primero se hace un análisis cuantitativo donde se observa que los valores mínimos y máximos sean coherentes con la teoría y posteriormente se hace un análisis cuantitativo donde sea posible divisar ciertos fenómenos fluido-dinámicos presentes en el movimiento de un objeto a través de un fluido.



Fig. 37. Contorno de presión alrededor del vehículo posterior a 500 iteraciones para una velocidad de 80 km/h.

Puede observarse en la **Fig. 37** que en la simulación se tiene un valor máximo de presión estática en la superficie del vehículo de 420 Pa en el frente del vehículo y la mínima fue una presión de -1.58 kPa en el parachoques delantero.

Cuando un automóvil se desplaza a través del aire, el flujo de este último se divide alrededor de la forma del vehículo. En la parte frontal del automóvil, el flujo se comprime y aumenta la presión, lo que puede dar lugar a una apariencia de estancamiento en la **Fig. 38**. Sin embargo, en la parte trasera del vehículo, el flujo se expande y disminuye la presión, creando un área de menor presión en comparación con la del frente.

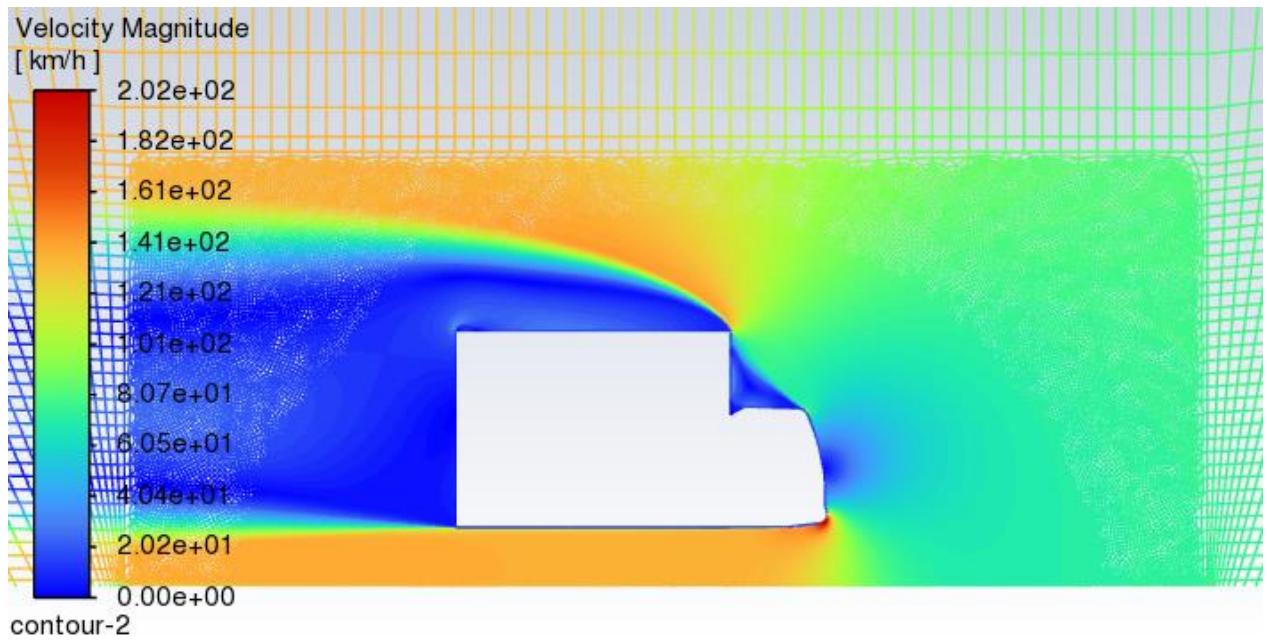


Fig. 38. Campo vectorial de velocidad alrededor del vehículo posterior a 500 iteraciones para una velocidad de 80 km/h.

En la **Fig. 38** es posible observar el campo vectorial de velocidad alrededor del vehículo donde se tiene una velocidad máxima de 200 km/h en el parachoques delantero y una velocidad mínima de 0 km/h en la estela que deja el vehículo y en toda la capa límite de la superficie del vehículo y el fluido, esto no es más que una representación del estancamiento del fluido que ocurre gracias a la adhesión de este mismo a la superficie del vehículo.

Estudio de variables

Locación

Posteriormente se hace el estudio de como la variable de presión y altura afecta el coeficiente de arrastre con 3 ciudades representativas para el comercio en Colombia los cuales son caracterizados en la **TABLA XVII**.

TABLA XVII. CARACTERIZACIÓN DE LUGARES PRINCIPALES DE COMERCIO EN COLOMBIA.

Locación	Altura MSNM	Presión atmosférica [Pa]
Barranquilla	30	100925
Medellín	1538	85326.33
Bogotá	2640	74660.54

Los resultados obtenidos mediante simulación según el lugar pueden ser apreciados en la

Fig. 39:

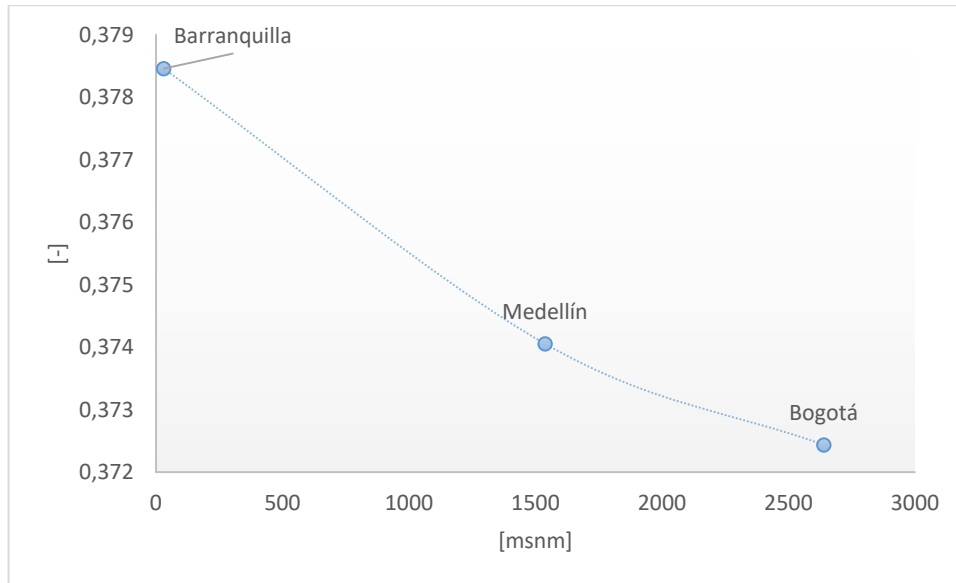


Fig. 39. Coeficiente de arrastre “Drag” en función de la altura.

Como puede apreciarse en la **Fig. 39** el coeficiente de arrastre es inversamente proporcional a la altura, esto es de esperarse, ya que, al tener una menor altura con respecto al nivel del mar la presión atmosférica es mayor, lo cual conlleva a una densidad del aire mayor. Y como puede observarse en la ecuación de la fuerza de arrastre, esta es directamente proporcional a la densidad del medio.

Velocidad del vehículo

Según la **Fig. 40** la tendencia que sigue el coeficiente al subir la velocidad es la tendencia esperada, ya que, esta debe seguir una tendencia cuadrática entre los 20 y 60 km/h, posterior a estas velocidades el coeficiente de arrastre empieza a tornarse aproximadamente constante, esto se debe a que el vehículo alcanza su velocidad óptima a los 70 km/h. Cabe resaltar que las simulaciones variando la velocidad fueron desarrolladas a condiciones de Medellín.

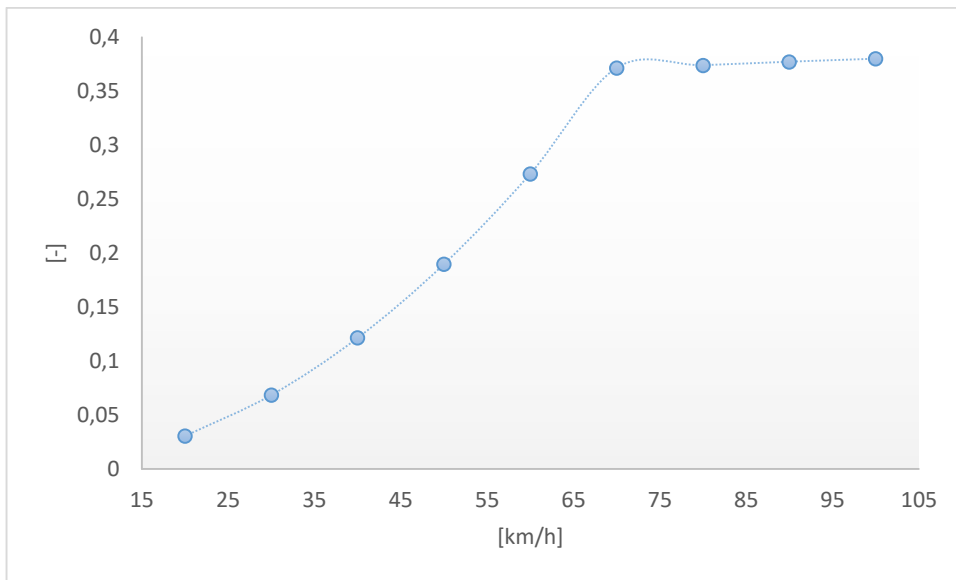


Fig. 40. Coeficiente de arrastre “Drag” en función de la velocidad.

Pruebas de desaceleración

Los resultados posteriores al análisis fisicomatemático desarrollado en la metodología de las pruebas pueden ser apreciados en la **Fig. 41**.

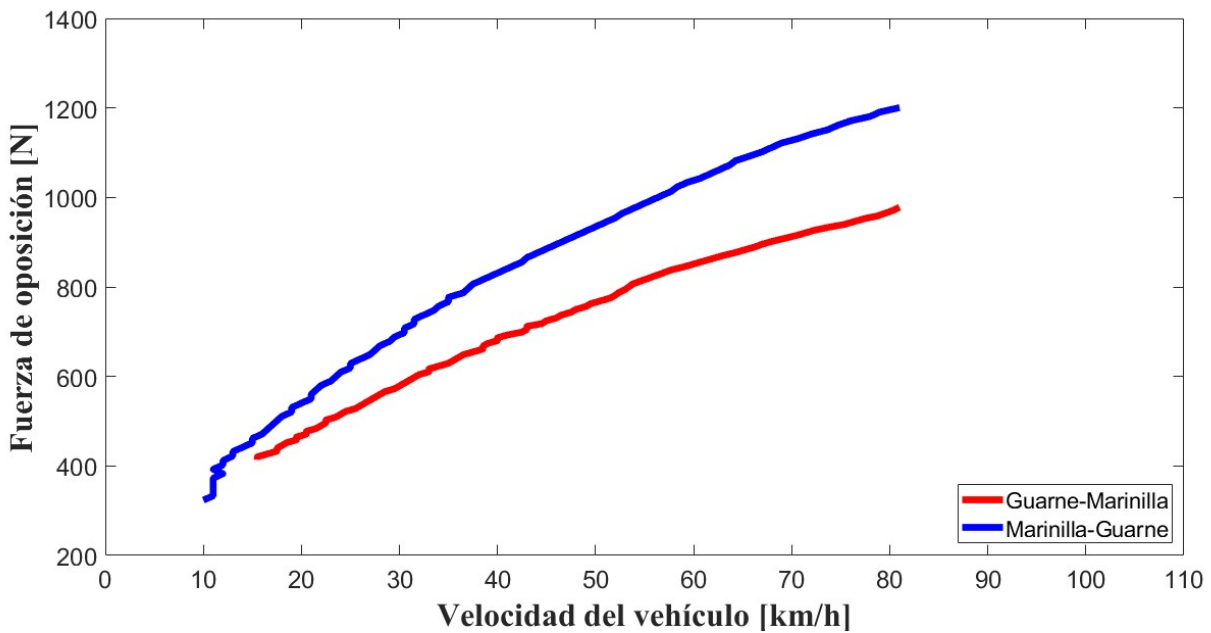


Fig. 41. Fuerza disipada en función de la velocidad.

Para Guarne – Marinilla tenemos

$$F(V) = -0.0595V^2 + 14,291V + 204.59$$

$$R^2 = 0.9995$$

Por lo tanto, los coeficientes son:

$$b_0 = 204.59 \text{ N}$$

$$b_1 = 14,291 \frac{\text{N}}{\frac{\text{km}}{\text{h}}}$$

$$b_2 = -0.0595 \frac{\text{N}}{\left(\frac{\text{km}}{\text{h}}\right)^2}$$

Y el coeficiente de arrastre a 80 km/h es:

$$C_{d_{g-80\text{km/h}}} = 0.24$$

Para Marinilla - Guarne tenemos la siguiente ecuación

$$F(V) = -0.0964V^2 + 20.44V + 165.58$$

$$R^2 = 0.9981$$

Por lo tanto, se tiene:

$$b_0 = 165.58 \text{ N}$$

$$b_1 = 20,44 \frac{\text{N}}{\frac{\text{km}}{\text{h}}}$$

$$b_2 = -0.0964 \frac{\text{N}}{\left(\frac{\text{km}}{\text{h}}\right)^2}$$

Y el coeficiente de arrastre a 80 km/h es:

$$C_{d_{m-80\text{km/h}}} = 0.39$$

Solucionando las ecuaciones anteriores para una velocidad de 50 mph (80.47 km/h), se tiene que la potencia a vencer por el vehículo, más conocida como “Power@50mph” es:

Guarne – Marinilla

$$Power@50\text{mph} = 29.5 \text{ HP}$$

Marinilla – Guarne

$$Power@50mph = 36.22 \text{ HP}$$

Factor de emisión del CO₂ y consumo de combustible extraído mediante pruebas en dinamómetro

En la **Fig. 42** se aprecia la comparación en el flujo de aire que el motor admite entre ambas metodologías empleadas. A pesar de que los resultados no difieren considerablemente, es evidente que existe una sobreestimación en el cálculo del flujo teórico de aire.

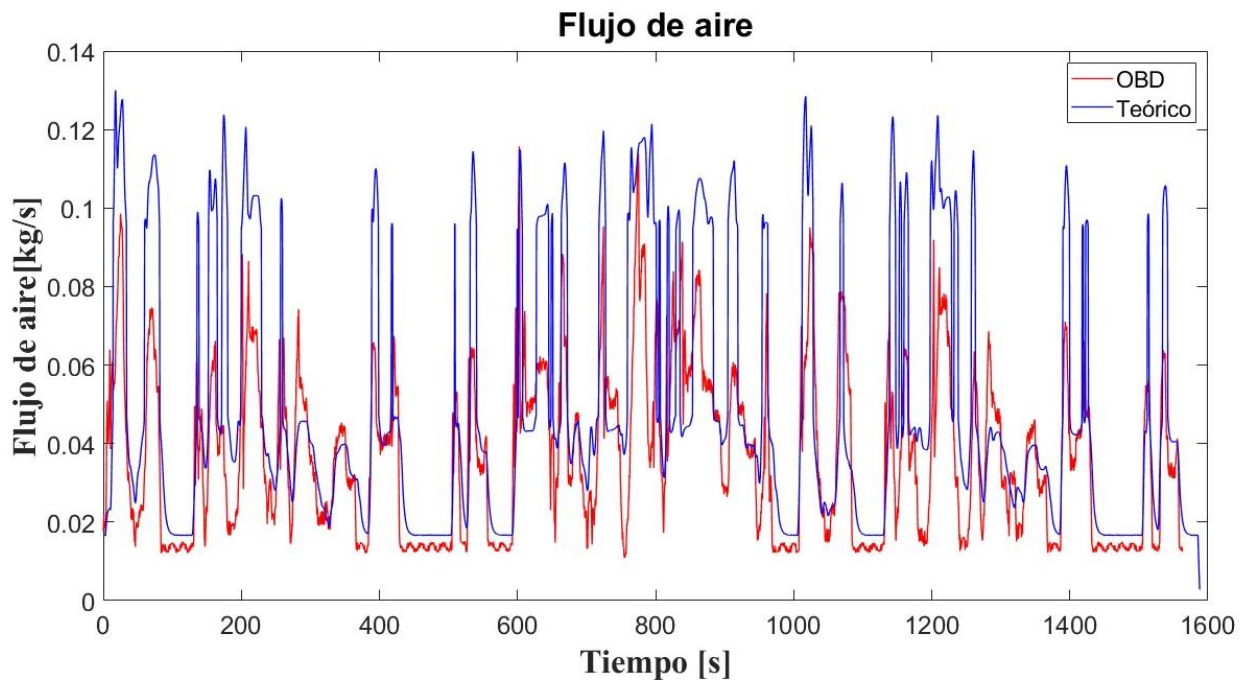


Fig. 42. Comparativo de flujo de aire medido con el OBD y el flujo de aire estimado teóricamente.

En la **Fig. 43** es posible apreciar el comparativo de flujo de diésel extraído bajo ambos métodos, así como con el flujo de aire hay una clara sobreestimación del flujo de diésel. Lo que podría explicar posteriormente la diferencia de factores de emisión y rendimiento entre la metodología de estimación de aire teórico, la medición del aire mediante el OBD y el modelo.

Esta comparativa puede notarse en la **TABLA XIX**.

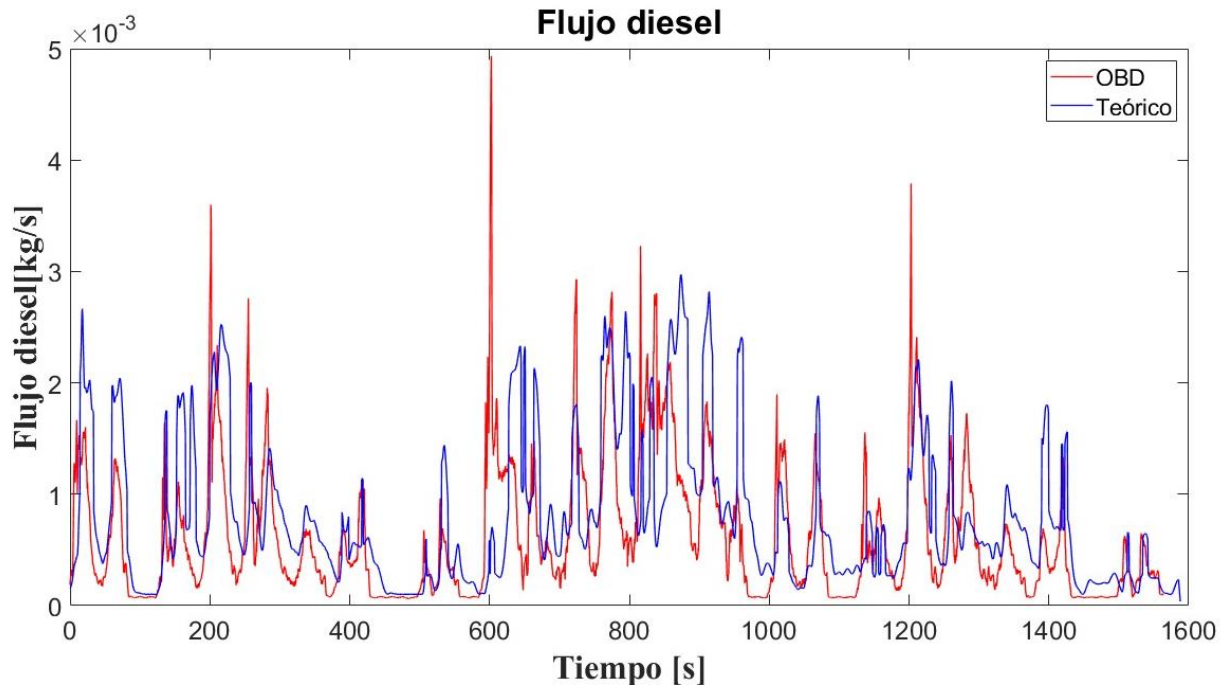


Fig. 43. Comparativo de flujo de diésel calculado mediante el OBD y el calculado teóricamente.

En la **Fig. 44** puede observarse que, a pesar de la sustitución de combustible diésel por un combustible mixto de diésel y Gas Natural Comprimido, el vehículo sigue teniendo el mismo comportamiento en el desarrollo del ciclo de conducción, donde puede apreciarse que no hay pérdida de potencia, ni retardos en la respuesta de la entrega de esta.

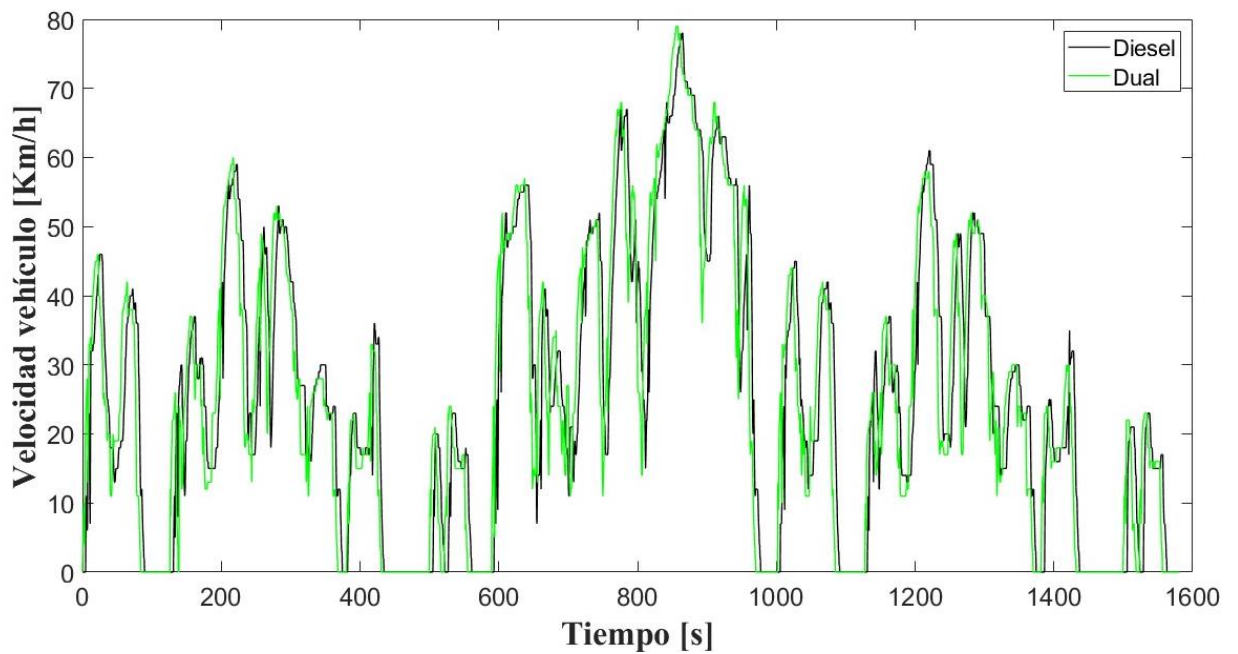


Fig. 44. Perfiles de velocidades de las pruebas realizadas en modo diésel y modo Dual.

También con el fin de analizar cómo afecta las emisiones este cambio de combustible se procede a extraer la **Fig. 45**, gracias al analizador de especies gaseosas para ambos modos de operación del vehículo.

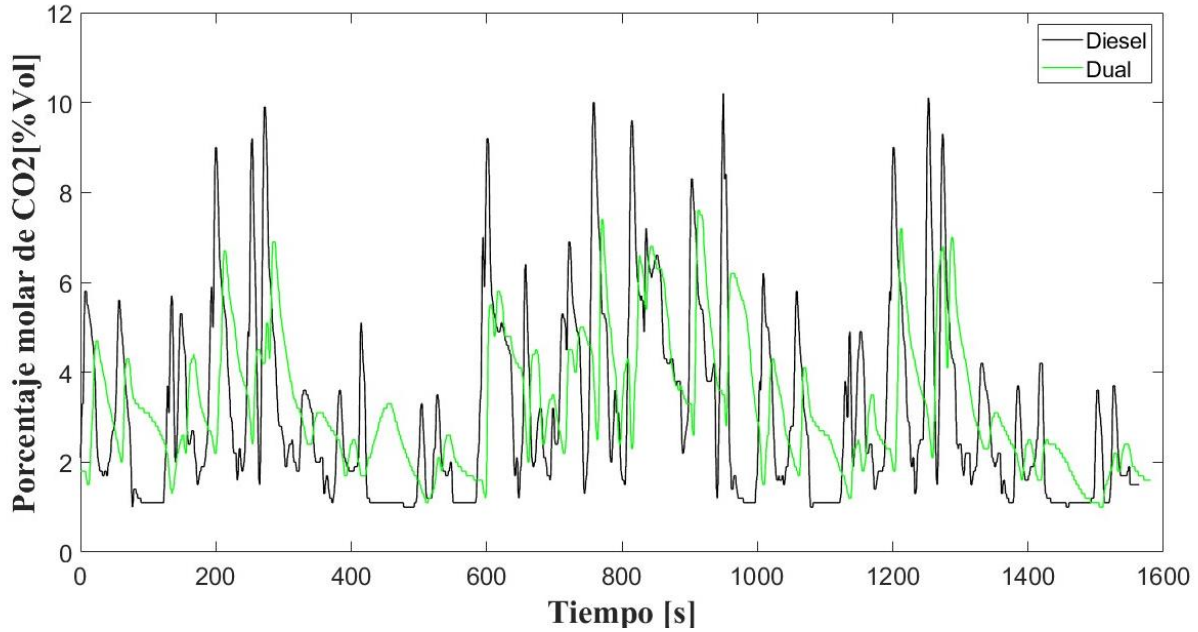


Fig. 45. Perfiles de porcentaje molar del dióxido de carbono en modo diésel y modo Dual.

En la **Fig. 45** puede observarse que hay una tendencia de reducción del porcentaje molar del CO₂ en operación Dual, esto gracias a que la composición de la partícula de gas natural tiene muy poco carbono en comparación con la partícula del diésel B10 utilizado en los ciclos.

En la **Fig. 46** puede notarse el flujo de combustible tipo diésel inyectado en el motor, se percibe que en modo dual hay una disminución en la inyección de diésel, esto se debe a la sustitución en cierto porcentaje del combustible. También es posible observar que el corte y la inyección del combustible diésel en modo dual es muy intermitente en las zonas de alta carga, esto podría deberse a las fluctuaciones de las sustituciones parciales que pasan de bajo a alto porcentaje en los picos de alta carga.

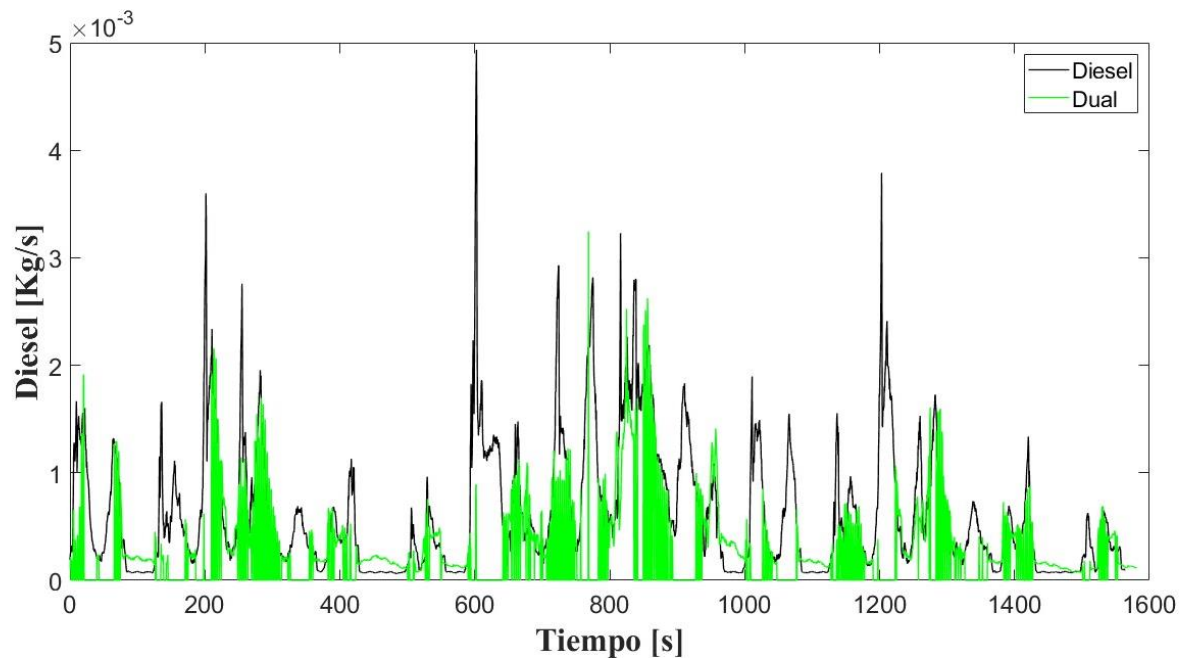


Fig. 46. Flujo de diésel inyectado en el motor en operación diésel y dual

En la **Fig. 47** se aprecia un comparativo a lo largo del ciclo donde se ve una clara disminución del factor de emisión del CO₂ en la operación dual debido al bajo contenido de carbono del combustible que sustituye al diésel, sin embargo, es posible notar que en las zonas de ralentí el factor de emisión es mayor para la operación dual, esto se debe a que el sistema de conversión dual sigue inyectando una cantidad de combustible de gas metano en estas zonas de carga mínima.

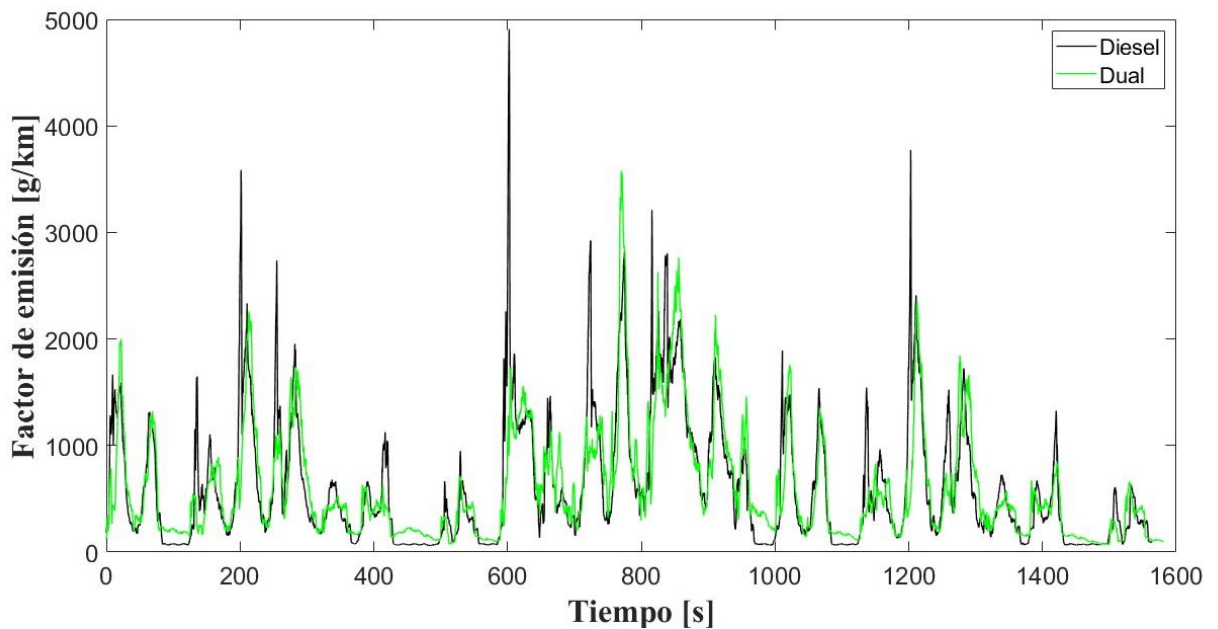


Fig. 47. Comparativo del factor de emisión de CO₂ a lo largo del ciclo.

Gracias a la metodología de la extracción de los factores de emisión explicada anteriormente y los resultados obtenidos de los equipos instalados en el camión se obtuvieron los siguientes resultados observados en las **Fig. 48** y **Fig. 49**, promediando las 3 pruebas realizadas, para ambos modos de operación:

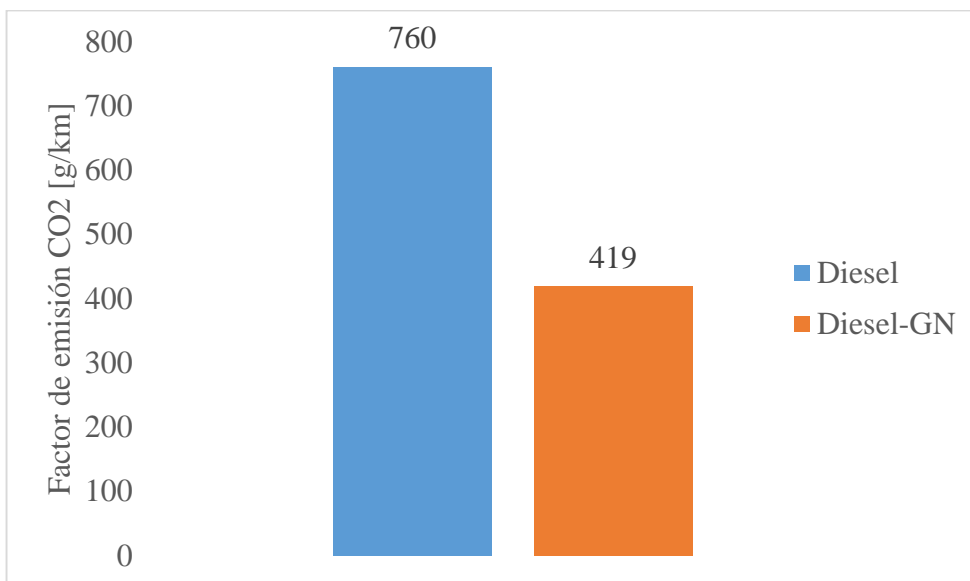


Fig. 48. Comparativo del factor de emisión del CO₂ en función del modo de operación del vehículo.

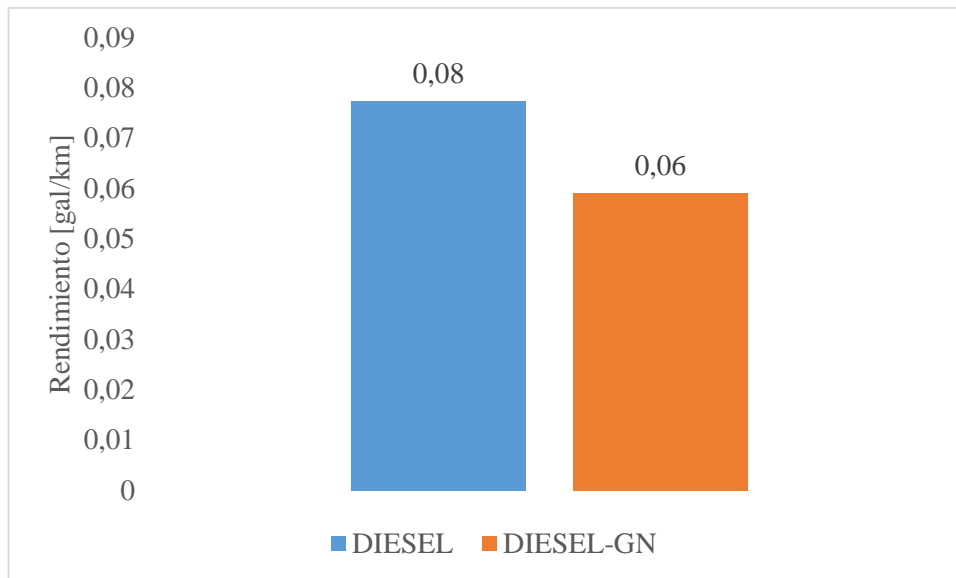


Fig. 49. Comparativo del factor del rendimiento de combustible en función del modo de operación del vehículo

Según la **Fig. 48** puede observarse una disminución del 45% en el factor de emisión del CO₂.

Con relación al rendimiento de combustible, ver **Fig. 49**, se aprecia una disminución de gasto de combustible tipo diésel; sin embargo, dado que el camión necesita de la misma cantidad de energía para moverse, sin importar de donde provenga, es necesario inyectar una mayor cantidad de gas natural. Por lo tanto, este resultado indica el porcentaje global de sustitución del combustible tipo diésel en la operación dual.

Errores de conducción

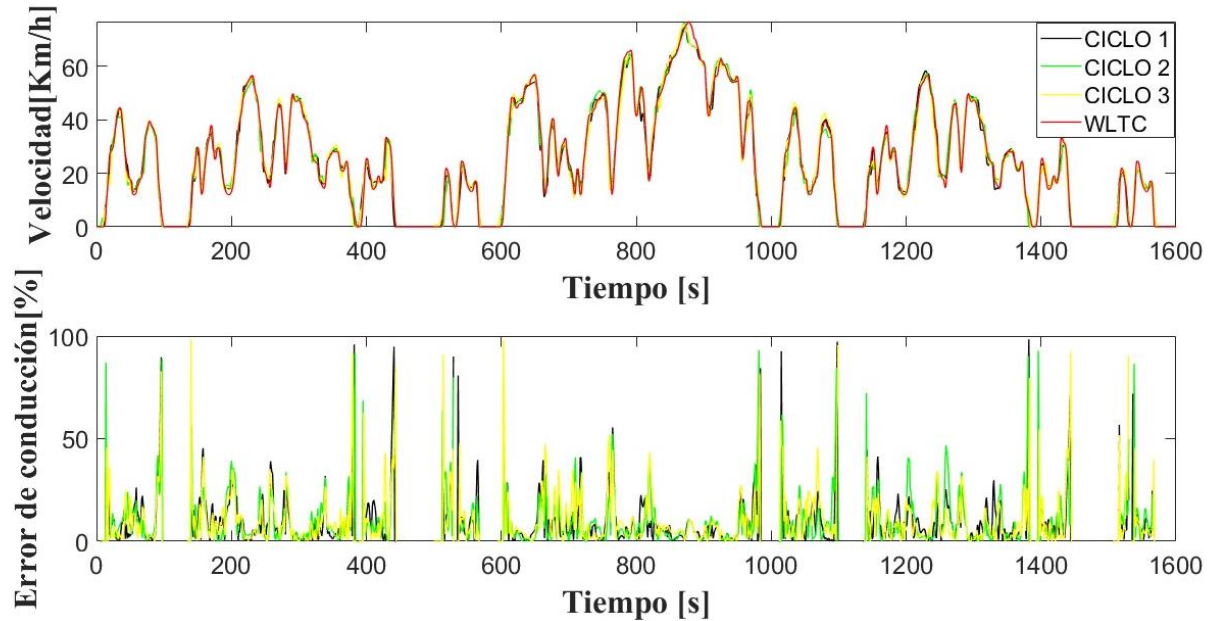


Fig. 50. Ciclo de conducción (arriba) y errores de conducción (abajo).

Es posible apreciarse en la **Fig. 50** que los errores de conducción del piloto en las 3 pruebas son muy similares, el error promedio de estos 3 ciclos fue del 10.19%, sin embargo, los picos de este error de conducción se dan en transiciones del vehículo en movimiento-estacionario esto quiere decir que el piloto no rebaja la velocidad a 0 o pone el vehículo en movimiento en el segundo exacto, este aspecto podría mejorarse con la práctica del piloto en replicar el ciclo.

Errores de resultado propagado

El error propagado promedio calculado según la metodología para el factor de emisión del dióxido de carbono fue del 16.87% con la estimación de masa de aire teórica y con la medición de este flujo el resultado en el error propagado fue del 15.37%.

En la **Fig. 51** se visualiza un comparativo de la propagación de error de ambos métodos utilizados para la extracción de factor de emisión del dióxido de carbono (método de medición del flujo de aire y método de estimación teórica del flujo de aire). Es posible observar que en ambos métodos se siguió con gran similitud el ciclo WLTC y pueden notarse grandes cambios en la distribución de los cálculos del factor de emisión y los cálculos del error a lo largo del ciclo, en general en el estimativo teórico la tendencia del error se incrementa en las zonas de ralentí al contrario del comportamiento con la medición del flujo de aire.

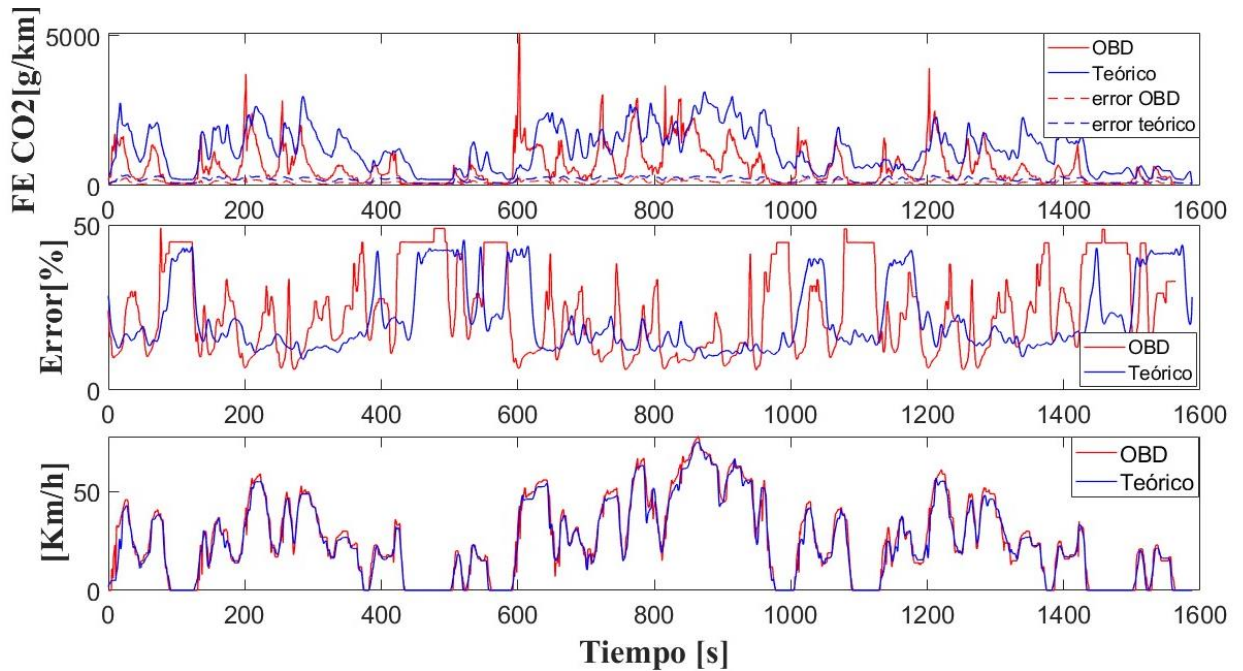


Fig. 51. Comparativo entre métodos de extracción del factor de emisión y error propagado (arriba), error propagado porcentual (medio) y velocidad del vehículo (abajo).

Modelo GEM

Para el análisis de los factores de emisión y rendimiento del vehículo extraídos mediante el modelo internacional GEM, fue necesario evaluar las mismas locaciones evaluadas en los resultados de las simulaciones CFD, donde se evalúan 3 locaciones sumamente importantes para el comercio colombiano como lo son Bogotá, Medellín y Barranquilla. Los resultados obtenidos mediante el modelo pueden ser apreciados en las **Fig. 52** y **Fig. 53**.

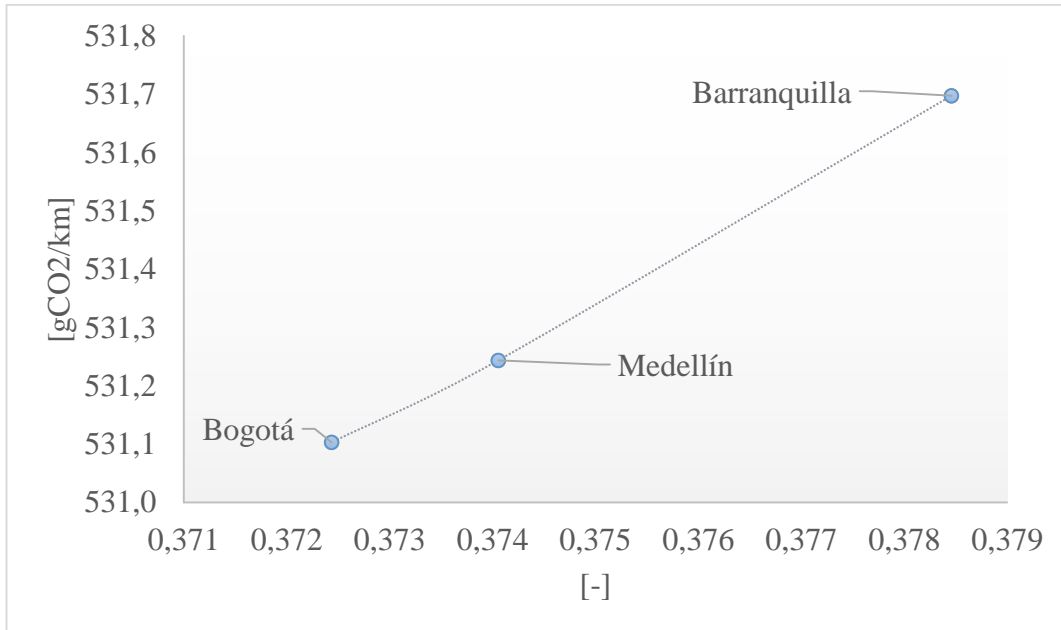


Fig. 52. Factor de emisión del CO₂ en función del coeficiente de arrastre del vehículo.

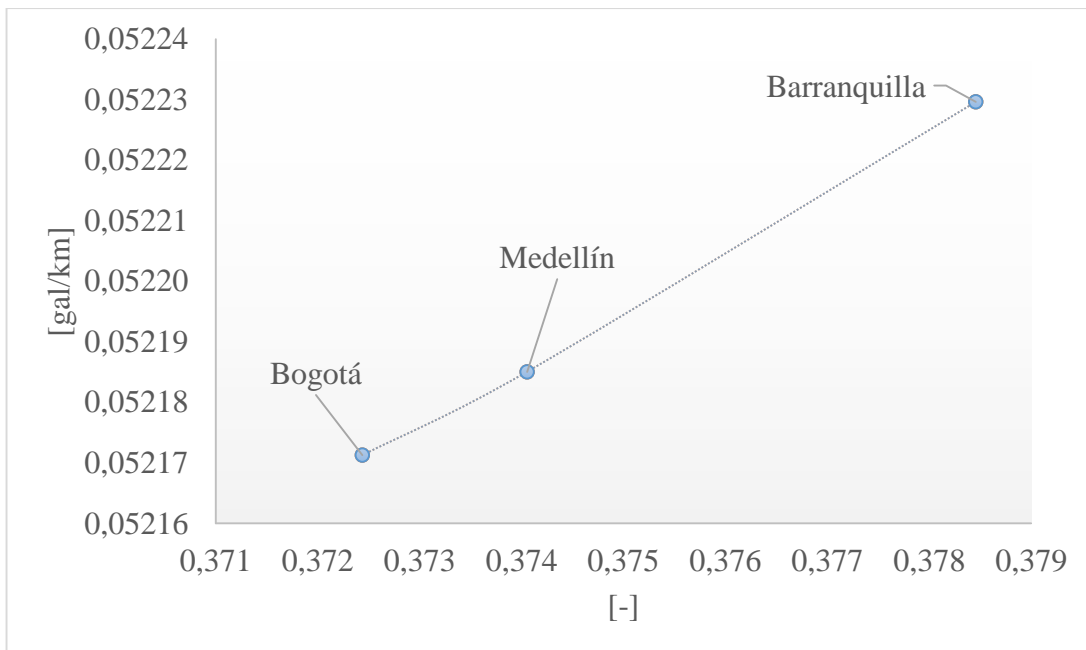


Fig. 53. Factor de rendimiento de combustible en función del coeficiente de arrastre del vehículo.

En las **Fig. 52** y **Fig. 53** puede observarse una tendencia de que tanto el factor de emisión del CO₂ y el factor de rendimiento de combustible extraídos mediante el GEM, son directamente proporcionales al coeficiente de drag. El resultado anterior se debe a que, al tener un coeficiente de drag mayor se tiene una fuerza de oposición mayor que vencer por el motor y esto hace que el

consumo de combustible se haga mayor y que haya más emisiones de CO₂. Los factores de rendimiento del vehículo y las emisiones apenas experimentan variaciones mínimas, pero profundizando en el análisis de estos indicadores, es posible obtener resultados de suma importancia. Por ejemplo, si consideramos que estos automóviles recorren 3000 km al mes, una modificación en la aerodinámica del vehículo que reduzca el coeficiente de arrastre en tan solo un 0.08% podría dar como resultado una disminución de 1380 gCO₂ en emisiones. Además, esta herramienta permite llevar a cabo análisis a nivel de flotas de vehículos, donde pequeños cambios pueden tener un impacto significativo en los resultados, siendo de gran relevancia para las empresas manufactureras.

Comparativo de resultados obtenidos mediante simulación CFD y las pruebas de desaceleración

El comparativo de resultados de simulación y experimentales para la extracción del coeficiente de arrastre del vehículo Chevrolet NHR 2022 puede ser apreciado en la **TABLA XVIII**.

TABLA XVIII. COMPARATIVO DE RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN CFD Y LAS PRUEBAS DE DESACELERACIÓN

Desaceleración CFD		% de diferencia
0.39	0.37	4%

Esta diferencia de resultados podría deberse a múltiples factores de error como:

- En la simulación CFD: Como puede apreciarse en la Ilustración 28, la simplificación desarrollada con el fin de evitar puntos de estancamiento en geometrías complicadas y la ausencia de las llantas por la razón de que estas no se extienden a lo profundo de la geometría del vehículo, los resultados pueden diferir de la realidad siendo los simulados más bajos, ya que, las llantas también generan arrastre aerodinámico.
- En las pruebas de Desaceleración: En el desarrollo de las pruebas hubo otros automóviles los cuales podrían afectar el flujo de aire a través del vehículo afectando las mediciones de fuerzas disipadas en el trayecto. Además, a pesar de que el procedimiento se hizo bajo la norma la longitud de la carretera no permitía

culminar la prueba de un solo intento por lo cual hubo que seccionar la prueba en 2 partes y este seccionado hizo que hubiera una discontinuidad en los datos, esta discontinuidad podría afectar seriamente el análisis de fuerzas desarrollado en la metodología. Otros elementos que pudieron haber condicionado los resultados de las pruebas fueron: falta de experiencia por parte del conductor, irregularidades y rugosidad variable en la vía, falta de un sistema de medición de velocidad del vehículo en línea y con una capacidad de muestreo mayor.

Comparativo de resultados del Modelo GEM y de las pruebas realizadas en transitorio

El comparativo de resultados entregados por el modelo y los resultados extraídos de las pruebas realizadas en estado transitorio en dinamómetro de rodillos puede apreciarse en la **TABLA XIX**. Además, los comparativos porcentuales pueden apreciarse en la **TABLA XX**.

TABLA XIX. COMPARATIVO DE RESULTADOS DEL MODELO GEM Y LAS PRUEBAS REALIZADAS EN TRANSITORIO.

Ítem	Modelo GEM	Masa de aire teórica	Masa de aire medida
Factor de emisión de CO ₂ [gCO ₂ /km]	531	760	616
Factor de consumo de combustible[gal/km]	0.052	0.077	0.063

TABLA XX. DIFERENCIAS ENTRE METODOLOGÍAS DE EXTRACCIÓN DE FACTOR DE EMISIÓN

Ítem	Factor de emisión	Factor de consumo
Diferencia entre el modelo y el método de aire de masa estimada teóricamente	30%	32%
Diferencia entre el modelo y el método de aire de masa medida	14%	17%

Esta diferencia se debe a varios factores como:

- Mapas de “motoring”, de motor a máxima carga y de ciclo transitorio son promedios de la información facilitada por la EPA, sin embargo, no son los mapas exactos extraídos del vehículo.
- Errores propagados debidos a los elementos de medición.

- Simplificaciones y errores provenientes de la simulación CFD.

Es importante tener en cuenta que las simulaciones se llevan a cabo utilizando las características físicas de un vehículo completamente distinto al que se busca analizar. Además, se debe considerar que las condiciones ambientales en las cuales se realiza la simulación del modelo están basadas en condiciones a nivel del mar, lo cual puede tener una influencia significativa en la estimación de los factores.

V. CONCLUSIONES

- En este estudio se ha implementado una metodología combinada de uso de técnicas CFD- Pruebas de desaceleración libre (coast-down) y uso del modelo GEM para la estimación de emisiones específicas de CO_2 y de la eficiencia del uso del combustible en vehículos semipesados. La metodología ha sido utilizada para la estimación de dichas variables de interés a condiciones atmosféricas de Barranquilla, Medellín y Barranquilla, encontrando que el coeficiente de resistencia aerodinámica del aire “drag” tiende a ser menor con la altura sobre el nivel del mar, por efecto de la disminución de la densidad del aire. Así mismo, el consumo de combustible y las emisiones de CO_2 por kilómetro tienden a disminuir, debido a la menor potencia que el motor debe vencer debidas a las fuerzas de oposición del viento. Adicionalmente, al comparar los resultados de la metodología con medición experimentales hechas en Medellín siguiendo el ciclo WLTC, se ha encontrado que la metodología sobre predice las variables de interés en un 15.5% aproximadamente. Dicha incertidumbre se puede reducir mejorando la estimación de la masa del aire que entra al motor, reduciendo los errores propagados en la metodología de medición y mejorando las simplificaciones y modelos de cálculo de la fase en que se usa el CFD. A continuación, se discuten otras conclusiones del estudio:
- El establecimiento de las condiciones geométricas del mallado de un vehículo semipesado para el análisis CFD es fundamental para obtener resultados precisos en la simulación. El uso de técnicas de mallado adecuadas permite capturar de manera efectiva los flujos de fluidos y las fuerzas que actúan sobre el vehículo, lo cual es esencial para un análisis CFD preciso.

-
- La simulación CFD proporciona una herramienta valiosa para determinar los parámetros operativos de un vehículo semipesado. Al simular las fuerzas y la fluidodinámica que actúan sobre el vehículo en diferentes condiciones, es posible evaluar y optimizar su rendimiento en términos de resistencia aerodinámica, distribución de presión y campo de velocidad del flujo alrededor del vehículo.
 - La implementación de un modelo de cálculo avalado internacionalmente basado en los resultados de la simulación CFD permite establecer de manera confiable y precisa las variables operativas y ambientales de los vehículos semipesados. Esto proporciona una base sólida para el diseño y desarrollo de estos vehículos, así como para la evaluación de su rendimiento y cumplimiento de los estándares y regulaciones internacionales.
 - La verificación experimental de los resultados numéricos obtenidos en un vehículo semipesado en condiciones reales es esencial para validar la precisión y confiabilidad de la simulación CFD así mismo como mediante pruebas prácticas en situaciones reales, se puede comparar y contrastar los resultados obtenidos en la simulación con los datos reales, lo que permite evaluar la efectividad del modelo y realizar ajustes o mejoras si es necesario.
 - Las simulaciones son una herramienta valiosa para obtener perspectivas preliminares y guiar las decisiones. Sin embargo, es fundamental ejercer un análisis crítico de los resultados y considerar cómo las diferencias entre el modelo y la realidad podrían afectar las conclusiones. En última instancia, una interpretación informada y una combinación de datos experimentales y simulados contribuirán a una toma de decisiones más precisa y completa.
 - El flujo de aire admitido es un parámetro importante para el cálculo de factores de emisiones y rendimiento de un vehículo, aunque su estimación teórica arroja un resultado no tan alejado de la realidad permitiendo realizar estudios y ver tendencias, se convierte en un aspecto de vital importancia contar con una metodología correcta para la medición directa de este parámetro. La extracción de este flujo y otras variables con el OBD resulta ser una alternativa de medición correcta y acertada, reduciendo un poco el factor de error resultante de los equipos, gracias a su alta resolución.

VI. REFERENCIAS

- [1] UPME, Plan energético nacional 2020-2050, 2020. Disponible en :<https://www1.upme.gov.co/>
- [2] BBC News, Mundo, Cómo Volkswagen trató de encubrir el "terrible" fraude de las emisiones contaminantes, 5 de mayo 2018. Disponible en :
<https://www.bbc.com/mundo/noticias-44014908>
- [3] HAL Open Science, Methods of estimation of atmospheric emissions from transport: European scientist network and scientific state-of-the art, 1999. Disponible en :<https://hal.science/hal-01253787>
- [4] David C.S. Beddows, Roy M. Harrison, Comparison of average particle number emission factors for heavy and light duty vehicles derived from rolling chassis dynamometer and field studies, 2008. Disponible en:
<https://doi:10.1016/j.atmosenv.2008.06.021>
- [5] SAE, SAE-J1263, Road load measurement and dynamometer simulation using coastdown techniques, 1996. Disponible en :<http://www.sae.org>
- [6] EPA, Greenhouse Gas Emissions Model Phase 2, 2022. Disponible en :
<https://espanol.epa.gov/>
- [7] Chaitanya Chilbule, Awadhesh Upadhyay, Yagna Mukkamala, Analyzing the profile modification of truck-trailer to prune the aerodynamic drag and its repercussion on fuel consumption, University Vellore, 2014. Disponible en :
<https://10.1016/j.proeng.2014.12.399>
- [8] Diego Fernando Flórez Trujillo, Análisis mediante dinámica de fluidos computacionales de un perfil aerodinámico para un vehículo tipo fórmula SAE, Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ingeniería Mecánica Pereira, 2020. Disponible en :
<https://repositorio.utp.edu.co/home>
- [9] Pierpaolo Napolitano, Chiara Guido, Carlo Beatrice, and Nicola Del Giacomo, Application of a Dual Fuel Diesel-CNG Configuration in a Euro 5 Automotive Diesel Engine. 2017. Disponible en: <https://doi.org/10.4271/2017-01-0769>

-
- [10] UNECE, Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure, 2014. Disponible en : <https://unece.org/>
- [11] McCormick, Barnes W, *Aerodynamics, Aeronautics, and Flight Mechanics*, 1979. Disponible en : <https://www.aero.psu.edu/>
- [12] Eddie F. Barrera, Fredy A. Aguirre, Salvador Vargas, Edwin D. Martínez, Influencia del Y Plus en el Valor del Esfuerzo Cortante de Pared a través Simulaciones empleando Dinámica Computacional de Fluidos, Universidad Libre, Facultad. de Ingeniería, Dpto. Ingeniería Mecánica, Bogota D.C, Colombia, 2018. Disponible en : <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000400291>
- [13] B. Andersson, R. Andersson, L. Håkansson, M. Mortensen, R. Sudiyo, and B. Van Wachem, Computational fluid dynamics for engineers, vol. 9781107018. 2011. Disponible en <http://ebooks.cambridge.org/ebook.jsf?bid=CBO9781139093590>
- [14] Luis Felipe Durán Vinuesa, Análisis y desarrollo de la simulación termo-hidráulica de flujo multifase en CFD con ANSYS Fluent. Universidad Politécnica de Madrid, 2017. Disponible en : <https://oa.upm.es/>
- [15] Giakoumis, E. G. Driving and Engine Cycles. Alemania: Springer International Publishing. 2016. Disponible en : <https://doi.org/10.1007/978-3-319-49034-2>
- [16] OBD. (18 de junio 2023). En *Wikipedia*. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/OBD>
- [17] SAE, SAE-J1939, Digital Annex, 2023. Disponible en: https://doi.org/10.4271/J1939DA_202301
- [18] SAE, SAE-J1979, E/E DIAGNOSTIC TEST MODES, 2017. Disponible en: https://doi.org/10.4271/J1979_201702
- [19] Vicente Franco, Oscar Delgado and Rachel Muncrief. Heavy-Duty vehicle fuel-efficiency simulation: A comparison of us and eu tools. 2015. Disponible en : <https://theicct.org/>

-
- [20] University of Technology Graz, Institute for Internal Combustion Engines and Thermodynamics, Development and testing of a certification procedure for CO₂ emissions and fuel consumption of HDV, 2012. Disponible en: <https://www.itna.tugraz.at/en/>
- [21] Michelin, Como calcular emisiones de CO₂, 2023. Disponible en: <https://connectedfleet.michelin.com/es/blog/calcular-emisiones-de-co2>
- [22] UPME, ANEXO A: Equivalencia energética consumo vehículo operando con GNV y diésel convencional, 2016. Disponible en: <https://www1.upme.gov.co/Hidrocarburos/Estudios%202014-2016/Anexo%20A.%20Equivalencia%20energ%C3%A9tica%20GNV-di%C3%A9sel.pdf>
- [23] Revista carga pesada, 20 de febrero 2022. Disponible en [:https://revistacargapesada.com/](https://revistacargapesada.com/)
- [24] Y+ Calculator, Volupe Application, 2022. Disponible en [:https://volute.se/y-calculator-launched-at-volupes-webpage/](https://volute.se/y-calculator-launched-at-volupes-webpage/)
- [25] ANSYS, “Design Modeler”,2022. Disponible en [:https://www.ansys.com/academic/students](https://www.ansys.com/academic/students)
- [26] Houigab Jeong, Seungho Lee, Soon-Duck Kwon, Blockage corrections for wind tunnel tests conducted on a Darrieus wind turbine, 2018. Disponible en [:https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.06.002](https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.06.002)
- [27] ANSYS, “Ansys Fluent”. 2022. Disponible en [:https://www.ansys.com/academic/students](https://www.ansys.com/academic/students)
- [28] Gustavo Richmond Navarro, Modelos de turbulencia introductorio, 2019. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.21060.17289>
- [29] ASME, Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications, 2008. Disponible en [:https://asmedigitalcollection.asme.org/fluidsengineering](https://asmedigitalcollection.asme.org/fluidsengineering)
- [30] Iván Darío Bedoya Caro, Andrés Adolfo Amell Arrieta, David Zuluaga Castrillón, Andrés David Morales Rojas, Metodología para el análisis de parámetros

operativos y ambientales de vehículos semi-pesados en el contexto colombiano, 2023. Disponible en: <https://repositoryinst.uniguajira.edu.co/>

[31] Oscar David Hincapié García, Diseño e implementación de un modelo para el cálculo de incertidumbres de emisiones contaminantes en pruebas dinámicas y estáticas de fuentes móviles. Disponible en : <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/>

[32] United States Environmental Protection Agency, Greenhouse Gas Emissions Model (GEM) v4.0 User Guide, 2022. Disponible en : <https://espanol.epa.gov/>

[33] Juan Manuel Perrier, Eugenio Bonvín, Esteban Ibarrola, Verificación del rendimiento aerodinámico de un vehículo terrestre aplicando técnicas de cálculo y experimentales. Departamento de Aeronáutica. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba. 2004. Disponible en : <https://rdu.unc.edu.ar/>