



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Grupo de Investigación en Combustibles Alternativos, Energía, y  
Protección del Medio Ambiente  
Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica  
Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Colombia –Sede  
Bogotá D.C.  
Carrera 30 No 45 –03, Edificio 453, Oficina 401  
Tel.: 3165320, Fax.: 316533 Correo Electrónico:  
[gruicte\\_bog@unal.edu.co](mailto:gruicte_bog@unal.edu.co)

**ESTUDIO DE TECNOLOGÍAS DISPONIBLES  
PARA INCENTIVAR EL USO DEL GAS  
COMBUSTIBLE EN EL SECTOR TRANSPORTE  
(Informe Final-Tomo III)**

**Informe preparado para:**

**Unidad de Planeación Minero Energética –  
UPME**

**Contrato # C-005-2014**

**Informe preparado por:**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA –  
FACULTAD DE INGENIERIA**

**Noviembre de 2014**



## CONTENIDO

1.	MODELO DE EMISIONES Y EFICIENCIA ENERGÉTICA.....	19
1.1	SOPORTE TEÓRICO .....	19
1.2	CARACTERÍSTICAS DEL SOFTWARE.....	22
2.	DESARROLLO MODELOS .....	24
2.1	MODELO POTENCIA ESPECÍFICA DEL VEHÍCULO (VSP VEHICLE SPECIFIC POWER).....	24
2.1.1	Desarrollo ciclos de manejo .....	28
2.2	MODELO MANTOS DE EMISIONES Y DINÁMICA VEHICULAR.....	31
2.2.1	Módulo generación mantos de factor de emisión.....	31
2.2.2	Modulo dinámica vehicular.....	34
2.3	PARÁMETROS DE COMPARACIÓN ENTRE MODELOS .....	42
2.4	VEHÍCULOS ELÉCTRICOS.....	42
2.5	FACTORES DE EMISIÓN QUE PERMITE ESTIMAR EL SOFTWARE VERSIÓN 1.....	43
2.5.1	Carácter económico .....	44
2.5.2	Eficiencia energética.....	44
2.5.3	Medio ambiente.....	44
2.5.4	Consumo de combustible.....	44
3.	EJEMPLOS, VALIDACIÓN Y SENSIBILIDAD DEL MODELO .....	45
3.1	PARÁMETROS DE AJUSTE MODELO.....	45
3.2	SENSIBILIDAD FINAL MODELO .....	47
3.3	CONCLUSIONES SENSIBILIDAD DEL MODELO .....	52
4.	COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS REAL VS SIMULACIÓN .....	53
4.1	VEHÍCULO A. DUAL DIÉSEL-GNV.....	53
4.1.1	Conclusiones de la modelación del VSP [Kw/Ton].....	55
4.2	VEHÍCULO B. DEDICADO-GNV.....	57
4.3	VEHÍCULO C. TRANSFORMADO-GNV.....	60
4.4	VEHÍCULO D. DUAL DIÉSEL-GLP .....	62



4.5	VEHÍCULO E. TRANSFORMADO 1-GLP .....	64
4.6	VEHÍCULO F. TRANSFORMADO 2-GLP .....	67
4.7	OBSERVACIONES DEL MODELO EEVmod 1.0.....	70
4.8	RESULTADOS GLOBALES Y OBSERVACIONES DE LA MUESTRA DE VEHÍCULOS .....	71
5.	ANÁLISIS ENERGÉTICO ENTRE TECNOLOGÍAS Y COMBUSTIBLES .....	74
5.1	VEHÍCULO A ANÁLISIS TECNOLOGÍAS Y COMBUSTIBLES, NPR 71.....	74
5.1.1	Observaciones análisis tecnologías y combustibles, NPR 71 .....	75
5.2	VEHÍCULO A ANÁLISIS TECNOLOGÍAS Y COMBUSTIBLES, DODGE D600.....	77
5.2.1	Observaciones análisis tecnologías y combustibles, DODGE D600 .....	78
5.3	COMENTARIOS ANÁLISIS ENERGÉTICO ENTRE TECNOLOGÍAS Y COMBUSTIBLES .....	79
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	80



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Grupo de Investigación en Combustibles Alternativos, Energía, y  
Protección del Medio Ambiente  
Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica  
Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Colombia –Sede  
Bogotá D.C.  
Carrera 30 No 45 –03, Edificio 453, Oficina 401  
Tel.: 3165320, Fax.: 316533 Correo Electrónico:  
[gruicte\\_bog@unal.edu.co](mailto:gruicte_bog@unal.edu.co)

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ejemplo cido de manejo.....	33
--------------------------------------	----



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de conceptos generales para proceso de modelo .....	19
Figura 2. Mapa de conceptos específicos para proceso de modelo .....	20
Figura 3. Cido de manejo vehículos de carga pesada ilustrado desde Matlab.....	25
Figura 4. Términos de la ecuación 1 VSP .....	26
Figura 5. VSP calculado para un vehículo de carga pesada cap. 24 Ton, potencia 180 kW @ 2100 Nm con diferentes perfiles de carga.....	26
Figura 6. Frecuencia de VSP en diferentes cargas para un vehículo de 129 [kW]. a. 5% - b. 10% - c. 15% - d. 20% .....	27
Figura 7. Cido de manejo para evaluación de vehículos articulados en Bogotá (CEMB Bogotá) 28	
Figura 8. Organigrama modulo mantos de emisiones.....	32
Figura 9. Ejemplo manto de emisiones de [gHC/km] para un vehículo dual diésel -GLP de 75kW .....	32
Figura 10. Torque motor para vehículo modelado en dinámica longitudinal camioneta LUV ...	35
Figura 11. Velocidad modelada del motor camioneta LUV .....	36
Figura 12. Potencia del motor camioneta LUV simulada en un cido de manejo .....	37
Figura 13. Curvas de torque en diferentes motores predefinidas en software .....	38
Figura 14. Curva construida a partir de datos ingresados por el usuario .....	38
Figura 15. Condición de conducción en vehículo predefinida en software .....	39
Figura 16. Programación de caja de velocidades ZF de seis relaciones de velocidad.....	39
Figura 17. Aceleración de vehículo con 180 kW y una caja ZF de 7 velocidades.....	40
Figura 18. Potencia estimada para una aceleración de un vehículo.....	41
Figura 19. Simulación de un vehículo de 200kW en el ciclo de manejo CEMB(Ciclo de emisiones manejo para Bogotá). .....	41
Figura 20. Dinámica de vehículo de 200kW .....	42
Figura 21. Comparación emisiones .....	46
Figura 22. Peso emisiones.....	46
Figura 23. Consumo combustible.....	47
Figura 24. Sensibilidad de vehículo dual diésel-GNV (NPR) .....	48
Figura 25. Sensibilidad consumo combustible vehículo dual diésel-GNV (NPR).....	48
Figura 26. Sensibilidad del modelo a cambios en condiciones de operación, vehículo dedicado GNV (IVECO) .....	49
Figura 27. Sensibilidad del modelo a cambios en condiciones de operación II, vehículo dedicado GNV (IVECO) .....	49
Figura 28. Sensibilidad del modelo Chevrolet NPR 729 .....	50
Figura 29. Sensibilidad del modelo a condición de operación normal vehículo transformado GLP (DODGE).....	50



Figura 30. Sensibilidad del modelo sobre vehículos pequeños transformado GLP (LUV).....	51
Figura 31. Consumo vehículo transformado 2 GLP (LUV).....	51
Figura 32. Emisiones vehículo A (NPR 71), modo diésel.....	53
Figura 33. Emisiones vehículo A (NPR), modo dual diésel-GNV.....	54
Figura 34. Consumo vehículo A (NPR), modo diésel y dual diésel-GNV.....	54
Figura 35. VSP vehículo A (NPR), a 20% de pendiente.....	55
Figura 36. Gasto del vehículo A (NPR), simulado.....	56
Figura 37. Emisiones vehículo B (IVECO).....	57
Figura 38. Consumo de combustible vehículo B (IVECO).....	58
Figura 39. VSP vehículo dedicado B (IVECO), a 20% de pendiente.....	58
Figura 40. Emisiones vs demanda energética.....	59
Figura 41. Factores de emisión vehículo B (IVECO).....	60
Figura 42. Emisiones vehículo C (NPR 729).....	60
Figura 43. Consumo de combustible vehículo C (NPR 729).....	61
Figura 44. VSP vehículo C (NPR 729), a 20% de pendiente.....	61
Figura 45. Gasto del vehículo C (NPR 729), simulado.....	62
Figura 46. Emisiones vehículo D (NKR).....	63
Figura 47. Consumo de combustible vehículo D (NKR).....	63
Figura 48. VSP vehículo C (NKR), a 20% de pendiente.....	64
Figura 49. Consumo acumulado vehículo D (NKR).....	64
Figura 50. Emisiones vehículo E (DODGE).....	65
Figura 51. Consumo de combustible vehículo E (DODGE).....	65
Figura 52. VSP vehículo E (DODGE), a 20% de pendiente.....	66
Figura 53. VSP vehículo E (DODGE), a 10% de pendiente.....	66
Figura 54. Emisiones vehículo D (LUV).....	67
Figura 55. Consumo de combustible Chevrolet LUV.....	68
Figura 56. VSP vehículo Chevrolet LUV, a 20% de pendiente.....	68
Figura 57. Consumo instantáneo vehículo F (LUV).....	69
Figura 58 Gasto del vehículo F (LUV).....	69
Figura 59. Aporte en emisiones de diferentes tecnologías.....	71
Figura 60. Consumo de combustible para los vehículos evaluados.....	72
Figura 61. Comparación aporte de emisiones real vs simulación.....	73
Figura 62. Vehículo Smithelectric, análogo en capacidad al NPR 71.....	74
Figura 63. Consumo energético y eficiencia del vehículo NPR 71 simulado en diferentes combustibles.....	75
Figura 64. Emisiones para vehículo NPR 71 usando diferentes combustibles.....	76
Figura 65. Vehículo EVI, análogo en capacidad al DODGE D600.....	77
Figura 66. Consumo energético y eficiencia del vehículo DODGE D600 simulado en diferentes combustibles.....	78



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Grupo de Investigación en Combustibles Alternativos, Energía, y  
Protección del Medio Ambiente  
Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica  
Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Colombia –Sede  
Bogotá D.C.  
Carrera 30 No 45 –03, Edificio 453, Oficina 401  
Tel.: 3165320, Fax.: 316533 Correo Electrónico:  
[gruicte\\_bog@unal.edu.co](mailto:gruicte_bog@unal.edu.co)

Figura 67. Emisiones para vehículo DODGE D600 usando diferentes combustibles ..... 79



## RESUMEN EJECUTIVO

Este documento muestra el desarrollo y la implementación de un modelo para la simulación de la operación de un vehículo bajo diferentes condiciones de trabajo, bajo diferentes tipos de tecnologías y bajo diferentes tipos de combustibles con el objetivo de permitir indagar y evaluar las tecnologías existentes que implementen gas natural en el sector transporte, haciendo una comparación con tecnologías convencionales como vehículos diésel y a gasolina, también incluye vehículos de tipo dual y eléctricos. Además se muestra variedad de factores de emisión y consumo que son base para el desarrollo de análisis de eficiencia, de consumo de combustible, y económico.

La flexibilidad del modelo permite la modelación de vehículos de diferentes capacidades y tecnologías.

Dentro de los alcances del modelo se cita:

1. La capacidad de modelar vehículos con combustibles: GNV, GLN, GLP, diésel, Gasolina y además simular vehículos eléctricos con regeneración y estado de carga en baterías.
2. Presenta correlación con datos reales por encima del 75% para vehículos simulados cuya peso neto sea mayor a dos toneladas, para valores inferiores, resuelve el sistema de ecuaciones pero el nivel de correlación con datos reales cae considerablemente.
3. Trae anexo el modelo, vehículos muestra de cada tipología de combustible y de diferentes capacidades.
4. Es capaz de modelar vehículos con y sin turbo, con intercambiador de temperatura y sin, motores encendidos por chispa y a compresión.
5. Puede simular tres condiciones de operación: Agresiva – Normal –Suave, tal que permita al usuario indagar sobre las condiciones de operación del vehículo bajo diferentes zonas.
6. Respecto a la normativa en emisiones, esta normado bajo estándar EURO (II III IV V y VI).
7. Conociendo condiciones de operación y entorno, puede construir un perfil de eficiencia para el motor buscando acercarse a la realidad.
8. Como insumo de entrada obligatorio, está el perfil de velocidad que debe seguir el vehículo, tal como si estuviese desarrollando una ruta.
9. Bajo la condición citada en (7), el modelo trae un librería que le permite al usuario construir un ciclo de manejo, o perfil de velocidad representativo de velocidad de una ruta predeterminada que desee el usuario simular.



10. En cuanto a emisiones se refiere, el modelo está en la capacidad de simular emisiones de CO<sub>2</sub> – CO – HC –NO<sub>x</sub> y PM.
11. El modelo maneja cuatro (4) tipos de factores de emisión:
  - a. Gramos del contaminante por kilómetro desplazado del vehículo, siendo este el de mayor nivel de confianza dado la cantidad de data experimental que respalda el resultado.
  - b. Gramos del contaminante por [kWh] consumido por el vehículo.
  - c. Gramos del contaminante por [kg] de combustible consumido, que presenta su equivalente en cuanto a consumo de energía.
  - d. Gramos del contaminante por [Ton] de carga transportada por el vehículo, incluyendo el peso del propio vehículo.
  - e. El modelo principal denominado *EEVmod* se compone de varios sub modelos ligados entre sí, para dar solución a las diferentes demandas del vehículo, citadas en los anteriores numerales. Los modelos incluyen:
    - i. Modelos de potencia específica vehicular, que se usa para evaluar la eficiencia de un vehículo desarrollando un trayecto y para apreciar la dependencia de las emisiones de la demanda de energía.
    - ii. Modelos de dinámica vehicular que buscan determinar el consumo energético efectivo del vehículo. Y estimar la cantidad de combustible dadas las condiciones de operación y las características técnicas del vehículo.
    - iii. Modelos de equilibrio químico, ecuaciones de Arrhenius y balance de carbono para determinar el nivel de emisiones del vehículo en medio de una simulación.
    - iv. Modelos estadísticos de mantos que a posteriori permitirá evaluar la simulación de un trayecto con más detalle.

A lo largo de este documento se presentara:

1. Marco teórico que involucra el desarrollo del modelo
2. Análisis de sensibilidad y resultados obtenidos del modelo
3. Capacidad del modelo para desarrollar diferentes tipos de análisis a un mismo vehículo.
4. Tutoriales de operación del programa desarrollado
5. Tutoriales específicos del modelo, aplicado a diferentes condiciones.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Grupo de Investigación en Combustibles Alternativos, Energía, y  
Protección del Medio Ambiente  
Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica  
Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Colombia –Sede  
Bogotá D.C.  
Carrera 30 No 45 –03, Edificio 453, Oficina 401  
Tel.: 3165320, Fax.: 316533 Correo Electrónico:  
[gruicte\\_bog@unal.edu.co](mailto:gruicte_bog@unal.edu.co)

EEVmod 1.0 es un programa desarrollado con el objeto de evaluar tecnologías vehiculares, presenta variedad de combinaciones y librerías que le dan al usuario variedad de opciones al momento de simular.



## ALCANCES

En este informe se incluyen los alcances presentados en el segundo informe que hacen parte del contrato C005 de 2014 suscrito entre la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y la Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá, adicionalmente cubre los siguientes alcances:

1. Construir un modelo que permita simular el funcionamiento de un vehículo con cada una de las tecnologías, para cada tipo de vehículo, servicio, categoría y gas combustible (gas natural -GNL y GNC- y GLP), y comparar los resultados con el funcionamiento de los vehículos a gasolina y diésel.
2. Definir y calcular para cada tecnología, indicadores ambientales y de uso eficiente y racional de la energía.
3. El modelo deberá calcular las emisiones esperadas de acuerdo a la calidad real del gas natural y GLP en el país, indicadores ambientales, indicadores de eficiencia energética, consumo de combustible, costos de inversión, costos operativos, costo del combustible, y demás aspectos relevantes.
4. Comparar los resultados por tecnología, tipo de vehículo, categoría y servicio, y por tipo de combustible
5. Analizar técnica, ambiental y económicamente los resultados obtenidos mediante el modelo.
6. Comparar los resultados prácticos con los calculados a través del modelo, y a partir de los resultados de las mediciones prácticas efectuadas, ajustar los supuestos y parámetros del modelo.



## DEFINICIONES

### ARBOL DE LEVAS

Es el encargado de controlar la apertura y cierre de las válvulas de admisión y escape de acuerdo a los tiempos del motor.

### BLOQUE DEL MOTOR

Es el elemento más grande del motor de combustión interna, en el cual se montan los demás componentes, tales como el cigüeñal, cárter, cilindros, pistones, bielas y culata. El bloque está soportado en el chasis del vehículo.

### BIELAS

Son los elementos de unión entre el cigüeñal y los pistones de un motor.

### BUJÍAS

Son los elementos encargados de generar la chispa eléctrica dentro de la cámara de combustión en los motores que operan con ciclo Otto, para hacer la ignición de la mezcla aire-combustible.

### CALOR DE COMBUSTIÓN ( $\Delta H_f^\circ$ )

Es la energía liberada en forma de calor cuando un componente logra combustión completa con oxígeno bajo condiciones estándar. Está expresado en unidades de energía por unidad de masa (kJ/kg o BTU/lb) o en unidades de energía por unidad de volumen (kJ/litro o BTU/gal).

### CALOR ESPECÍFICO ( $C_p - C_v$ )

Se define como la energía requerida para elevar en un grado Celsius la temperatura de una unidad de masa de una sustancia. Dicha energía depende de cómo se realice el proceso, por lo cual puede ser calor específico a volumen constante ( $C_v$ ) o calor específico a presión constante ( $C_p$ ). El calor específico a presión constante es siempre mayor que el de volumen constante porque la presión constante permite que el sistema se expanda y la energía de expansión también debe ser suministrada al sistema. Un mayor valor en el calor específico de un material muestra una mayor capacidad de almacenamiento de energía por parte de dicho material.



#### CALOR LATENTE DE VAPORIZACIÓN

Es el valor de la energía requerida para el cambio de fase de un líquido a vapor. Depende de las condiciones de temperatura y presión y está expresado en unidades de energía por unidad de masa (kJ/kg o BTU/lb) o en unidades de energía por unidad de volumen (kJ/litro o BTU/gal).

#### CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO

Es la capacidad volumétrica o másica de un vehículo para almacenar combustible en sus tanques, bien sea gas o líquido.

#### CÁRTER

Se ubica en la parte inferior del bloque del motor y sirve como depósito del aceite lubricante.

#### CIGÜEÑAL

Es el eje principal del motor y se encarga de convertir el movimiento lineal de los pistones en movimiento rotativo a partir del accionamiento de las bielas.

#### CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (k)

Indica la velocidad de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área y por unidad de diferencia de temperatura entre los extremos de dicho espesor. Es por tanto, una medida de la capacidad del material para conducir calor. Un material es buen conductor térmico cuando su conductividad térmica es elevada y, en contraste, un valor bajo de conductividad significa que el material es un aislante térmico. Sus unidades son energía por unidad de tiempo, distancia y temperatura (W/m °C o BTU/h lb °F).

#### CULATA

Se ubica en la parte superior del motor, encima del bloque del motor y forma la cámara de combustión. En la culata se instalan las válvulas de admisión y de escape así como los elementos de encendido e inyección del motor.

#### DINÁMICA VEHICULAR

Rama de la ingeniería que presenta en detalle la mecánica que se presenta en los diferentes desplazamientos de un vehículo, se clasifica en tres partes de acuerdo al plano de desplazamiento del vehículo: dinámica longitudinal, dinámica lateral y dinámica vertical.



### DENSIDAD ( $\rho$ )

Indica la cantidad de masa de una sustancia que está contenida en un volumen unitario.

$$\rho = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}}$$

### DYNO

Banco dinamométrico, dispositivo mecánico diseñado para montar vehículos sobre sus rodillos y poder frenarlo por diferentes mecanismos de manera controlada.

### ENERGÍA MÍNIMA DE INFLAMACIÓN

Es la energía mínima necesaria para conseguir la inflamación de un combustible en condiciones atmosféricas estándar.

### GAS A LIQUIDO (GAL)

Es el proceso de conversión de un combustible gaseoso a un combustible líquido, con origen en la tecnología conocida como Fischer Tropsch.

### GAL DIESEL

Es un tipo de diésel de alta calidad obtenido a partir de un proceso GAL.

### GRAVEDAD ESPECÍFICA ( $G_s$ )

Conocida también como densidad relativa, es la relación entre la densidad de un gas y la densidad del aire medida a las mismas condiciones de referencia.

$$G_s = \frac{\rho_{gas}}{\rho_{aire}}$$

### ÍNDICE WOBBE ( $W_s$ )

Es la relación entre el poder calorífico inferior de un combustible y la raíz cuadrada de su gravedad específica. Este parámetro sirve para establecer la intercambiabilidad entre gases combustibles usados en motores de combustión interna.

$$W_s = \frac{LHV}{G_s}$$



#### INTERVALO DE INFLAMABILIDAD

Es el intervalo de concentraciones de gases, nieblas o vapores de un combustible en aire en el cual puede generarse la ignición de la mezcla aire-combustible. Se expresa como un par de números que indican el límite inferior y el límite superior de dicho intervalo.

- Límite inferior de inflamabilidad: Es la concentración de gases, vapores o nieblas en aire, por debajo de la cual la mezcla no es inflamable.
- Límite superior de inflamabilidad: Es la concentración de gases, vapores o nieblas en aire, por encima de la cual la mezcla no es inflamable.

#### INTERENFRIADOR

Es un intercambiador de calor que disminuye la temperatura del aire de admisión de un motor una vez pasa por el turbocargador.

#### KNOCK

Es la combustión detonante no controlada al interior de los cilindros de un motor de combustión interna. Puede presentarse debido a la baja capacidad antidetonante del combustible en comparación con la relación de compresión del motor, a temperaturas muy altas dentro de la cámara de combustión (como en las paredes de los cilindros o en los electrodos de las bujías), o a una mala calibración en el tiempo de inicio de la chispa en las bujías. En todos los casos, se presenta la ignición temprana de la mezcla aire-combustible, con respecto al momento ideal para dicha ignición.

#### MANTO

Superficie graficada en 3D que permite representar las emisiones en función de dos variables dinámicas del vehículo. Por ejemplo: las emisiones de CO en función de la velocidad y la aceleración desarrolladas durante una prueba en ruta.

#### MÚLTIPLE DE ADMISIÓN

Es un elemento que tiene como función principal servir de distribuidor del aire de admisión, desde el sistema de admisión hacia cada uno de los cilindros del motor, donde es alimentado mediante las válvulas de admisión.

#### MÚLTIPLE DE ESCAPE

Es un elemento que tiene como función principal servir de colector de los gases de escape producidos en la combustión al ser liberados por cada cilindro mediante válvulas de escape y conducidos hacia el tubo de escape del vehículo.



#### NÚMERO DE CETANO

Es un indicativo de la facilidad con la cual un combustible hace ignición en un motor diésel. Se toma como referencia el valor de 100 para el cetano (n-hexadecano) puro y el valor de 15 para el heptametilnonano. Es medido en un motor que opera bajo condiciones estándar. Típicamente, los motores diésel se diseñan para un número de cetano entre 40 y 55. Por debajo de 38, se incrementa el retardo de la ignición en el motor.

#### OCTANAJE

También denominado número de octano es el índice de resistencia al *knock*, con base en combustibles de referencia como son el iso-octano (octanaje=100) y el n-heptano (octanaje=0).

#### PESO EN VACÍO

Es el peso del vehículo incluyendo chasis, motor y carrocería delantera. No incluye peso de carrocería posterior, por ejemplo peso de furgones, estacas, etc.

#### PESO NETO VEHICULAR

Es el peso original del vehículo en condiciones de operación con todo el equipo estándar de fábrica y con el tanque de combustible lleno a la capacidad nominal del tanque.

#### PESO BRUTO VEHICULAR (PBV)

Es el peso máximo de diseño del vehículo cargado, especificado por el fabricante mismo. Incluye el peso del vehículo en vacío, más el peso de la tripulación, más el peso máximo de carga que puede transportar

$$PBV = \text{Peso en vacío} + \text{peso carrocería posterior} + \text{peso tripulación} + \text{carga útil}$$

#### PISTÓN

Es un elemento que recibe la presión o energía liberada en la combustión para convertirla en un movimiento lineal, el cual es transmitido a las bielas.

#### PODER CALORÍFICO SUPERIOR (UHV por sus siglas en inglés)

Es la cantidad de energía que entrega un kilogramo o un metro cúbico de combustible al oxidarse de forma completa. Se considera que el vapor de agua contenido en los gases de combustión se condensa.



#### PODER CALORÍFICO INFERIOR (LHV por sus siglas en inglés)

Es el poder calorífico superior menos el calor latente de condensación de los productos de combustión.

#### PUNTO DE EBULLICIÓN ( $T_e$ )

Es la temperatura a la cual ocurre el cambio de fase de una sustancia entre la fase gaseosa y la fase líquida.

#### PUNTO DE FUSIÓN ( $T_F$ )

Es la temperatura a la cual ocurre el cambio de fase de una sustancia entre la fase líquida y la fase sólida.

#### PUNTO DE INFLAMACIÓN

Es la temperatura mínima en condiciones normales de presión, donde se desprende la suficiente cantidad de vapores de una sustancia para que se produzca la inflamación de la mezcla de dichos vapores con aire mediante el aporte de un foco de ignición externo.

#### RELACIÓN AIRE/COMBUSTIBLE

Es la relación entre la masa de aire y la masa de combustible en un proceso de combustión. Si dicha relación corresponde a la relación teórica requerida para una combustión completa, se denomina relación estequiométrica. Si el valor de la relación es mayor que la estequiométrica, la mezcla aire-combustible se denomina mezcla pobre y si la relación es menor que la estequiométrica, la mezcla se denomina mezcla rica.

#### SONDA LAMBDA

Es un sensor encargado de medir el nivel de oxígeno presente en los gases de escape del motor a partir del índice Lambda. Lambda es el índice que relaciona la masa de aire proporcionada y la masa de aire necesaria, por tanto si la cantidad de aire proporcionado es igual al necesario  $\lambda=1$  entonces la mezcla es estequiométrica, si es mayor  $\lambda>1$  entonces la mezcla es pobre y si es menor  $\lambda<1$  la mezcla es rica.

#### TEMPERATURA DE LLAMA ADIABÁTICA

Es la temperatura que alcanzarían los productos de combustión de una mezcla aire-combustible debido al calentamiento producido por la energía liberada en la combustión en condiciones adiabáticas, es decir, sin pérdida de calor hacia el entorno.



#### TEMPERATURA DE AUTOENCENDIDO

Es la temperatura mínima para que un combustible haga ignición en aire de forma espontánea en una atmósfera normal, sin un foco externo de ignición (chispa o llama).

#### TURBOCARGADOR

Es un dispositivo que se utiliza para aumentar la cantidad de aire que ingresa a la cámara de combustión del motor, a partir del aumento de presión del aire. Está conformado por una turbina accionada por la energía presente en los gases de escape y por un compresor encargado de aumentar la presión del aire de admisión antes de ser conducido a los pistones.

#### VÁLVULAS DE ADMISIÓN Y ESCAPE

Son elementos ubicados en la culata y accionados por el eje de levas, que tienen como función permitir el ingreso del aire (válvulas de admisión) y la salida de los gases producto de la combustión (válvulas de escape).

#### VISCOSIDAD CINEMÁTICA ( $\nu$ )

Es la relación entre la viscosidad dinámica y la densidad de un fluido.

Dos unidades son el  $m^2/s$  y el stoke (1 stoke =  $1\text{ cm}^2/s$ ) VISCOSIDAD DINÁMICA ( $\mu$ )

Es una medida de la resistencia a fluir de un líquido o un gas. La viscosidad es causada por las fuerzas de cohesión entre las moléculas en los líquidos, y por las colisiones moleculares en los gases. Su unidad es el poise que equivale a  $0.1\text{ Pa}\cdot\text{s}$  (pascal por segundo).

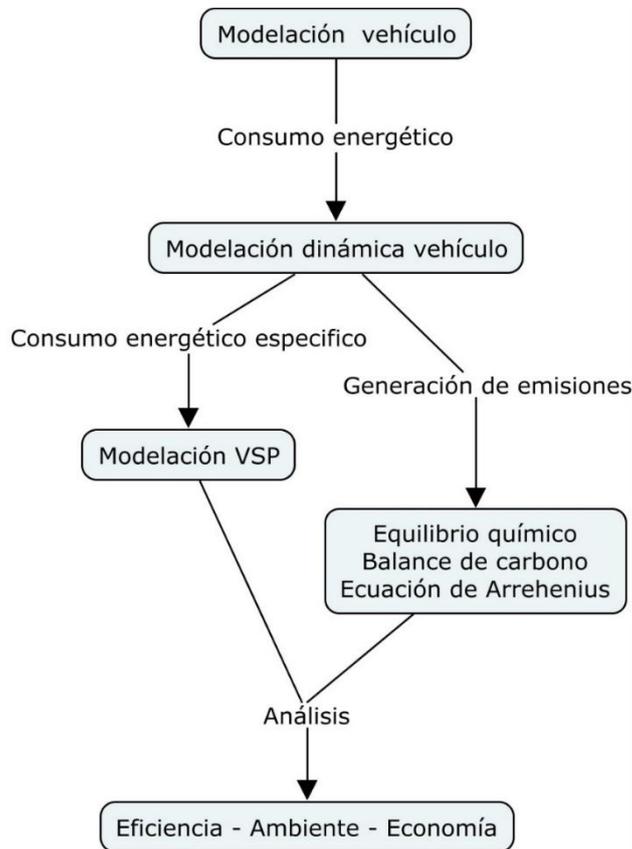


# 1. MODELO DE EMISIONES Y EFICIENCIA ENERGÉTICA

## 1.1 SOPORTE TEÓRICO

El modelo desarrollado para la estimación de factores de emisión contaminantes de vehículos, consumo energético y finalmente el desarrollo de análisis económicos, ambientales y energéticos está estructurado como se indica en la Figura 1.

**Figura 1. Mapa de conceptos generales para proceso de modelo**

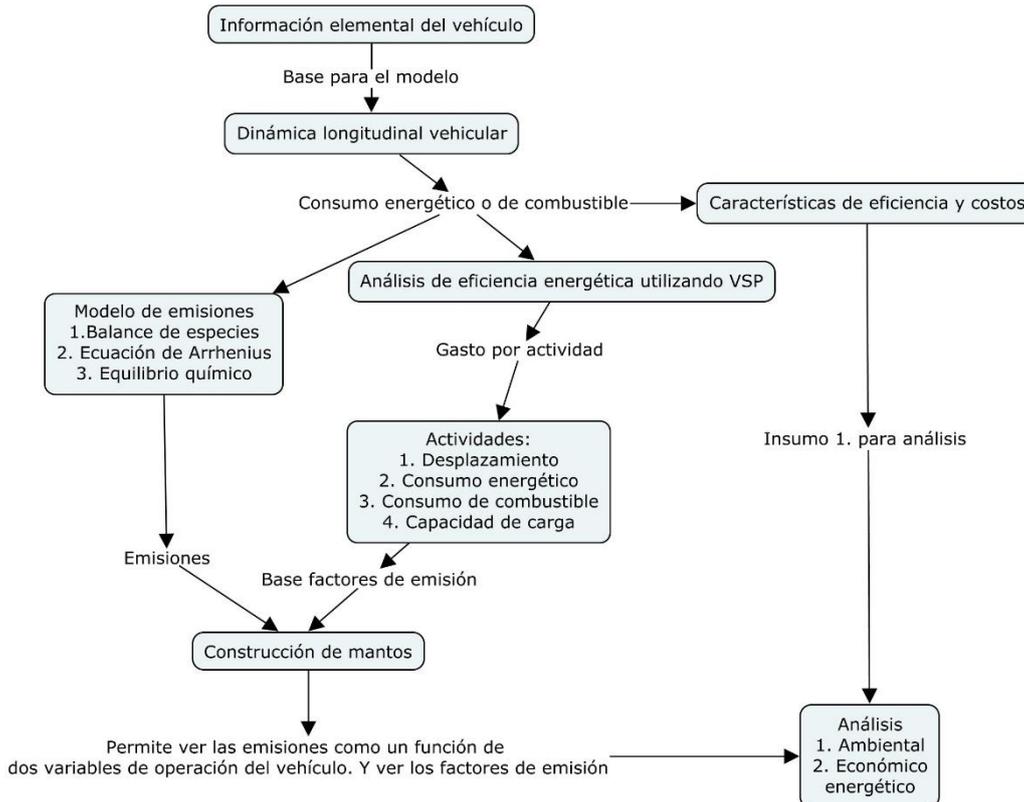


Fuente. Elaboración Propia



De modo más detallado la Figura 2 presenta las secciones que abarca el desarrollo de cada modelo propuesto.

**Figura 2. Mapa de conceptos específicos para proceso de modelo**



Fuente. Elaboración Propia

Como se ilustra la modelación parte de un análisis de dinámica vehicular, tal que permite estimar la cantidad de energía requerida para que determinado vehículo sea capaz de cumplir con su objetivo o simular algún recorrido.

El conocimiento detallado del vehículo permite caracterizarlo de tal modo que conociendo sus características técnicas y de eficiencia es posible conocer la cantidad de determinado combustible que necesita para operar y de ese punto partir hacia el cálculo de emisiones utilizando balance de especies, equilibrio químico y ecuaciones de Arrhenius.

Los factores de emisión de un vehículo se representan como la cantidad de gas contaminante generado por él, desarrollando determinada actividad o consumiendo unidades de combustible o su equivalente energía. Son valores representativos y específicos de las



actividades comunes de los vehículos. En este caso son estimados a partir del modelo de dinámica vehicular y el modelo de química para el cálculo de emisiones.

Por otro lado está el análisis económico, ambiental y energético que utiliza como insumos los factores de emisión calculados, los consumos de combustibles modelados y los costos asociados al mismo.

La simulación numérica para estimar factores de emisiones, consumo energético y eficiencia energética en sistemas de transporte vehicular que se presenta en este documento, está fundamentada sobre dos modelos matemáticos. Un modelo denominado Vehicle Specific Power (VSP): definido como la potencia instantánea por unidad de masa del vehículo (JIMENEZ PALACIOS, 1999). Y un segundo modelo que trabaja la combinación de estadística de mantos de factores de emisión con datos adquiridos sobre pruebas en tiempo real de vehículos que operan con combustibles convencionales (diésel, Gasolina), GLP, GNL y GNV que combinados con análisis de dinámica vehicular longitudinal, permite calcular factores de emisión, consumos y costos para diferentes condiciones de operación de un vehículo.

La razón de implementar los dos modelos dentro del software es permitir establecer dos puntos de referencia que muestren un resultado análogo, es decir dentro de un margen de tolerancia en los datos menores al 10% o un factor de correlación que sea superior al 0.75 y de esa forma dar un mayor grado de confianza a las simulaciones desarrolladas, se especifica que el margen no está enfocado a los valores numéricos de las emisiones instantáneas, sino a las tendencias que siguen las emisiones a lo largo de cada ciclo o ruta modelada.

Cada modelo presenta ventajas entre sí que enriquecen el resultado de la simulación, el modelo VSP permite evaluar las emisiones de vehículos teniendo en cuenta la capacidad de carga del vehículo, tal que permite dar una clasificación en “Peso” importante en el sector del transporte para análisis económicos, entregando un valor de VSP en unidades de [kW/Tn métrica], VSP es función de los efectos de la aceleración y desaceleración, la velocidad, fuerzas resistivas a la rodadura y finalmente el peso del vehículo, presentadas cuando recorre un ciclo de manejo predefinido. El modelo VSP permite desarrollar comparaciones entre las diferentes tecnologías, como es requerimiento en este software, también permite hacer comparaciones con estudios y análisis de otros países porque es un modelo ya estandarizado por organizaciones como la EPA (Environmental Protection Agency en Estados Unidos). VSP permite analizar un perfil de emisiones segundo a segundo, es decir datos de emisiones registrados por un vehículo recorriendo un ciclo de manejo y predecir bajo qué condiciones de carga, velocidad y aceleración son más críticas las emisiones en el mismo. Es decir las emisiones presentan una fuerte dependencia del VSP para cualquier vehículo que opere con motores de combustión interna, sin importar su tecnología o combustible.



Ahora con el segundo modelo que es la contraparte y va a completar los resultados del modelo entregados por VSP, se incorpora a los resultados la dinámica que se presentan en las rutas normales. ¿Cuál es el complemento? –El desarrollo del modelo VSP se hace sobre un modelo matemático y datos de emisiones obtenidos sobre banco dinamométrico, es decir una prueba totalmente controlada y alejada de la realidad de la ciudad.

La construcción de mantos de emisiones y la modelación de la potencia consumida por el vehículo en una ruta desarrollada, utilizando dinámica longitudinal (La dinámica utilizada en el segundo modelo a diferencia de la usada en VSP, implementa en las ecuaciones:

- La carga del motor
- Las características técnicas del motor
- Las características del tren de transmisión de potencia

Buscando estimar un consumo de potencia más cercano a la realidad, siendo ambos siempre inexactos por definición el deslizamiento de las ruedas, las cargas aerodinámicas, la transferencia de masa por efecto de la suspensión presentan un comportamiento complejo, que en la modelación del desplazamiento de un vehículo se asumen valores típicos adquiridos experimentalmente: en bancos dinamométricos, frenos de rueda y diferentes pruebas dinámicas desarrolladas a vehículos por centros especializados y certificados).

## 1.2 CARACTERÍSTICAS DEL SOFTWARE

En conclusión para esta introducción se presenta un software que tiene las siguientes características:

1. Modela las emisiones de vehículos bajo dos condiciones:
  - En estado controlado, es decir siguiendo un ciclo de manejo
  - En estado real, es decir siguiendo una ruta predeterminada en la calle
2. Para la modelación nombrada se implementa el modelo VSP que utiliza datos adquiridos en banco dinamométrico tal que permite establecer un valor de referencia. Y un segundo modelo de dinámica vehicular apoyado por estadística usando mantos construidos a partir de datos adquiridos en las rutas de los vehículos de muestra.
3. En la simulación el software da la opción de comparar las emisiones vehiculares entre diferentes tecnologías y vehículos.



4. El software consta de una base datos de emisiones y ciclos de manejos predeterminados y así mismo abre la opción para almacenar nuevas bases de datos y simulaciones desarrolladas.
5. El software como producto final de la simulación entrega factores emisión por:
  - Unidad de energía consumida [g/kWh]
  - Unidad de desplazamiento lograda por el vehículo [g/km]
  - Unidad de carga transportada [g/Tn métrica de carga]
  - Unidad de combustible consumido [gr/kg combustible]



## 2. DESARROLLO MODELOS

### 2.1 MODELO POTENCIA ESPECÍFICA DEL VEHÍCULO (VSP VEHICLE SPECIFIC POWER)

De acuerdo con (JIMENEZ PALACIOS, 1999) la expresión desarrolla para expresar el VSP se ilustra en la siguiente ecuación:

$$VSP = v * a * 1 + \varepsilon_i + g * pendiente + g * C_R + \frac{1}{2} * \rho_a * \frac{C_D * A}{M} * v + v_w^2 * v$$

Donde:

- (v) corresponde a la velocidad,
- (a) la aceleración,
- ( $\varepsilon_i$ ) La masa rotacional equivalente del tren de transmisión,
- (g) la gravedad, (pendiente) del vehículo en un ciclo,
- ( $C_R$ ) coeficiente de resistencia a la rodadura,
- ( $\rho_a$ ) Densidad del aire ambiente,
- ( $C_D$ ) Coeficiente aerodinámico del vehículo,
- (A) área de la sección transversal del vehículo,
- (M) masa efectiva del vehículo,
- ( $v_w$ ) Velocidad del viento.

La ecuación como tal representa el balance de fuerzas sobre un vehículo. Utilizando el sistema de unidades métrico las unidades de VSP son [kW/Ton métrica].

Luego como datos de entrada para este modelo se requiere:

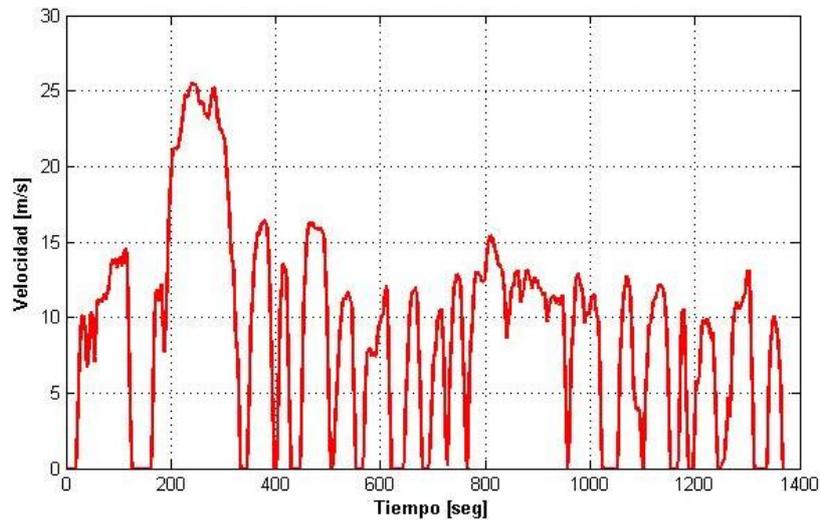
1. El perfil de velocidad del ciclo de manejo y su respectiva derivada, bajo este contexto el software trae consigo una biblioteca con los ciclos de manejo definidos para Bogotá hasta la fecha y los ciclos de manejo facilitados de forma abierta por la EPA.
2. O en defecto el perfil de velocidad de la ruta desarrollada por algún vehículo, el software tiene implementado un librería que permite construir ciclos de manejo (No mayor a 10 min) y de esa forma trabajar sobre el ciclo de manejo y el perfil de la ruta para el juego de vehículos asignados. Luego como entrada principal se requiere ya sea un perfil de velocidad de una ruta en las calles o un ciclo de manejo predefinido.



3. Las características técnicas del vehículo: peso, relaciones de velocidad de la transmisión y el diferencial, inercia aproximada de las partes rotativas del tren de transmisión.
4. Los coeficientes de rodadura y aerodinámicos del vehículo, estos normalmente se obtiene por modelación en métodos numéricos o pruebas en desaceleración del vehículo.

En la Figura 3 se aprecia el comportamiento de los tres términos mencionados para el cálculo de VSP para un vehículo de carga pesada.

**Figura 3. Ciclo de manejo vehículos de carga pesada ilustrado desde Matlab**



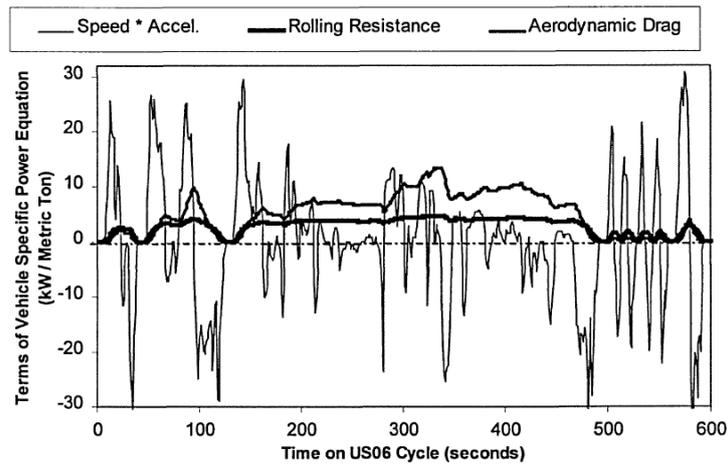
Fuente. Elaboración Propia

De la observación detenida sobre la Figura 3 se puede concluir que valores negativos de aceleración representan caída en velocidad. De esos valores negativos se debe esperar valores análogos para el cálculo final de VSP. Tal efecto se aprecia en la, donde el VSP oscila entre +-25 [kW/Ton métrica].



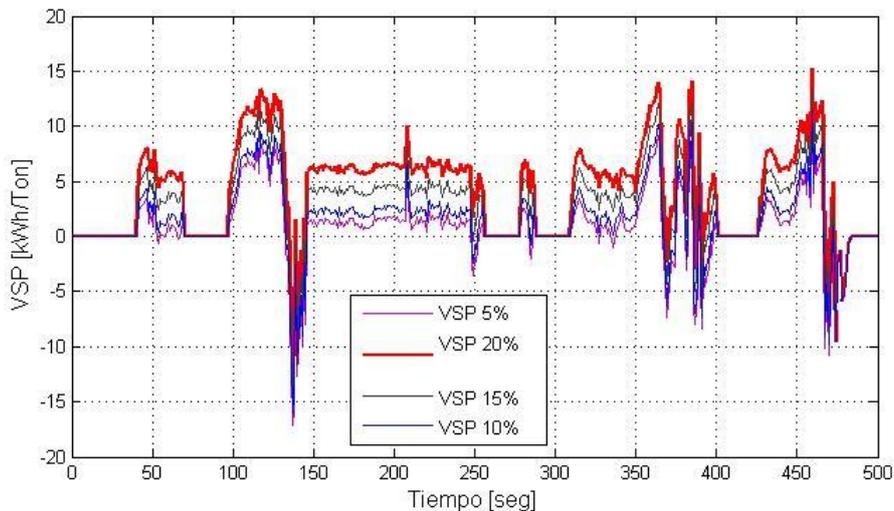
Como se aprecia en la Figura 4 en el VSP se pueden diferenciar tres términos claramente: el efecto de la velocidad y la aceleración es el primer término, el segundo corresponde a la resistencia a la rodadura y finalmente está el término de resistencia a la fuerza aerodinámica.

Figura 4. Términos de la ecuación 1 VSP



Fuente. (JIMENEZ PALACIOS, 1999)

Figura 5. VSP calculado para un vehículo de carga pesada cap. 24 Ton, potencia 180 kW @ 2100 Nm con diferentes perfiles de carga



Fuente. Elaboración Propia

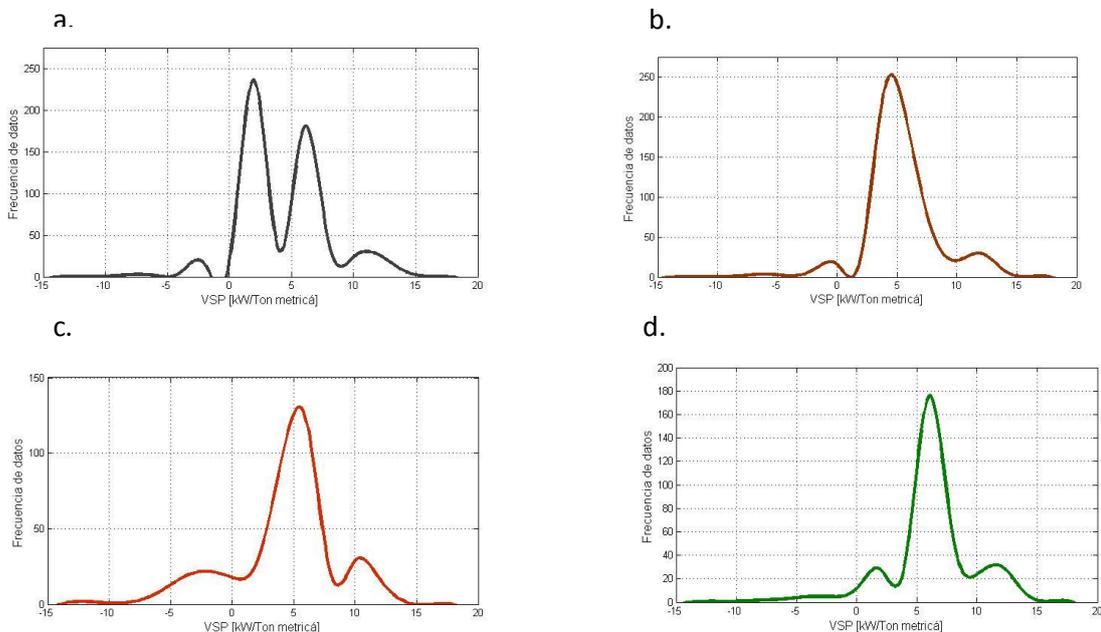


Una vez desarrollado el VSP surgen tres razones importantes para utilizar este modelo como patrón (JIMENEZ PALACIOS, 1999), de las cuales ya se han mencionado dos:

1. La potencia específica es directamente medible: se desarrolla por medio del dinamómetro, es muy importante dada todas las variables que se están monitoreando en el DYNO: potencia, torque, velocidad, aceleración, emisiones, consumo, flujo de aire.
2. El nivel de emisiones de cualquier vehículo con MCI como fuente de funcionamiento, es altamente sensible de los parámetros de operación del motor, principalmente la relación aire/combustible, la potencia y velocidad del motor. (HEYWOOD, 1998). El VSP es proporcional a la potencia del motor, la definición involucra las fuerzas resistivas del vehículo y pérdidas por inercias en la transmisión y la fricción entre partes giratorias.
3. Trabaja bajo ciclos de manejo lo cual permite hacer comparaciones con otros trabajos desarrollados en otras ciudades.

Dentro de VSP se puede calcular La frecuencia de VSP, es indicador de eficiencia energética indicando donde se concentra el mayor consumo de energía y además cual es el mayor consumo de energía por tonelada transportada.

**Figura 6. Frecuencia de VSP en diferentes cargas para un vehículo de 129 [kW]. a. 5% - b. 10% - c. 15% - d. 20%**



Fuente. Elaboración Propia



Para este vehículo se aprecia que para diferentes valores de carga el perfil de frecuencia se desplaza hacia la derecha, lo cual es válido dado que está invirtiendo más energía para transportar la misma carga.

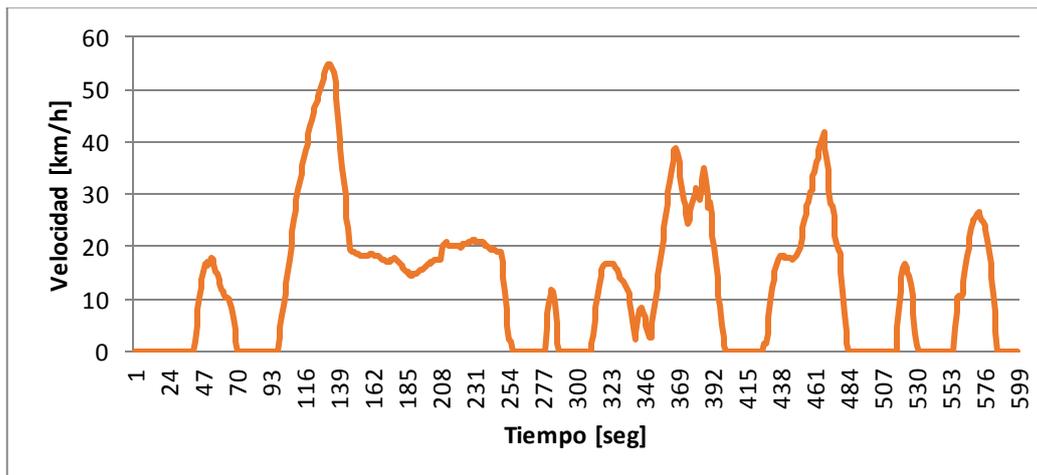
El valor máximo indica que el vehículo llegara a consumir esa energía para transportarse en esa ruta, se aprecia que el valor máximo en todas las gráficas es de 15[kW/Ton] sin importar la carga. Un vehículo que consuma más energía que la citada en este valor bajo la misma condición de operación no es rentable, ni eficiente comparado con el vehículo patrón.

### 2.1.1 Desarrollo ciclos de manejo

Entiéndase como ciclo de manejo un perfil de velocidad contra tiempo como el ilustrado en la Figura 7 el cual es una representación corta de tiempo de lo que sería la velocidad media de una determinada tipología de vehículo en una ruta o trayecto específico de una carretera o ciudad. Por ejemplo: en la Figura 7 se aprecia el perfil de velocidad para vehículos articulados en las troncales de Transmilenio S.A. en la ciudad de Bogotá. Dentro de las características que se pueden citar del perfil esta:

1. Velocidad máxima: 60 [km/h]
2. Paradas de 12 [seg], simulando la estación de pasajeros
3. Velocidad media de operación 20[km/h]

**Figura 7. Ciclo de manejo para evaluación de vehículos articulados en Bogotá (CEMB Bogotá)**



Fuente. Elaboración Propia



Como se acaba de resaltar, cada perfil de velocidad tiene características propias del sector o ruta que busca representar.

Los ciclos de manejo permiten desarrollar la simulación de condiciones reales de operación de vehículos en dinamómetros o modelos matemáticos, permitiendo hacer análisis de eficiencia, rendimiento y emisiones a vehículos como si estos estuviesen en plena carretera de manera controlada, segura y más económica.

Las organizaciones oficiales de control ambiental y energético en diferentes países han desarrollado variedad de ciclos de manejo para diferentes aplicaciones, el modelo presentado trae anexo una carpeta con varios de estos perfiles de manejo, la lista incluye:

#### **1. IM240**

Es un test de 240 [seg] para la evaluación de emisiones en vehículos de carga livianos, desarrollado para el programa de inspección y mantenimiento en esta tipología de vehículos en EEUU.

#### **2. UDDS**

Es un test de 1369 [seg], un ciclo de manejo que representa las condiciones de conducción en ciudad para EEUU.

#### **3. FTP**

Es un test de 1874 [seg], es tal vez el ciclo de manejo más pesado y complejo de seguir para un vehículo según la Agencia de protección del medio ambiente EPA (<http://www.epa.gov/nvfel/testing/dynamometer.htm>), está compuesto en parte por el ciclo UDDS y se divide en tres secciones: fase motor frío, fase de transición (motor frío a caliente), fase de motor caliente.

#### **4. HWFET**

Es un test de 765 [seg], es un ciclo para la evaluación de consumo de combustible en autopistas desde que empieza a calentar el vehículo hasta su estado estable. Tiene una velocidad máxima de 97 [km/h].

#### **5. NYCC**

Es un test de 598 [seg], simula las condiciones de velocidad baja para la ciudad de Nueva York.



## 6. US06

Es un test de 600 [seg], busca simular condiciones de aceleración agresiva, lo usan como un complemento del FTP, para condiciones agresivas de conducción.

## 7. HDUDDS

Es un test de 1060 [seg], es un ciclo diseñado para vehículos de carga pesada.

## 8. ECE

Es un test de 195 [seg], diseñado por la comisión económica de la Unión europea, para análisis de consumo.

## 9. CEMB Articulado

Es un test de 600 [seg], simula las condiciones de operación para vehículos articulados operando sobre las troncales de la ciudad de Bogotá.

## 10. CEMB SITP

Es un test de 719[seg], simula las condiciones de operación para vehículos del SIPT fuera de las troncales en la ciudad de Bogotá.

Los ciclos citados (1-8) los encuentra en la página web de la Agencia para la protección del medio ambiente EPA. (Es importante tener presente que los perfiles ingresados al modo lo deben estar segundo a segundo y en km/h).

En la carpeta de ciclos de manejo en el instalador de EEVmod 1.0 se encuentran los ciclos de manejo citados, en este tomo se encuentran en el Anexo C.

Dado el caso que se desee construir un ciclo de manejo de alguna ruta que se haya desarrollado y se tenga los datos de velocidad y altura sobre el nivel del mar, segundo a segundo, el modelo trae consigo una librería que permite la construcción del ciclo de manejo representativo de ese perfil de velocidad ingresado. El usuario es libre de elegir el tamaño del ciclo, se recomienda sea mayor a 10 [min].



## 2.2 MODELO MANTOS DE EMISIONES Y DINÁMICA VEHICULAR

Este modelo se compone de tres secciones:

1. Desarrollo de los mantos de emisiones para un vehículo en específico (elegido por el usuario)
2. Desarrollo de dinámica longitudinal para determinar la potencia necesaria para cumplir el ciclo.
3. Desarrollo de dinámica longitudinal para que el vehículo bajo determinadas características técnicas (motor, transmisión y carga) y perfil de conducción de alturas o pendientes, intente seguir el ciclo de manejo predispuesto.

### 2.2.1 Módulo generación mantos de factor de emisión

El manto consiste de una superficie que graficada y presentada en 3D sobre los ejes X, Y e Z, se aprecia una forma de sabana donde se representa las emisiones de un vehículo en función de dos características de operación del vehículo, por ejemplo:

1. Emisiones en función de velocidad y aceleración
2. Emisiones en función de potencia del motor y consumo

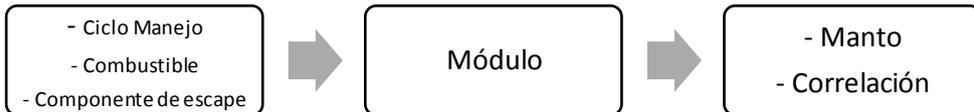
Se puede generar de este modo diferentes mantos, dependiendo las necesidades o factores de emisión que se deseen obtener.

El usuario por medio de la interfaz gráfica (en fase de desarrollo) selecciona el ciclo de conducción, el tipo de combustible y el componente de escape que quiere visualizar. Una vez seleccionadas las opciones se le entrega al usuario un manto de Factor de Emisión, este consiste en dividir los datos en rangos de velocidad y aceleración, una vez clasificados se promedia los factores de emisiones para cada "intersección" de rangos para tener un factor de emisión consolidado; una vez procesado todos los datos se grafica una superficie o manto con todos los Factores de emisión obtenidos. El objetivo de visualizar estas emisiones de esta manera es poder comparar entre combustibles o tecnologías para un mismo ciclo de manejo y evaluar la correlación que existe entre dos vehículos, y así ver observar y cuantificar que tan beneficioso es uno con respecto al otro.



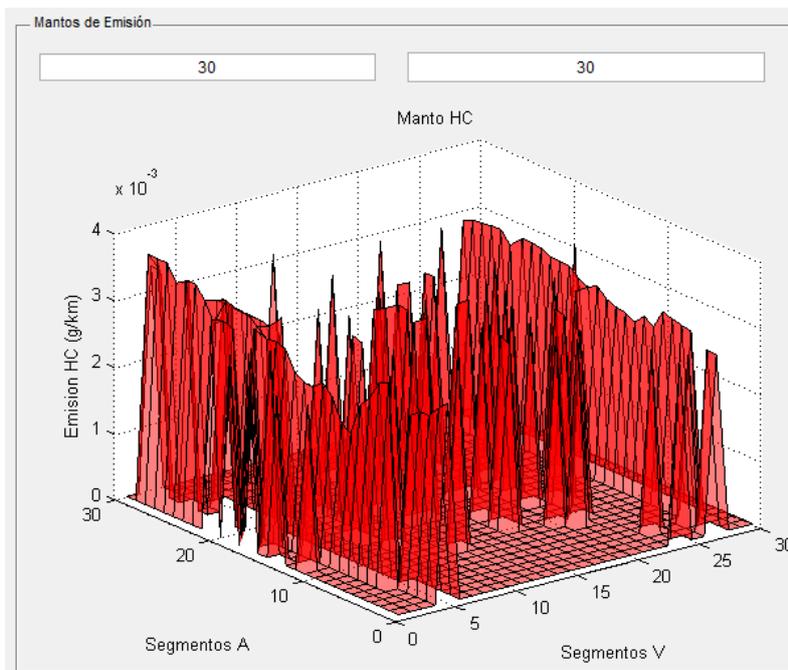
Los datos de entrada para la construcción de los mantos se ilustran en la Figura 8, el cual señala de forma sencilla como opera el modulo.

**Figura 8. Organigrama modulo mantos de emisiones**



Fuente. Elaboración Propia

**Figura 9. Ejemplo manto de emisiones de [gHC/km] para un vehículo dual diésel-GLP de 75kW**



Fuente. Elaboración Propia



### Procedimiento durante la modelación de un manto

A continuación se presenta el procedimiento para determinar la emisión en función de velocidad y aceleración para un vehículo de ejemplo:

1. El módulo lee el perfil de manejo que ha seleccionado el usuario.

Éste importa el archivo en formato plano con la información que se aprecia en la Tabla 1, a ambiente de EEVmod 1.0 generado por Matlab, cabe aclarar que el usuario con definir la división de datos también cambia las cotas de los intervalos, lo cual hace automáticamente el programa.

**Tabla 1. Ejemplo ciclo de manejo**

Tiempo	VAM				Analizador de gases					
	lat	lon	km/hr	gps altura	ppm CO	% CO2IR	ppm HC	% O2	ppm NOx	ppm NO2
41766.6	4.6967	-74.092	0.18	2565.52	407	0.31	102	20.18	71.4	1.4
41766.6	4.6967	-74.092	0.144	2566.04	406	0.31	100	20.38	71.5	1.5

Fuente. GICAEPMA

De esta forma se genera un manto de frecuencias para la velocidad y la aceleración para distribuir en estos intervalos la emisión correspondiente.

2. Una vez distribuida la información en la matriz de frecuencia la función FIND proporciona en qué posición dentro del documento se encuentra el dato ideal para cada segmento.

Dependiendo del componente que seleccione el usuario se diseñó un CASE para que cambiara la columna si bien es CO, CO2, HC u O2. Toda esta información se almacena en un vector donde una vez cumplido el ciclo se calcula el promedio y esta se asigna en la matriz para posteriormente ser graficada.

Dentro de las ventajas de construir estos mantos está que permite ver relaciones directas entre las emisiones seleccionadas y las características del vehículo filtradas. De ese modo permite obtener conclusiones cuantificables sobre el peso de alguna actividad del vehículo sobre el nivel de emisión y así compararla con otro vehículo.

Por ejemplo. Se presenta un manto de emisión de CO en función de consumo y carga, se aprecia que el manto presenta más picos hacia el lado del eje de consumo y es más bajo hacia



el eje de carga, lo cual da indicios de que la emisión es más sensible a un cambio en consumo que a un cambio en carga.

## 2.2.2 Modulo dinámica vehicular

Este módulo se compone de dos modelos matemáticos de dinámica vehicular:

### 1. Modelo de dinámica vehicular para determinar la energía mínima

Modelo de dinámica vehicular para determinar la energía mínima para que un vehículo pueda seguir un perfil de manejo o ciclo de manejo como el ilustrado en la Figura 3.

Para el desarrollo del modelo que determina la mínima cantidad de energía, es necesario suministrar el perfil que es insertado a matlab como un archivo de texto plano, el cual cuente con el valor de la velocidad requerida en [km/h] segundo a segundo. El modulo toma estos datos e interpola para lograr una curva un poco más suave para aplicar el factor de conversión necesario para manejar el ciclo de conducción en unidades del sistema internacional, se obtiene la Figura 3. Ciclo de manejo vehículos de carga pesada ilustrado desde Matlab

En donde se muestra el desarrollo del ciclo de manejo en el tiempo. Teniendo estos datos se calcula la distancia que es recorrida por el vehículo durante el ciclo además de la aceleración que este experimenta mediante las siguientes relaciones partiendo de los valores conocidos de velocidad:

$$\text{Distancia recorrida: } s = \int v dt \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\text{Aceleración vehículo: } a = \frac{dv}{dt} \quad \text{Ecuación 2}$$

En donde  $s$  es la distancia recorrida por el vehículo,  $v$  corresponde a los valores indicados de velocidad,  $a$  es la aceleración experimentada por el vehículo y  $t$  corresponde al tiempo. La distancia recorrida durante el avance del ciclo de manejo y la aceleración.

Se requiere conocer variables ambientales como la altitud, y temperatura además de variables del vehículo como la masa, relaciones de transmisión, área transversal del vehículo, coeficiente de arrastre aerodinámico, factor de resistencia a la rodadura de las ruedas, análogo a los valores usados en el modelo VSP.

Al tener todos los datos anteriormente descritos el modelo procede a usar un modelo de dinámica vehicular longitudinal propuesto por (GILLESPIE), este modelo está dado por la Ecuación 3:

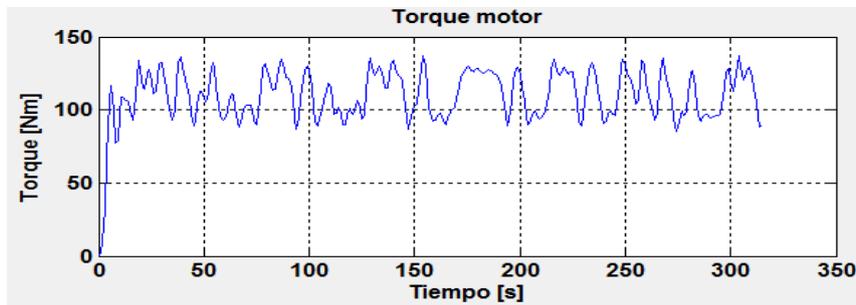


$$M_{eq} * a = \frac{T * N_{tf} * \eta_{tf}}{r} - R - D \quad \text{Ecuación 3}$$

En esta ecuación  $M_{eq}$  corresponde a una masa equivalente del vehículo y los elementos móviles en el tren de transmisión,  $a$  representa la aceleración que el vehículo experimenta al seguir el ciclo de manejo,  $T$  es el torque entregado por el motor según el combustible usado para realizar la simulación,  $N_{tf}$  representa una relación de transmisión conjunta entre la caja de velocidades y el diferencial del vehículo,  $\eta_{tf}$  es la eficiencia de la transmisión del vehículo,  $r$  es el radio de las ruedas,  $R$  representa la resistencia a la rodadura causada por las ruedas del vehículo y el tipo de terreno que está transitando y  $D$  corresponde a la resistencia aerodinámica.

El software usa la relación anteriormente expuesta para calcular el torque y velocidad requerida en el motor para cumplir con el ciclo de manejo, de acá es posible calcular la potencia entregada por el motor y así el gasto energético del vehículo dependiendo del combustible usado. La gráfica que muestra el comportamiento del torque del motor a lo largo del desarrollo del ciclo de manejo Se ilustra a continuación:

**Figura 10. Torque motor para vehículo modelado en dinámica longitudinal camioneta LUV**



Fuente. Elaboración Propia

En la Figura 10 se aprecia que existen unos picos de torque que son incongruentes, esto se debe a la forma en que está planteado el modelo, lo cual implica restringir las condiciones límite de la caja de velocidades planteada.

Para obtener la potencia y la velocidad del motor se utilizan las siguientes relaciones:

$$\omega = \frac{v * N_{tf}}{r} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$P = T * \omega \quad \text{Ecuación 5}$$



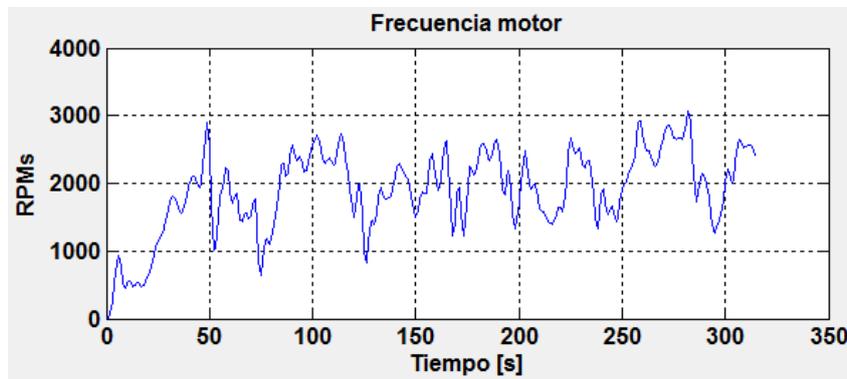
En estas relaciones  $\omega$  representa la velocidad del motor,  $v$  es la velocidad que desarrolla el vehículo y  $P$  es la potencia generada por el motor. La grafica de la velocidad como la de la potencia se muestra a continuación.

Este modelo es la referencia respecto a que cantidad de energía debería esperar consumirse mínima, para que el vehículo pueda superar el ciclo de manejo sin ningún contratiempo.

Bajo esta condición el modelo debe cumplir con los siguientes parámetros:

1. La velocidad determinada para el motor y el torque estimado debe estar dentro de un rango aceptable y esperado para el vehículo asignado, de lo contrario el modelo construido carece de utilidad. Es decir, si se modela un vehículo con capacidad de carga 6 [Ton] y por experiencia y razonamiento se espera que el torque de un vehículo de este tipo oscile entre 400 a 600 Nm, es claro que existe un problema en las restricciones del modelo. De igual modo la velocidad del motor debe ser congruente con la velocidad esperada en un motor diésel, un comportamiento normal sería el ilustrado en la Figura 11.

**Figura 11. Velocidad modelada del motor camioneta LUV**

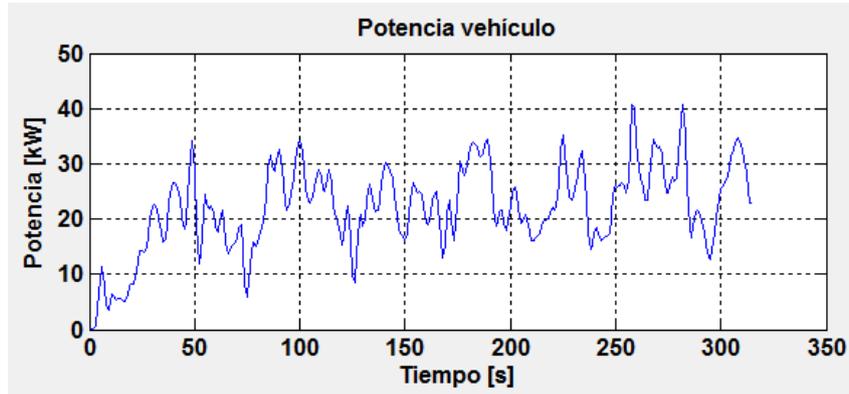


Fuente. Elaboración Propia

2. Si el torque del motor presenta picos altos debido a las restricciones dadas al modelo, se extenderá el error al cálculo de la potencia, tal como se ilustra en la Figura 12.



Figura 12. Potencia del motor camioneta LUV simulada en un ciclo de manejo



Fuente. Elaboración Propia

Este es un ejemplo claro del error en el que el usuario del software podría caer si no restringe el modelo que desarrolla adecuadamente.

3. Para evitar los picos el usuario debe tener conocimiento previo de: las RPMs de gobernación y de cambio para la transmisión insertada, en este caso se presenta un ejemplo arbitrario que explota fácilmente generando los picos.

Dentro de las ventajas del uso de este modelo está la facilidad de implementación y la clara tendencia que muestran los datos bajo la modelación de un ciclo de manejo.

2. Modelo de dinámica vehicular involucrando carga del motor y curvas características del motor

El modelo anterior parte del perfil de velocidad y estima la potencia requerida mínima. Este modelo a partir de las características técnicas y operativas del vehículo trata de seguir el ciclo de manejo.

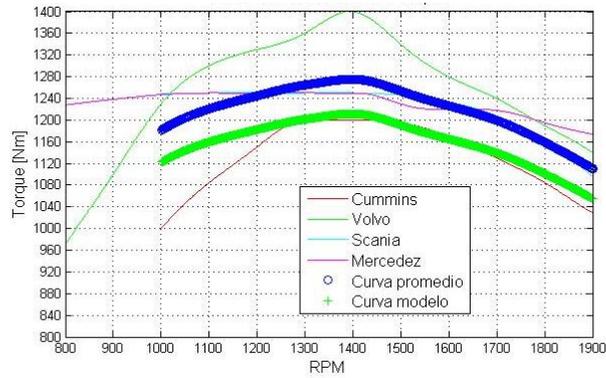
Para cumplir los criterios del modelo es necesario:

1. En primer lugar caracterizar el motor del vehículo, para esto el software facilita dos opciones:

**Opción 1:** trabaja con un motor predefinido en el software, con los puntos de una curva conocida y el software la construye.



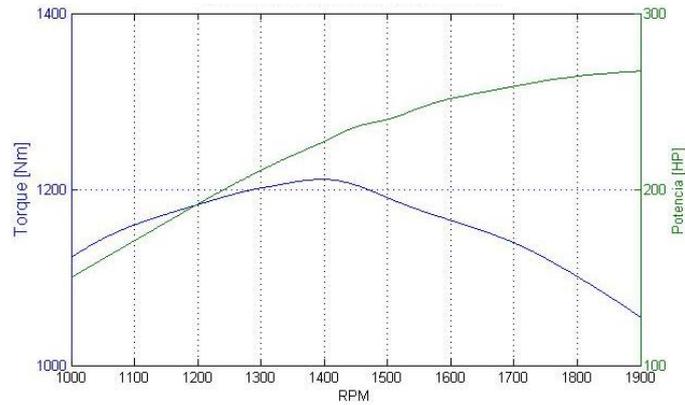
**Figura 13. Curvas de torque en diferentes motores predefinidas en software**



Fuente. Elaboración Propia

**Opción 2:** el usuario ingresa los puntos de una curva conocida y el software la construye como se ilustra en la Figura 14.

**Figura 14. Curva construida a partir de datos ingresados por el usuario**

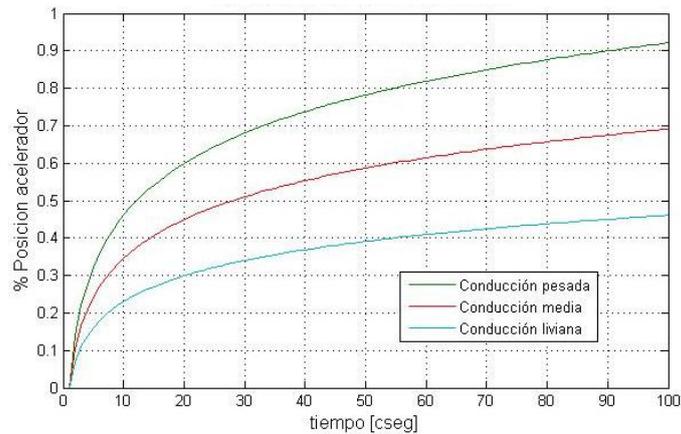


Fuente. Elaboración Propia



2. La posición del pedal del acelerador esta predefinida en el software bajo tres condiciones de manejo: Pesada, media y liviana como se ilustra la posición del pedal del acelerador en la Figura 15.

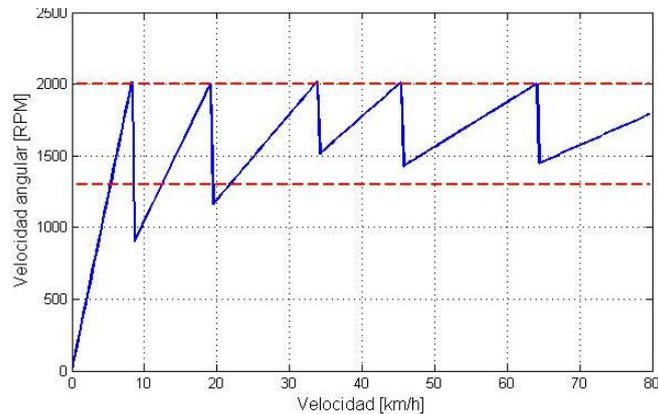
**Figura 15. Condición de conducción en vehículo predefinida en software**



Fuente. Elaboración Propia

3. Conocer adecuadamente la programación de la caja de velocidades de los vehículos es muy útil en la implementación del modelo, la velocidad de gobernación del motor y la velocidad de cambio del motor. Al igual que los intervalos de velocidad del vehículo y las relaciones de velocidad de la caja, que solicita el modelo sean ingresados. Si no son ingresados estos datos en su totalidad el modelo no puede correr de forma correcta.

**Figura 16. Programación de caja de velocidades ZF de seis relaciones de velocidad**



Fuente. Elaboración Propia



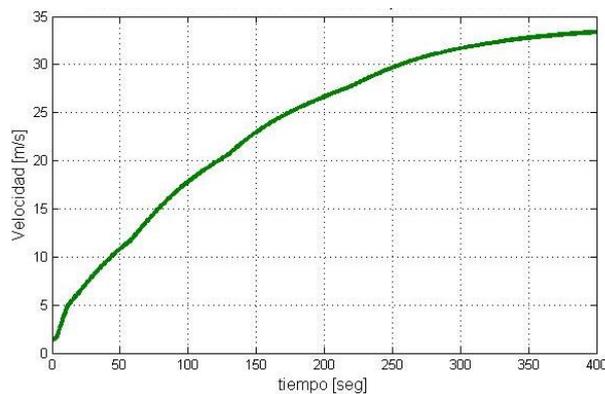
Se requiere al igual que en el modelo anterior el perfil de un ciclo de manejo, sin embargo en esta ocasión, el modelo busca tratar de seguir el perfil usando las características técnicas ingresadas, es decir es un modelo más restringido.

Respecto a la ecuación diferencial que se debe solucionar se ilustra a continuación su forma:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{T(v) * N_{tf}(v) * \eta_{tf}}{r_{eff}} - R - D(v) / M_{efectiva} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde todos sus términos dependientes son función de la velocidad del vehículo. Los términos análogos a la  $M_{eq} * a = \frac{T * N_{tf} * \eta_{tf}}{r} - R - D$  Ecuación 3 presenta la siguiente solución para una aceleración del vehículo.

Figura 17. Aceleración de vehículo con 180 kW y una caja ZF de 7 velocidades

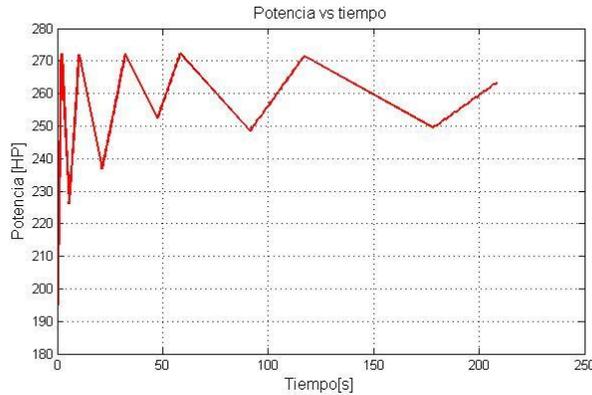


Fuente. Elaboración Propia

Solucionando la ecuación diferencial controlando la velocidad por medio de la posición del pedal del acelerador y guiándose por el ciclo de manejo y generando el perfil de torque y velocidad del motor se determina la potencia consumida.



**Figura 18. Potencia estimada para una aceleración de un vehículo**

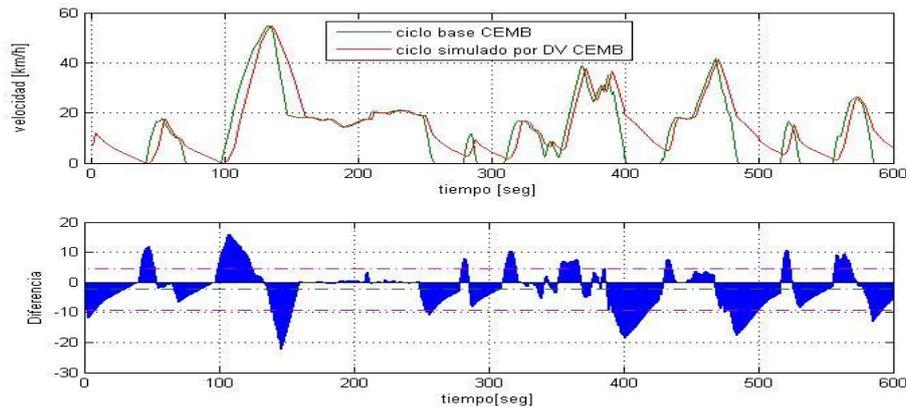


Fuente. Elaboración Propia

Finalmente conociendo potencia y torque consumido por el vehículo durante el desarrollo de un ciclo de manejo o un perfil de velocidad de una ruta desarrollada, se puede construir el manto en función de potencia y torque.

Un perfil de velocidad modelado con este juego de ecuaciones para un vehículo de 200kW.

**Figura 19. Simulación de un vehículo de 200Kw en el ciclo de manejo CEMB(Ciclo de emisiones manejo para Bogotá).**



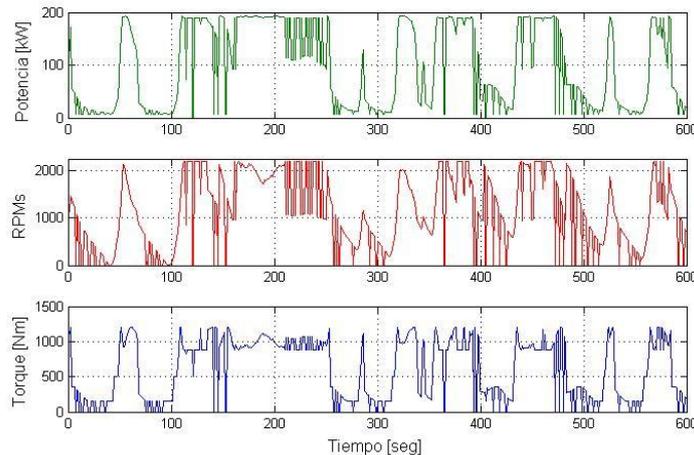
Fuente. Elaboración Propia

En el área azul se parecía la diferencia entre el objetivo (Ciclo CEMB, visto en verde) y el simulado por el vehículo (visto en rojo). Se aprecia una media de -2 km/h en la diferencia, y una desviación estándar de +4.5 km/h.



Respecto a consumo energético se aprecia la Figura 20.

**Figura 20. Dinámica de vehículo de 200kW**



Fuente. Elaboración Propia

### 2.3 PARÁMETROS DE COMPARACIÓN ENTRE MODELOS

Se utilizan varias herramientas y mecanismos para comparar tanto los resultados entre modelos como entre simulaciones de vehículos, dentro de los cuales se lista:

1. Determinación de factores de correlación
2. Comparación de sectores en ciclos de manejo
3. Comparación de valores de VSP para diferentes simulaciones
4. Análisis de tendencia de los factores de emisión para diferentes tecnologías.
5. Sensibilidad de las emisiones vehiculares a diferentes parámetros de operación del vehículo.

### 2.4 VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Dentro de las nuevas tecnologías se encuentran los vehículos eléctricos, en el programa desarrollado se anexa una librería que involucra la modelación de vehículos eléctricos. Se desarrolla bajo el concepto de balance energético sobre las baterías del vehículo.



El consumo energético del vehículo eléctrico se define como:

$$E_{consumida} = Cap_{bateria} * SOC_{inicial} - Cap_{bateria} * SOC_{final}$$

$$SOC = \frac{E_{inicial\ bateria} + E_{regenerada} - E_{consumida}}{Capacidad\ energetica\ bateria}$$

$$FER = \frac{E_{consumida} - E_{regenerada}}{E_{consumida}}$$

Donde E abrevia energía, SOC representa el estado de carga de la batería en %, Cap representa la capacidad de la batería en kwh al igual que la capacidad energética batería.

El consumo energético del vehículo se resuelve usando el modelo de dinámica vehicular, mientras se requiere como dato de entrada la capacidad en kwh de las baterías del vehículo y el factor de energía recuperada FER.

## 2.5 FACTORES DE EMISIÓN QUE PERMITE ESTIMAR EL SOFTWARE VERSIÓN 1

Los dos modelos presentados en el marco teórico del software en desarrollo permiten hasta el momento evaluar factores de emisión de acuerdo a las siguientes actividades o consumos:

### 1. Gramos de contaminante por kWh consumido

ES posible obtenerlo a partir de la simulación del modelo de mantos y dinámica, y se puede obtener a través del modelo VSP de forma indirecta pero no es el objetivo de VSP.

### 2. Gramos de contaminante por km desplazado

Es posible obtenerlo a partir de la simulación del modelo de mantos y dinámica.

### 3. Gramos de contaminante por tonelada transportada

Es posible obtenerlo a partir del modelo VSP



Los factores listados hasta el momento son la base para el análisis de:

#### 2.5.1 Carácter económico

Permite establecer un punto de comparación entre diferentes tecnologías o combustibles bajo un mismo ciclo de manejo y estimar el consumo energético para: el mismo ciclo de manejo, diferentes tecnologías, diferentes combustibles y desarrollar un pronóstico de costos asociado al consumo energético del vehículo.

#### 2.5.2 Eficiencia energética

Permite comparar el aprovechamiento energético entre diferentes tipos de combustibles y tecnologías.

#### 2.5.3 Medio ambiente

Permite establecer indicadores de la cantidad de productos de combustión que están siendo lanzados a la atmosfera en un determinado intervalo de tiempo.

#### 2.5.4 Consumo de combustible

El consumo de combustible se calcula por dos medios: utilizando mantos construidos a partir de datos adquiridos en ruta o estimando el consumo de combustible a partir del consumo energético del vehículo.



### 3. EJEMPLOS, VALIDACIÓN Y SENSIBILIDAD DEL MODELO

Los factores de emisión en gramos del contaminante por kilómetro desplazado son el punto de comparación que se tiene entre el modelo desarrollado y la realidad, se hace énfasis en que los factores de emisión presentados están dentro de la escala que opera el vehículo, más no deben ser iguales porque:

- El modelo calcula factores de emisión en base a un ciclo de manejo representativo de la ruta real, lo cual implica que la simulación tendrá: la misma velocidad media, la misma aceleración media, la misma desaceleración media que la ruta real, la correlación entre el perfil de la ruta y el perfil del ciclo de manejo construido es superior a 0.88, lo cual indica que es una muy buena representación de la ruta.
- Al ser modelados, la realidad se aleja de los resultados simulados, sin embargo es de esperar que los factores de emisión sean congruentes con los reales.
- Las características técnicas y de operación del vehículo son idealizadas, por tanto encontrara consumos un poco más altos a los reales.
- El consumo de combustible de los vehículos variara respecto al real dependiendo de las condiciones de operación y de las características del vehículo +/- 10%.

En el desarrollo del proyecto se evaluaron vehículos en modo dual para GLP, GNV con combustibles convencionales diésel, dedicado y transformados.

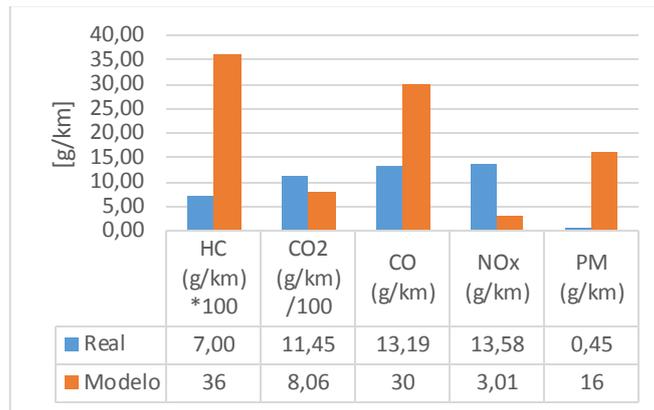
#### 3.1 PARÁMETROS DE AJUSTE MODELO

En este numeral se presenta la metodología que se utilizó para ajustar el modelo, se utilizó: los resultados de los vehículos evaluados en pruebas en ruta, se utilizó la base de datos de mediciones desarrolladas por la Universidad Nacional de Colombia, sin embargo estos datos no hacen parte de los productos e información a entregar en este proyecto, Se lista primero un vehículo dual diésel-GLP (Chevrolet NKR).



La Figura 21 muestra los resultados para el vehículo operando en modo diésel, como los factores de emisión se mantienen en la misma escala a excepción de PM y HC se presenta una buena simulación para el vehículo.

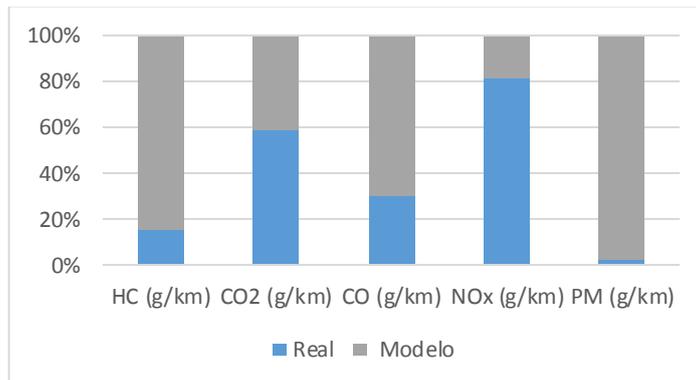
**Figura 21. Comparación emisiones**



Fuente. Elaboración Propia

Se espera que el equilibrio entre cada emisión fuera del 50%, en este caso los factores que mejor se comportan son el CO<sup>2</sup> y el CO.

**Figura 22. Peso emisiones**

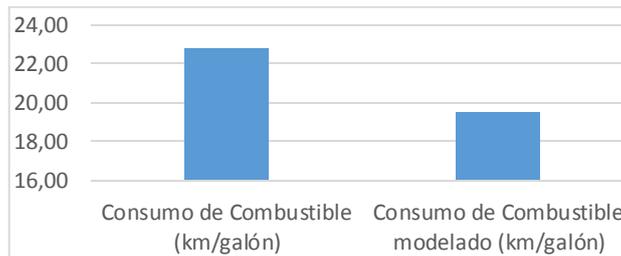


Fuente. Elaboración Propia



Para el caso de consumo de combustible la Figura 23 ilustra que la eficiencia energética modelado es inferior al real, luego el consumo de combustible es mayor en la simulación.

**Figura 23. Consumo combustible**



Fuente. Elaboración Propia

Dada la situación se somete el modelo a ajustes buscando que los valores de emisión coincidan con los reales, el ajuste del modelo se lleva a cabo bajo el siguiente procedimiento:

1. Corregir la composición de los combustibles, utilizando las especificaciones técnicas presentadas en este informe y sugeridas por UPME.
2. Utilizar más vehículos de patrón.
3. Detallar mejor las características de operación del vehículo.
4. Modificar las relaciones químicas utilizadas para ajustar el valor de las emisiones.

Bajo estas condiciones se presentan los siguientes resultados finales de sensibilidad, para los vehículos evaluados y los combustibles utilizados.

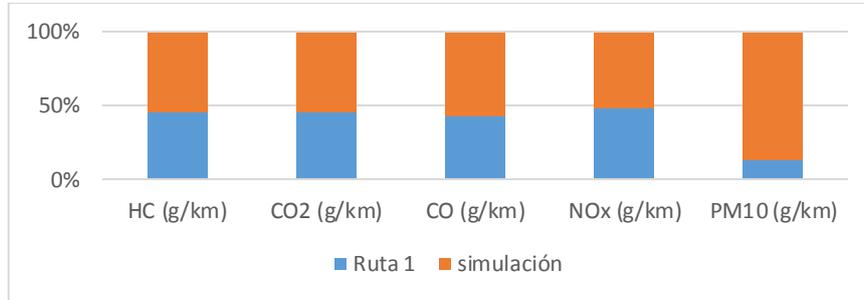
### 3.2 SENSIBILIDAD FINAL MODELO

En primer lugar se ilustra el vehículo dual diésel -GNV, Chevrolet de línea NPR, de 4600 [cc].

La Figura 24 representa el peso del factor de emisión real obtenido en el vehículo contra el obtenido en la simulación, en el caso ideal se espera que ambos colores se encontraran en el 50%.



**Figura 24. Sensibilidad de vehículo dual diésel-GNV (NPR)**

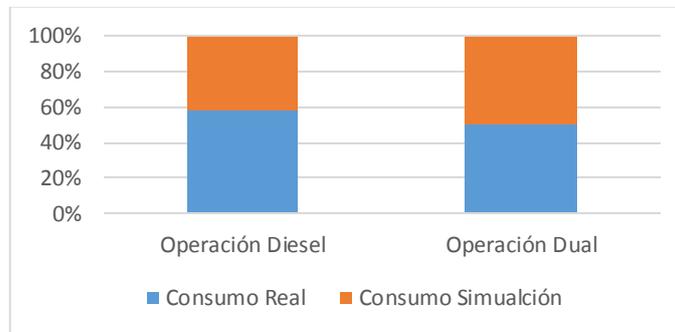


Fuente. Elaboración Propia

Para la modelación de vehículos duales GNV se aprecia una alta sensibilidad por parte de la simulación para la mayoría todas las emisiones a excepción del material particulado, el cual tiende a ser sobre estimado en la simulación.

Ahora si se aprecia la sensibilidad del consumo del combustible se aprecia un comportamiento análogo Figura 25. El consumo simulado bajo condiciones de operación normal tiene un alto grado de correlación respecto al dato real.

**Figura 25. Sensibilidad consumo combustible vehículo dual diésel-GNV (NPR)**



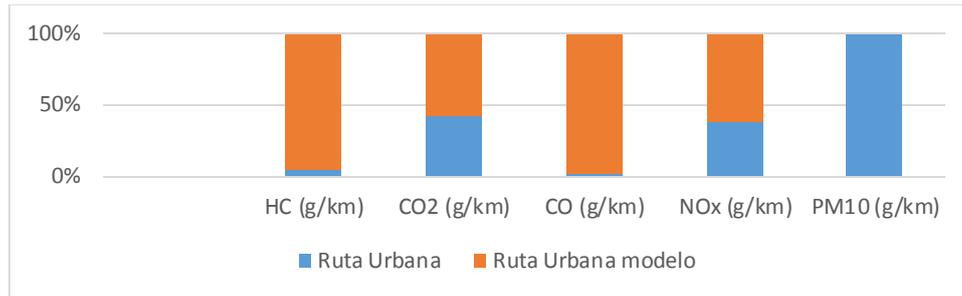
Fuente. Elaboración Propia

A continuación se ilustra el vehículo IVECO dedicado a GNV, en este caso se evalúa la sensibilidad del modelo a operar bajo diferentes condiciones de operación. En el caso de este vehículo se llevó a dos diferentes rutas, una urbana y la otra inter-urbana, siendo las condiciones de operación totalmente diferentes.



En la Figura 26 se aprecia los resultados para el vehículo dedicado GNV (IVECO).

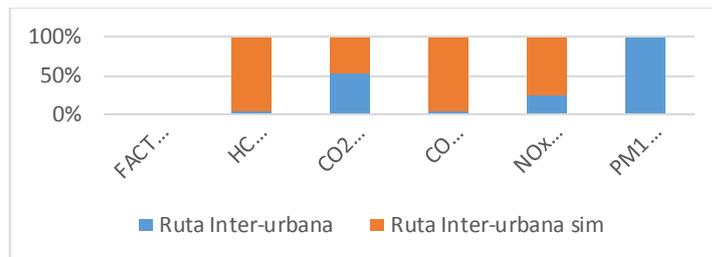
**Figura 26. Sensibilidad del modelo a cambios en condiciones de operación, vehículo dedicado GNV (IVECO)**



Fuente. Elaboración Propia

La simulación y el recorrido de la ruta en la ciudad, se puede apreciar baja sensibilidad en HC, CO, PM. Lo cual indica que el modelo aunque da una representación buena de la realidad, se aleja cuando se modifica las condiciones de operación del vehículo. Es análogo el comportamiento para el vehículo simulado en condiciones de ruta Inter urbana, es decir donde hay un mayor promedio de velocidad media, y se mantiene por mayor tiempo la misma.

**Figura 27. Sensibilidad del modelo a cambios en condiciones de operación II, vehículo dedicado GNV (IVECO)**



Fuente. Elaboración Propia

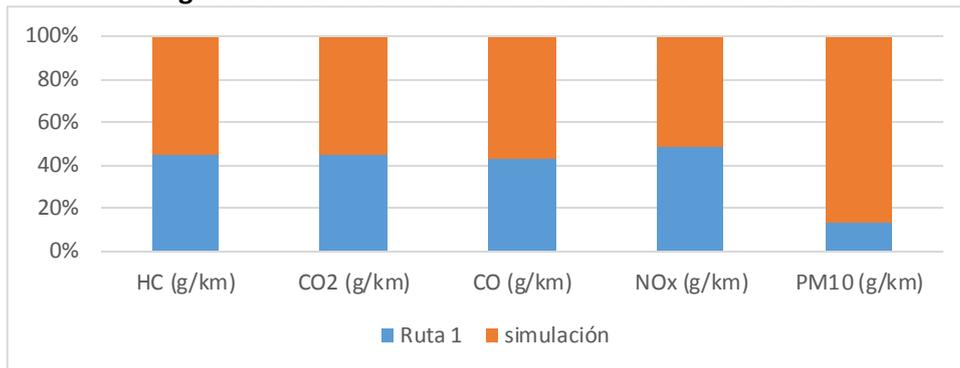
EEVmod 1.0 trae consigo tres modos de operación como se mencionó anteriormente, se recomienda trabajar con el modo Normal (ver tutoriales), dado que es el que mayor grado de sensibilidad presenta.

Respecto al consumo se comporta de manera análoga y presenta un menor kilometraje por metro cubico consumido en la simulación, alejándose por más del 30% del valor real.



Si se aprecia otro vehículo con tecnología análoga, en este caso un vehículo transformado a GNV, Chevrolet NPR 729 (Figura 28) se aprecia un comportamiento un poco parecido sin embargo el modelo ya presenta un grado de sensibilidad mayor al ser simulado bajo condiciones de operación "Normal", se aleja del objetivo el material particulado.

**Figura 28. Sensibilidad del modelo Chevrolet NPR 729**

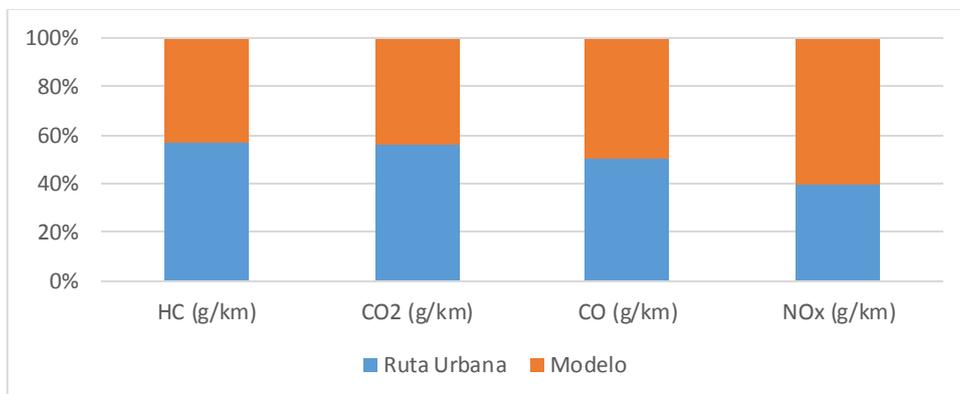


Fuente. Elaboración Propia

Respecto al consumo se comporta de manera análoga y presenta un menor kilometraje por metro cubico consumido en la simulación, alejándose por más del 30% del valor real.

Ahora se ilustra la sensibilidad del modelo respecto al vehículo DODGE 600 transformado a GLP, los resultados son bastante buenos, la correlación entre los datos simulados en emisiones son superiores al 80%. En la Figura 29 se aprecia el peso de las emisiones muy cercanas al 50%, lo cual confirma la confiabilidad del modelo respecto a este tipo de combustible.

**Figura 29. Sensibilidad del modelo a condición de operación normal vehículo transformado GLP (DODGE)**



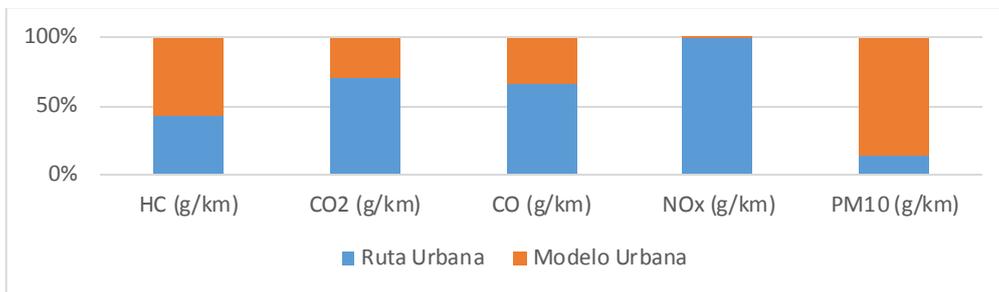
Fuente. Elaboración Propia



Respecto al consumo de combustible se aprecia que el subestima el consumo, es bastante conservador respecto a la cantidad de kilómetros desplazados por vehículo.

Como se ha mencionado el modelo no es altamente sensible a vehículos con capacidades inferiores a las dos (2) toneladas, este es caso de la camioneta Chevrolet LUV 2300 [cc].

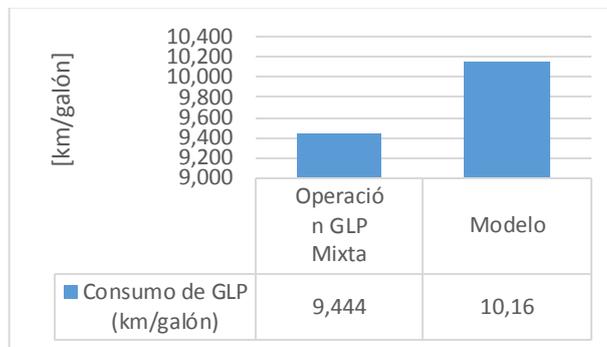
**Figura 30. Sensibilidad del modelo sobre vehículos pequeños transformado GLP (LUV)**



Fuente. Elaboración Propia

La Figura 31 muestra que las emisiones de NOx son subestimadas, mientras las de PM hacen lo inverso, respecto a las demás especies se aprecia un buen comportamiento.

**Figura 31. Consumo vehículo transformado 2 GLP (LUV)**



Fuente. Elaboración Propia

La Figura 31 muestra el consumo del vehículo transformado 2-GLP (Chevrolet LUV), el modelo presenta una alta sensibilidad respecto a este valor.



### 3.3 CONCLUSIONES SENSIBILIDAD DEL MODELO

Respecto a la sensibilidad del modelo se puede concluir que:

1. La sensibilidad respecto a especies como CO<sub>2</sub> - CO – NO<sub>x</sub> es alta, mientras que en algunas situaciones o vehículos las emisiones de HC y PM tienden a ser subestimadas y sobrestimadas, respectivamente.
2. La modelación del vehículo bajo condiciones de operación diferentes a la normal debe ser analizada con mayor detalle para evitar caer en algún error, se recomienda utilizar datos de referencia.
3. La modelación del consumo de combustible en la mayoría de los casos presenta un buen nivel de sensibilidad. Se recomienda ser más detallista con el consumo de GNV.



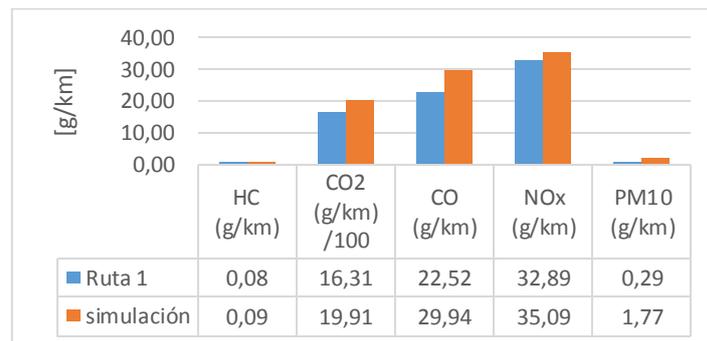
## 4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS REAL VS SIMULACIÓN

A continuación se muestran los resultados obtenidos para los vehículos evaluados dentro de los alcances de este proyecto.

### 4.1 VEHÍCULO A. DUAL DIÉSEL-GNV

Es un vehículo Chevrolet de línea NPR 71, de 4550 [cc]. La Figura 32 presenta el resultado para los factores de emisión operando el vehículo solamente en diésel.

**Figura 32. Emisiones vehículo A (NPR 71), modo diésel**



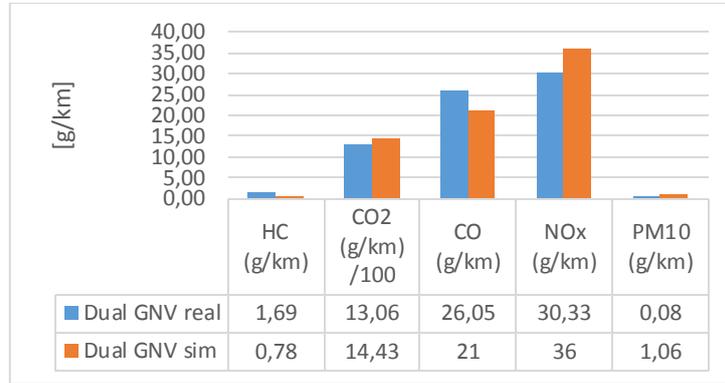
Fuente. Elaboración Propia

Los resultados de la simulación están por encima de los reales, sin embargo, mantienen la escala y la sensibilidad promedio de la estimación de los factores es superior al 90%.

Respecto a la simulación en modo dual, se presenta un grado de sensibilidad análogo a la simulación en diésel,



**Figura 33. Emisiones vehículo A (NPR), modo dual diésel-GNV**



Fuente. Elaboración Propia

De la Figura 33 se puede inferir que el nivel de gCO/km aumenta respecto al modo de operación convencional.

En cuanto a consumo se aprecia en la Figura 34 que las simulación está muy cerca a los valores reales, sin embargo tiende a ser conservadora (De forma general los modelos de dinámica tienden a ser conservadores, buscando que se cumpla el objetivo del modelo, dar un grado de acierto en cuanto al comportamiento de las variables).

**Figura 34. Consumo vehículo A (NPR), modo diésel y dual diésel-GNV**

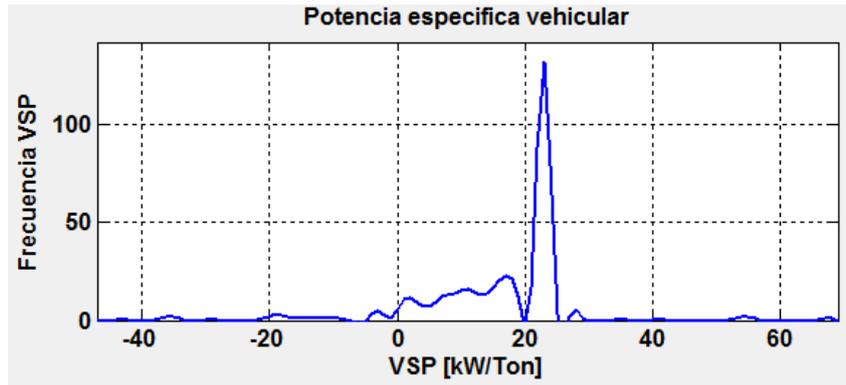


Fuente. Elaboración Propia



Respecto a eficiencia energética, se trabaja bajo los resultados presentados en la Figura 35 y la Figura 36..

**Figura 35. VSP vehículo A (NPR), a 20% de pendiente**



Fuente. Elaboración Propia, EEVmod 1.0

#### 4.1.1 Conclusiones de la modelación del VSP [Kw/Ton]

1. La mayor cantidad de tiempo el vehículo está consumiendo entre 20 y 30 [kw] por cada tonelada de peso transportada, si se estuviese simulando una pendiente del 20% y se obtiene un valor pico de 60 [kW/Ton] en algunos puntos de la ruta, dada la capacidad del motor del vehículo (119[kW]) estaría en capacidad de suplir la demanda.
2. Establecer un valor de VSP máximo para el perfil de velocidad simulado implica la simulación de variedad de vehículos con características y capacidades semejantes.

**Nota:** El valor de VSP máximo patrón es un término que se establece con la prueba de varios vehículos con capacidades semejantes bajo el mismo trayecto o ciclo de manejo. Luego una vez este establecido el valor VSP máximo para una gama de vehículos en determinada ruta, cualquier vehículo que con características semejantes supere el valor pico se convierte en un vehículo “No eficiente” para desarrollar el trayecto seleccionado.

3. En este caso solo se tiene el vehículo simulado, luego no es posible establecer un valor VSP máximo patrón.



La Figura 36 muestra una sección de la ventana de EEVmod 1.0, donde se aprecia el vehículo simulado para el mismo trayecto operando bajo diferentes combustibles y tecnologías.

**Figura 36. Gasto del vehículo A (NPR), simulado**

Gasto vehículo		
Distancia Total Recorrida [km]:	1.53695	
Energía Total Consumida [kWh]:	2.92266	
Energía específica [kWh/Ton]:	5.01027	
Energía consumida de la batería [kWh]:*	1.8997	
Consumo Total de Combustible:		
Equiv. eléctrico [km/gal]**	32.1191	% Ahorro energético ref. DIESEL
GNL [km/gal]	6.60289	12.5
GNV [km/m <sup>3</sup> ]	3.37469	
GLP [km/gal]	5.86029	
Gasolina [km/gal]	7.09335	
Diesel [km/Gal]	10.3792	
DUAL [km/gal equi]***	12.9712	19.9824

Fuente. Elaboración Propia, EEVmod 1.0

Muestra entre los datos más relevantes:

1. El consumo energético en kWh para completar el trayecto simulado
2. El consumo de combustible para la gama de combustibles de EEVmod 1.0
3. El ahorro energético referenciado a diésel si se operara dual o GNV
4. Respecto al ahorro energético en GNV encontrara en la mayoría de las simulaciones que oscila entre 12 y 13 %, porque es una relación entre los poderes caloríficos de cada combustible y el objetivo del modelo es estimar la cantidad de energía suficiente para suplir la ruta, luego debe tender a ser parecida la cantidad de energía.
5. Respecto al análisis económico refiérase a la sección de tutoriales y sección económica.



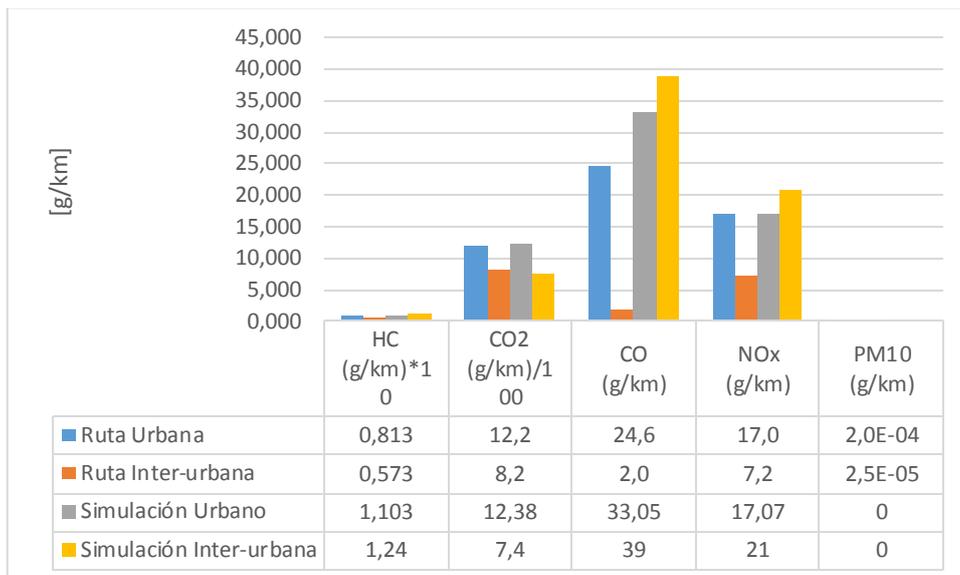
## 4.2 VEHÍCULO B. DEDICADO-GNV

Corresponde a un vehículo IVECO 50C14, de 2998 [cc]. Se presentan dos tipos de ruta:

1. Ruta Urbana: se simula como una conducción agresiva dado que las dinámicas de transporte dentro de la ciudad.
2. Ruta Inter-Urbana: se simula como una conducción suave dado que las condiciones de operación en carretera son de espacios de tiempo grandes a velocidad constante y poca actividad de tránsito.

Bajo estas condiciones los resultados obtenidos se presentan en la Figura 37.

**Figura 37. Emisiones vehículo B (IVECO)**



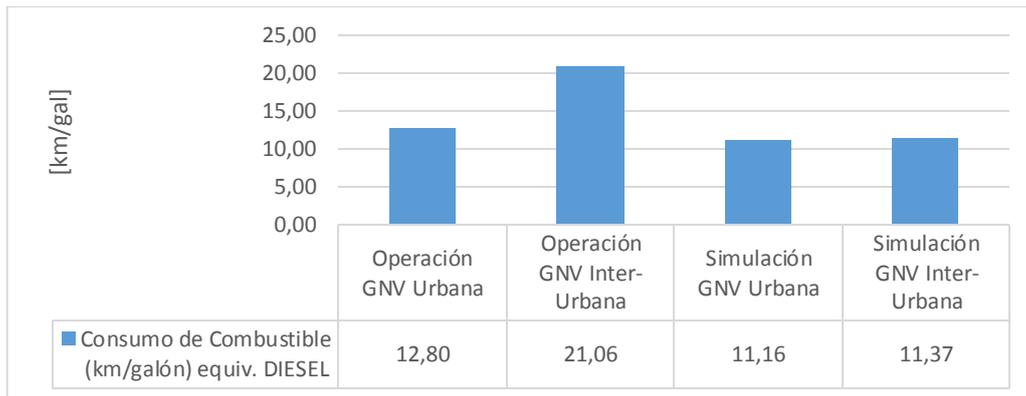
Fuente. Elaboración Propia

En la figura anterior se determina que los factores de emisión de PM, dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno son una buena representación de la realidad.



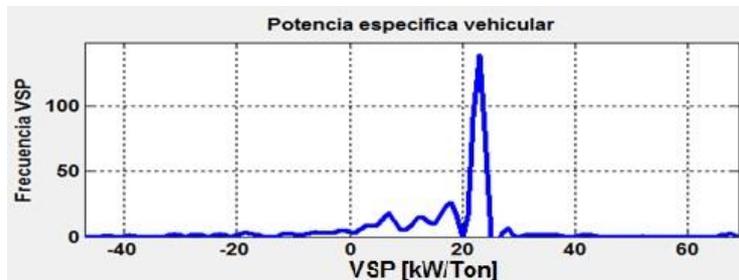
En cuanto a consumo de combustible se evidencia una alta sensibilidad en la simulación del vehículo en una condición de manejo agresiva (Urbana), mientras que la simulación en Interurbana se aleja de la realidad y los resultados no arrojan la misma eficiencia.

**Figura 38. Consumo de combustible vehículo B (IVECO)**



Fuente. Elaboración Propia

**Figura 39. VSP vehículo dedicado B (IVECO), a 20% de pendiente**



Fuente. Elaboración Propia

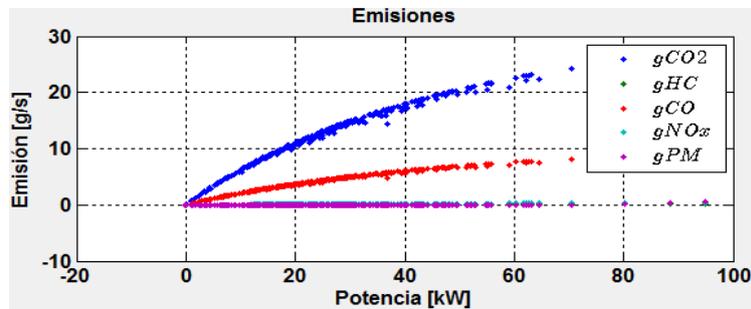
1. Se aprecia un valor pico de 65 [kw/Ton] y una media de 20 a 25 [kw/Ton], se considera que es baja comparada con los valores estimados con los demás vehículos hasta el momento, por tal motivo se infiere que:
2. El vehículo no fue cargado con la capacidad estipulada (Se simulan los vehículos con el valor de la carga que transportaron el momento de las pruebas).



3. Es un vehículo más eficiente que los evaluados hasta el momento. Sería un vehículo comparable al Chevrolet NKR, la cual tiene un valor de 25 a 30 [kw/Ton], lo cual implica que es menos eficiente que el IVECO.

Dentro de EEVmod se encuentran diferentes modos de apreciar el comportamiento de las emisiones simuladas durante un trayecto, la Figura 40 muestra la dependencia de las emisiones respecto a la demanda de energía del vehículo en la ruta simulada.

**Figura 40. Emisiones vs demanda energética**



Fuente. Elaboración Propia

EEVmod 1.0 también le permite ver los factores de emisión generados por el vehículo en cada tipo de combustible simulado, y lo hace específico para cuatro actividades (Figura 41).

1. Gramos de la emisión por kilómetro desarrollado, estos factores son los de mayor grado de confiabilidad, luego son usados en el análisis energético, ambiental y económico.
2. Gramos de la emisión por kWh consumido
3. Gramos de la emisión por kilogramo de combustible consumido
4. Gramos de la emisión por tonelada de carga transportada



**Figura 41. Factores de emisión vehículo B (IVECO)**

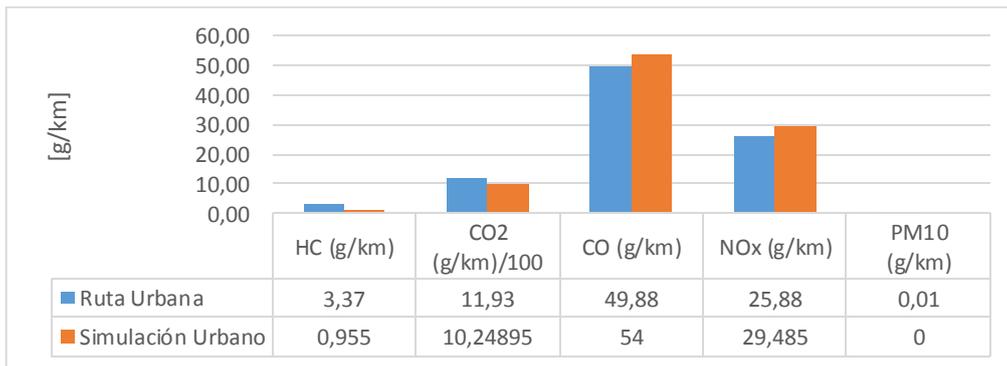
Factores de emisión				
FEs operando en GNV				
	[g/km]	[g/kWh]	[g/kg comb]	[g/Ton]
CO2	1157.31	686.924	6445.17	321413
HC	0.966275	0.573536	5.38129	268.359
CO	30.8906	18.3352	172.033	8579.08
NOx	15.7396	9.34228	87.6554	4371.27
PM	3.49045	2.07177	19.4387	969.385

Fuente. Elaboración Propia

#### 4.3 VEHÍCULO C. TRANSFORMADO-GNV

Corresponde a un vehículo Chevrolet de línea NPR 729, de 5130 [cc]. La sensibilidad del modelo es alta, por encima del 80%, el vehículo real fue evaluado en una zona urbana, la simulación se desarrolló con un modelo de carga agresivo dadas las condiciones del tráfico.

**Figura 42. Emisiones vehículo C (NPR 729)**

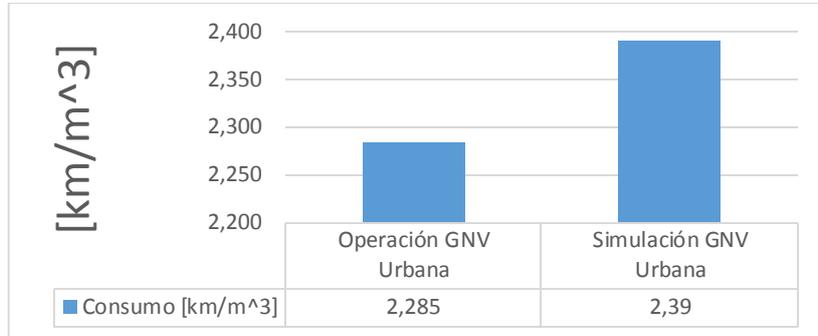


Fuente. Elaboración Propia

De la Figura 42 se aprecia que las emisiones del vehículo se comportan de manera normal, es decir no presenta altos ni bajos de las emisiones respecto a las emisiones de vehículos de la misma gama.



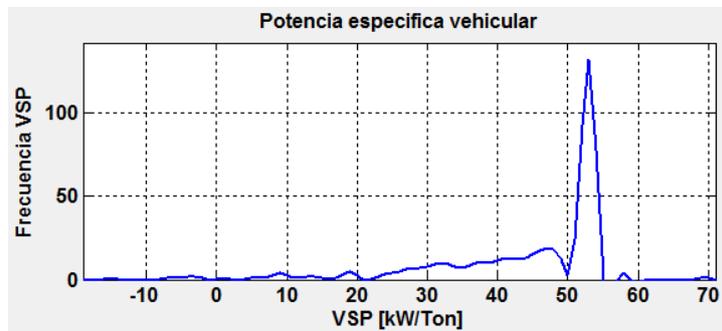
**Figura 43. Consumo de combustible vehículo C (NPR 729)**



Fuente. Elaboración Propia

En la Figura 43 se aprecia el consumo, para esta situación los resultados de la simulación arrojan un mejor rendimiento que el real, por encima del 5%, valor que no es significativamente alto, se considera entonces un valor simulado altamente representativo de la realidad del vehículo.

**Figura 44.VSP vehículo C (NPR 729), a 20% de pendiente**



Fuente. Elaboración Propia

En la Figura 44 se ilustra la distribución de VSP, para una pendiente del 20% se aprecia que:

1. El consumo específico de energía se concentra entre 50 y 55 [kw/Ton], y se presenta un valor pico de 75 [kw/Ton], si se contrasta este valor con el obtenido en la NPR 71, se aprecia una diferencia de 10[kw], análoga a la diferencia entre las capacidades de cada motor 119[kw] y 129[kw] respectivamente, la capacidad de cada vehículo para transporte de carga es análoga, sin embargo la NPR 729 es físicamente más grande, la distancia entre ejes.



- 2. Se puede asumir que las características de los vehículos son semejantes u oscilan dentro de un intervalo de tolerancia entre ambos para citar el ejemplo de eficiencia.

*“Dado el caso que esto dos vehículos sean asignados para la misma aplicación en la determinado trayecto y transportando la misma cantidad de carga se concluye que el vehículo NPR 71 es capaz de hacer la tarea consumiendo menor cantidad de energía por tonelada de carga transportada”.*

Respecto a eficiencia energética se presenta los resultados anexos en la Figura 45, el contraste del consumo para el vehículo operando en diferentes combustibles.

**Figura 45. Gasto del vehículo C (NPR 729), simulado**

Gasto vehículo		
Distancia Total Recorrida [km]:	1.61038	
Energía Total Consumida [kWh]:	3.92317	
Energía específica [kWh/Ton]:	3.92317	
Energía consumida de la batería [kWh]:*	2.5500	
Consumo Total de Combustible:		% Ahorro energético
Equiv. eléctrico [km/gal]**	25.0711	ref. DIESEL
GNL [km/gal]	5.15811	12.5
GNV [km/m3]	2.63627	
GLP [km/gal]	4.578	
Gasolina [km/gal]	5.54125	
Diesel [km/Gal]	8.10813	
DUAL [km/gal equi]***	13.5056	39.9648

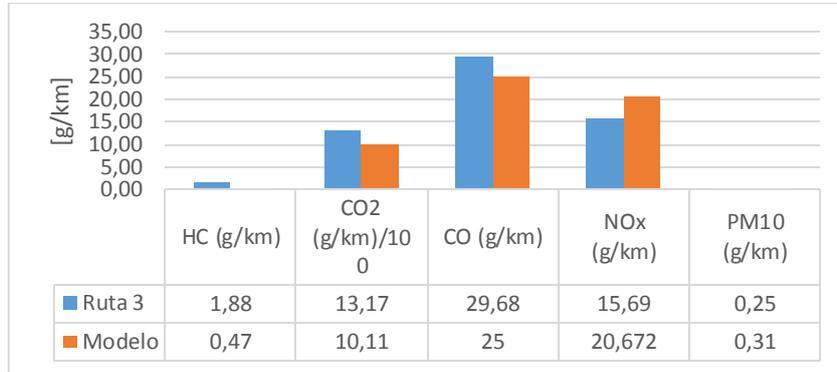
Fuente. Elaboración Propia

#### 4.4 VEHÍCULO D. DUAL DIÉSEL-GLP

Corresponde a un vehículo Chevrolet de línea NKR, de 2771[cc]. La simulación muestra alto grado de sensibilidad mayor al 90% respecto a las emisiones generadas.



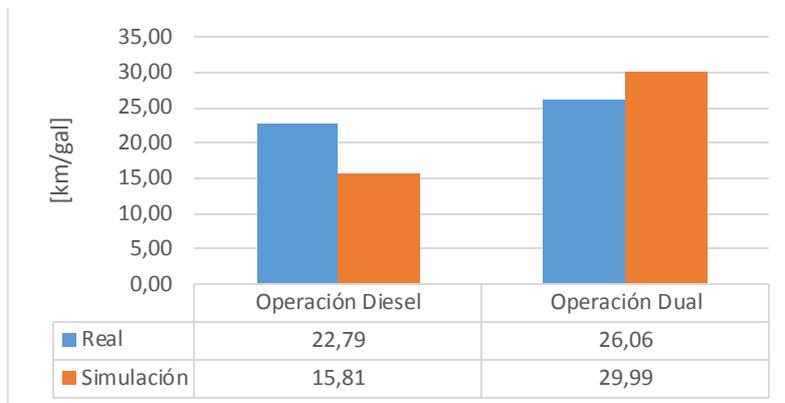
**Figura 46. Emisiones vehículo D (NKR)**



Fuente. Elaboración Propia

En cuanto a consumo se aprecia que el consumo diésel simulado está siendo conservador respecto al real, mientras el consumo de GLP tiende a ser lo contrario, los valores de diferencia oscilan entre -13% al 30% en diferencia frente al valor real, se recomienda ser más meticuloso al momento de simular vehículos en combustibles GLP y GNL.

**Figura 47. Consumo de combustible vehículo D (NKR)**

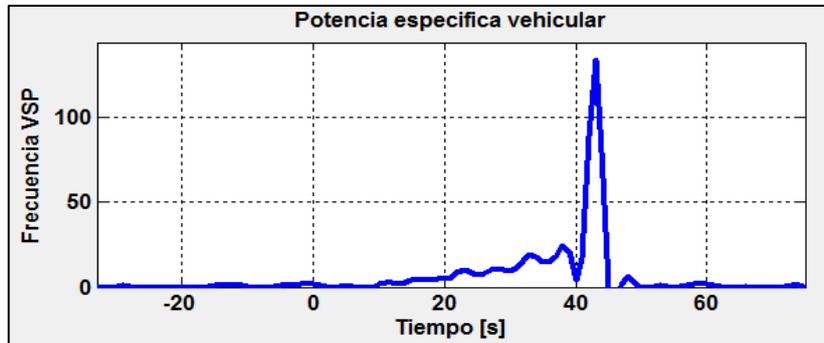


Fuente. Elaboración Propia

En la Figura 48 se aprecia un consumo específico de 40 a 45 [kw/Ton] y un valor pico de 50 [kw/Ton], 10 unidades por debajo de la capacidad de los vehículos NPR, sin embargo no son comparables dada la tipología de carga de los vehículos. Sin embargo al ser un valor específico, este vehículo presenta un mejor rendimiento que las NPR.



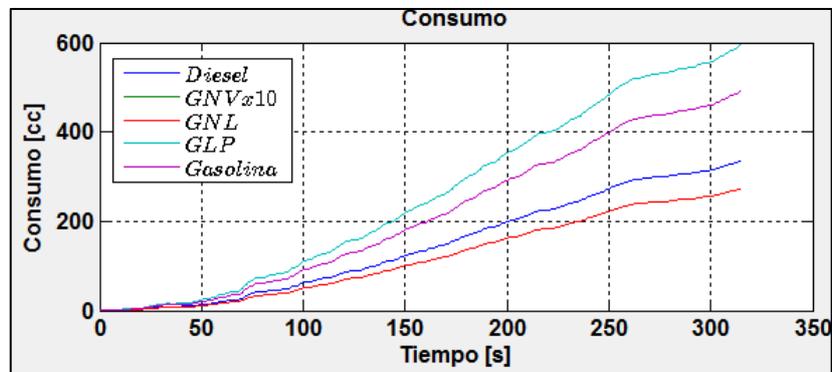
Figura 48. VSP vehículo C (NKR), a 20% de pendiente



Fuente. Elaboración Propia

Otro modo de ver el consumo de combustible se aprecia en la Figura 49 como crece el consumo se comporta el consumo de combustible en el vehículo NKR a medida que esta desarrollando una ruta, en este caso se aprecian 5 minutos para una ruta de Bogotá.

Figura 49. Consumo acumulado vehículo D (NKR)



Fuente. Elaboración Propia

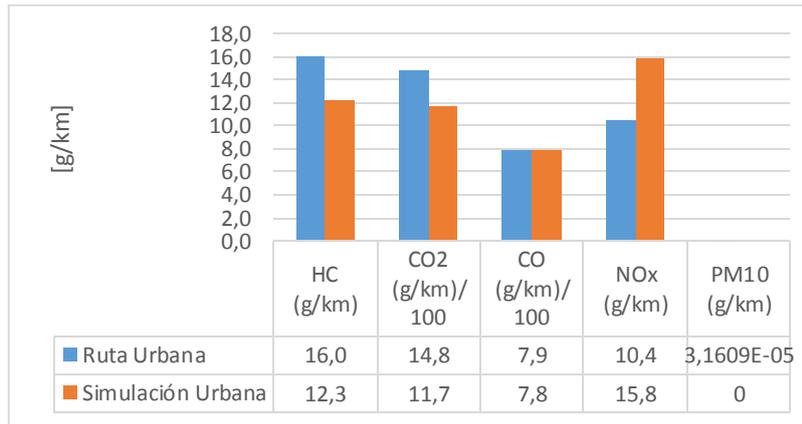
#### 4.5 VEHÍCULO E. TRANSFORMADO 1-GLP

Corresponde a un vehículo DODGE D600, de 5920 [cc]. Este caso permite ver que la sensibilidad del modelo respecto al GLP es alta, dado que no se apreciaron buenos resultados para el vehículo transformado 2 (Chevrolet LUV).



En este caso la Figura 50 evidencia la alta sensibilidad del modelo, este es un vehículo con un motor de cilindrada media para su tipología.

**Figura 50. Emisiones vehículo E (DODGE)**



Fuente. Elaboración Propia

Los factores de emisión simulados tienen una desviación no mayor al 20% respecto a los reales, a excepción de los óxidos de nitrógeno que superan el 30%, se considera una simulación representativa del vehículo.

En cuanto a eficiencia energética se aprecia que los resultados tienen una diferencia del 20%, como siempre el modelo se mantiene conservador respecto a la realidad.

**Figura 51. Consumo de combustible vehículo E (DODGE)**

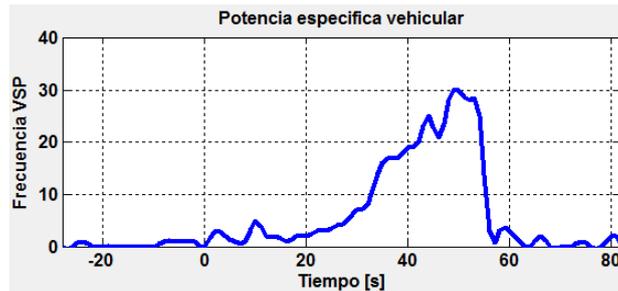


Fuente. Elaboración Propia



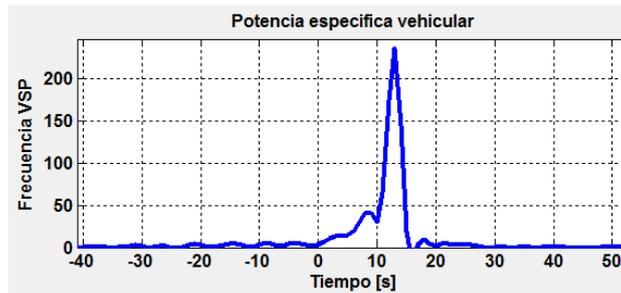
En el análisis de VSP de este vehículo se aprecian dos figuras (Figura 52 y Figura 53)

**Figura 52. VSP vehículo E (DODGE), a 20% de pendiente**



Fuente. Elaboración Propia

**Figura 53. VSP vehículo E (DODGE), a 10% de pendiente**



Fuente. Elaboración Propia

Ahora se desea mostrar el análisis que se puede desarrollar si se evalúa el vehículo en diferentes condiciones de pendientes, los resultados determinan que:

1. La distribución de VSP se desplaza hacia la derecha, es decir aumenta el consumo específico a medida que la pendiente aumenta.
2. Conociendo las características del trayecto o geografía en la que operara el vehículo se puede llegar a un vehículo de menor potencia que sea capaz de desarrollar el trayecto, esto lo que implica es una reducción en el consumo de combustible. Y directamente se ve reflejado en las emisiones.



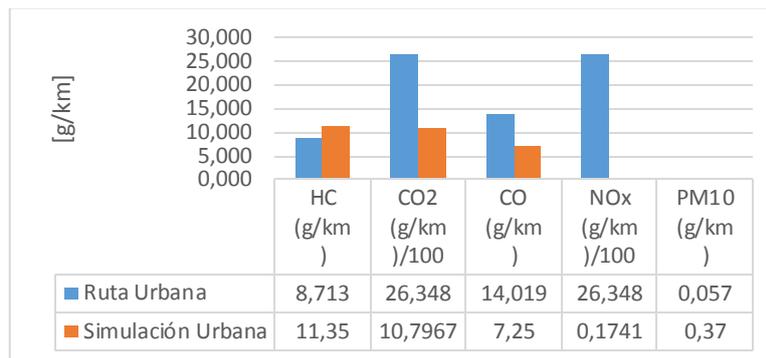
#### 4.6 VEHÍCULO F. TRANSFORMADO 2-GLP

Corresponde a un vehículo Chevrolet LUV, de 2300 [cc]. Los resultados de este vehículo respecto a la simulación si difieren bastante de los reales, la diferencia está por encima del 50%, ajustar el modelo a este vehículo no se considera correcto dado que los valores de los factores de emisión son atípicos.

Además se debe tener en cuenta que el modelo pierde sensibilidad cuando se trabaja con vehículos pequeños, esta camioneta está en el límite del modelo. Luego se recomienda evaluar un vehículo de mayor capacidad para ser comparado con el modelo desarrollado.

Respecto a las emisiones reales se aprecian niveles muy altos de óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono, el modelo no es capaz de percibir ese comportamiento.

**Figura 54. Emisiones vehículo D (LUV)**

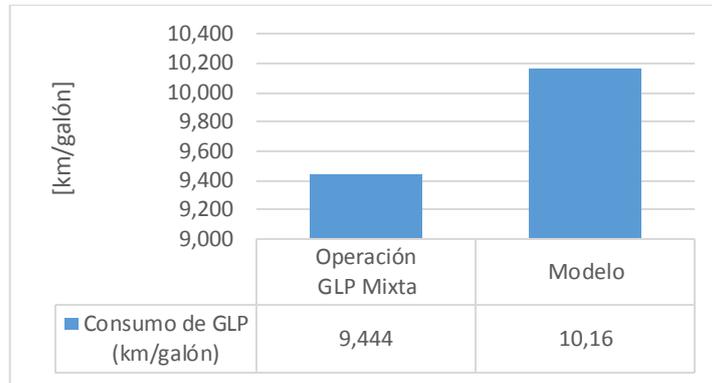


Fuente. Elaboración Propia

El consumo de combustible simulado es conservador de ahí que las emisiones sean inferiores respecto a las reales.



**Figura 55. Consumo de combustible Chevrolet LUV**



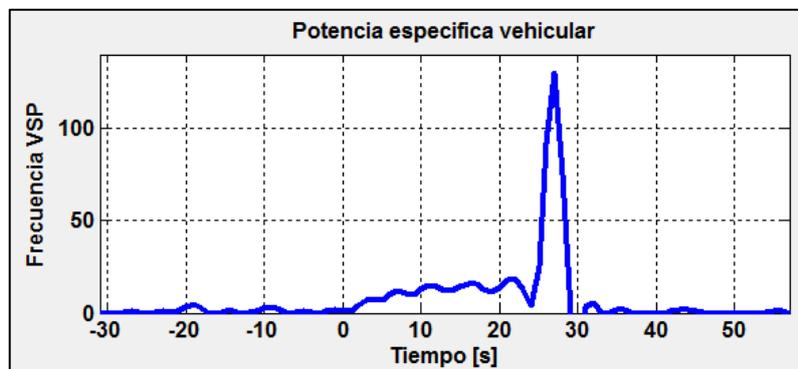
Fuente. Elaboración Propia

El valor de VSP para la operación media del vehículo oscila entre 24 y 30 [Kw/Ton] y presenta un valor pico de 55 [kW/Ton], en este caso el consumo energético es más del 65% de la capacidad del motor de la LUV, además es un vehículo sin turbo, por lo cual presenta mayor nivel de pérdidas a alturas superiores a las del nivel del mar. En este caso Boyacá y Bogotá, donde se han desarrollado las pruebas.

Luego los valores de VSP ilustrados en la Figura 56 son una sobrecarga al vehículo, aunque el modelo lo resuelve, difícilmente el vehículo es capaz de entregar esa potencia a plena carga en una pendiente del 20%, es decir no es capaz de ascender. Luego se recomienda usar un vehículo de mayor capacidad.

Esta evaluación de VSP es independiente del modelo de consumo y emisiones, luego para este caso es una evaluación acertada.

**Figura 56. VSP vehículo Chevrolet LUV, a 20% de pendiente**

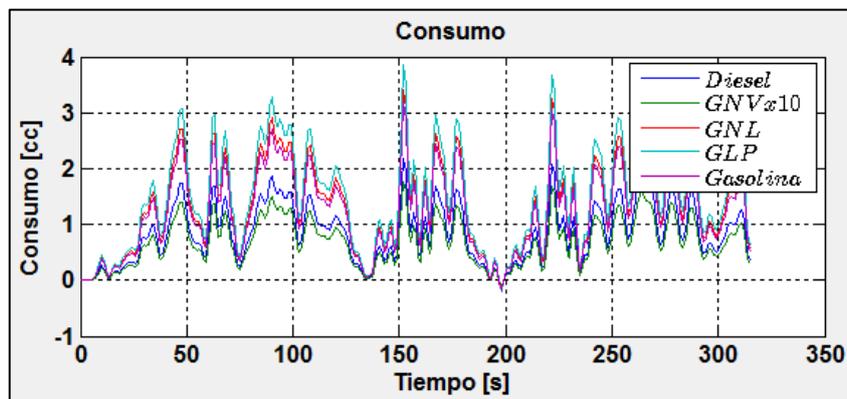


Fuente. Elaboración Propia



En el anterior vehículo se ilustraba el consumo acumulado del vehículo desarrollando una ruta, EEVmod también permite ver el comportamiento del consumo instantáneo como se ilustra en la Figura 57, el objetivo de ir mostrando diferentes imágenes generadas durante en EEVmod durante diferentes fases del análisis de los resultados es ilustrar la utilidad de las diferentes aplicaciones que trae consigo el programa desarrollado.

Figura 57. Consumo instantáneo vehículo F (LUV)



Fuente. Elaboración Propia

Figura 58 Gasto del vehículo F (LUV)

Gasto vehículo	
Distancia Total Recorrida [km]:	1.41005
Energía Total Consumida [kWh]:	18.6465
Energía específica [kWh/Ton]:	7.45858
Energía consumida de la batería [kWh]:*	6.5262
Consumo Total de Combustible:	
Equiv. eléctrico [km/gal]**	24.5074
GNL [km/gal]	10.3111
GNV [km/m <sup>3</sup> ]	5.12356
GLP [km/gal]	10.1683
Gasolina [km/gal]	12.3078
Diesel [km/Gal]	18.0092
DUAL [km/gal equi]***	29.9951

Fuente. Elaboración Propia

En el gasto vehicular de la LUV (Figura 58), se aprecia un mayor rendimiento con el vehículo operando en modo dual.



Dentro de las aplicaciones se encuentra un modelo pequeño de vehículos eléctricos plug y con baterías que solicita como datos de entrada, la capacidad de la batería en [kWh] y el coeficiente de regeneración del vehículo, parte del hecho que la batería al iniciar la ruta está cargada al 100%. Para este caso se tiene una autonomía de 24 [km/gal] (equivalente diésel), presenta una eficiencia mayor al diésel, sin embargo no alcanza a la de operación dual. Para este caso se utilizó una batería de 21 [kWh] y un coeficiente de regeneración de 0.35 (0-1).

#### 4.7 OBSERVACIONES DEL MODELO EEVmod 1.0

De acuerdo a los resultados obtenidos del modelo para los vehículos evaluados dentro del proyecto, se deben tener en cuenta las siguientes observaciones:

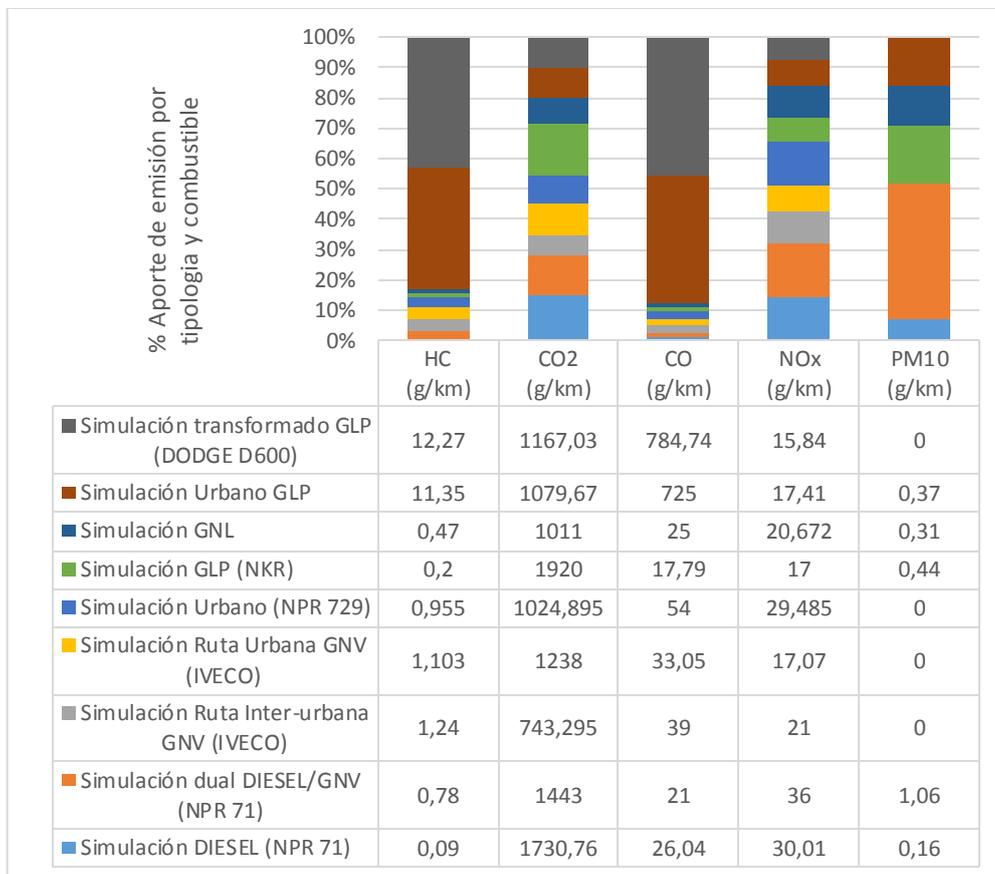
1. El modelo siempre que seleccione la opción de simular bajo ciclo de manejo, EEVmod construirá un ciclo de manejo del tiempo deseado para la ruta introducida, pero no siempre entrega el mismo ciclo, es decir EEVmod construye un ciclo de manejo diferente cada vez que corra el modelo, sin embargo las características globales se mantienen: velocidad media, aceleración media, desaceleración media y factor de correlación. Es decir cualquiera de los ciclos formados de un perfil de velocidad tendrán las mismas características, solo varía su forma.
2. Los factores de emisión variarán si varía el ciclo de manejo
3. El modelo muestra ser una buena representación de la realidad, sin embargo tenga presente valores de referencia cuando lo esté manipulando.
4. El análisis de VSP para eficiencia energética se convierte en una buena herramienta cuando se conoce la flota de vehículos muy bien.
5. La eficiencia energética simulada es una buena representación de la realidad para la mayoría de los combustibles, se aleja en un valor no mayor al 20% el GLP.



#### 4.8 RESULTADOS GLOBALES Y OBSERVACIONES DE LA MUESTRA DE VEHÍCULOS

La muestra de vehículos medidos se ilustra en la Figura 59, la Figura 60 y la Figura 61, permite establecer observaciones y aclaraciones respecto al modelo.

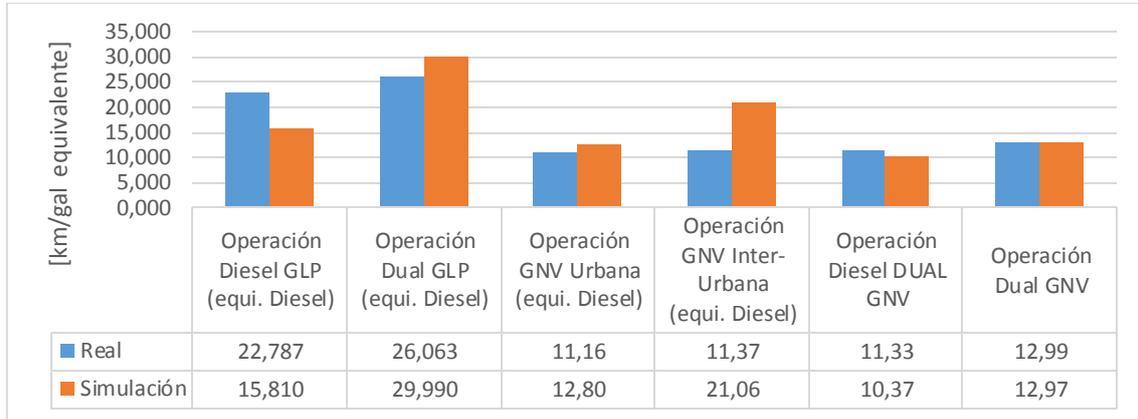
**Figura 59. Aporte en emisiones de diferentes tecnologías**



Fuente. Elaboración Propia



**Figura 60. Consumo de combustible para los vehículos evaluados**



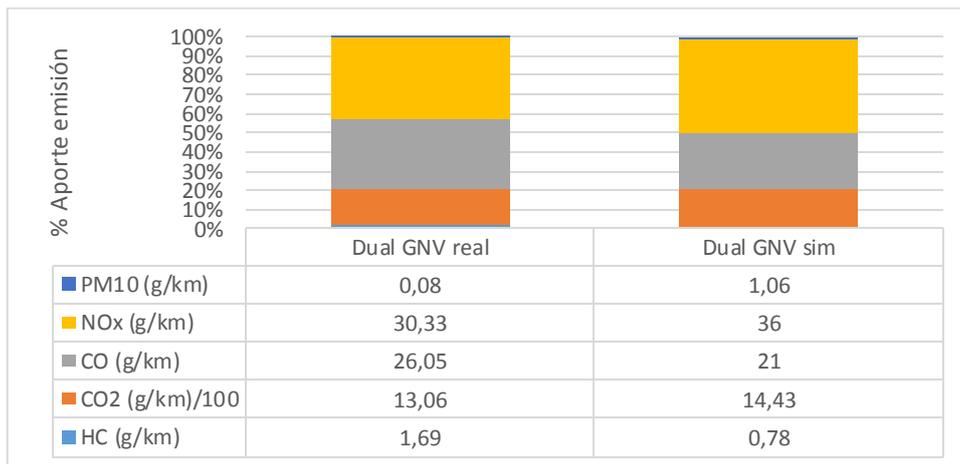
Fuente. Elaboración Propia

1. Los vehículos que presentaron el mayor nivel de reducción en emisiones son los vehículos alimentados con GNV, además presentan la mayor eficiencia energética referenciada al diésel.
2. GLP presenta valores de consumo buenos sin embargo, el modelo desarrollado para el GLP es el que menor grado de sensibilidad presenta. Luego si se comparan a los reales las eficiencias caen más del 30%, como se ilustra en la descripción de cada vehículo.
3. El material particulado siempre es alto en vehículos diésel, GLP y DUALES (Este último varía en reducción dependiendo de la combinación de combustibles, la mayor reducción en emisiones se da con la combinación diésel/GNV), tenga presente que todos los vehículos simulados se trabajaron bajo el estándar de emisiones EURO II, luego está sujeto a restricciones en emisiones, es decir el vehículo en la realidad debería estar homologado para este estándar, en el caso de los vehículos GLP se aprecia que no cumplen. Luego la comparación pierde sentido porque están trabajando bajo diferentes restricciones de niveles de emisión.
4. La eficiencia energética de los vehículos medidos y simulados para GNV oscilan en valores de 11 al 13 % en energía ahorrada, lo cual muestra las ventajas del uso del gas como segunda opción para vehículos duales y como vehículos 100% GNV.
5. Dentro de los resultados se aprecia que las emisiones de CO en GNL más bajas que las demás tecnologías.



6. Las emisiones de NOx se mantienen dentro de un intervalo de 10 a 30 [g/km] para todas las tecnologías, se dispara en el uso de GLP.
7. Respecto al GNV y su ganancia en eficiencia energética se contrarresta con la generación de más NOx. (Figura 61)
8. Los vehículos con mayor nivel de emisiones aparte de DIESEL son los alimentados con GLP.

**Figura 61. Comparación aporte de emisiones real vs simulación**



Fuente. Elaboración Propia



## 5. ANÁLISIS ENERGÉTICO ENTRE TECNOLOGÍAS Y COMBUSTIBLES

En esta sección se presenta el análisis desarrollado para dos vehículos: NPR 71 y DODGE D600, los cuales son dual GNV y GLP transformado respectivamente.

El ejercicio busca mostrar el consumo energético si el vehículo operara en cada uno de los combustibles y tecnologías trabajadas en EEVmod 1.0.

### 5.1 VEHÍCULO A. ANÁLISIS TECNOLOGÍAS Y COMBUSTIBLES, NPR 71

Se desarrolla el ejercicio bajo las siguientes condiciones:

1. Se genera un ciclo de manejo en la ruta de emisiones de Bogotá.
2. Se modela un vehículo eléctrico equivalente en capacidad al NPR 71, en este caso se utiliza un vehículo de carga liviana de la compañía Smithelectric.

**Figura 62. Vehículo Smithelectric, análogo en capacidad al NPR 71**

<b>TECHNICAL SPECIFICATIONS</b>	
<b>MOTOR:</b> Up to 161bhp [120kW], 442 lb-ft [600Nm], permanent magnet brushless, liquid-cooled	<b>BRAKES:</b> Dual circuit, 4 wheel disc air brake system with WABCO ABS, air dryer, parking brake, fail safe spring operated park brake to rear axle
<b>CONTROLLER:</b> Vector Controlled AC System with Regenerative Breaking	<b>BRACING:</b> 2 stage regenerative braking puts energy back into the battery during coasting & braking
<b>BATTERIES:</b> Lithium-Ion 40kWh, 60kWh, 80kWh, 100kWh, 120kWh	<b>FRAME:</b> Ladder type cold riveted and bolted with U-section side members and open profile steel cross members
<b>CHARGER:</b> On-Board, Fully Automatic	<b>WHEELS:</b> 17.5 x 6.00 (16,500 – 22,000) 19.5 x 6.75 (26,000)
<b>CAB:</b> All steel, two door with hydraulic tilt, and shock absorbing latching, zinc coated panels with wax filled cavities and thermal insulation	<b>TIRES:</b> 225/75R17.5 (16,500 – 22,000) 245/70R19.5 (26,000)
<b>INTERIOR:</b> Air suspended driver's seat, dual passenger seat, Kenwood stereo CD, EV drivers information center, heated mirrors	<b>WARRANTY:</b> 36 months chassis and drive train, 60 months on HV battery (3 years replacement and 2 years prorated)
<b>STEERING:</b> Hydraulic power assisted steering monoblock. Tilt adjustment w/18" diameter padded wheel	<b>SERVICE &amp; TRAINING:</b> Full Circle Program
<b>SUSPENSION:</b> Front & rear parabolic springs with transverse torsion bar stabilizer, hydraulic double acting shock absorbers	

Fuente: [http://www.smithelectric.com/wp-content/themes/barebones/pdfs/SmithNewtonUS\\_SpecSheet\\_2011.pdf](http://www.smithelectric.com/wp-content/themes/barebones/pdfs/SmithNewtonUS_SpecSheet_2011.pdf)

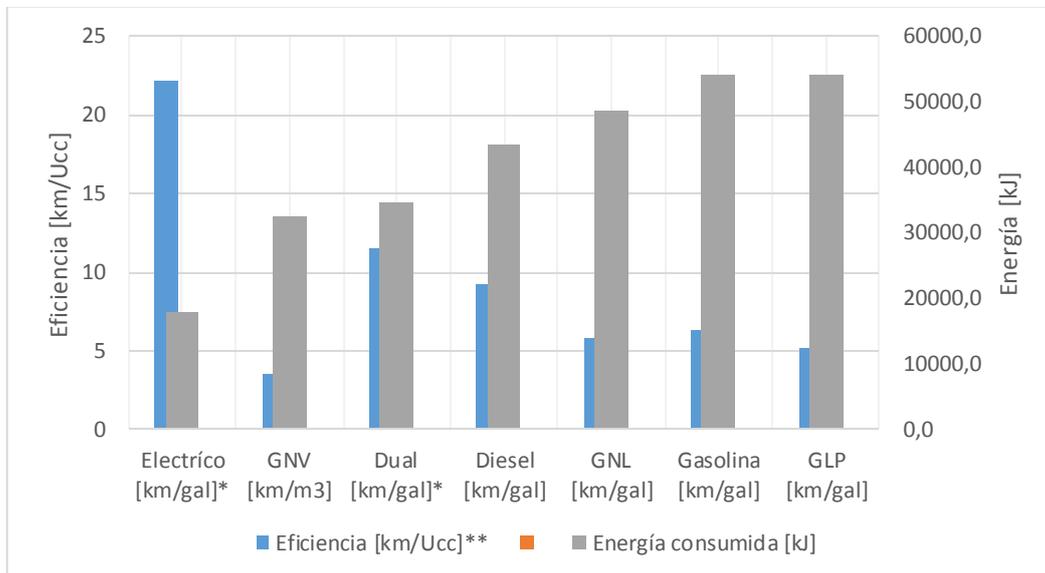


3. Se modela con las características del vehículo NPR 71, con una batería de 80 [kwh] y un FER del 30%.
4. Se estima la demanda energética para cumplir con el ciclo, y se calcula el consumo de combustible operando en DIESEL, gasolina, GLP, GLN y GNV.
5. El ciclo modelado tiene una duración de 10[*min*], un recorrido desarrollado de 2.8 [km] y una velocidad máxima de 60 [km/h] y demanda un consumo energético de 21510 [kJ], según el tipo de combustible variara la cantidad de energía suministrada para suplir la demanda citada.

#### 5.1.1 Observaciones análisis tecnologías y combustibles, NPR 71

Sujeto a las condiciones presentadas, se ilustran los resultados obtenidos en la Figura 63.

**Figura 63. Consumo energético y eficiencia del vehículo NPR 71 simulado en diferentes combustibles**



Fuente. Elaboración Propia



Las observaciones de los resultados obtenidos del análisis realizado son las siguientes:

1. La tecnología más eficiente son los vehículos eléctricos, sin embargo se debe considerar que: el factor de regeneración varía según el modo de conducción, en este caso es un valor alto, que implica un perfil de conducción ideal para este tipo de vehículos, lo cual hace altamente eficiente esta tecnología. Igualmente se debe entender que la autonomía de los vehículos eléctricos es menor a la de los convencionales. Respecto a emisiones el valor es cero, y es la ventaja más alta frente a las demás tecnologías.
2. En segundo lugar está el uso de GNV, respecto a emisiones es la tecnología que menor cantidad de gases emite.
3. La combinación dual es la tecnología que ocupa el tercer lugar y su nivel de emisiones es superior al combustible de combinación (en este caso GNV) e inferior al combustible de referencia diésel y a la gasolina como combustibles convencionales.
4. Para esta simulación se aprecia que el consumo de energético de GNL y GLP es superior al diésel y se encuentran muy cercanos al equivalente en gasolina.
5. Se aprecia que para este vehículo el GLP es el combustible que es menos eficiente.
6. Respecto a emisiones se aprecia que la gasolina presenta altos niveles de CO<sub>2</sub> y de HC, mientras el PM es mayor para el vehículo diésel, y el nivel de emisiones más bajo es para el vehículo operando en GNV. (Figura 64)

**Figura 64. Emisiones para vehículo NPR 71 usando diferentes combustibles**

FEs operando en Diesel			FEs operando en Gasolina			FEs operando en GNV		
	[g/km]	[g/kWh]		[g/km]	[g/kWh]		[g/km]	[g/kWh]
CO <sub>2</sub>	1727.42	810.469	CO <sub>2</sub>	2132.94	1000.73	CO <sub>2</sub>	1404.94	659.17
HC	0.081	0.381379	HC	1.03187	0.484131	HC	1.17304	0.550364
CO	25.9862	12.1922	CO	16.4938	7.73853	CO	37.5005	17.5944
NO <sub>x</sub>	29.9149	14.0354	NO <sub>x</sub>	38.5309	18.0779	NO <sub>x</sub>	19.3887	9.09677
PM	0.158619	0.0744206	PM	0	0	PM	0	0

Fuente. Elaboración Propia



## 5.2 VEHÍCULO E. ANÁLISIS TECNOLOGÍAS Y COMBUSTIBLES, DODGE D600

Se desarrolla el ejercicio bajo las siguientes condiciones:

1. Se genera un ciclo de manejo en la ruta de emisiones de Bogotá.
2. Se modela un vehículo eléctrico equivalente en capacidad al DODGE D600, en este caso se utiliza un vehículo de carga de la compañía EVI.

**Figura 65. Vehículo EVI, análogo en capacidad al DODGE D600**

Specifications	
<b>KEY SPECIFICATIONS</b>	
Maximum Speed	65 mph*
Average Range	90 Miles*
Acceleration (0-60 mph)	26 Seconds at 19,500 lb.
GVWR	Class 5 (16,001 lb.) – Class 6 (23,000 lb.)
Wheel Base	155"– 270"
<b>BATTERY SYSTEM</b>	
Make	Valence Technology
Chemistry	Lithium Iron Magnesium Phosphate (LiFeMgPO <sub>4</sub> )
Type	U-Charge XP®
Energy	99 kWh
Warrantied Battery Life	1,500 Cycles or 5 Years
<b>MOTOR</b>	
Type	AC Permanent Magnet
Continuous Rated Power	120 kW
Peak Rated Power	200 kW/260 hp
Maximum Torque	900 Nm/664 lbf.ft
<b>TRANSMISSION</b>	
Description	2 Speed Automatic Manual
<b>CHARGER</b>	
Charging Time	Scalable 6 – 12 Hours (J1772 Compliant) (6 Hours: 220 Vac/75 amp)

Fuente. <http://www.evi-usa.com/LinkClick.aspx?fileticket=SyZhwUVqNJs%3d&tabid=83>

3. Se modela con las características del vehículo DODGE D600, con una batería de 99 [kwh] y un FER del 40%.
4. Se estima la demanda energética para cumplir con el ciclo, y se calcula el consumo de combustible operando en diésel, gasolina, GLP, GLN y GNV.
5. El ciclo modelado tiene una duración de 10[min], un recorrido desarrollado de 3.12 [km] y una velocidad máxima de 60 [km/h] y demanda un consumo energético de 20376 [kJ],

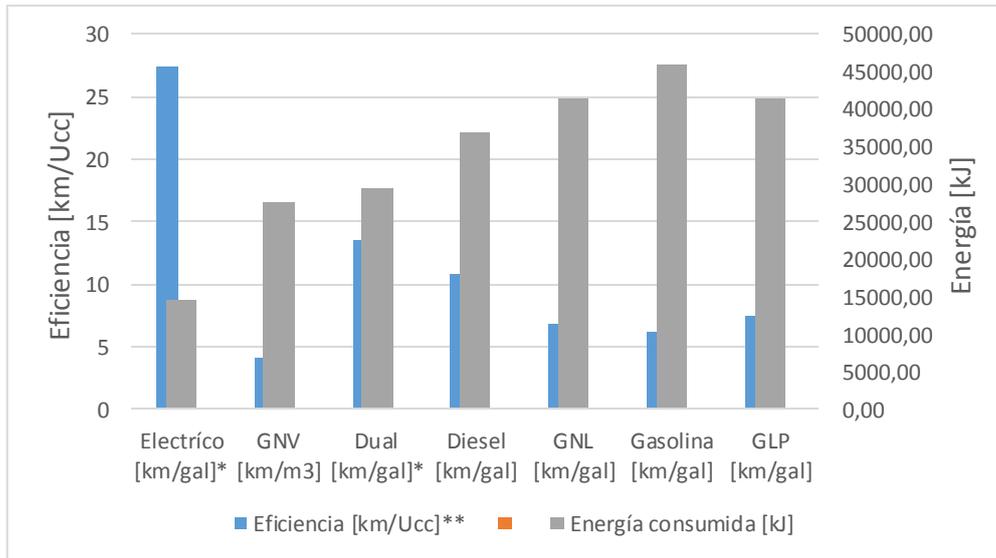


según el tipo de combustible variara la cantidad de energía suministrada para suplir la demanda citada.

### 5.2.1 Observaciones análisis tecnologías y combustibles, DODGE D600

Sujeto a las condiciones presentadas, se ilustran los resultados obtenidos en la Figura 66 de los cuales se presentan las siguientes observaciones:

**Figura 66. Consumo energético y eficiencia del vehículo DODGE D600 simulado en diferentes combustibles**



Fuente. Elaboración Propia

Las observaciones de los resultados obtenidos del análisis realizado son las siguientes:

1. La tecnología más eficiente son los vehículos eléctricos, al igual que en la simulación anterior, sin embargo el FER es más alto y esto dispara la eficiencia, sin embargo se recuerda que estos factores varían según las condiciones de operación y la ruta.
2. En segundo lugar está el uso de GNV, respecto a emisiones es la tecnología que menor cantidad de gases emite.
3. La combinación dual es la tecnología que ocupa el tercer lugar y su nivel de emisiones es inferior al combustible de combinación (en este caso GLP) e inferior al combustible de



referencia diésel y a la gasolina como combustibles convencionales. En este caso se usó una proporción de 80/20 para la combinación dual.

4. Para esta simulación se aprecia que el consumo de energético de GNL y GLP es inferior a la gasolina.
5. Se aprecia que para este vehículo la gasolina es el combustible que es menos eficiente.
6. Respecto a emisiones se aprecia que el GLP es quien presenta niveles más altos de emisiones y de HC, mientras el PMes mayor para el vehículo diésel, y el nivel de emisiones más bajo es para el vehículo operando en GNV. (Figura 67)

**Figura 67. Emisiones para vehículo DODGE D600 usando diferentes combustibles**

FEs operando en Diesel			FEs operando en Gasolina			FEs operando en GLP		
	[g/km]	[g/kWh]		[g/km]	[g/kWh]		[g/km]	[g/kWh]
CO2	1466.89	809.454	CO2	1797.51	991.895	CO2	2266.47	1250.67
HC	0.069	0.0380901	HC	0.869599	0.479858	HC	18.2745	10.0841
CO	22.067	12.1769	CO	13.9	7.67023	CO	116.842	64.4754
NOx	25.1905	13.9005	NOx	32.426	17.8932	NOx	28.0172	15.4603
PM	0.150749	0.0831854	PM	0.128406	0.0708565	PM	0.149633	0.0825701

Fuente. Elaboración Propia

### 5.3 COMENTARIOS ANÁLISIS ENERGÉTICO ENTRE TECNOLOGÍAS Y COMBUSTIBLES

Como se vio en estos dos ejemplos EEVmod 1.0 permite la comparación entre diferentes tecnologías y tipos de combustibles, se debe tener en cuenta que:

1. Se debe conocer las características técnicas de los vehículos eléctricos y las condiciones de operación para poder generar un factor de energía recuperada FER.
2. La eficiencia de los vehículos eléctricos siempre será mayor a las demás tecnologías, dada la alta eficiencia de los sistemas eléctricos y los factores de energía recuperada, sin embargo recuerde involucrar la autonomía de su vehículo dentro de las conclusiones.
3. El GLP y la gasolina son los dos combustibles menos eficientes.



## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El modelo desarrollado en el presente estudio, junto con las pruebas en ruta realizadas permite concluir lo siguiente:

1. Se requiere de un procesamiento de datos de ruta de los vehículos de carga obtenidos a través de sistemas de posicionamiento satelital (GPS por sus siglas en Inglés), para que a partir de éstos, se construyan ciclos más robustos que permitan simular más las condiciones reales de operación.
2. El modelo permite predecir en forma limitada las condiciones de manejo de los vehículos, mientras que las pruebas en ruta permitieron determinar las emisiones y consumos reales de los vehículos. Esto hace que los consumos de combustible se subestimen en el modelo en comparación con los datos reales en ruta.
3. La modelación de los vehículos con tecnología GLP y GNV y los datos obtenidos durante las pruebas, muestran que existe una buena correlación en las emisiones gaseosas (especialmente hidrocarburos y monóxido de carbono). Las emisiones sólidas (material particulado), no son tan precisas en comparación con las pruebas en ruta, ya que el mecanismo de formación de material particulado usado fue desarrollado para motores diésel y su adaptación a motores a gasolina no está desarrollada en su totalidad.
4. La modelación de los vehículos con tecnología GLP y GNV y los datos obtenidos durante las pruebas, muestran que existe una correlación aceptable en cuanto a eficiencia energética. En general, los modelos de consumo energético en un vehículo permiten a partir de condiciones de operación, calidades de combustible, entre otros, predecir en forma muy cercana los consumos reales bajo condiciones controladas.

Fruto de la realización del presente estudio, se recomienda:

1. Alimentar la base de datos de las curvas características de los motores y de transmisiones para robustecer los resultados que arroje el modelo.
2. Establecer un modelo de predicción de material particulado para motores a gasolina e incluirlo en este modelo desarrollado.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Grupo de Investigación en Combustibles Alternativos, Energía, y  
Protección del Medio Ambiente  
Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica  
Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Colombia –Sede  
Bogotá D.C.  
Carrera 30 No 45 –03, Edificio 453, Oficina 401  
Tel.: 3165320, Fax.: 316533 Correo Electrónico:  
[gruicte\\_bog@unal.edu.co](mailto:gruicte_bog@unal.edu.co)

3. Realizar más pruebas en ruta con tecnologías diversas en GLP y GNV para robustecer el modelo.



## GLOSARIO

CO: Monóxido de Carbono

NMHC: Hidrocarburos sin quemar sin incluir metano

NO<sub>x</sub>: Óxidos de Nitrógeno

PM o MP: Material particulado, cuando incluye subíndice, el número indica el tamaño de partícula en micrómetros.

CH<sub>4</sub>: Metano

NP: Número de partículas

THC: Hidrocarburos sin quemar totales.

HHV: Higher Heating Value (Poder Calorífico Superior).

LHV: Lower Heating Value (Poder Calorífico Inferior).

GNC: Gas Natural Comprimido

GNL: Gas Natural Licuado

GLP: Gas Licuado de Petróleo

GAL: Gas a Líquido

MCI: Motor de Combustión Interna

EPA: Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos)

PMS: Punto Muerto Superior



PMI: Punto Muerto Inferior

MAP: Manifold Absolute Pressure (Presión Absoluta en el Múltiple)

TPS: Throttle Position Sensor (Sensor de Posición de la Mariposa)

IAC: Idle Air Control (Control de Aire en Ralentí)

ECU: Engine Control Unit (Unidad de Control del Motor)

ESC: Ciclo estacionario Europeo

ETC: Ciclo Transciente Europeo

ELR: Ciclo de respuesta de carga Europea.

SFC: Consumo específico de combustible

OEM: Fabricante de equipamiento original.

GDE: Galones de diésel equivalentes

LHDDE: Motor diésel liviano para carga pesada

MHDDE: Motor diésel mediano para carga pesada

HHDE: Motor diésel pesado para carga pesada



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] National Renewable Energy Laboratory. NREL. R. BARNIT, K. CHANDLER. In-use Comparison of Hybrid Electric, CNG, and Diesel Buses at New York City Transit. 2008. Copyright © 2008 SAE International.
- [2] CONVENIO 013 DE 2013. Secretaría Distrital de Ambiente y Universidad Nacional de Colombia, 2013
- [3] Andrew C. Polk, Chad D. Carpenter, Kalyan Kumar Srinivasan, Sundar Rajan Krishnan. An investigation of diesel-ignited propane dual fuel combustion in a heavy-duty diesel engine. ELSEVIER. 2014
- [4] UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA – Grupo de Investigación en Combustibles Alternativos, Energía y Protección del Medio Ambiente. Pruebas de validación, eficiencia energética y emisiones contaminantes sobre vehículo dedicado a combustible gas natural euro 6 SCANIA. Realizado para Scania Colombia/ Gas Natural Fenosa SA ESP. 2014.
- [5] SAE J1616. Recommended Practice for Compressed Natural Gas Vehicle Fuel. Issued Feb 1994.
- [6] S. Mokhtab, W. Poe, J. Speight. Handbook of Natural Gas transmission and Processing. Elsevier. 2006.
- [7] Julio Pérez, Manuel Cabarcas, Jesús Archila, Yamil Yubran. 2005. Potencial de la tecnología “Gas To Liquids –GTL” en Colombia. CIGP – Universidad Industrial de Santander, Ecopetrol S.A. Gerencia regional sur, Neiva – Huila.
- [8] José R. Freire. 2013. Usos del gas natural en el transporte. Gas Natural Fenosa (España)
- [9] BIPHASE TECHNOLOGIES. Liquid propane Electronic fuel injection LPEFI® – General Diagnostic Manual. 2014
- [10] Jorge Díaz. 2006. Gas Natural Licuado, Tecnología y mercado. Instituto Argentino de la Energía “General Mosconi”. Trabajo de investigación.
- [11] Indian Auto LGP. 2008. Booklet OnSafe Practices/Check list. Pg 20. LPG Installation – schematic diagram.
- [12] ASOCIACIÓN EUROPEA DEL GPL. 2009. El Autogás en Europa, La alternativa sostenible
- [13] Landi Renzo. <http://www.landi.it/> Revisada el 7 de julio de 2014
- [14] Landi Renzo Diesel Metano <http://www.dieselmetano.it/it/index.php> Revisada el 7 de julio de 2014
- [15] Landi Renzo – Bay tech. <http://www.landiusa.com/baytech> Revisada el 7 de Julio de 2014
- [16] American Power Group Inc. <http://americanpowergroupinc.com/about-dual-fuel/technology> Revisada el 7 de Julio de 2014



- [17] NGV Motori USA. <http://www.ngvus.com/index.php> Revisada el 7 de Julio de 2014
- [18] Omnitek Engineering Corp. <http://www.omnitekcorp.com/dng.htm> Revisada el 7 de Julio de 2014.
- [19] Clean Fuel USA. <http://www.cleanfuelusa.com/> Revisada el 7 de Julio de 2014
- [20] Roush Clean Technologies. <http://www.roushcleantech.com/content/fuel-system-overview>
- [21] PEMEX. <http://www.ref.pemex.com/octanaje/24DIESEL.htm>. Revisado el 13 de Julio de 2014
- [22] NATURGAS. [http://www.naturgas.com.co/htms/contenido-colombia-sigue-en-el-top-10-de-transporte-a-gas-natural-vehicular\\_367.html](http://www.naturgas.com.co/htms/contenido-colombia-sigue-en-el-top-10-de-transporte-a-gas-natural-vehicular_367.html) Revisada el 7 de Julio de 2014
- [23] PERIÓDICO EL HERALDO. Abril 2014. <http://www.elheraldo.co/economia/promigas-construye-planta-de-gas-natural-licuado-149343> Revisado el 9 de julio de 2014
- [24] PERIÓDICO EL TIEMPO. Abril 2014. <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-13870216> Revisado el 9 de Julio de 2014
- [25] INDIAN AUTO LGP COALITION. [http://www.iac.org.in/4-wheelers-conversion.php.fecha\\_de\\_consulta\\_02/07/14](http://www.iac.org.in/4-wheelers-conversion.php.fecha_de_consulta_02/07/14) Revisado el 9 de Julio de 2014
- [26] Azqueta D. y Ferreiro A. Análisis Económico y Gestión de Recursos Naturales. Alianza Editorial. Madrid, España, 1994.
- [27] García, L et al. Evidencia empírica de poder de mercado en industrias minoristas de Gas Natural Vehicular. Simposio de Microeconomía Aplicada, 2012.
- [28] IGU (International Gas Union). “Natural Gas for Vehicles (NGV)”, Report on Study Group 5.3, IGU, 2009.
- [29] IEA. Medium Term Oil and Gas Markets, 2010.
- [30] Michiel Nijboer. The Contribution of Natural Gas Vehicles to Sustainable Transport. Working Paper, International Energy Agency, 2010.
- [31] Mokate K. Evaluación Financiera de Proyectos de inversión. Alfaomega. Bogotá. Colombia, 2005.
- [32] Natural Gas Vehicles for America. The Status and Future of the Natural Gas Vehicles Market. Alternative Fuel Vehicle Conference, 2012.
- [33] Saldarriaga, C. A. et al. Análisis Costo- Beneficio del Programa de Gas Natural Vehicular Aplicado en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Revista Gestión y Ambiente. Volumen 14 - No. 1, Mayo de 2011, Medellín ISSN 0124.177X, 2010. pp 143-150.
- [34] UPME. La Cadena del Gas Natural en Colombia, 2006.
- [35] UPME. Proyección de Demanda de Energía del Sector Transporte Terrestre, 2010a.
- [36] UPME. Proyección De Demanda De Gas Natural En Colombia, 2010b.



- [37] UPME. Proyecciones De Precios De Gas Natural y Combustibles Líquidos Para Generación Eléctrica, 2012.
- [38] World Energy Outlook, 2009.
- [39] K CHEENKACHORN. Performance and emissions of a heavy duty diesel engine fuelled with diesel and LNG. 2013. ELSEIVER.
- [40] N. C. SURAWSKI. Performance and gaseous and particle emissions from a liquefied petroleum gas (LPG) fumigated compression ignition engine. 2014. ELSEIVER.
- [41] E. R. YAYARATNE. Particle and gaseous emissions from compressed natural gas and ultralow sulphur diesel-fuelled buses at four steady engine loads. 2009. ELSEIVER
- [42] B. B. SAHOO. Effect of engine parameters and type of gaseous fuel on the performance of dual fuel gas diesel engines – A critical review. 2009. ELSEIVER.
- [43] Arroyo, A. La Argentina y el Estado Plurinacional de Bolivia, más que partícipes de una frontera común. Serie Recursos Naturales. CEPAL, Naciones Unidas, 2013.
- [44] Brown, S. & Yücel, M. What Drives Natural Gas Prices? Federal Reserve Bank Of Dallas, Research Department, Working Paper 0703, 2007.
- [45] Huntington, G. Industrial Natural Gas Consumption in the United States: An Empirical Model for Evaluating Future Trends. Energy Modeling Forum, Stanford University, Energy Economics, 2006.
- [46] Kozulj, R. Análisis de formación de precios y tarifas de gas natural en América del Sur. Documento de Proyecto. CEPAL, Naciones Unidas, 2012.
- [47] UPME. La Cadena del Gas Natural en Colombia, 2006.
- [48] UPME. Cadena del Gas Licuado de Petróleo 2013, 2013.
- [49] UPME. Proyecciones de precios de gas natural y combustibles líquidos para generación eléctrica febrero de 2012, 2012.
- [50] Villar, J. & Joutz, F. The Relationship Between Crude Oil and Natural Gas Prices. EIA manuscript, 2006.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Grupo de Investigación en Combustibles Alternativos, Energía, y  
Protección del Medio Ambiente  
Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica  
Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Colombia –Sede  
Bogotá D.C.  
Carrera 30 No 45 –03, Edificio 453, Oficina 401  
Tel.: 3165320, Fax.: 316533 Correo Electrónico:  
[gruicte\\_bog@unal.edu.co](mailto:gruicte_bog@unal.edu.co)

## ANEXOS

Anexo A. Versión ejecutable del modelo EVVmod 1.0 formato digital DVD.

Anexo B. Desarrollo-Tutorial EEVmod 1.0\_V1

Anexo C. Ciclos de manejo, archivo de Excel en formato digital CD.