



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Modelo para el cálculo del consumo de
combustible y emisiones de bióxido de carbono
para vehículos pesados con motores diésel**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Eléctrico Electrónico

P R E S E N T A

Domínguez Pérez Laura Danielle

DIRECTOR DE TESIS

M. en C. Edgar Baldemar Aguado Cruz



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023

AGRADECIMIENTOS

A mi mamá quien creyó en mí día y noche aun en los momentos en que dudaba de terminar mi carrera.

A mi papá quien me ha motivado a reconocer mis habilidades.

A mis hermanos por el soporte y motivación en todos los instantes alegres que hemos compartido en la vida y en especial durante mi carrera.

Agradezco a la Universidad Autónoma Metropolitana por haberme permitido participar en la creación de UAMmero.

Le agradezco a mi asesor, el M. en C. Edgar Baldemar Aguado Cruz por asesorarme en la culminación de mis estudios de ingeniería.

Agradezco a todos los sinodales por sus valiosos comentarios al manuscrito original porque me ayudaron a mejorar mucho el texto.

MODELO PARA EL CÁLCULO DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y EMISIONES DE BIÓXIDO DE CARBONO PARA VEHÍCULOS PESADOS CON MOTORES DIESEL

ÍNDICE

RESUMEN	5
ABSTRACT	5
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO	6
1.1 Las emisiones de bióxido de carbono y el calentamiento global.....	6
1.2 Regulación de las emisiones de bióxido de carbono y consumo de combustible de vehículos pesados en el mundo.....	8
1.3 UAMmero, herramienta mexicana para el cálculo del consumo de combustible y las emisiones de bióxido de carbono	9
1.4 Valor Presente Neto y tasa de descuento	11
CAPÍTULO 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
CAPÍTULO 3. JUSTIFICACIÓN	15
CAPÍTULO 4. HIPÓTESIS.....	18
CAPÍTULO 5. OBJETIVOS	19
5.1 Objetivo general	19
5.2 Objetivos particulares	19
CAPÍTULO 6. DINÁMICA VEHICULAR	20
6.1. Ecuación de movimiento.....	20
6.2 Fuerzas sobre un vehículo.....	21
6.3 Fuerza de tracción del motor sobre el vehículo.....	22
CAPÍTULO 7. CARACTERÍSTICAS DE LOS VEHÍCULOS PESADOS ESTUDIADOS	24
7.1 Vehículo con un motor de 350 HP	24
7.2 Vehículo con un motor de 455 HP	25
7.3 Vehículo con un motor de 200 HP	28
CAPÍTULO 8. CICLO DE CONDUCCIÓN.....	31
CAPÍTULO 9. PAR O TORQUE, REVOLUCIONES POR MINUTO Y POTENCIA DEL MOTOR PARA MOVER EL VEHÍCULO	32
CAPÍTULO 10. EL PROGRAMA COMPUTACIONAL UAMMERO	35
10.1 Arquitectura de UAMmero.....	35

10.2 Resultados obtenidos gráficamente	44
10.3 Observaciones	52
CAPÍTULO 11. COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE EL GEM Y UAMmero	53
11.1 Masa inercial.....	53
11.2 Fuerzas sobre el vehículo	54
11.3 Par o troque	54
11.4 Potencia	55
11.5 Observaciones	55
CAPÍTULO 12. CÁLCULO DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE, RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE Y EMISIONES DE BIÓXIDO DE CARBONO DE UN VEHÍCULO PESADO	56
12.1 Cálculo de la rapidez del vehículo, del rpm y del par (o torque) del motor	56
12.2 Mapa de combustible para el motor a diésel de 455 HP.....	60
12.3 Cálculo del consumo instantáneo de combustible del motor.....	62
12.4 Cálculo del rendimiento de combustible del vehículo.....	64
12.5. Observaciones	65
CAPÍTULO 13. EFECTO DE LA MASA DE LA CARGA Y DE LA PENDIENTE DEL RECORRIDO EN EL RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE Y EN LAS EMISIONES DE BIÓXIDO DE CARBONO PARA UNA CAMIONETA PESADA	67
13.1 Consumo de combustible y emisiones de bióxido de carbono de una camioneta sin carga que viaja en un camino plano.....	67
13.2 Consumo de combustible y emisiones de bióxido de carbono de una camioneta pesada que transporta 2 toneladas de carga y viaja en un camino con pendiente de 6 grados.....	73
13.3 Rendimiento de combustible de una camioneta pesada que viaja en un ciclo de manejo con una velocidad crucero de 77 km/hr	77
13.4 Observaciones	79
CAPÍTULO 14. EFECTO DE LA RAPIDEZ EN EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE, LA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y LAS EMISIONES DE BIÓXIDO DE CARBONO	81
14.1 Vehículos que se mueven con rapidez constante.....	81
14.2 Rendimiento de combustible contra la rapidez para un tractocamión	83

14.3 Observaciones	85
CAPÍTULO 15. MODELO PARA EVALUAR EL COSTO BENEFICIO DE ADQUIRIR TRACTOCAMIONES EFICIENTES	86
15.1. Modelo del costo beneficio de un aumento en la eficiencia energética de un tractocamión	86
15.2. Resultados del Valor Presente Neto para un tractocamión en varios años.....	88
15.3 Observaciones	93
CAPÍTULO 16. CONCLUSIONES	94
BIBLIOGRAFÍA	96

RESUMEN

Se describe el modelo matemático del **Modelo de Emisiones Resultantes de la Operación** de vehículos pesados desarrollado en la **UAM (UAMmero)**, así como se bosqueja su arquitectura para el caso de recorridos en un ciclo de manejo. Se estudia la dinámica vehicular y se muestra una comparación de los resultados del programa de computación desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de América, GEM, con los de UAMmero, para un ejemplo específico. Se explica en detalle cómo se realizan los cálculos del consumo de combustible del vehículo, de las emisiones de bióxido de carbono y del rendimiento de combustible. Se reportan los resultados para una camioneta pesada el efecto de la masa de la carga y de la pendiente del camino en el rendimiento de combustible. Se muestran algunos resultados cuando se considera una rapidez constante del vehículo. Se realiza un primer análisis del costo beneficio de adquirir vehículos pesados más eficientes. Finalmente, se presentan las conclusiones.

ABSTRACT

The mathematical model of the Model of Emissions Resulting from the Operation of heavy vehicles developed at the UAM (UAMmero) is described, as well as its architecture is outlined for the case of routes in a driving cycle. Vehicle dynamics are studied and a comparison of the results of the computer program developed by the Environmental Protection Agency of the United States of America, GEM, with those of UAMmero, is shown for a specific example. It is explained in detail how the calculations of the vehicle's fuel consumption, carbon dioxide emissions and fuel efficiency are made. The results are reported for a heavy truck, the effect of the mass of the load and the slope of the road on fuel efficiency. Some results are shown when considering a constant speed of the vehicle. A first analysis of the cost benefit of acquiring more efficient heavy vehicles is carried out. Finally, the conclusions are presented.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

1.1 Las emisiones de bióxido de carbono y el calentamiento global

El cambio climático es un hecho y, si no se detiene, causará daños terribles e irreparables a los seres humanos en todo el mundo. Por tanto, es necesario reducir las emisiones de gases de efecto invernadero como el bióxido de carbono (CO_2) de los mayores emisores del mundo; de lo contrario, la temperatura del planeta aumentará más de 1.5 grados a finales de siglo por encima de la de su época preindustrial [1]. El transporte pesado de mercancías y personas es uno de los emisores de CO_2 más importantes. En los Estados Unidos de América (EE. UU.), la población de vehículos pesados es aproximadamente el 10% de su flota de transporte por carretera; sin embargo, emiten el 20% de CO_2 de ese sector [2]; es decir, contribuyen de manera desproporcionada a las emisiones de gases de efecto invernadero. Por eso, se ha realizado un gran esfuerzo para promulgar regulaciones en algunos países del mundo para limitar el consumo de combustible y las emisiones de CO_2 de los vehículos pesados [3]. Una de las herramientas necesarias para evaluar el consumo de combustible y las emisiones de CO_2 de los vehículos pesados son los programas computacionales como el Modelo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEM, por sus siglas en inglés) [4][5][6][7] desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de EE. UU., la Herramienta para el cálculo del consumo de energía vehicular (VECTO, por sus siglas en inglés) [8][9] desarrollada por la Unión Europea y el Modelo de Emisiones Resultantes de la Operación de Vehículos Pesados (UAMmero) [10][11] que está siendo desarrollado en México por la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) Campus Azcapotzalco.

Existen problemas formidables en la implementación de regulaciones de eficiencia energética en muchos países, uno de los más conocidos es que los vehículos más eficientes son más caros. Sin embargo, en Estados Unidos el retorno de la inversión es de entre uno y cuatro años para los vehículos pesados que se comercializan en ese país [6].

El costo de desarrollar vehículos pesados menos contaminantes aumenta porque se necesitan mejores tecnologías, éstas son: mejores motores, transmisiones, diferenciales, neumáticos, materiales que son más livianos, pero tan fuertes como el acero, formas aerodinámicas de los vehículos, electrónica y sensores para controlar las emisiones y mejorar el rendimiento de los motores y muchos otros dispositivos, así como combustibles más limpios.

En el mundo, existen pasos previos antes de fabricar vehículos pesados que consuman menos combustible y emitan menos CO₂; uno de ellos es usar motores que emiten menos óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, óxidos de azufre, hidrocarburos y partículas. Las regulaciones más famosas y recientes del mundo para reducir estos otros contaminantes han sido la US EPA 2010 y la EURO VI de la Unión Europea, que exigen alrededor de un 99% menos de partículas emitidas por los motores de los vehículos pesados que en los años noventa. Otro de los pasos importantes ha sido la producción de gasolina y diésel en las refinerías con menos de 15 partes por millón (ppm) de azufre. Si el diésel y la gasolina tienen más que esta cantidad de azufre, los motores de los vehículos no pueden cumplir con las regulaciones EPA 2010 o EURO VI, que se han adaptado en muchos países para reducir la contaminación.

Las refinerías mexicanas no producen suficiente cantidad de estos combustibles ultrasulfurados ni el gobierno mexicano importa una cantidad suficiente [12]. Es por eso que se comercializa diésel con menos de 15 partes por millón (ppm) solo en las zonas metropolitanas del Valle de México, de la Ciudad de Guadalajara y de la Ciudad de Monterrey y a lo largo de la frontera de México con Estados Unidos.

El 90% de las estaciones de abasto de diésel no cuenta con la señalética oficial de diésel de ultra bajo azufre (DUBA) [13]. Es por ello que no es obligatorio que todos los vehículos pesados cumplan con la normativa mexicana NOM-044-SEMARNAT-2017 [14] promulgada por el Gobierno de México, que es una adaptación de las normativas US EPA 2010 y EURO VI a México. Si bien la NOM-044-SEMARNAT-2017 podría hacerse cumplir en las regiones mexicanas donde es posible obtener los combustibles adecuados, como en la Ciudad de México, esto es incierto.

Los vehículos pesados pesan más de 3.857 toneladas (tons) y en México su consumo de combustible y emisiones de CO₂ no están regulados por la norma federal mexicana NOM-163-SEMARNAT-ENER-SCFI-2013 [15], que regula los automóviles nuevos y camiones livianos comercializados en el país. En la figura 1 se ilustra un vehículo pesado.

En México no se obedecen todas las leyes promulgadas. La Compañía Mexicana Petróleos Mexicanos (PEMEX) tenía el mandato de entregar DUBA a todo el país desde el año 2018, y hasta la fecha no ha cumplido, sino será hasta el 1 de enero del año 2025 [16]. Por lo tanto, un reglamento para reducir el CO₂ y el consumo de combustible para vehículos pesados debería ser tan apropiado y realista que debería cumplirse una vez promulgado. El DUBA no estará disponible en todo el país sino probablemente hasta el año 2024, por lo que una normativa sobre reducción del consumo de combustible y emisiones de CO₂ no se hará cumplir

pronto, lo que permite al Gobierno en conjunto con otras organizaciones interesadas comenzar a diseñar una buena regulación en estos asuntos [17].

Varias regulaciones en México en ocasiones no se cumplen porque fueron adoptadas descuidadamente desde otros países y no son las adecuadas, por eso en la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) Campus Azcapotzalco, un grupo de profesores se tomó la tarea de contribuir a diseñar una normativa adecuada y su herramienta de certificación a la eficiencia energética y las emisiones de CO₂ de vehículos pesados.



Figura 1. Vehículo pesado.

1.2 Regulación de las emisiones de bióxido de carbono y consumo de combustible de vehículos pesados en el mundo

Debido a las emisiones de CO₂ en la producción, transformación y uso de energía, en algunos países del mundo se han promulgado regulaciones de eficiencia energética para vehículos pesados con el fin de reducir el impacto de esas emisiones en el cambio climático. En México, aún no existe una regulación de eficiencia energética para vehículos pesados a pesar de la urgencia de implementarla. Se deben comenzar a construir o a adecuar las herramientas para certificar su cumplimiento para cuando se promulgue dicha norma mexicana [10][11]. Una norma de eficiencia energética exige que los vehículos pesados cumplan con determinados límites de consumo de combustible [5].

El consumo de combustible y las emisiones de bióxido de carbono de un vehículo dependen de su motor, transmisión, diferenciales, neumáticos, forma aerodinámica, dispositivos anticontaminantes, dispositivos electrónicos y muchos otros componentes. El consumo de combustible de los vehículos pesados se evalúa principalmente mediante un software que simula su movimiento. Entre los modelos matemáticos para evaluar el consumo de combustible y las emisiones de bióxido de carbono se encuentran el (GEM) [4] [5], el VECTO) [8][9] y UAMmero, que se está desarrollando en México [10][11]. En este trabajo se detalla en los capítulos 6 y 9 la dinámica del vehículo, que es la base teórica para la evaluación del consumo de combustible, la eficiencia energética y las emisiones de CO₂ de los vehículos pesados que incluyen tractores que arrastran remolques. El procedimiento utilizado para obtener los resultados presentados en esta tesis es el de UAMmero.

Tanto en GEM como en VECTO, el consumo de combustible de un vehículo pesado se obtiene asumiendo que se mueve en un ciclo de conducción, es decir, se prescribe una rapidez objetivo para el vehículo en función del tiempo [10][11].

En UAMmero se modela que el vehículo se mueve en un ciclo de conducción, pero también tiene una opción para simular que el vehículo viaja en algunas carreteras mexicanas [10]. El modelado del movimiento en los ciclos de conducción simula los típicos viajes por carretera de los vehículos a lo largo de las regiones por las que viajan. Por lo tanto, los ciclos de conducción utilizados para Japón, Estados Unidos de América y Europa son diferentes. En la simulación, un vehículo no seguirá la velocidad prescrita si transporta una carga muy pesada porque el motor no podrá proporcionar el par necesario (o torque) [10][11]; ni si el vehículo se mueve por una carretera con pendiente pronunciada; en este caso, debe reducirse la velocidad del vehículo. En los casos de simulación en los que un vehículo se mueve en un ciclo de conducción, la pendiente de la carretera se considera constante durante el viaje y que el vehículo se mueve en línea recta (algo que no se considera en el caso de que el vehículo se mueva en una calle o carretera puesto que las pendientes cambian a lo largo de ellas).

En esta tesis se detalla la dinámica del vehículo [18][19] para un vehículo que se mueve en un ciclo de conducción.

1.3 UAMmero, herramienta mexicana para el cálculo del consumo de combustible y las emisiones de bióxido de carbono

En México es necesario establecer una norma de consumo de combustible y de emisiones de CO₂ de vehículos pesados y el primer paso es contar con una herramienta para evaluar esas dos variables. En el caso de vehículos pesados la certificación se puede realizar con un programa de computación que modele la

operación del vehículo pesado y calcule el consumo de combustible y las emisiones de CO₂ durante su recorrido. La herramienta puede ser el VECTO de la Unión Europea o el GEM de Estados Unidos de América, aunque también podría desarrollarse una en México para asegurar que sea apropiada para las condiciones geográficas del país y la operación de los vehículos pesados en las calles y carreteras del país.

En México se han iniciado proyectos de investigación (en los que la tesista ha participado oficialmente) en la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) Unidad Azcapotzalco (UAMA) para el desarrollo de la herramienta que podría servir para certificar los vehículos pesados al consumo de combustible y las emisiones de CO₂. En esta tesis se resumen algunos de los trabajos que se han publicado o están por publicarse hacia la construcción de esa herramienta, en los que la tesista es coautora. En los cálculos se han usado los parámetros del GEM con el propósito de realizar comparaciones. La EPA nos permitió usar la primera versión del GEM y de ahí se tomaron varios de los parámetros, aunque el programa de computación UAMmero, es muy diferente al GEM, es decir no es una adaptación del GEM.

UAMmero, es un software que calcula el consumo de combustible y las emisiones de CO₂ a partir de modelos matemáticos de los vehículos motorizados. Los modelos del motor que se usan en este trabajo son los que existen en el software de la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) de EE. UU. llamado Greenhouse Gas Emissions Model (GEM), que son motores para vehículos pesados, es decir aquellos que pesan más de 3.857 tons. El GEM se usa en EE. UU. para certificar que los vehículos pesados cumplen con las normas establecidas por la EPA y la Administración Nacional de Seguridad del Tránsito en Carreteras de EE. UU. (NHTSA, por sus siglas en inglés) para el consumo de combustible y emisiones de CO₂ [4] [5][6][7][20][21][22].

1.4 Valor Presente Neto y tasa de descuento

Los tractocamiones son los vehículos que consumen más combustible y emiten más CO₂ por unidad que todos los demás vehículos en el parque vehicular del país. Los tractocamiones transportan ininterrumpidamente productos alimenticios y otros bienes que son indispensables para la población aun en situaciones de emergencias sanitarias. Un incremento del 1% de producto interno bruto per cápita en un país ocasiona un aumento del 1.07% en las tons por kilómetro (km) de carga transportada en sus carreteras [23]. Los tractocamiones son muy rentables para transportar carga porque consumen (1 litro)/(100 tons km) mientras que cuando se transporta carga con un vehículo de los menos pesados el consumo es de (14.4 litros)/(100 tons km) [23]. Un tractocamión con tráiler que transporta 23 toneladas podría consumir (25 litros/100 km), o sea que tendría un consumo de combustible de 0.25 litros/km, pero si viaja muy cargado su consumo podría aumentar a 40 litros/100km [23], o sea su consumo sería de 0.4 litros/km. Para los tractocamiones más pesados por cada tonelada adicional de carga el consumo aumenta como en (1 litro/100km) [23]. En este trabajo se presenta un modelo basado en el Valor Presente Neto (VPN), en el que se compara el incremento en el costo de los tractocamiones con el ahorro en el consumo de combustible de vehículos más eficientes.

Supóngase que hoy se realiza una inversión que resultará en entradas o salidas de efectivo en varios puntos del futuro. Un buen inversionista es aquél que determina si el total de estos movimientos de dinero resultarán en un valor mayor a su inversión inicial, de lo contrario, resultaría en una pérdida. El Valor Presente Neto (VPN) es un concepto para englobar la inversión inicial junto con los futuros flujos de efectivo y establecer una medida para el rendimiento al día de hoy para una inversión. La manera en que se comparan los flujos futuros de efectivo contra el gasto al tiempo presente es mediante una tasa de descuento r , donde el factor $(1 + r)^n$ se le aplicará a todos los flujos de efectivo dependiendo del año en que se realicen. De esta forma, definimos el VPN en la ecuación 1.

$$VPN = \sum_n \frac{Flujo_n}{(1 + r)^n} \quad (1)$$

En la ecuación 1, $Flujo_n$ es el flujo de efectivo en el año n y r es la tasa de descuento.

Para el caso de tractocamiones, se utiliza el VPN como medida para saber en qué casos se presentan ganancias al invertir en vehículos eficientes. El objetivo de este modelo es comparar si los ahorros en diésel del vehículo eficiente (la diferencia entre el costo del diésel para el vehículo convencional y el costo del diésel para operar el vehículo eficiente) será mayor al día de hoy a la prima por adquirir un vehículo eficiente, o sea, el exceso del costo del vehículo eficiente sobre el del vehículo convencional.

Definimos la tasa interna de retorno (ret) como la tasa de descuento tal que el VPN tome el valor de cero, es decir, la inversión no resultará en pérdidas ni ganancias como se muestra en la ecuación 2.

$$\sum_n \frac{Flujo_n}{(1 + ret)^n} = 0 \quad (2)$$

Supongamos que el tractocamión B con consumo de 0.255 litros de diésel por kilómetro recorrido tiene un costo de \$3025946.875, contra el tractocamión A con consumo de 0.3 litros de diésel por kilómetro con un costo de \$2,800,000. Como se puede observar, el vehículo A es menos eficiente por lo que su costo inicial es menor. Para este modelo, tomaremos en cuenta el desgaste del vehículo, es decir, después de cada año el vehículo consumirá más combustible que el año anterior, aumentando su consumo en 0.1992% cada año. Se supone que en el año 2021 comienzan a operar los vehículos e inicialmente recorren 70000 kilómetros y cada año posterior se reducirá su recorrido en 1,000 km. Se considera el costo de un litro de diésel en \$20.50 pesos que se incrementa anualmente en un 3.4%. La tabla 1 muestra los costos del diésel en los siguientes cinco años detallando el consumo de cada vehículo.

Tabla 1. Costos de operación en 5 años de dos vehículos con eficiencias energéticas diferentes.

Año	Precio diesel	Recorrido km	Vehículo A			Vehículo B			Ahorro
			Consumo (litros/km)	Litros Consumidos	Costo diésel	Consumo (litros/km)	Litros consumidos	Costo diésel	
2021	\$20.00	70,000	0.3	21,000.00	\$420,000.00	0.255	17,850.00	\$357,000.00	\$63,000.00
2022	\$20.68	69,000	0.3006	20,741.24	\$428,928.75	0.2555	17,630.05	\$364,589.44	\$64,339.31
2023	\$21.38	68,000	0.3012	20,481.36	\$437,955.30	0.256	17,409.15	\$372,262.01	\$65,693.30
2024	\$22.11	67,000	0.3018	20,220.36	\$447,075.11	0.2565	17,187.31	\$380,013.84	\$67,061.27
2025	\$22.86	66,000	0.3024	19,958.24	\$456,283.16	0.257	16,964.51	\$387,840.69	\$68,442.47

Para este ejemplo, la inversión inicial será la diferencia entre el precio de los dos vehículos, siendo de \$225,946.875. Los ahorros serán las diferencias entre el costo del diésel para operar el vehículo A contra el del vehículo B. En el cálculo del VPN, la inversión inicial será de -225,946.875 (prima para el vehículo eficiente) y los flujos de efectivo serán los ahorros de cada año. De esta forma, el VPN será como se muestra en la ecuación 3.

$$VPN = -225,946.875 + \frac{63,000}{(1 + ret)^1} + \frac{64,339.31}{(1 + ret)^2} + \frac{65,693.30}{(1 + ret)^3} + \frac{67,061.27}{(1 + ret)^4} + \frac{68,442.47}{(1 + ret)^5} \quad (3)$$

Igualando VPN a cero, resolvemos la ecuación para ret y obtenemos ret=13.712%. Concluimos que cualquier tasa de descuento menor a ret resultaría en un VPN positivo, siendo una inversión con ganancias.

La tasa de descuento aplicable para inversiones relativas al ahorro energético se puede determinar mediante el Capital Asset Pricing Model (CAPM), o Modelo de Valuación de Activos de Capital, el cual describe la relación entre el riesgo

sistemático y los rendimientos esperados para activos en el mercado. Este modelo es usado extensivamente en las finanzas para valuar activos en el mercado y determinar sus rendimientos esperados tomando en cuenta su nivel de riesgo y costo de capital. Se basa en la premisa que, al tomar un riesgo en el mercado, se compensa con una prima de riesgo, o sea, una posible ganancia obtenida por tomar el riesgo. El modelo CAPM está expresado en la ecuación 4.

$$ER_i = R_f + \beta_i(ER_m - R_f) \quad (4)$$

En la ecuación 4, ER_i son los rendimientos esperados de la inversión, R_f es la tasa libre de riesgo (tasa Cetes en el caso de México), β_i es la beta de la inversión, o sea, la sensibilidad del activo frente a movimientos en el mercado, ER_m es el rendimiento esperado del mercado y $(ER_m - R_f)$ la prima de riesgo en el mercado.

Los rendimientos esperados para una inversión dirigida al ahorro de combustible resultarían en la tasa de descuento [24], por lo que el modelo CAPM aplicado a una inversión energética en México sería como se muestra en la ecuación 5.

$$Tasa\ de\ descuento = r = Tasa\ Cetes + \beta \times Prima\ de\ Riesgo \quad (5)$$

El grupo de trabajo que elabore la norma de vehículos pesados deberá realizar un estudio exhaustivo para obtener los insumos de esta fórmula; sin embargo, varios autores han sustentado un rango de valores para la tasa de descuento en automóviles. Busse [25] propone para el caso de Estados Unidos que este rendimiento se encuentra dentro del rango 0% - 20%, mientras Verboven [26] lo encuentra dentro del rango 5% - 13% para Europa. Aludiendo a estos resultados, el Ministerio de Comercio e Industria de Singapur [27] propone un valor de 10% en sus cálculos del VPN aplicable a ahorros derivados de avances en la eficiencia energética de automóviles.

Dado que $r = 10\%$ cae dentro de los rangos propuestos por Verboven y Busse [25][26], se puede tomar este valor para realizar aproximaciones a los ahorros resultantes en valor presente por la utilización de vehículos eficientes. En este trabajo por lo tanto usamos $r=10\%$ que se puede modificar en el futuro al valor que se acuerde en el grupo de trabajo que diseñe la norma.

Así es que el VPN compara un vehículo con otro de mayor eficiencia, trayendo los ahorros a valor presente.

CAPÍTULO 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Se estudia el movimiento del vehículo en el tiempo al moverse en un ciclo de conducción, o sea con una rapidez programada en el tiempo. De la rapidez del vehículo se obtienen las revoluciones por minuto del motor (rpm), de las fuerzas sobre el vehículo se obtiene el par o torque que debe proporcionar el motor. De las rpm y el torque que debe proporcionar el motor se obtiene el consumo de combustible usando un mapa del consumo de combustible del motor. Del consumo de combustible y la distancia recorrida se obtiene el rendimiento de combustible en kilómetros (km) por litro al dividir la distancia recorrida entre el consumo de combustible en litros. Las emisiones de CO_2 se calculan al considerar que de un litro de diésel consumido en el motor se emiten 2.6 kilogramos (kg) de CO_2 . Por otra parte, un vehículo eficiente se ensambla con tecnologías más caras por lo que costará más; sin el embargo, el costo extra podría compensarse con el ahorro de combustible durante la vida útil del vehículo.

CAPÍTULO 3. JUSTIFICACIÓN

Se tuvieron contingencias ambientales en la Ciudad de México por la concentración de ozono en la atmósfera en el año 2016, del 14 al 17 de marzo; del 5 al 6 de abril; y luego del 4 al 5, del 14 al 15, del 20 al 21, el 24, del 27 al 28 de mayo; también del 31 de mayo al 1 de junio; del 8 al 9 de julio y finalmente del 8 al 9 de agosto [28] [29]. Estos episodios de contingencia de fase I, se declararon cuando las concentraciones de ozono rebasaron los 150 puntos del índice Metropolitano de Calidad del Aire (IMECA).

Existen 45 estaciones de monitoreo de la calidad del aire que integran el Sistema de Monitoreo Atmosférico [30]. El índice de calidad del aire es un indicador del estado de la calidad del aire. Desde 2006, el índice de calidad del aire tiene su fundamento en la Norma Ambiental del Distrito Federal NADF-009-AIRE-2006. El índice se calcula para cinco de los contaminantes criterio: bióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), bióxido de nitrógeno (NO₂), ozono (O₃) y partículas suspendidas (PM₁₀, PM_{2.5}). Se usa una escala del 0 al 500. Un valor menor a 100 se considera satisfactorio y con un bajo riesgo para la salud [31].

Tanto la Ciudad de México como el Estado de México son grandes emisores de contaminantes. De acuerdo con el Inventario de Emisiones de la Ciudad de México 2014 [32], publicado en el año de 2016, durante el año 2014 se emitieron 138454 toneladas de óxidos de nitrógeno y 360132 de compuestos orgánicos volátiles que son precursores de ozono. Además de 31431 toneladas de PM₁₀ de las cuales 41% correspondieron a PM_{2.5}. Se emitieron 56.2 millones de toneladas de CO₂ equivalentes y 1793 toneladas de carbono negro. De acuerdo con ese último inventario, la mayor parte de los contaminantes se originaron en el Estado de México.

La Comisión Ambiental de la Megalópolis eliminó las precontingencias ambientales, y estableció las contingencias ambientales a partir de 150 puntos del índice Metropolitano de Calidad del Aire (por debajo de 180) también implantó el “doble hoy no circula” del 5 de abril al 30 de junio de 2016 en caso de contingencias ambientales. Durante ese lapso se declararon seis contingencias y otras dos más, en julio y en agosto de 2016. Durante las contingencias se prohibió la circulación del 40% de los vehículos incluyendo a los de hologramas 0 y 00 que no eran altamente contaminantes, considerándolos al mismo nivel como los de hologramas 1 y 2. Esta medida no mejoró apreciablemente la calidad del aire. Durante las contingencias no se demostraron científicamente las causas de las contingencias ambientales por la mala calidad del aire en la Ciudad de México. Ni existieron estudios técnicos que respaldaran las medidas del Doble Hoy No Circula que mostraran cuantitativamente que la contaminación del aire disminuía sustancialmente debido a su implantación [33]. Sí existieron varios argumentos en periódicos y algunas revistas cuestionando o apoyando las medidas del Hoy No Circula y del Doble Hoy No Circula pero no fueron estudios integrales consistentes.

El Gobierno Federal no realiza estudios en parte porque no tiene herramientas apropiadas necesarias que permitan determinar que funcionó o funciona, tecnologías tales como programas de computación para simular el consumo de combustible y emisiones de los vehículos que circulan en la Ciudad de México. Tampoco dispone de laboratorios especializados que se dediquen al desarrollo, adaptación o adopción de tecnologías para el control y remediación de la contaminación. Y menos ha creado políticas públicas integrales y congruentes que se puedan implementar sin dañar económicamente a la población. Muchas de las medidas para disminuir la contaminación por parte de los Gobiernos Federal y Local parecen resultados de ocurrencias de los funcionarios [34].

Lo que sí es un hecho es que, hasta el año 2016 por lo menos, los niveles de los contaminantes han sido similares en todos los muchos años en los cuáles se ha implantado el “hoy no circula” o el “doble hoy no circula” [35], sin disminuir apreciablemente; por lo que esas medidas son percibidas por gran parte de la población como instrumentos recaudatorios del Gobierno que fomentan la corrupción.

Los vehículos que más generan contaminantes de partículas pequeñas, entre ellas el carbono negro, son los vehículos pesados que usan diésel para moverse. El diésel que se vende en la Ciudad de México, Guadalajara, Monterrey y en once corredores carreteros en México contiene no más de 15 partes por millón de azufre; sin embargo, el diésel que se vende fuera de estas zonas especiales tiene entre 350 y 500 partes por millón de azufre (y quizá hasta más).

La norma oficial mexicana NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005, que se publicó en el mes de enero de 2006 que establecía que el diésel en todo el territorio nacional contendría no más de 15 partes por millón de azufre a partir del mes de septiembre de 2009 en todo el país [36], no se acató. La nueva norma oficial NOM-016-CRE-2016 [37], tampoco reglamentaba que el diésel que se usaría en todo el país en los vehículos tendría menos de 15 partes por millón en el año de 2016, 2017 o aún en el año de 2018.

Los días de contingencia ambiental en el año de 2016, ocurrieron meses después de que en la Ciudad de México entrara en vigor el día 15 del mes de diciembre del año de 2015, el nuevo reglamento de tránsito que restringió la rapidez máxima permitida en las vías principales. Los límites máximos permitidos fueron de: 80 kilómetros por hora (km/hr) en los carriles centrales de las vías de acceso controlado, 50 km/hr en las vías primarias, 40km/hr en vías secundarias incluyendo las laterales de vías de acceso controlado, 30 km/hr en zonas de tránsito calmado, 20 km/hr en zonas escolares, de hospitales, de asilos, de albergues y casas hogar, y 10 km/hr en estacionamientos y en vías peatonales en las cuales se permite el acceso a vehículos.

Muchos especialistas cuestionaron los nuevos límites de rapidez del nuevo reglamento de tránsito, pero no ofrecieron pruebas técnicas a sus argumentos, por lo que en este trabajo se realiza un estudio sobre la emisión de bióxido de carbono cuando varía la rapidez del vehículo.

Es necesario disminuir el consumo de combustible porque México todavía importa alrededor del 60% del diésel que se consume en el país y el diésel ha aumentado de precio. Además, es urgente reducir las emisiones de bióxido de carbono de la flota vehicular pesada porque contribuyen al efecto invernadero que incrementa el calentamiento global.

CAPÍTULO 4. HIPÓTESIS

Se puede desarrollar un programa de computación para evaluar el consumo de combustible y las emisiones de bióxido de carbono de vehículos pesados apropiado para la geografía y la flota vehicular pesada de México.

CAPÍTULO 5. OBJETIVOS

5.1 Objetivo general

Crear un programa de computación para evaluar el consumo de combustible, el rendimiento del combustible y las emisiones de bióxido de carbono de vehículos pesados.

5.2 Objetivos particulares

Desarrollar un programa de computación usando software libre para evaluar el consumo de combustible de vehículos pesados al moverse en un ciclo de manejo y en modelos de carreteras y calles de México.

Evaluar el rendimiento de combustible de vehículos pesados.

Evaluar las emisiones de CO₂ de vehículos pesados.

Desarrollar un modelo para estimar el costo beneficio de adquirir vehículos pesados eficientes.

CAPÍTULO 6. DINÁMICA VEHICULAR

Las explosiones que ocurren en el motor de un vehículo al quemarse el combustible mueven los pistones que hacen girar el cigüeñal y producen el par o torque que se transmite al resto del vehículo [18]. El clutch o embrague está enganchado al motor y a la transmisión cuando el vehículo se mueve. La transmisión está enganchada al clutch y al diferencial a través de ejes. Finalmente, el diferencial está enganchado a la transmisión y a las ruedas del vehículo a través de ejes y ellas mueven al vehículo al rodar sobre el pavimento.

6.1. Ecuación de movimiento

Existen varias fuerzas que se oponen al movimiento de un vehículo [10][11][38][39], que se mueve debido a que su motor hace girar los engranes de la transmisión y estos hacen mover el diferencial o los diferenciales y finalmente las llantas. Las fuerzas que se oponen al movimiento del vehículo son la fuerza aerodinámica que se debe a la resistencia del aire que se opone al movimiento del vehículo, F_a , la fuerza de fricción de las llantas con el pavimento, F_r , y la componente de la fuerza gravitacional en la dirección del movimiento, F_p , como se muestra en la figura 2.

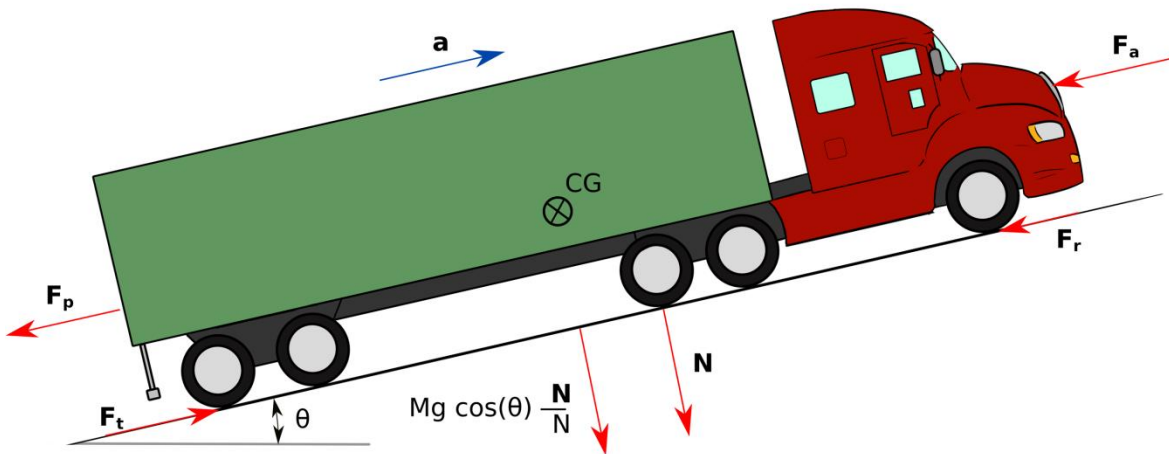


Figura 2. Fuerzas sobre un vehículo.

La dinámica vehicular se describe en la ecuación 6 [11][18][19].

$$(M + m_i)a = \frac{T_e R_{eff}}{r_w} - F_a - F_p - F_r \quad (6)$$

En la ecuación 6, M es la masa total del vehículo. m_i es la masa inercial debida a las partes del vehículo que rotan [11]. a , es la magnitud de la aceleración lineal del vehículo, r_w es el radio de las llantas (en esta tesis se asume que todas las llantas

tienen el mismo radio). T_e es el par (o torque) que proporciona el motor para que el vehículo se mueva. R_{eff} es la razón de la relación combinada del engrane de la transmisión que se usa con la de los diferenciales o diferencial del vehículo. R_{eff} es más compleja para los vehículos más pesados con muchas llantas y ejes. R_{eff} y m_i son variables que dependen del tiempo y que cambian conforme el vehículo aumenta o disminuye su rapidez y en la transmisión se va cambiando de engrane (engrane de primera velocidad de la transmisión, engrane de segunda velocidad de la transmisión, etcétera) conforme el vehículo acelera o desacelera. Los diferentes engranes de la transmisión tienen diferentes momentos de inercia y razón de la relación debido a que no tienen el mismo tamaño ni el mismo número de dientes. El valor de los parámetros del vehículo pesado de 5 ejes, incluidos los de la transmisión y el motor que se usan en este trabajo, se encuentran en la Guía del usuario de GEM 2010 [20] y en el software GEM utilizado para la certificación durante la primera fase de la regulación de Estados Unidos de América.

6.2 Fuerzas sobre un vehículo

Las fuerzas F_a , F_p , y F_r , se escriben en las ecuaciones 7, 8 y 9.

$$F_a = \frac{1}{2} c_{air} A_L \rho_a V^2 \quad (7)$$

En la ecuación 7, $c_{air} = 0.69$, es el coeficiente del arrastre aerodinámico, $\rho_a = 1.1071 \text{ kg/m}^3$, es la densidad del aire, A_L es el área frontal efectiva del vehículo y V es la rapidez o magnitud de la velocidad del vehículo. En esta tesis se considera que el vehículo se mueve en una sola dirección.

$$F_p = Mg \sin(\theta) \quad (8)$$

$$F_r = C_r Mg \cos(\theta) \quad (9)$$

La M en las ecuaciones 6, 8 y 9, es la suma de las masas del tracto, trailer y carga (incluyendo las masas de la transmisión, el motor, los diferenciales, los ejes y el combustible). En las ecuaciones 8 y 9, $g = 9.8066 \text{ m/s}^2$, es la aceleración de la gravedad. θ es el ángulo de inclinación de la trayectoria con respecto a la horizontal por la cual el vehículo se mueve. En el caso de que el vehículo se mueva en un ciclo de conducción, el ángulo de inclinación se considera constante durante todo el tiempo de la simulación. En la ecuación 9, C_r , es el promedio de los coeficientes de fricción de todas las llantas del vehículo contra el pavimento [20].

La masa inercial, m_i , depende de las partes que giran, de las relaciones de los engranajes de la transmisión, de las relaciones de los diferenciales y de los radios de los neumáticos. En este trabajo con el fin de comparar los resultados con los de GEM, se toma el modelo de masa inercial utilizado en el software GEM para los

cálculos realizados en este trabajo. Los valores de las variables de las ecuaciones 6, 7, 8 y 9 se obtienen de la referencia [20] y del código fuente de GEM.

La masa inercial se calcula usando la ecuación 10.

$$m_i = \frac{I_{eff}}{r_w^2} \quad (10)$$

I_{eff} es el momento de inercia efectivo que incluye los momentos de inercia de la transmisión, del embrague y del motor, así como las relaciones de la transmisión y de los diferenciales y los momentos de inercia de los ejes.

Una vez que se conocen las fuerzas, se obtiene la aceleración, la velocidad y la distancia recorrida del vehículo en cualquier instante.

6.3 Fuerza de tracción del motor sobre el vehículo

La ecuación 6 se puede escribir como se muestra en la ecuación 11.

$$\frac{T_e R_{eff}}{r_w} = F_a + F_p + F_r + Ma + m_i a \quad (11)$$

La ecuación 11 también se puede escribir como la ecuación 12.

$$F_t = F_a + F_p + F_r + Ma + F_i \quad (12)$$

En la ecuación 12, F_t que se representa esquemáticamente en la figura 2, está definida en la ecuación 13 y es la fuerza de tracción del motor para empujar al vehículo.

$$F_t = \frac{T_e R_{eff}}{r_w} \quad (13)$$

En la ecuación 12, F_i está definida en la ecuación 14 y se le llama fuerza inercial o de D’Alambert.

$$F_i = m_i a \quad (14)$$

El motor proporciona la energía necesaria para vencer las fuerzas para que el vehículo se mueva con cierta velocidad y aceleración. A medida que la pendiente es más grande, la fuerza opositora es mayor. A mayor área efectiva transversal del vehículo a la dirección en que se mueve, mayor es la fuerza opositora del aire; los vehículos con mejores formas aerodinámicas ofrecen menores resistencias pues tienen áreas efectivas más pequeñas. A mayor coeficiente de fricción de las llantas con el pavimento, mayor será la oposición al movimiento.

A mayor carga transportada se requerirá una mayor tracción del motor y se requerirá de mayor combustible para mover el vehículo si se desea mantener la misma velocidad. La magnitud de la fuerza aerodinámica depende de la velocidad del vehículo. La magnitud de la fuerza inercial, $m_i a$, depende de la aceleración del vehículo. Por lo anterior, en la ciudad la fuerza inercial puede ser mayor que la debida a la pendiente en la calle por las constantes aceleraciones y deceleraciones que ocurren. La fuerza inercial es cero cuando el vehículo se mueve a velocidad constante porque el vehículo no se acelera. En carretera la fuerza aerodinámica puede ser mayor a las demás por la velocidad que puede tener el vehículo.

Si existe una pendiente considerable en el camino la fuerza debida a ella puede ser más grande que las demás.

El torque que se requiere para mover las llantas es un múltiplo del que se genera en el motor debido al golpeteo de los pistones en el cigüeñal. El torque que llega a las llantas depende de la relación del engrane que se use en la transmisión (es decir, si la transmisión se encuentra en primera, segunda, tercera, etcétera) y de la relación en el diferencial o de las relaciones de los diferenciales. El torque del motor requerido para mover el vehículo se calcula usando la ecuación 11 y se muestra en la ecuación 15.

$$T_e = \frac{F_a + F_p + F_r + Ma + m_i a}{\frac{R_{eff}}{r_w}} \quad (15)$$

La ecuación 15 también se puede escribir como la ecuación 16.

$$T_e = \frac{[F_a + F_p + F_r + Ma + m_i a] * r_w}{R_{eff}} \quad (16)$$

La aceleración del vehículo, se obtiene de la ecuación 6 y se muestra en la ecuación 17.

$$a = \frac{\frac{T_e R_{eff}}{r_w} - F_a - F_p - F_r}{M + m_i} \quad (17)$$

Más adelante se muestra el procedimiento para obtener las revoluciones por minuto (rpm), que debe proveer el motor para que el vehículo se mueve con determinada rapidez. La aceleración máxima que puede tener un vehículo es aquella en la que el motor proporciona el torque máximo.

CAPÍTULO 7. CARACTERÍSTICAS DE LOS VEHÍCULOS PESADOS ESTUDIADOS

Los autores de UAMmero tomaron los datos de los motores del GEM y los incorporaron al software mexicano. La razón principal de usar los modelos del GEM fue porque los autores no han podido conseguir modelos directamente de los fabricantes y todavía se encuentran diseñando modelos propios para esos motores. En el GEM se usan modelos de transmisiones típicas en Estados Unidos. En UAMmero usamos aparte de las transmisiones que se usan en el GEM, modelos de transmisiones típicas en México, como transmisiones de 18 velocidades.

7.1 Vehículo con un motor de 350 HP

En este trabajo, el modelo del mapa de combustible de un motor de 350 caballos de potencia (HP) se tomó de la primera versión del paquete computacional GEM de la EPA de EE. UU. Los valores máximos del par del motor en Newtons-metro (Nm) que proporciona el motor para algunos valores de las revoluciones por minuto de eje del motor (rpm) son: 949.074 (rpm = 600), 1071.0978 (rpm = 800), 1220.238 (rpm = 900), 1586.3094 (rpm = 1000), 1626.984 (rpm = 1100), 1626.984 (rpm = 1200), 1626.984 (rpm = 1300), 1626.984 (rpm = 1400), 1626.984 (rpm = 1500), 1559.193 (rpm = 1600), 1466,99724 (rpm = 1700), 1387,00386 (rpm = 1800), 1247,3544 (rpm = 1900), 1084,656 (rpm = 2000), 813,492 (rpm = 2100) y 0 (rpm = 2200). Una vez que se conoce el par del motor máximo, la potencia máxima se puede calcular multiplicando el par del motor máximo por las rpm de eje del motor ($\omega_{e,max}$) [11].

$$P_{e,max} = 0.745699872 * (T_{e,max}\omega_{e,max}) \quad (18)$$

El consumo de combustible específico del motor en kg por HP*seg (kg/(HP*seg)), se puede calcular del mapa de combustible del motor para una pareja de par del motor y rpm del eje del motor. Los valores normalizados de los valores máximos del par (torque), la potencia y el consumo específico de combustible del motor se muestran en la figura 3, tal como se obtienen en la salida de UAMmero.

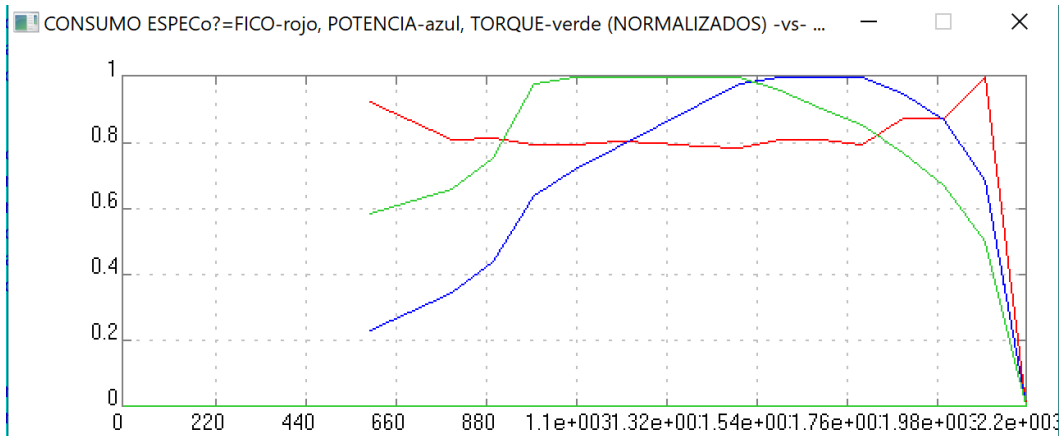


Figura 3. Valores máximos normalizados del par del motor (línea verde), de la potencia del motor (línea azul) y del consumo específico de combustible del motor (línea roja) contra rpm del eje del motor, tal como se obtienen de UAMmero.

La masa del vehículo sin carga es de 9.752 tons. En el ejemplo considerado en el capítulo 10, se considera una carga de 10 tons, por lo que $M = 19.752 \text{ tons}$, es la masa total del vehículo. Los radios de las ruedas son de 0.489 metros (m). El vehículo tiene un área transversal efectiva en la dirección de movimiento de $A_L=6.0$ metros cuadrados (m^2). El coeficiente promedio de fricción de las ruedas con el pavimento es de 0.0071.

Las relaciones de transmisión de los engranajes de la transmisión de diez velocidades del vehículo modelado en este trabajo son: 11.06 (primer engrane), 8.19 (segundo engrane), 6.05 (tercer engrane), 4.46 (cuarto engrane), 3.34 (quinto engrane), 2.48 (sexto engrane), 1.83 (séptimo engrane), 1.36 (octavo engrane), 1.00 (noveno engrane) y 0.75 (décimo engrane). La relación de transmisión del diferencial es de 3.73.

En el caso en el que la carga transportada por el vehículo o la pendiente del recorrido sea grande, el vehículo no alcanza la rapidez de cruce programada en alguna o en todas las partes del ciclo de manejo, porque el motor no puede proporcionar el par del motor necesario porque tiene un máximo y en este caso se debe reducir la rapidez del vehículo, como se explica más adelante.

7.2 Vehículo con un motor de 455 HP

Se considera un vehículo con una transmisión de 10 velocidades y un motor de 455 caballos de potencia (HP).

En las figuras 4 y 5 se muestran los valores máximos del torque y la potencia que puede proporcionar el motor de 455 HP como una función de las rpm del motor.

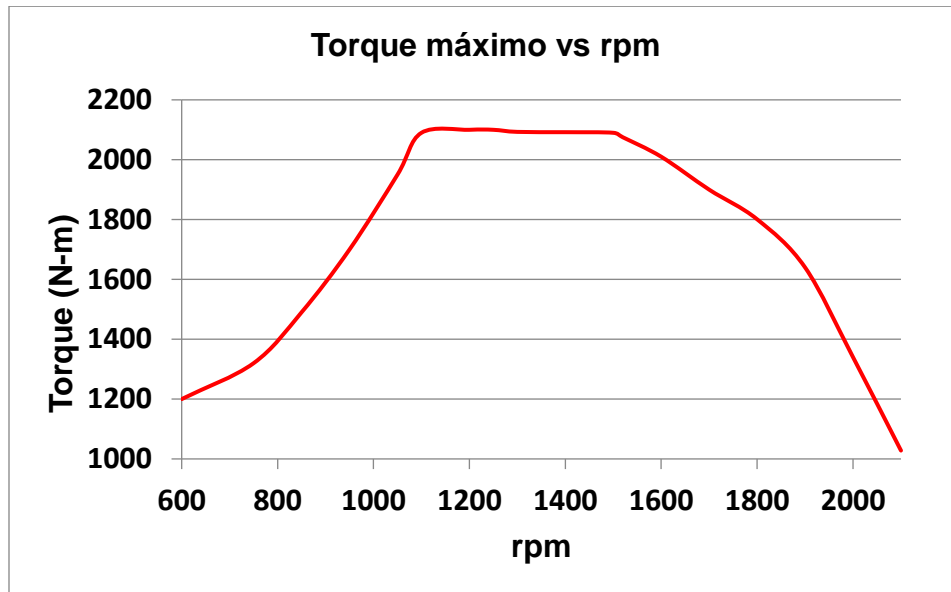


Figura 4. Torque máximo que puede proporcionar el motor como función de las rpm del motor.

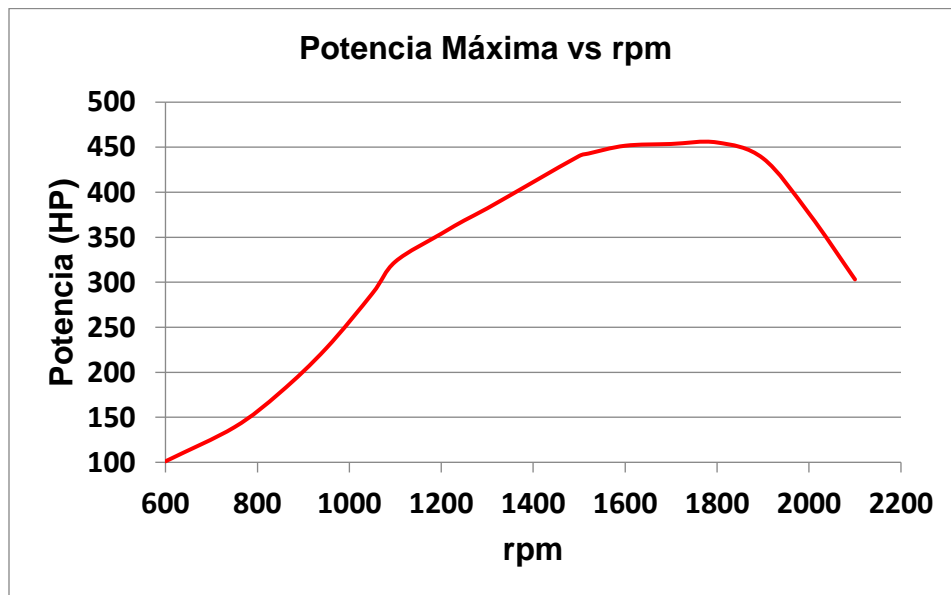


Figure 5. Potencia máxima que puede proporcionar el motor como función de las rpm del motor.

En la figura 6 se muestra el consumo de combustible del motor dividido entre la potencia del motor (consumo específico).

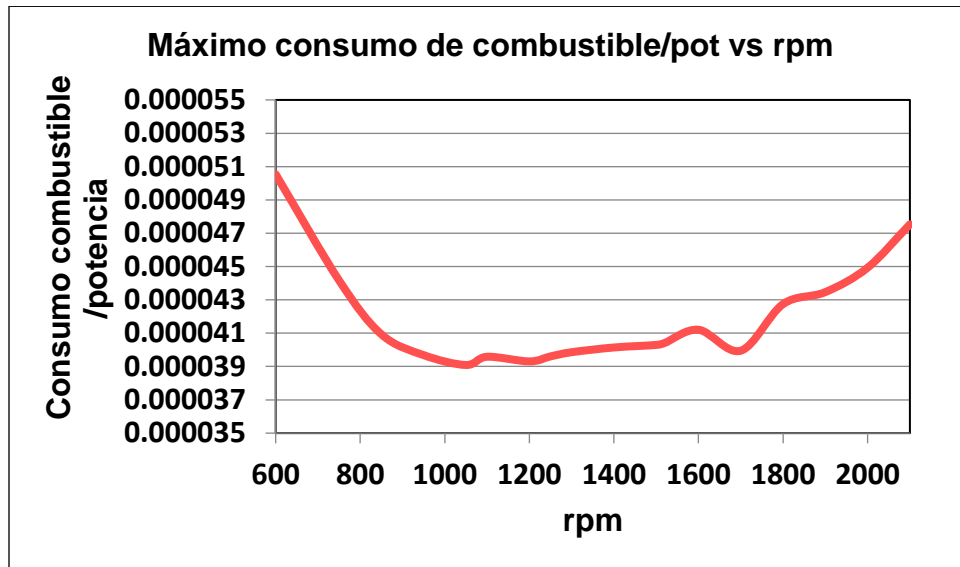


Figure 6. Valores del consumo específico del motor contra las rpm del motor para los valores máximos del torque.

Las razones de relación de las marchas son: 14.8 (primera), 10.95 (segunda), 8.09 (tercera) marcha, 5.97 (cuarta), 4.46 (quinta), 3.32 (sexta), 2.45 (séptima), 1.81 (octava), 1.35 (novena) y 1.00 (décima). La razón de la relación de los engranes de la transmisión se reducen conforme el vehículo aumenta su rapidez. La razón de relación efectiva R_{eff} , es siempre mayor que 1, por lo tanto, la frecuencia de rotación de las ruedas será menor que la frecuencia de rotación del motor (rpm) y el torque del motor será menor que el torque que hace girar las ruedas.

Potencia máxima del motor: 455 HP (caballos de potencia). Número de ejes del vehículo: 3 del tracto y 2 del tráiler. Transmisión: 10 velocidades. Área efectiva transversal: $A_L=9.8$ metros cuadrados (m^2). Radio de cada llanta: 0.489 m. Masa del vehículo sin carga 14.742 tons. $C_r = 0.007205$. Algunos de estos parámetros se cambian en algunas corridas.

A diferencia de otros países como Estados Unidos, en México son típicas las transmisiones de 18 velocidades en la transmisión (o sea que se tienen 18 engranes para cambiar el torque y la velocidad de rotación proporcionados por el motor) debido a que en México se mueven cargas muy pesadas y las pendientes de las carreteras no son pequeñas.

Para vehículos pesados, los motores están diseñados para proporcionar los pares más altos para valores de rpm no muy altos, como se ve en la figura 4. El consumo específico de combustible del motor (consumo de combustible sobre la potencia) tiene valores mínimos en la región de los valores máximos del par, como se puede

ver comparando la figura 6 con la figura 4; es decir, el consumo de combustible del vehículo sobre la potencia es mínimo cuando el vehículo realiza su función principal: transportar carga.

7.3 Vehículo con un motor de 200 HP

El motor diésel de 200 HP empuja a la camioneta pesada de 4.407 toneladas. El modelo para el motor de 200 HP se ha obtenido de la guía del usuario de GEM [20] y del software GEM. El consumo de combustible para pares de valores del par del motor (T_e) y las revoluciones por minuto del eje del motor (rpm) se obtiene del mapa de combustible del motor. El modelo del motor también incluye los valores máximos del torque del motor, T_e , en función de las rpm. Los valores máximos del par en Newtons-metro (Nm) son: 440 (rpm = 750), 580 (rpm = 907), 690 (rpm = 1055), 720 (rpm = 1208), 730 (rpm = 1358), 730 (rpm = 1507), 730 (rpm = 1660), 730 (rpm = 1809), 713 (rpm = 1954), 678 (rpm = 2105), 640 (rpm = 2258), 450 (rpm = 2405), 50 (rpm = 2556) y 0 (rpm = 2600).

Una vez que se conoce el valor máximo del torque del motor, T_e , de acuerdo a la ecuación 18 se obtiene el valor máximo de la potencia multiplicando el torque máximo por el rpm [11]. El consumo máximo de combustible se obtiene para los pares de los valores máximos del T_e y de sus correspondientes rpm. En las figuras 7, 8 y 9 se muestran los valores máximos del par motor de 200 HP (en N-m), de la potencia (HP) y del consumo específico de combustible (kg / (HP * seg)) [11] para el torque máximo en función de las rpm del motor.

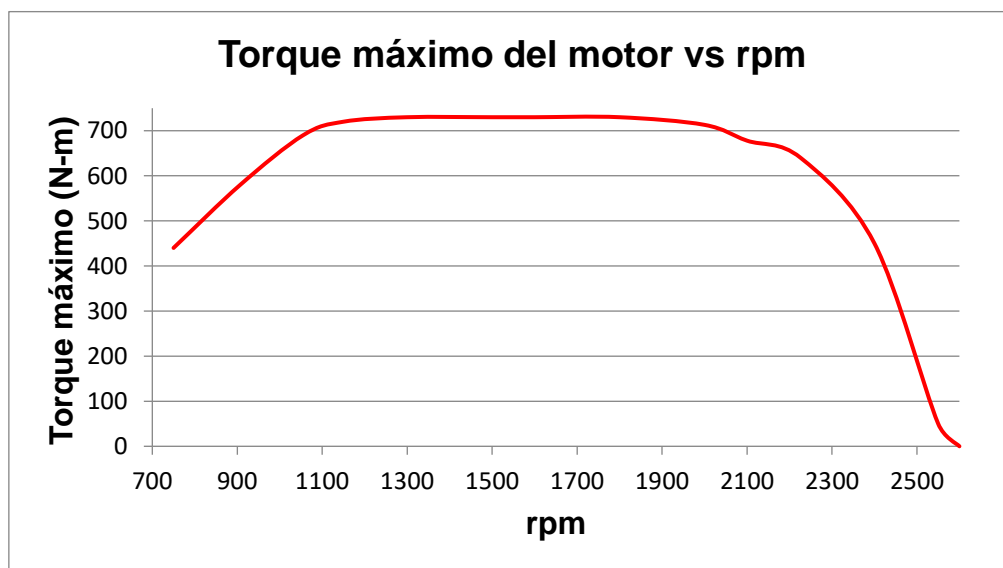


Figura 7. Torque máximo contra el rpm del motor.

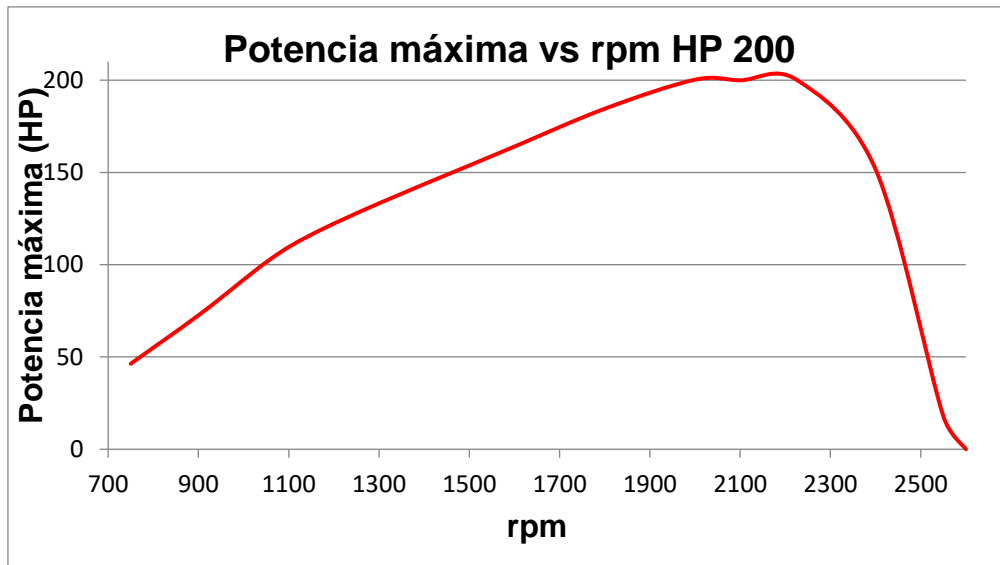


Figura 8. Potencia máxima contra rpm.

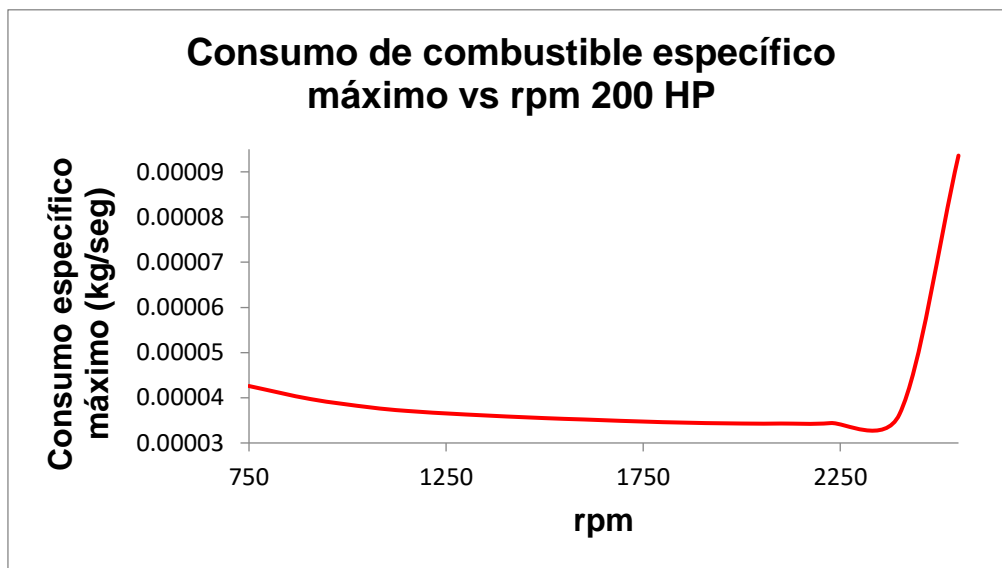


Figura 9. Valores del consumo específico de combustible contra las rpm del motor correspondientes al torque máximo.

La camioneta pesada modelada en este trabajo tiene una transmisión de 6 velocidades, un motor diésel de 200 HP y 4 ruedas de un radio de 0.378 metros (m). La razón de relación de los seis engranes son 9.01 (primera velocidad), 5.27 (segunda velocidad), 3.22 (tercera velocidad), 2.407 (cuarta velocidad), 1.36 (quinta velocidad) y 1.00 (sexta velocidad). La razón de la relación del diferencial es de 2.85, el resto de datos se pueden encontrar en la referencia [20] y se definen en la primera versión del software GEM.

Los parámetros que se usaron en la corrida de UAMmero para la camioneta pesada son: masa de la camioneta sin carga: 4.407 toneladas. Potencia máxima del motor: 200 HP. Transmisión de 6 velocidades. Radio de cada una de las llantas: 0.378 m. $A_L = 9.0 \text{ m}^2$ es el área efectiva frontal del vehículo. $C_r = 0.0035$. Algunos de estos parámetros se cambian en algunas corridas.

CAPÍTULO 8. CICLO DE CONDUCCIÓN

UAMmero se puede ejecutar en dos opciones. La primera opción considera que el vehículo circula en un ciclo de conducción y la otra que el vehículo circula en alguna de las carreteras de México o en alguna calle de la Ciudad de México. En este trabajo solo se describe el caso del ciclo de conducción.

El ciclo de conducción en km/h contra el tiempo en segundos (seg) se muestra en la figura 10 tal como se obtiene de UAMmero [40] para el vehículo con un motor de 350 HP que lleva una carga de 10 toneladas y que se mueve en una trayectoria de inclinación cero.

UAMmero [10] simula que un vehículo se mueve en línea recta en una trayectoria en un ciclo de conducción, es decir con una rapidez V prescrita de antemano conforme avanza el tiempo en segundos (seg). El ciclo de conducción modela que el vehículo se mueve en una región urbana, luego en una carretera con una rapidez de crucero de 88.514 kilómetros (km) por hora (h) (o 55 millas/h) y finalmente en una carretera con una rapidez de crucero de 104.607 km/h (o 65 millas/h) [11].

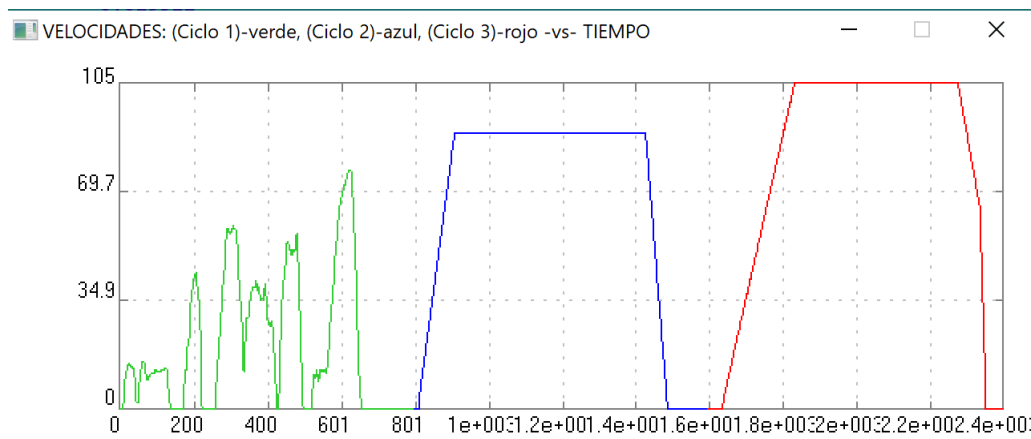


Figura 10. Primera parte (línea verde), segunda parte (línea azul) y tercera parte (línea roja) del ciclo de conducción del vehículo en km/h contra el tiempo en segundos tal y como se obtiene de UAMmero.

Durante la aceleración del vehículo descrita en la figura 10, el motor proporciona la tracción necesaria a las ruedas; esto es posible cuando la masa total del vehículo no es muy grande y la pendiente no es muy pronunciada. Si la masa es grande o la pendiente es pronunciada no se puede mantener la aceleración de la figura 10 y se tiene que reducir porque el motor tiene un límite para mover el vehículo, que es su torque máximo.

CAPÍTULO 9. PAR O TORQUE, REVOLUCIONES POR MINUTO Y POTENCIA DEL MOTOR PARA MOVER EL VEHÍCULO

En esta sección se explican los pasos para obtener las revoluciones por minuto del motor (rpm) y el par o torque del motor para que el vehículo se mueva con una rapidez lo más cercana al del ciclo de conducción prescrito.

La rotación del eje del motor se transmite hasta las llantas, pero modificada por las relaciones de la transmisión dependiendo del engrane al que se esté enganchado (primera, segunda, tercera, etc.); así como también de la relación del diferencial o las relaciones de los diferenciales [11] [38][39].

La tercera parte del ciclo de conducción se muestra en la figura 11.



Figura 11. Rapidez objetivo contra el tiempo (en segundos).

La rapidez del vehículo, V , es la rapidez de cualquier neumático en el movimiento lineal del vehículo. A partir de la velocidad lineal de un neumático se obtiene la frecuencia de rotación o revoluciones por minuto de la rueda, ω_w , como se muestra en la ecuación 19.

$$\omega_w = \frac{V}{r_w} \quad (19)$$

En la ecuación 19, r_w es el radio de una llanta. En este capítulo los radios de todos los neumáticos se consideran del mismo tamaño.

A partir de la frecuencia de giro de las llantas, se obtiene la frecuencia ω_e , o rpm del cigüeñal del motor, como se muestra en la ecuación 20.

$$\omega_e = R_{eff}\omega_w \quad (20)$$

En este trabajo los cambios de marcha de la transmisión se consideran instantáneos; es decir, el embrague (o clutch) siempre está unido al motor.

De las ecuaciones 19 y 20 se obtiene la ecuación 21.

$$V = r_w\omega_w = \frac{r_w}{R_{eff}}\omega_e \quad (21)$$

De la ecuación 21 se obtiene la figura 12. En la figura 12, las líneas horizontales corresponden a los cambios instantáneos de marcha en la transmisión (de primera a segunda, de segunda a tercera, etcétera, hasta el cambio de novena a décima). De la ecuación 21 (o de la figura 12) se obtiene el engrane de la transmisión que se utiliza en cualquier momento porque se conocen la rapidez del vehículo y la rapidez a la que se producen los cambios de engrane en la transmisión. Las rpm del motor también se obtienen de la ecuación 21 (o de la figura 12).

En la figura 12, el eje de ordenadas corresponde a la rapidez del vehículo y el eje de abscisas a las rpm del motor. De la ecuación 21, las pendientes de las rectas (las diferentes de cero) en la figura 12, corresponden a los valores de r_w/R_{eff} .

La línea recta en la parte inferior de la figura 12 corresponde a la rapidez a la que se mueve el vehículo cuando se usa la primera marcha de la transmisión. A medida que el vehículo aumenta su rapidez, hay un cambio de marcha instantáneo en la transmisión (al segundo engrane de la transmisión) que en la figura 12 está representada por la línea paralela más baja al eje de abscisas.

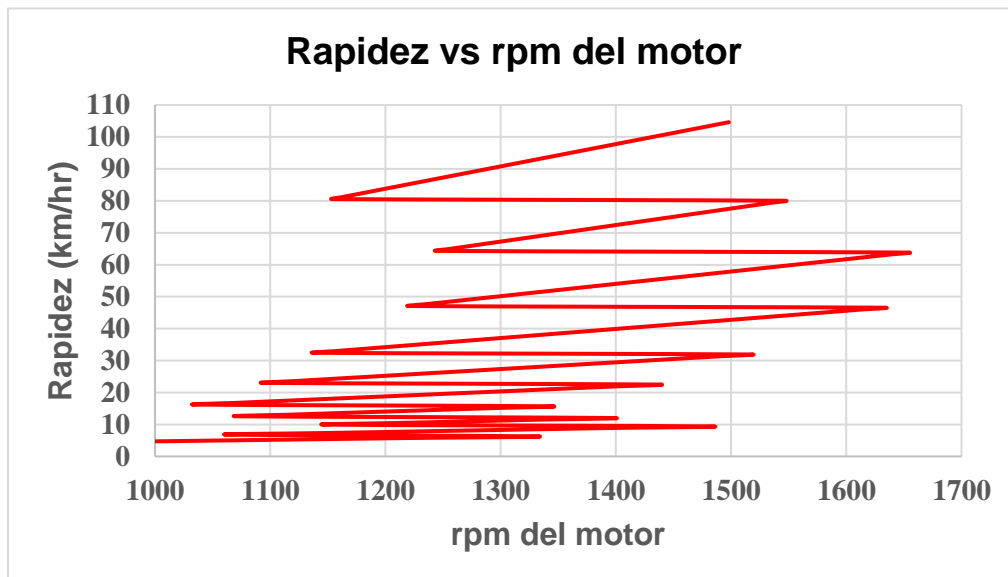


Figura 12. Rapidez del vehículo contra rpm.

A medida que el vehículo aumenta aún más su rapidez, se utilizan otros engranes. La suposición de cambios instantáneos de marchas es una buena aproximación porque esos cambios son relativamente pocos en una carretera donde se utilizan más los vehículos pesados; y los tiempos en los que se producen los cambios son muy breves en comparación con la duración de los viajes. En este modelo, los engranes de la transmisión se utilizan de forma progresiva (empezando por el engrane de primera, luego el de la segunda, y así sucesivamente) sin saltarse ninguno de los engranes. A baja velocidad, el vehículo viaja utilizando la marcha más baja de la transmisión (el engrane de primera), mientras que a velocidad de crucero (para la tercera parte del ciclo de conducción 65 millas por hora o 104.60736 km/h) el vehículo utiliza la marcha más alta de la transmisión (el engrane de la décima).

Cuando el vehículo reduce su velocidad de 104.60736 km/hr (65 millas por hora) a cero, las marchas de la transmisión se utilizan progresivamente desde la 10^a marcha a la 1^a marcha; en este caso los cambios de marchas de la transmisión ocurren a valores de la rapidez diferentes a los utilizados cuando el vehículo acelera de velocidad cero a velocidad de crucero.

CAPÍTULO 10. EL PROGRAMA COMPUTACIONAL UAMMERO

GEM está escrito en el lenguaje de programación C y usa el paquete comercial MATLAB para resolver la ecuación 6. UAMmero también está escrito en el lenguaje de programación C pero no usa MATLAB.

En el ejemplo presentado en este capítulo, se considera que la trayectoria es plana (pendiente cero), un vehículo pesado de 9.752 toneladas (tons) que tiene un motor de 350 HP, una transmisión de diez velocidades y que transporta 10 toneladas de carga [40].

UAMmero calcula consistentemente las fuerzas sobre el vehículo [11] en Newtons (N) así como las rpm y el par del motor necesarios para moverlo. Son muchas las tecnologías que componen un vehículo pesado y las características de muchas de ellas se proporcionan como entradas, como es el mapa de combustible del motor, el número de engranes de la caja de velocidades (transmisión), las relaciones de transmisión de los engranes de la caja de velocidades y muchas otras [11]. Al final se obtiene el consumo de combustible, el rendimiento del combustible, las emisiones de CO_2 y otras emisiones contaminantes, así como el costo del combustible usado en el viaje y el costo ambiental debido a las emisiones de CO_2 . UAMmero muestra muchos de los resultados de forma gráfica para poder evaluar fácilmente el desempeño de un vehículo con la tecnología con la que se le ha ensamblado.

10.1 Arquitectura de UAMmero

UAMmero es un paquete computacional desarrollado en C y que usa la librería libre de koolplot para graficar [40].

Para correr UAMmero se necesita el ejecutable CarroUAM_KP. Aparte del software libre no se necesita software comercial especial y menos entrenamiento para correr UAMmero.

El paquete computacional UAMmero consta de los siguientes archivos:

source

datos

veloci

mapas

carreteras (varias carreteras de México y calles de la Ciudad de México)

Estos son los archivos que se modifican si se desea cambiar el modelo matemático, agregar otros resultados de salida o cambiar alguno de los parámetros de los vehículos u otros que se usan en UAMmero (como la densidad del diésel). Una vez que se modifican los archivos se compila UAMmero usando software libre y se genera el ejecutable CarroUAM_KP.

A continuación, se explica que son los archivos que se usan en UAMmero.

source. Este archivo fuente contiene las instrucciones del programa. Lee los datos, aplica la dinámica vehicular, hace el cálculo del consumo de combustible, de las emisiones de CO_2 y de otros contaminantes y prepara los resultados de salida (*output*). También contiene las instrucciones para graficar los resultados.

datos. Este archivo contiene los datos de los vehículos. La rapidez en la que ocurren los cambios de cada engrane de la transmisión para cada vehículo considerado conforme el vehículo se acelera o desacelera. Contiene las relaciones de transmisión de los engranes de la caja de velocidades. Los momentos de inercia de las partes que rotan. Contiene las relaciones de transmisión del diferencial o diferenciales de todas las clases de los vehículos que se analizan. También contiene las masas de los vehículos sin carga, el radio de las llantas y el coeficiente de fricción de las llantas con el pavimento. Además, contiene parámetros como la gravedad, la densidad del aire y la densidad del combustible más otras variables. Para todos los vehículos contiene el torque máximo para ciertos valores del rpm del motor.

veloci. Contiene la rapidez programada del vehículo para las tres partes del ciclo de manejo (en cada segundo) con respecto al tiempo.

mapas. Contiene los mapas de combustible para cinco modelos de motores diferentes. Los datos corresponden al consumo de combustible en kg/seg para pares de torque y rpm. Las potencias de los motores corresponden a 455 HP, 350 HP, 270 HP, 200 HP y 600 HP. Debido a que es un gran número de datos no se reescriben aquí, pero los cuatro primeros han sido tomados de la primera versión del software GEM.

carreteras. Contiene las alturas y la distancia a un punto de partida de las posiciones de calles y carreteras de México.

Se considera que los motores que se modelan en UAMmero están disponibles en el mercado y que se certifican aparte usando herramientas y normas especiales para ellos. Estos motores emiten menos gases de efecto invernadero y consumen menos combustible que los motores de la mayoría de los vehículos pesados que circulan en México debido a las tecnologías que tienen integradas.

Los parámetros de entrada en el ejemplo de este capítulo corresponden a un vehículo con cabina baja/mediana diurna. Estos parámetros se obtuvieron de la tabla 2.2 de la Guía del Usuario del GEM versión 1.0 [20] y se usan en el archivo *datos*. Estos datos son necesarios para hacer la comparación de resultados entre el GEM y UAMmero, que se pueden modificar fácilmente en UAMmero para estudiar otras tecnologías de los vehículos pesados.

Una vez que se tienen los archivos:

source
datos
veloci
mapas
carreteras

Además, el acceso a la biblioteca koolplot, UAMmero se compila y se obtiene el ejecutable CarroUAM_KP.

Si no se tiene el ejecutable, para la compilación se requiere un compilador GCC con las librerías koolplot y WinBGIm que se encuentran en los siguientes enlaces:

<http://koolplot.codecutter.org/>

<http://codecutter.org/tools/winbgim/>

Si existen problemas para la compilación, existe una versión de codeblocks que tiene las librerías integradas:

<http://codeblocks.codecutter.org/>

En este caso, se debe crear un nuevo proyecto y elegir en el wizard "Koolplot Project" y continuar. Se elige "Add Console" y se proporciona el nombre del proyecto. Se mantienen iguales las opciones de compilador.

En el menú de "Project" se elige "Add files" y se agregan los archivos del programa. Una vez agregados, se compila con la opción de "Build" en el menú del mismo nombre. También se puede compilar con el ícono del engrane.

Si ya se tiene el ejecutable, nada más se tienen que seguir las instrucciones en el menú, como se detalla más adelante.

El programa se inicializará cargando los archivos de parámetros en el programa. Actualmente el programa carga los parámetros de los archivos de entrada "Datos.h" y "Mapas.h". Esto se realiza copiando el contenido de los archivos en las matrices del programa.

El programa captura la fecha y la hora y luego le pedirá al usuario un nombre de archivo de salida. Después de esto, el software solicitará al usuario los parámetros deseados del vehículo. Esto se hace mostrando una lista de las opciones que se precargaron.

Al vehículo se le proporciona una rapidez prescrita y en base a ello se calcula el estado interno del camión y el motor, incluido el cálculo de las fuerzas. El programa de computación UAMmero puede realizar 2 tipos de simulación: ciclo de manejo con rapidez prescrita en el tiempo (iviaje = 0) y un viaje en una ruta que puede ser una carretera de México o una calle de la Ciudad de México (iviaje = 1). En la opción del ciclo de manejo (iviaje=0) se proporciona la rapidez a la que se supone que el vehículo se moverá y lo hará siempre y cuando la carga y la pendiente del recorrido no sean grandes, de otra manera la rapidez cambiará de acuerdo al torque máximo

que puede proporcionar el motor. En la opción de iviaje=1, se define una ruta específica con cambios de elevación que dictarán el movimiento del vehículo pero que no se reporta en esta tesis.

El diagrama de flujo de UAMmero se presenta sin mucho detalle en la figura 13 [40].

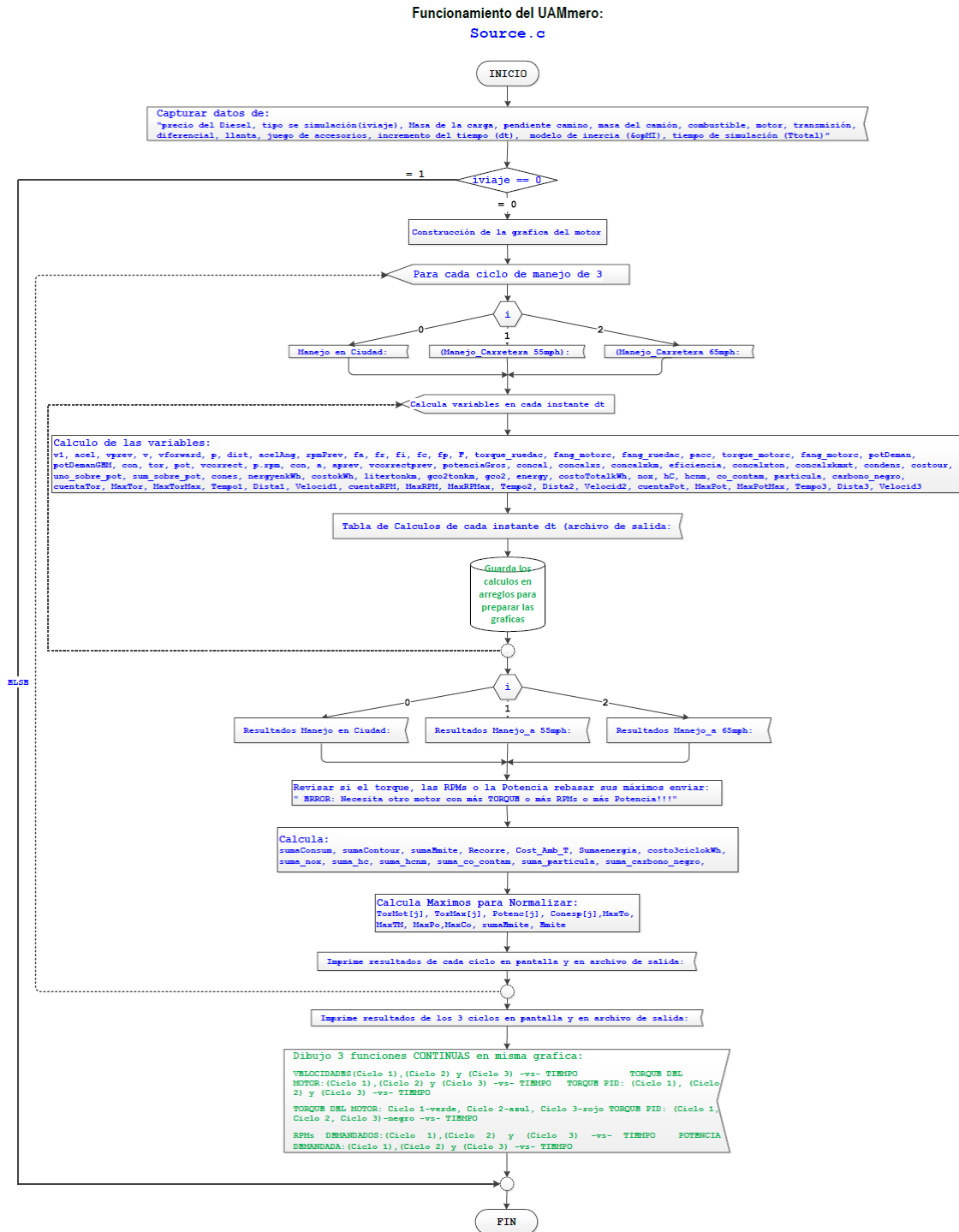


Figura 13. Diagrama de flujo de UAMmero para la opción de ciclo de manejo.

Ejemplo de corrida de UAMmero para el ciclo de manejo, iviaje = 0.

En la figura 14 se copia lo que aparece en la pantalla con el menú cuando se corre UAMmero. UAMmero solicita la información para el vehículo que se quiere analizar más otros datos. La figura 14 muestra la entrada de la ejecución y los parámetros proporcionados para la ejecución. Existen opciones para estudiar diferentes vehículos y es fácil incluir otros parámetros que modelen otros vehículos. En UAMmero se solicita el nombre del archivo de Salida. El usuario puede proporcionar el precio del diésel, lo que es muy importante porque puede cambiar diariamente en promedio en todo el país. Posteriormente se solicita que el usuario escoja la opción de ciclo de manejo o de viaje en carretera, la opción 0 corresponde al ciclo de manejo y la Opción 1 es tomar una carretera de México o una calle de la Ciudad de México. Después se tiene que proporcionar la carga transportada (en el ejemplo 10000 kg) y posteriormente la inclinación en grados de la trayectoria a recorrer (0 grados). Posteriormente se debe seleccionar la clase de vehículo a analizar, el 2 significa que escogemos el tractocamión con cabina baja/mediana diurna. Al seleccionar el 2 en las opciones que se solicitan se seleccionan los parámetros y el combustible para un tráiler con cabina baja/mediana diurna con un motor de 350 caballos de potencia, una transmisión de 10 velocidades y llantas para ese vehículo.

En UAMmero se pueden escoger cuatro modelos diferentes para la masa inercial de las partes que rotan. El 4 significa que hemos escogido el modelo que usa el GEM.


```

Deseas cambiar el precio/litro del Diesel?

Opcion = 0: SI cambiar el precio
Opcion != 0: NO cambiar el precio
Tu Opcion?> 1
Precio del Diesel : $ 20.59/litro

Que Simulacion desea realizar?

Opcion 0: Viaje de Manejo con Tres Ciclos
Opcion 1: Viaje de Manejo en Alguna Ruta

iviaje: 0

Masa de la carga en kilogramos: 10000

Manejo en pendiente: grados de inclinacion del trayecto: 0

Seleccionar por medio del numero del elemento.

Seleccionar caso de masa:
1. C8 SleepHRoot (trailer con cabina para dormir)
2. C7 DayLowMRoot (trailer con cabina mediana)
3. C6 7Voc Truck (torton, autobus, de cemento, de la basura)
4. C2b 5VocTruck (camioneta pesada)
5. Mexican (doble remolque, 18 velocidades, sobrecargado)
> 2

Seleccionar combustible:
1. C8 SleepHRoot (trailer con cabina para dormir)
2. C7 DayLowMRoot (trailer con cabina mediana)
3. C6 7Voc Truck (torton, autobus, de cemento, de la basura)
4. C2b 5VocTruck (camioneta pesada)
5. Mexican (doble remolque, 18 velocidades, sobrecargado)
> 2

Seleccionar motor:
1. C8 SleepHRoot (trailer con cabina para dormir)
2. C7 DayLowMRoot (trailer con cabina mediana)
3. C6 7Voc Truck (torton, autobus, de cemento, de la basura)
4. C2b 5VocTruck (camioneta pesada)
5. Mexican (doble remolque, 18 velocidades, sobrecargado)
> 2

Seleccionar transmision:
1. C8 SleepHRoot (trailer con cabina para dormir)
2. C7 DayLowMRoot (trailer con cabina mediana)
3. C6 7Voc Truck (torton, autobus, de cemento, de la basura)
4. C2b 5VocTruck (camioneta pesada)
5. Mexican (doble remolque, 18 velocidades, sobrecargado)
6. 8 velocidades
7. 9 velocidades
8. 12 velocidades
9. 14 velocidades
10. 15 velocidades
11. 16 velocidades
> 2

Seleccionar driveshaft:
1. C8 SleepHRoot (trailer con cabina para dormir)
2. C7 DayLowMRoot (trailer con cabina mediana)
3. C6 7Voc Truck (torton, autobus, de cemento, de la basura)
4. C2b 5VocTruck (camioneta pesada)
5. Mexican (doble remolque, 18 velocidades, sobrecargado)
> 2

Seleccionar Diferencial:
1. C8 SleepHRoot (trailer con cabina para dormir)
2. C7 DayLowMRoot (trailer con cabina mediana)
3. C6 7Voc Truck (torton, autobus, de cemento, de la basura)
4. C2b 5VocTruck (camioneta pesada)
5. Mexican (doble remolque, 18 velocidades, sobrecargado)
> 2

Seleccionar llanta:
1. C8 SleepHRoot (trailer con cabina para dormir)
2. C7 DayLowMRoot (trailer con cabina mediana)
3. C6 7Voc Truck (torton, autobus, de cemento, de la basura)
4. C2b 5VocTruck (camioneta pesada)
5. Mexican (doble remolque, 18 velocidades, sobrecargado)
> 2

Seleccionar modelo de inercia:
1. Kiencke
2. Gillespie
3. IMT
4. GEM
> 4

```

Figura 14. Menú para la corrida de UAMmero.

Al completar el menú de inicialización de la corrida en UAMmero aparecen los resultados. Primero aparecen las características del motor considerado y algunos de los datos de entrada proporcionados, que se listan:

Motor : C7 DayLowMRoot (tráiler con cabina baja/mediana diurna)

Transmision: C7 DayLowMRoot (tráiler con cabina baja/mediana diurna)

Carga : 10000 [kg]

Masa Total : C7 DayLowMRoot (tráiler con cabina baja/mediana diurna) (19752 [kg])

Llanta : C7 DayLowMRoot (tráiler con cabina baja/mediana diurna)

Torque Maximo : 1626.984000 [Nm]

Potencia Maxima: 350.609822 [hp]

La figura 15 muestra el resumen de algunos resultados de UAMmero que aparecen en la pantalla de la computadora personal en la que se corre UAMmero al final de la corrida.

Para cada una de las partes del ciclo de manejo se calculan:

Emissiones de óxidos de nitrógeno

Emissiones de hidrocarburos no quemados

Emissiones de hidrocarburos no metánicos

Emissiones de monóxido de carbono

Emissiones de partículas

Emissiones de amoniaco

Costo Ambiental

Costo a la Salud = [pesos]

Costo Social = [pesos]

Costo Dano Infraest = [pesos]

También se generan archivos de salida con detalles de la ejecución y con muchos otros resultados.

```

RESULTADOS DEL CICLO 1, MANEJO EN LA CIUDAD:
distancia recorrida = 4.573707 [km]
masa de la carga = 10.000000 [tons]
pendiente = 0.000000 [grados] de inclinacion
consumo combustible = 1.706127 [lts]
costo del viaje = 38.541403 [pesos (a $22.59/lit)]
rendimiento = 0.373029 [lts/km]
litros/(km*ton) = 0.037303

energia = 6.331658 [KWH]
costo total energia = 25.326632 [pesos (a $ 4.00/KWH)]

g CO2/(km*ton) = 96.987627
CO2 = 4435.929514 [grs]
CO2 = 4.435930 [kg]
CO2 = 0.004436 [ton]
nox = 15.090553 [gms]
hc = 15.090553 [gms]
hcnm = 18.043052 [gms]
co_contaminante = 131.222196 [gms]
particulas = 0.328055 [gms]
amoniaco = 328.055489 [ppm]

Costo Ambiental = 0.053231 [dolares (a 12 Dlls/Ton de CO2)]
Costo a la Salud = [pesos]
Costo Social = [pesos]
Costo Dano Infraest = [pesos]
    
```

```

RESULTADOS DEL CICLO 3, MANEJO EN CARRETERA A 65MPH:
distancia recorrida = 17.387621 [km]
masa de la carga = 10.000000 [tons]
pendiente = 0.000000 [grados] de inclinacion
consumo combustible = 4.407630 [lts]
costo del viaje = 99.568364 [pesos (a $22.59/lit)]
rendimiento = 0.253492 [lts/km]
litros/(km*ton) = 0.025349

energia = 17.289818 [KWH]
costo total energia = 69.159272 [pesos (a $ 4.00/KWH)]

g CO2/(km*ton) = 65.908030
CO2 = 11459.838283 [grs]
CO2 = 11.459838 [kg]
CO2 = 0.011460 [ton]
nox = 23.285491 [gms]
hc = 23.285491 [gms]
hcnm = 27.841348 [gms]
co_contaminante = 202.482529 [gms]
particulas = 0.506206 [gms]
amoniaco = 506.206322 [ppm]

Costo Ambiental = 0.137518 [dolares (a 12 Dlls/Ton de CO2)]
Costo a la Salud = [pesos]
Costo Social = [pesos]
Costo Dano Infraest = [pesos]
    
```

RESULTADOS DEL CICLO 2, MANEJO EN CARRETERA A 55MPH:		RESULTADOS DE LOS 3 CICLOS:	
distancia recorrida =	14.752328 [km]	Distancia Total =	36.713647 [km]
masa de la carga =	10.000000 [tons]	Masa de la Carga =	10.000000 [tons]
pendiente =	0.000000 [grados] de inclinacion	Pendiente =	0.000000 [grados] de inclinacion
consumo combustible =	3.273828 [lts]	Consumo Total =	9.387584 [lts]
costo del viaje =	73.955764 [pesos (a \$22.59/lit)]	Costo Viaje Total =	212.065531 [pesos (a \$22.59/lit)]
rendimiento =	0.221920 [lts/km]	Energia de 3 ciclos =	36.674845 [KWH]
litros/(km*ton) =	0.022192	Costo de 3 ciclos =	146.699380 [pesos (a \$ 4.00/lit)]
energia =	13.053369 [KWH]	Emissiones Totales =	65.908030 [g CO2/(km*ton)]
costo total energia =	52.213476 [pesos (a \$ 4.00/KWH)]	CO2 =	24407.719338 [grs]
g CO2/(km*ton) =	57.699071	CO2 =	24.407719 [kg]
CO2 =	8511.951541 [grs]	CO2 =	0.024408 [ton]
CO2 =	8.511952 [kg]	nox =	58.620539 [gms]
CO2 =	0.008512 [ton]	hc =	58.620539 [gms]
nox =	20.244496 [gms]	hcnm =	70.089775 [gms]
hc =	20.244496 [gms]	co_contaminante =	509.743821 [gms]
hcnm =	24.205376 [gms]	particulas =	1.274360 [gms]
co_contaminante =	176.039096 [gms]	amoniaco =	1274.359552 [ppm]
particulas =	0.440098 [gms]	Costo Ambiental Total =	0.292893 [dolares (a 12 Dlls/Ton de CO2)]
amoniaco =	440.097740 [ppm]	Costo a la Salud =	[pesos]
Costo Ambiental =	0.102143 [dolares (a 12 Dlls/Ton de CO2)]	Costo Social =	[pesos]
Costo a la Salud =	[pesos]	Costo Dano Infraestr. =	[pesos]
Costo Social =	[pesos]		
Costo Dano Infraestr =	[pesos]		

Figura 15. Resultados obtenidos en pantalla para las tres partes del ciclo de manejo y el resumen de las tres partes (ciclo completo).

Al término de la corrida aparecen varias gráficas. Para avanzar en las gráficas se oprime la tecla RETURN.

El archivo de salida es *output* que contiene una enorme cantidad de información con detalles de los resultados de la corrida. El *output* contiene aparte de la información de los datos de entrada los resultados en cada dt (avance en el tiempo) de:

T (avance en el tiempo)

Dist (distancia recorrida)

Vel (rapidez prescrita)

velC (rapidez corregida para que no se pase del par y la potencia máximos del motor)

acel (aceleración lineal del vehículo)

rpm (revoluciones por minuto del eje del motor)

potencia (potencia que debe proporcionar el motor)

pot_gros (potencia incluyendo la de los accesorios)

consumo (consumo de combustible)

fuelcons [lt] (consumo de combustible en litros)

costo viaje (costo del viaje en pesos)

pal (número de engrane de la transmisión que se está usando al tiempo t)

f_aereo (fuerza aerodinámica)

f_iner (fuerza inercial, $m_i a$)

f_rod (fuerza de rodamiento)

f_cent (masa total por la aceleración del vehículo, Ma)

f_pend (fuerza a vencer en las pendientes)

F (fuerza total sobre el vehículo)

torque_ruedac (torque en las llantas)

torque_motorc (torque del motor)

fang_ruedac (frecuencia de rotación de las llantas)

tor (torque máximo que puede proporcionar el motor)

mrotation (masa inercial del vehículo)

concal (consumo instantáneo del motor en kg/seg)

condens_vconst (consumo de combustible cuando la rapidez es constante)

con_especif (consumo específico)

Aparte del archivo *output* se obtienen los siguientes archivos:

arreglos (con resultados de algunas variables como las fuerzas)

El archivo de salida *consumos* contiene:

T (tiempo)

Vel (rapidez prescrita)

velC (rapidez corregida)

concalkg (consumo en kg/seg)

concallitros (consumo en litros/seg)

Rendimiento (kilómetros/litro)

costolitros (en pesos por el combustible consumido)

costoton (en pesos por tonelada transportada)

costokmton (en pesos por kilómetro por tonelada)

dist_pen (pendiente de la carretera o calle para la opción iviaje=1 en cada instante)

También se pueden crear archivos específicos de salida para estudiar el comportamiento de ciertas variables.

10.2 Resultados obtenidos gráficamente

El paquete computacional UAMmero genera resultados en forma gráfica que facilitan la interpretación de los resultados.

En la figura 16 se muestra la rapidez y el consumo instantáneo normalizados contra el tiempo (seg) para la tercera parte del ciclo de conducción. En la figura 17 se muestra el torque del motor (Nm) y el torque máximo (Nm) contra el tiempo (seg) para la tercera parte del ciclo de conducción. UAMmero proporciona las gráficas de las variables mencionadas para las tres partes del ciclo aunque en este capítulo solamente se presentan para una parte del ciclo de manejo.

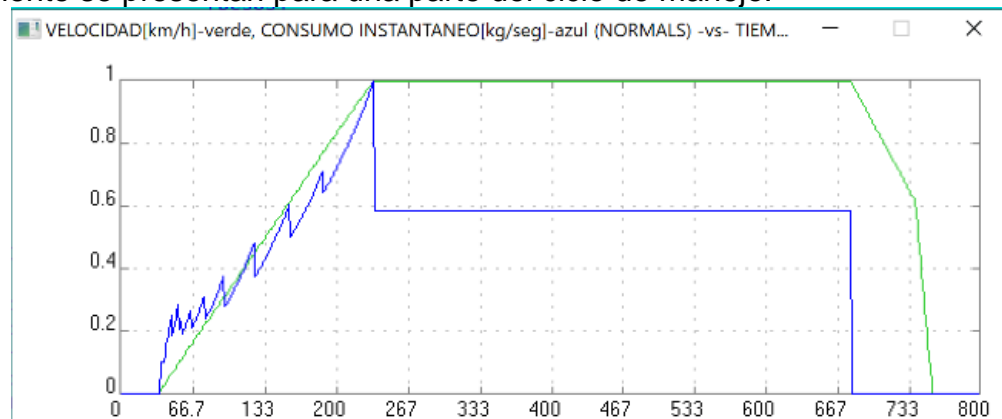


Figura 16. Rapidez y consumo instantáneo normalizados contra el tiempo (seg) para la tercera parte del ciclo de conducción. Motor 350 HP, $M = 19.752$ tons (carga 10 tons), inclinación 0° .

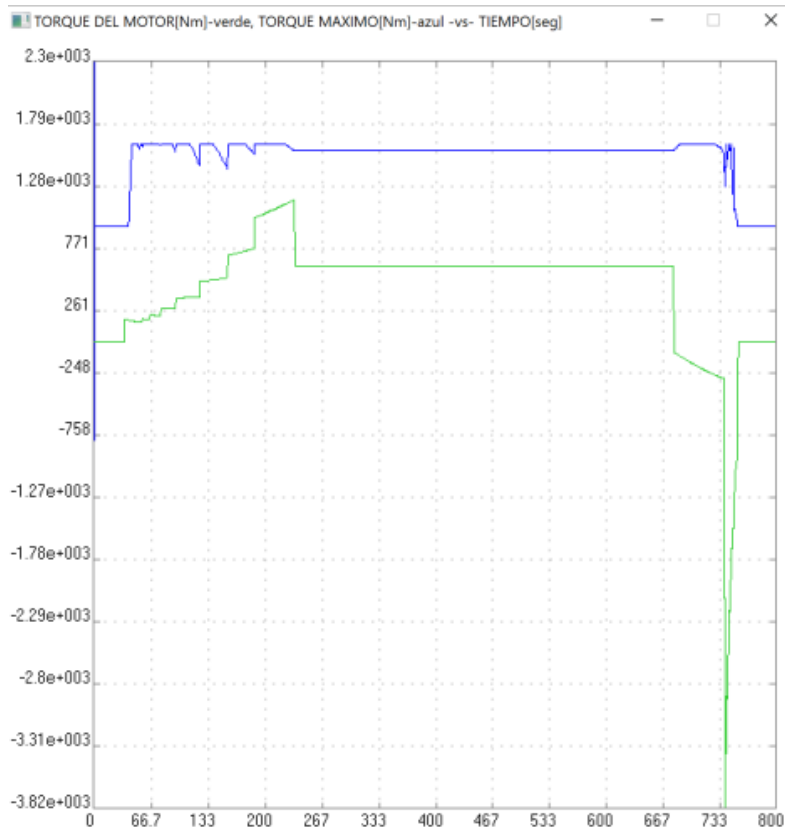


Figura 17. Torque del motor (Nm) y torque máximo (Nm) contra el tiempo (seg) para la tercera parte del ciclo de conducción.

En la figura 18 se muestra el consumo instantáneo y el par del motor normalizados contra el tiempo para la tercera parte del ciclo de manejo. En la figura 19 se muestra la potencia demandada por el vehículo y la potencia máxima que puede proporcionar el motor contra el tiempo (seg) para la tercera parte del ciclo de manejo.

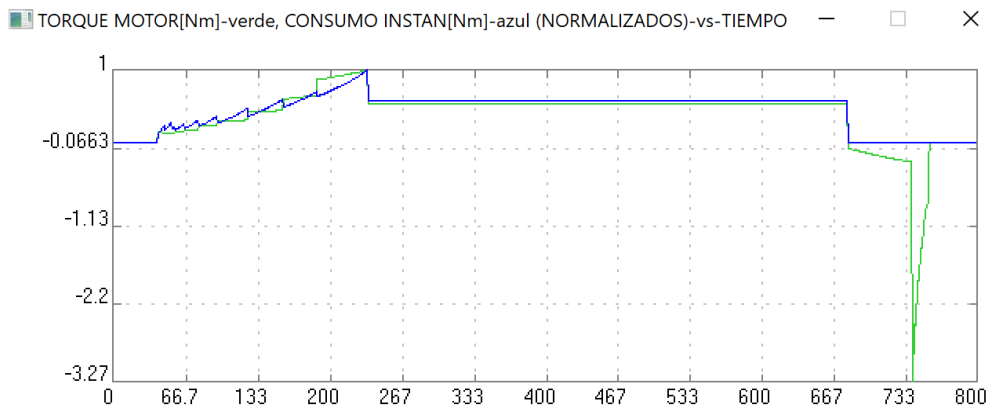


Figura 18. Consumo instantáneo (línea azul) y torque del motor (línea verde) normalizados contra el tiempo (seg) para la tercera parte del ciclo de manejo.

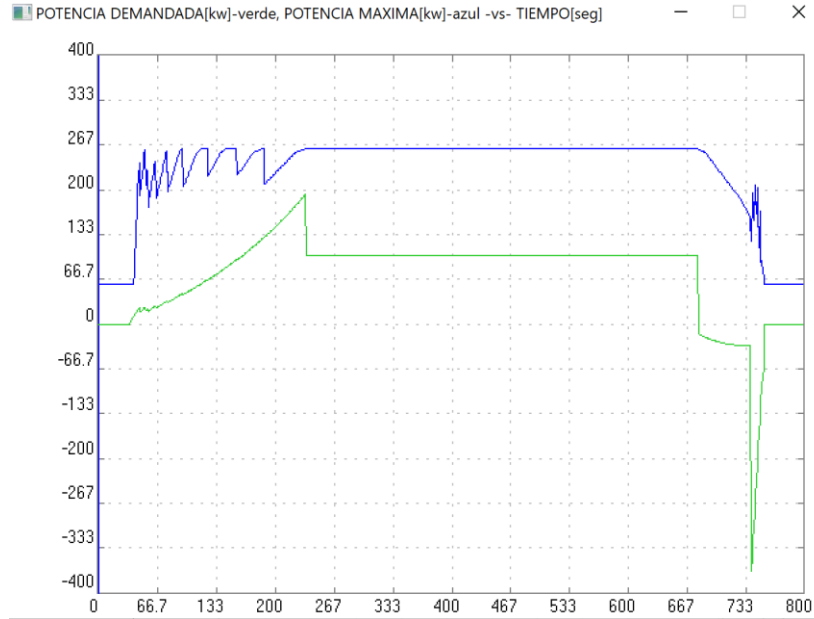


Figura 19. Potencia demandada (kW) por el vehículo y potencia máxima (kW) que podría proporcionar el motor contra el tiempo (seg), para la tercera parte del ciclo de conducción.

En la figura 20 se grafica la masa inercial del vehículo, m_i (kg), contra el tiempo (seg) como se obtiene de UAMmero. En las figuras 21, 22 y 23 se grafican las fuerzas F_a (N), F_r (N) y F_p (N) contra el tiempo en segundos, también se incluyen $M * a$ (N) y $F_i = m_i * a$, para las tres partes del ciclo de conducción.

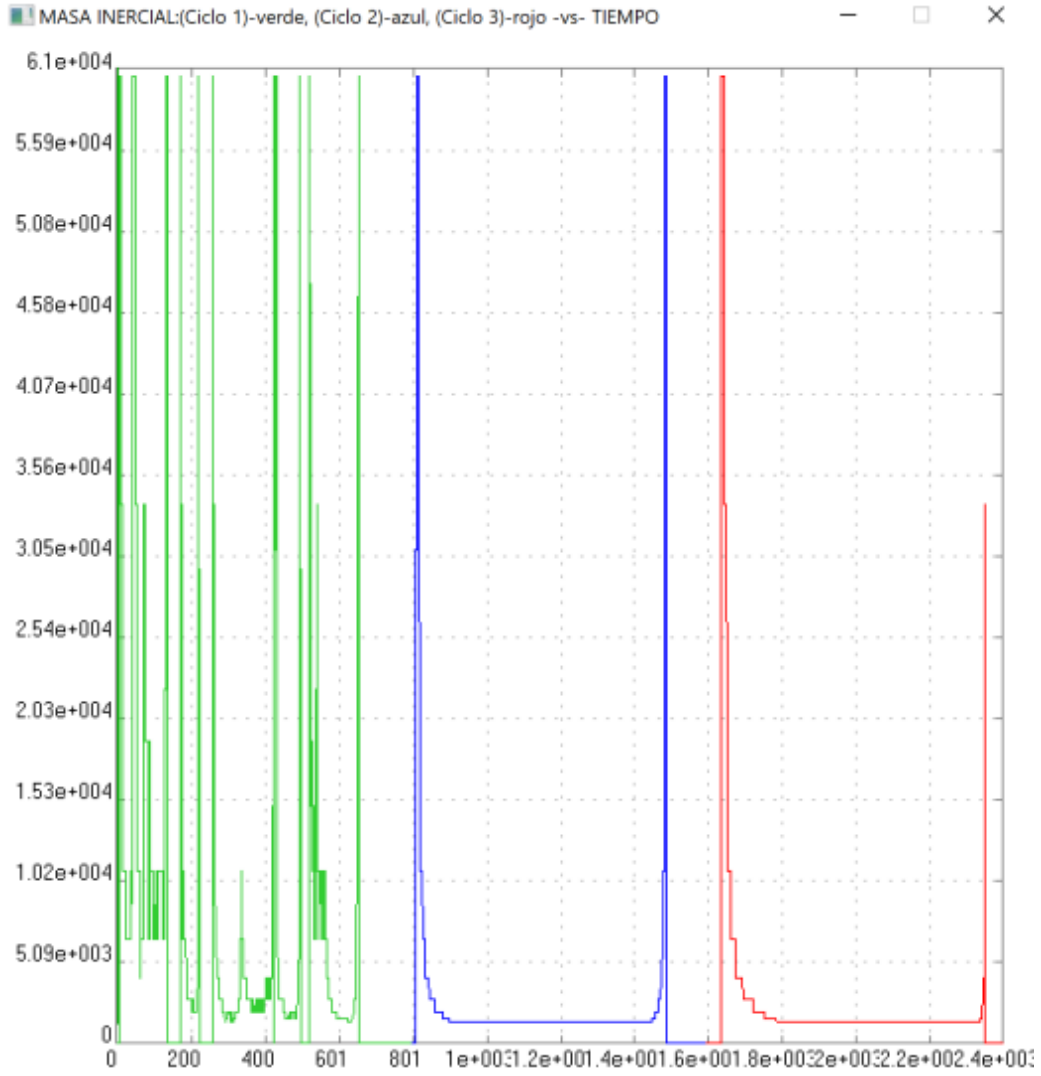


Figura 20. Masa inercial del vehículo (kg) para la parte de recorrido urbano (línea verde), para la segunda parte en carretera con un máximo de 88.514 km/hr (línea azul) y para el recorrido en carretera con un máximo de 104.607 km/hr (línea roja) contra el tiempo (seg).

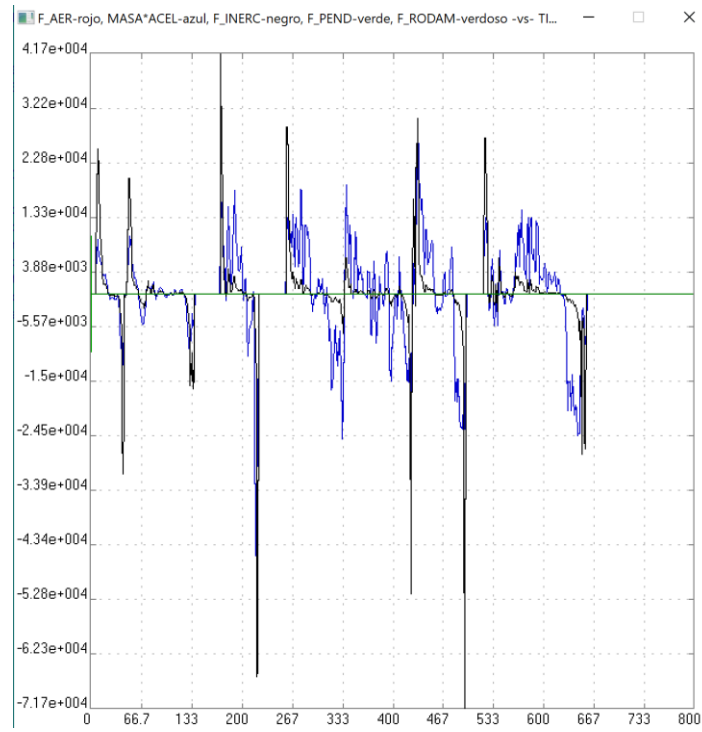


Figura 21. Fuerzas y otras variables (N) para la parte urbana del ciclo de manejo contra el tiempo en segundos.



Figura 22. Fuerzas y otras variables (N) para la parte en una carretera con velocidad máxima de 88.514 km/hr (segunda parte del ciclo de conducción) contra el tiempo en segundos.

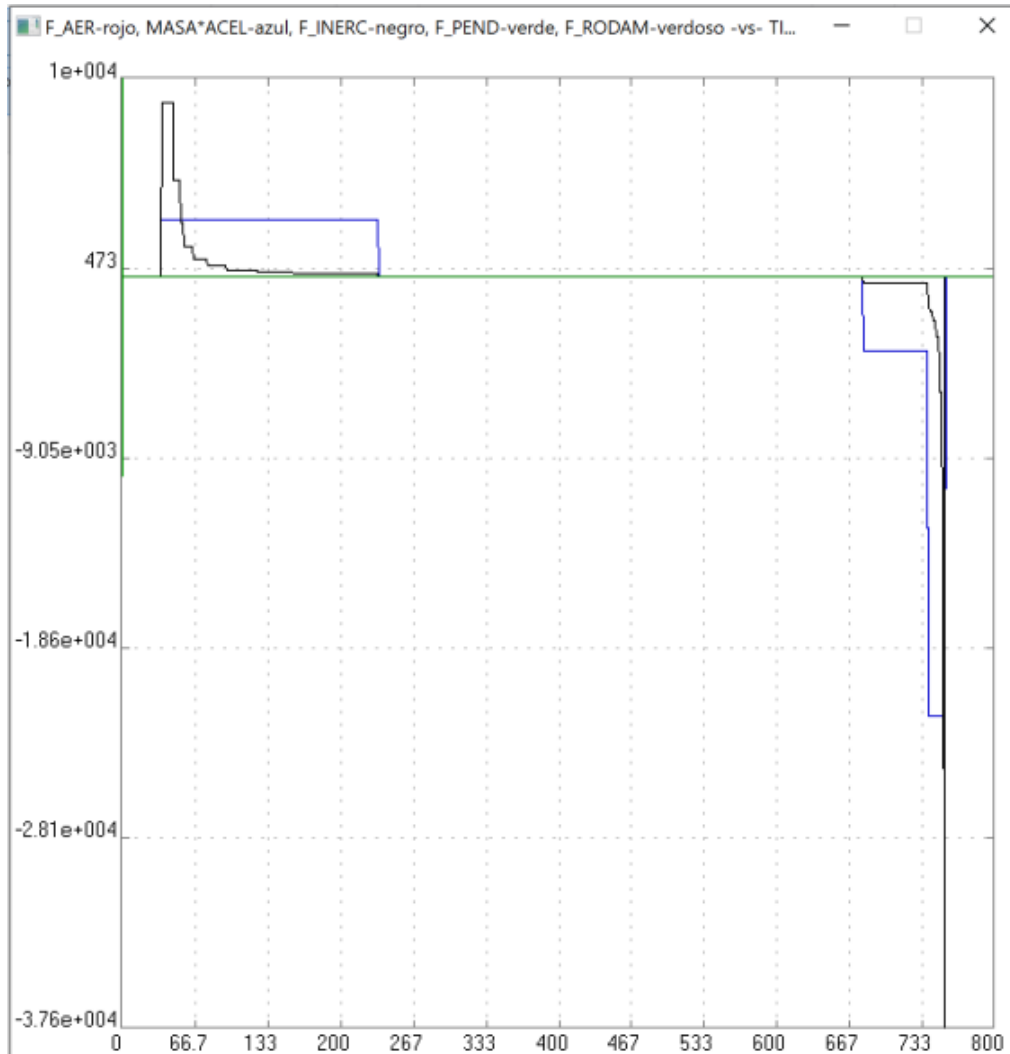


Figura 23. Fuerzas y otras variables (N) para la parte en una carretera con velocidad máxima de 104.607 km/hr (tercera parte del ciclo de conducción) contra el tiempo en segundos.

La figura 24 muestra el par del motor (Nm) contra el tiempo en segundos para las tres partes del ciclo de conducción. La figura 25 muestra las rpm del motor contra el tiempo en segundos para las tres partes del ciclo de conducción. La figura 26 muestra la potencia necesaria (kW) para mover el vehículo contra el tiempo en segundos. La figura 27 muestra el consumo de combustible acumulado en litros en función del tiempo en segundos para las tres partes del ciclo de conducción. La figura 28 muestra el rendimiento de combustible instantáneo en km/lit en función del tiempo en segundos para las tres partes del ciclo de conducción.

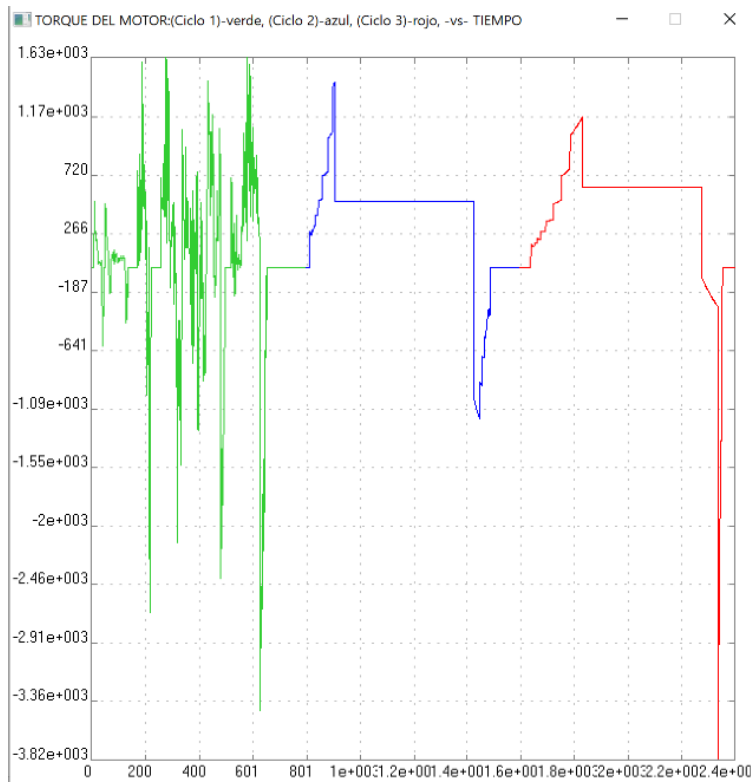


Figura 24. Torque (Nm) contra tiempo (seg) para las tres partes del ciclo de conducción.

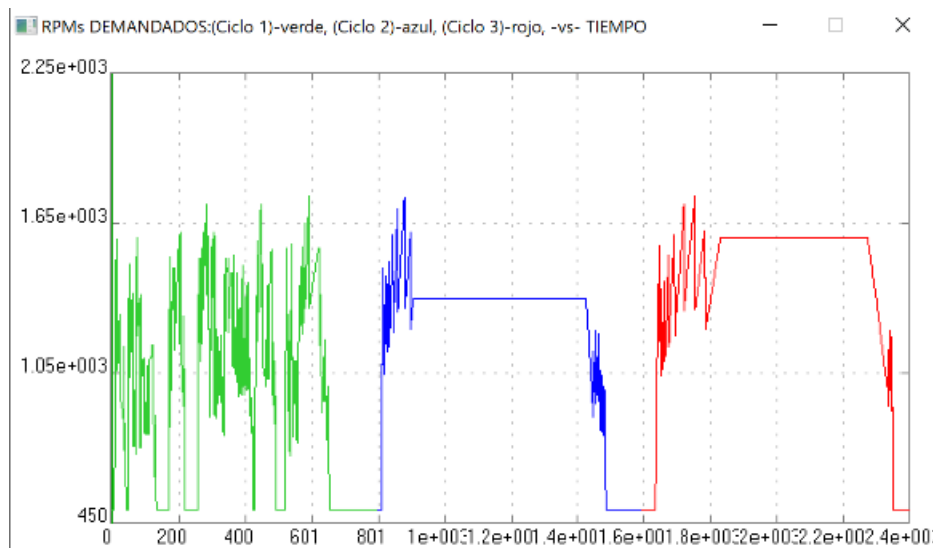


Figura 25. Revoluciones por minuto del eje del motor contra el tiempo (seg) de la primera (línea verde), la segunda (línea azul) y la tercera parte (línea roja) del ciclo de conducción.

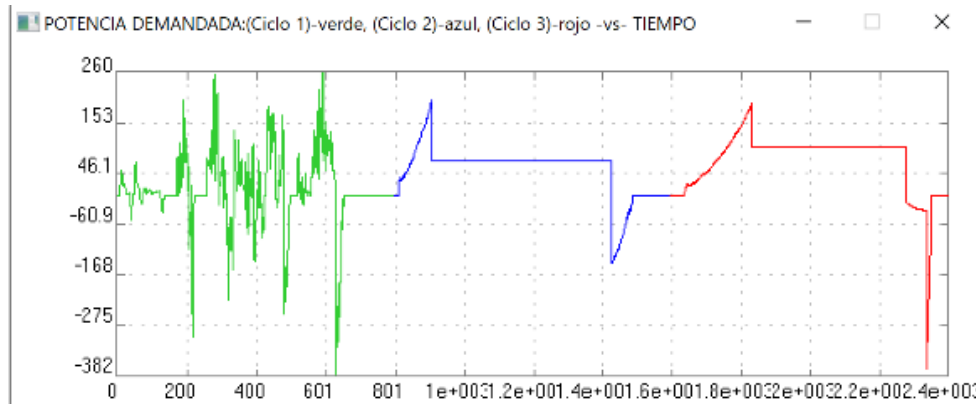


Figura 26. Potencia en kW necesaria para mover el vehículo en función del tiempo en segundos para la primera (línea verde), la segunda (línea azul) y la tercera parte (línea roja) del ciclo de conducción.

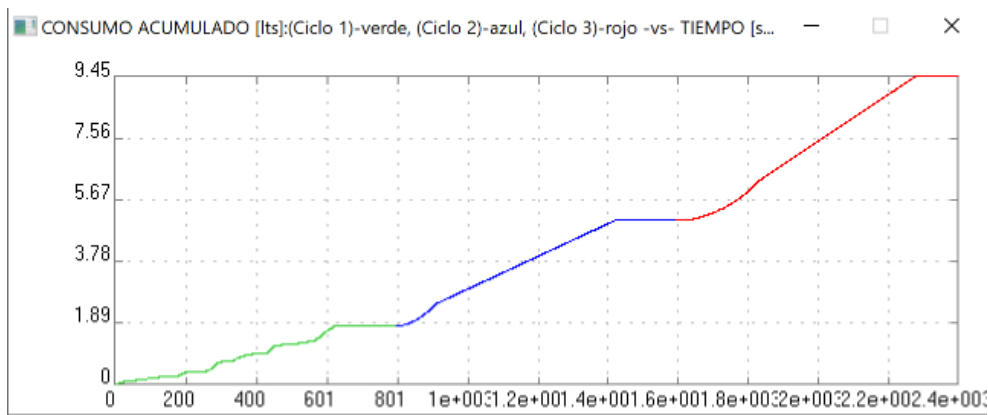


Figura 27. Consumo de combustible acumulado en litros contra el tiempo en segundos para la primera (línea verde), la segunda (línea azul) y la tercera parte (línea roja) del ciclo de conducción.

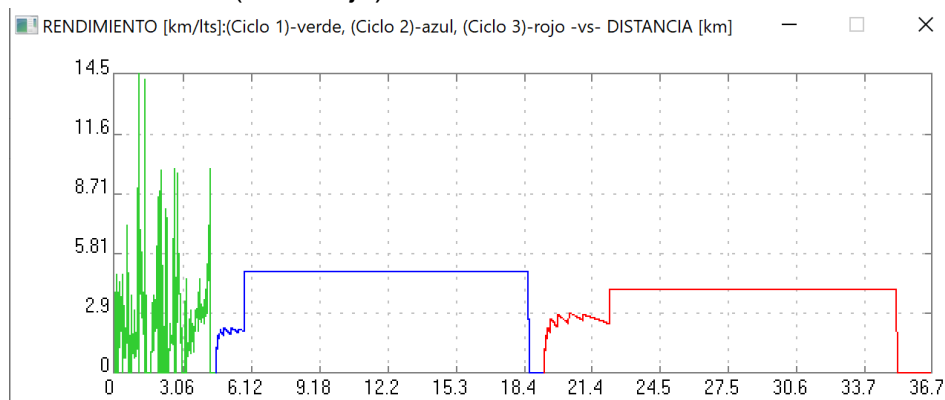


Figura 28. Rendimiento de combustible del vehículo pesado en km/lit contra el tiempo en segundos para la primera parte (línea verde), la segunda parte (línea azul) y la tercera parte (línea roja) del ciclo de manejo.

UAMmero proporciona la rapidez más cercana a la rapidez prescrita del ciclo de conducción considerando el par máximo que puede proporcionar el motor del vehículo. Se calcula la distancia recorrida y el combustible consumido por el vehículo en cada parte del ciclo de conducción, y esos valores se suman para obtener la distancia total recorrida y el combustible total consumido en el viaje. También se obtiene el costo del combustible. Las emisiones de CO_2 y otras emisiones se calculan para cada una de las partes del ciclo de conducción y se suman las cantidades totales para todo el viaje. El consumo de combustible se calcula instantáneamente y también el rendimiento de combustible para cada una de las tres partes del ciclo de conducción y también de todo el viaje.

La cantidad de CO_2 se calcula multiplicando el volumen de combustible consumido por 2.6 kg/litro. El daño ambiental se calcula multiplicando las toneladas de CO_2 por 12 dólares, considerando que una tonelada de CO_2 se penaliza con 12 dólares. En México aún no existe un costo oficial para la tonelada de CO_2 . Muchas organizaciones proponen que una tonelada de CO_2 sea penalizada con más de 50 dólares.

UAMmero también reporta el costo del viaje por kilómetro por tonelada de carga transportada.

La cantidad de óxidos de nitrógeno, hidrocarburos no quemados, hidrocarburos no metánicos, monóxido de carbono, partículas y amoniaco son los valores máximos que puede emitir el vehículo asumiendo que cumple con la NOM-044-SEMARNAT-2017 publicada el 18 de febrero de 2018 en el Diario Oficial de la Federación de México; es decir, se consideran sus valores máximos de emisión por kWh para obtener esos contaminantes. Si los fabricantes proporcionan más detalles sobre sus motores, se podrán obtener valores más precisos de UAMmero. También existen costos sociales, a la salud y a la infraestructura vial ocasionados por la conducción de los vehículos pesados, pero aunque algunos de ellos ya han sido estimados por los autores, aún no se han incorporado a UAMmero.

10.3 Observaciones

UAMmero es una herramienta computacional desarrollada en México para calcular el consumo de combustible, el rendimiento de combustible, el CO_2 y otras emisiones contaminantes de vehículos pesados. Puede ser útil para evaluar nuevas tecnologías para vehículos pesados ya disponibles en el mercado que pueden hacer posible que esos vehículos consuman menos combustible y emitan menos contaminantes.

CAPÍTULO 11. COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE EL GEM Y UAMmero

En esta sección se comparan los resultados del GEM y de UAMmero para la tercera parte del ciclo de conducción.

11.1 Masa inercial

Los resultados para m_i , F , T_e y P_e , en función del tiempo obtenidos de GEM y de UAMmero se muestran en las figuras 29, 30, 31 y 32 para un motor de 455 HP, $\theta = 0^\circ$, carga de 17236 kg y una masa total del vehículo de $M = 31978$ kilogramos [11].

Los resultados con UAMmero se muestran con línea roja y los de GEM con línea azul [11]. Los resultados difieren en menos de 3% a excepción del par o torque del motor durante los cambios de marcha de la transmisión. Los resultados de GEM presentan picos en el torque durante los cambios de la transmisión debido a que en ese modelo se utiliza un mecanismo de control Proporcional Integral Diferencial tradicional (PID) durante esos cambios. UAMmero ya tiene un PID para para el cambio suave de marcha en la transmisión, pero que no se ha utilizado para obtener los resultados presentados en esta tesis.

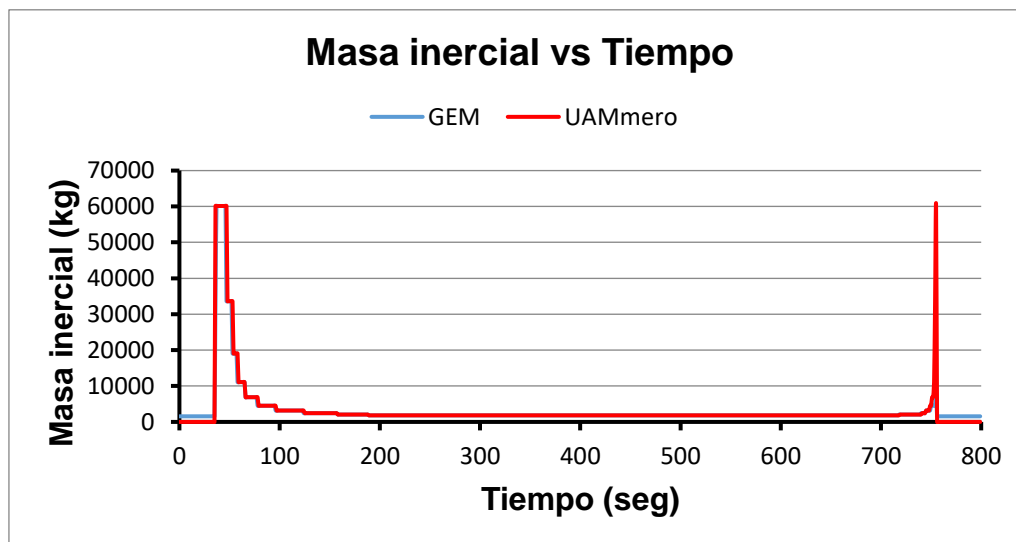


Figura 29. Comparación de la masa inercial entre el GEM y UAMmero contra el tiempo. Motor 455 HP, $M = 31.978$ tons (carga 17.236 tons), inclinación 0° .

11.2 Fuerzas sobre el vehículo

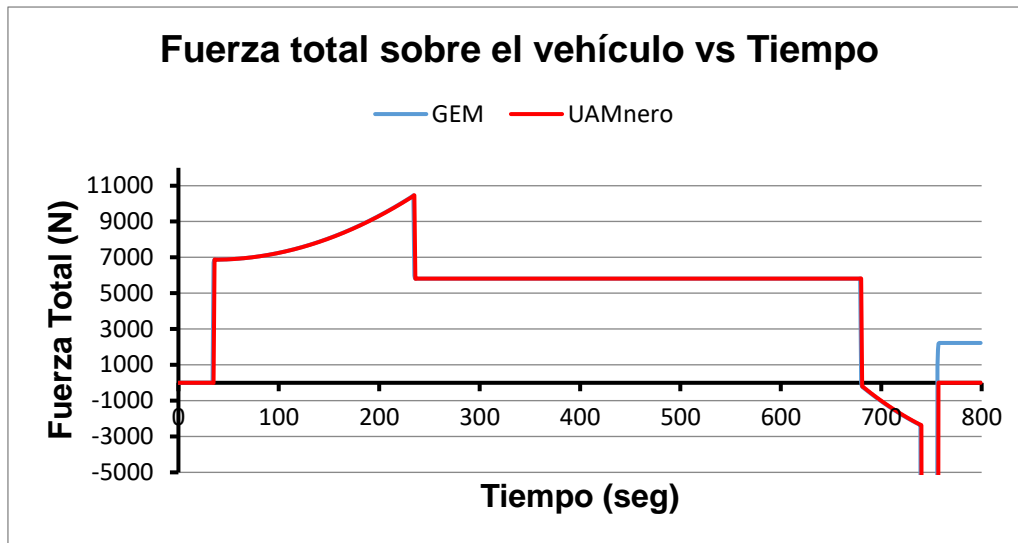


Figura 30. Comparación entre los resultados del GEM y de UAMnero de la fuerza total sobre el vehículo contra el tiempo.

11.3 Par o torque

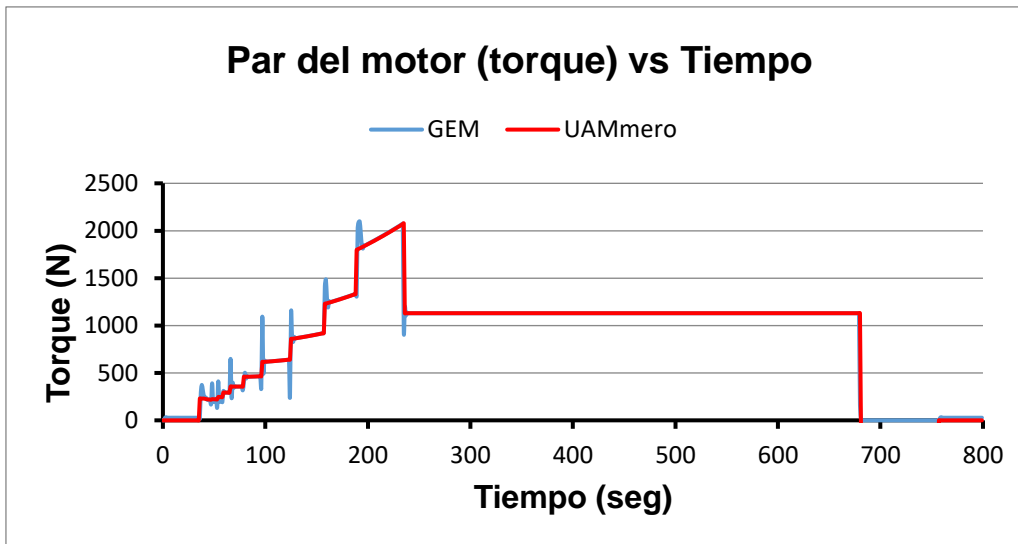


Figura 31. Comparación de los resultados entre el GEM y UAMnero del par o torque del motor contra el tiempo.

11.4 Potencia

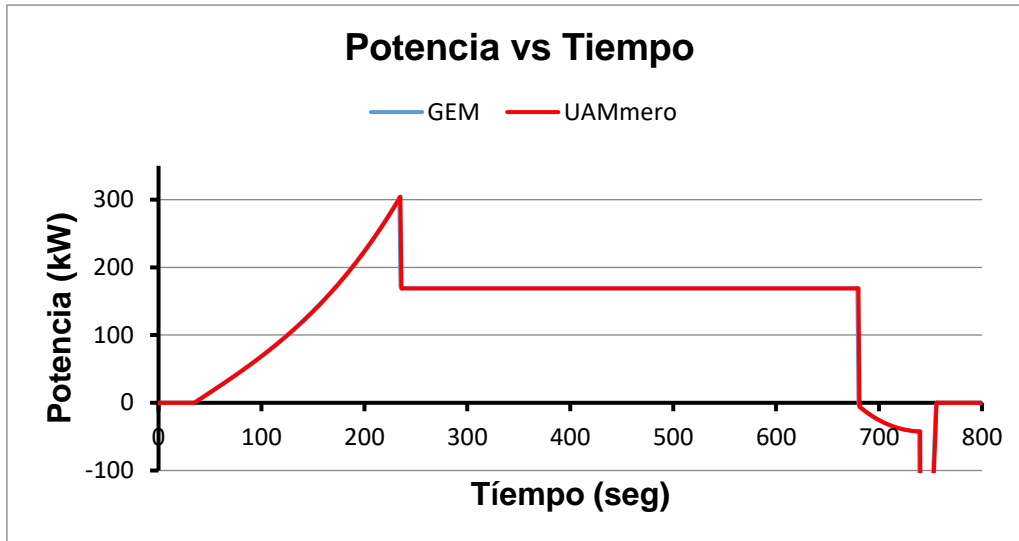


Figura 32. Comparación de los resultados del GEM y UAMmero de la potencia necesaria para mover al vehículo contra el tiempo.

11.5 Observaciones

UAMmero es un software útil para calcular los rpm y el par o torque del motor necesarios para mover un vehículo en un ciclo de conducción y sus resultados difieren en menos de 3% a los obtenidos utilizando el GEM de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América para el ejemplo estudiado.

CAPÍTULO 12. CÁLCULO DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE, RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE Y EMISIONES DE BIÓXIDO DE CARBONO DE UN VEHÍCULO PESADO

En este capítulo se muestra cómo se calculan el consumo de combustible, el rendimiento de combustible en kilómetros (km) por litro y las emisiones de CO_2 para un vehículo pesado utilizando UAMmero [10][11][38]. En los cálculos se usa el motor de 455 HP, $M = 22.742$ tons y una inclinación del recorrido de 0° . Se detallan los cálculos para la segunda parte del ciclo de conducción que se muestra en la figura 33..

12.1 Cálculo de la rapidez del vehículo, del rpm y del par (o torque) del motor

A partir de la rapidez del vehículo en el tiempo t , y de la información de la figura 33 o de las ecuaciones 10 y 11, se obtienen las rpm del motor. En la figura 34, se muestra la rapidez contra las rpm del motor a medida que el vehículo acelera desde la rapidez cero hasta 88.514 km/h. En la figura 35, se muestra la rapidez contra las rpm del motor para la desaceleración del vehículo de 88.514 km/hr a rapidez cero. El cambio brusco en las líneas de la figura 34 y en la figura 35 se deben a los cambios de engrane en la caja de cambios a determinadas velocidades del vehículo. Los cambios de marcha se consideran instantáneos en esta tesis. A medida que el vehículo aumenta su velocidad, utiliza las marchas más altas de la caja de cambios.

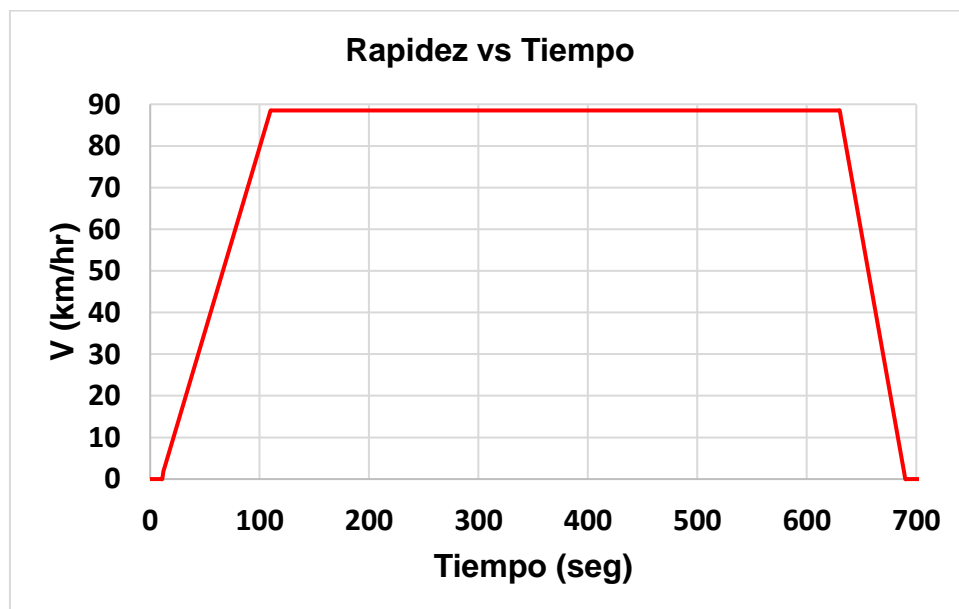


Figura 33. Rapidez del vehículo contra el tiempo. Segunda parte del ciclo de manejo. Motor 455 HP, $M = 22.742$ tons, inclinación 0° .

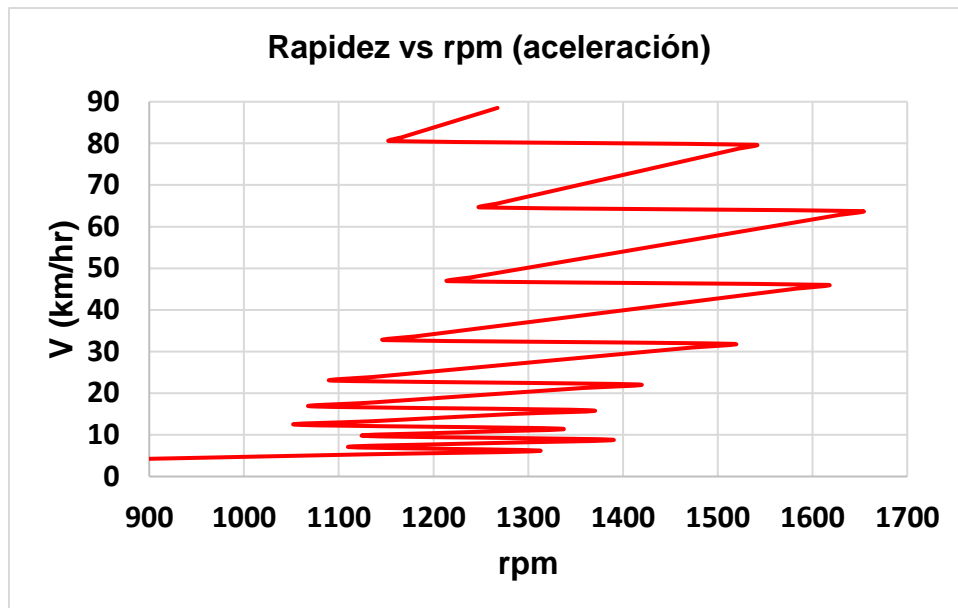


Figura 34. Rapidez del vehículo contra las rpm del motor, durante la aceleración del vehículo.

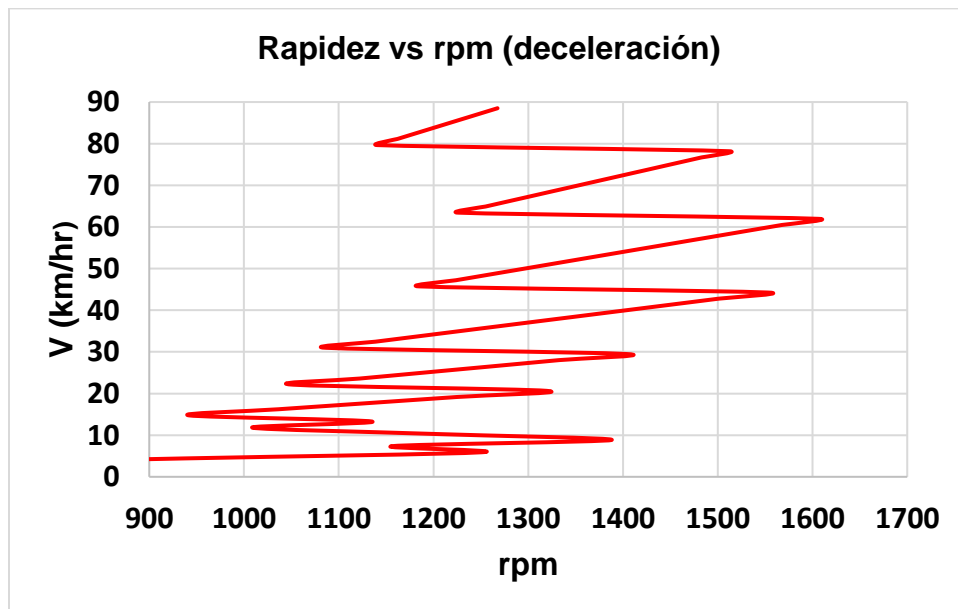


Figura 35. Rapidez del vehículo contra las rpm del motor, durante la deceleración del vehículo.

Si la rapidez del vehículo cambia, también lo hacen las rpm del motor. Si el vehículo se desplaza utilizando uno de los engranes de la transmisión, es decir, en una de las líneas rectas de la figura 34, las rpm del motor aumentan a medida que la velocidad del vehículo aumenta linealmente con respecto a las rpm. Como se ve en la figura 34, cuando el vehículo aumenta su velocidad, tiene que pasar de una marcha más baja a una más alta una por una, al hacerlo, las rpm del motor disminuyen pero las rpm aumentan nuevamente a medida que aumenta la rapidez del vehículo después del cambio de engrane. A medida que aumenta la velocidad del vehículo, el par o torque del motor aumenta como se muestra en la figura 36 y luego disminuye a medida que el vehículo mantiene una velocidad constante; el par o torque necesario para mantener la velocidad más alta es menor que cuando el vehículo está acelerando justo antes de alcanzar esa velocidad. A velocidad constante a medida que el par o torque decrece y las rpm se mantienen constantes, el consumo de combustible también es menor que cuando el vehículo acelera justo antes de alcanzar la velocidad de crucero. La figura 37 muestra los valores de rpm a medida que avanza el tiempo. Los rpm aumentan y disminuyen a medida que se cambian los engranajes de la transmisión para que el vehículo viaje a velocidades más altas. Cuando el vehículo se mueve a velocidad de crucero, los rpm del motor son constantes como se muestra en la figura 37, el par también es constante como se muestra en la figura 38. El par o torque en función del tiempo se muestra en la figura 38. Los valores del par y las rpm a la velocidad de crucero son $\text{rpm} = 1267.580$ y $T_e = 814.241 \text{ N}\cdot\text{m}$.

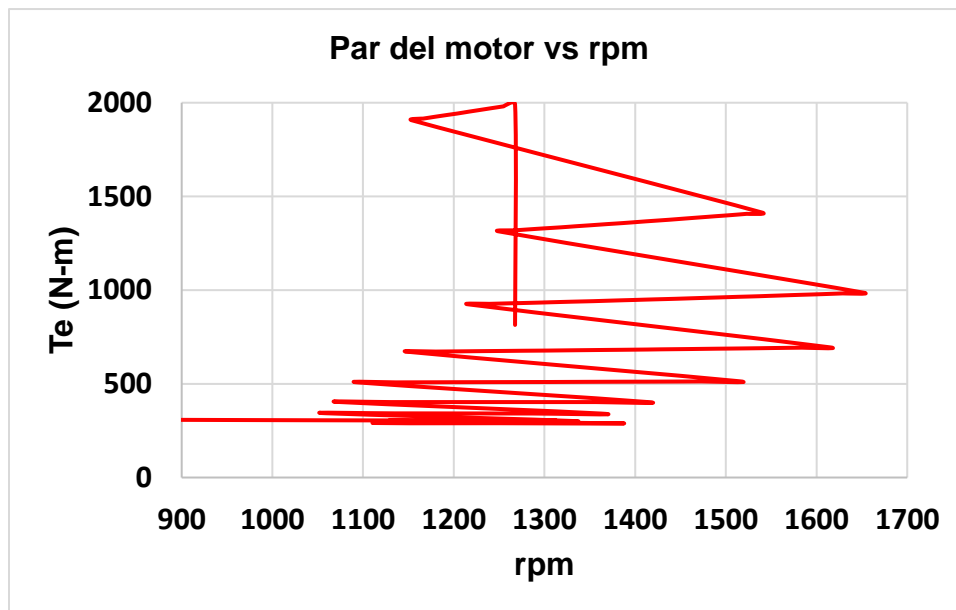


Figura 36. Torque contra rpm.

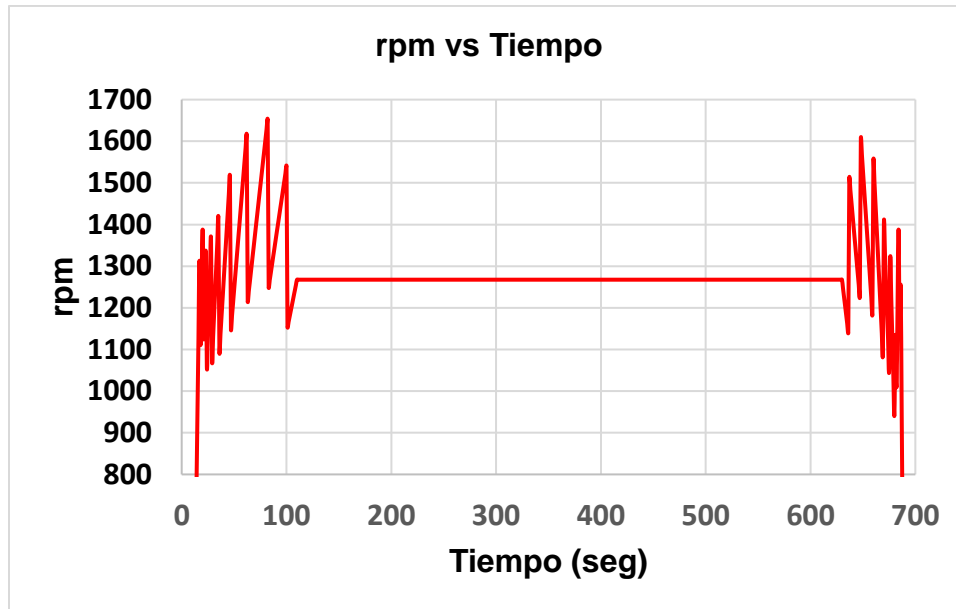


Figura 37. rpm del motor contra tiempo.

Para la parte del ciclo de manejo mostrado en la figura 33, F_a , F_p y F_r se muestran en la figura 39 como una función del tiempo. F_i se define en la ecuación 14 y también se muestra en la figura 39.

F_a es una fuerza cuadrática en la velocidad y por lo tanto es cuadrática en el tiempo como se muestra en la figura 39 (de 11 a 110 segundos), porque la velocidad aumenta linealmente a medida que avanza el tiempo. Posteriormente, F_a es constante en el tiempo (de 111 a 645 segundos). A medida que el vehículo desacelera disminuye y será cuadrática en el tiempo (de 646 a 705). F_a es muy importante en las carreteras si la velocidad del vehículo es grande. La fuerza de fricción por el rodamiento, F_r , no depende de la velocidad en este modelo y, por tanto, es constante. La masa, M , multiplicada por la aceleración, a , tiene un valor constante (de 11 a 110 segundos) y luego es cero (de 111 a 645 segundos) y finalmente es negativamente constante (de 646 a 705) porque la velocidad disminuye. F_i es diferente de cero solo cuando la aceleración del vehículo es diferente de cero, y depende de los momentos de inercia de las partes giratorias del vehículo. F_i es muy importante cuando el vehículo acelera y desacelera con frecuencia, como cuando el vehículo viaja en una región urbana. F_p es muy importante si el camino es empinado; en este capítulo la pendiente se considera cero; se reportan resultados con pendientes diferentes de cero en otros capítulos.

Una vez calculados F_a , F_p , F_r , F_i , y Ma , se evalúa la fuerza de tracción F_t (ecuación

12); y a partir de F_t , se calcula el par o torque necesario que debe proporcionar el motor.

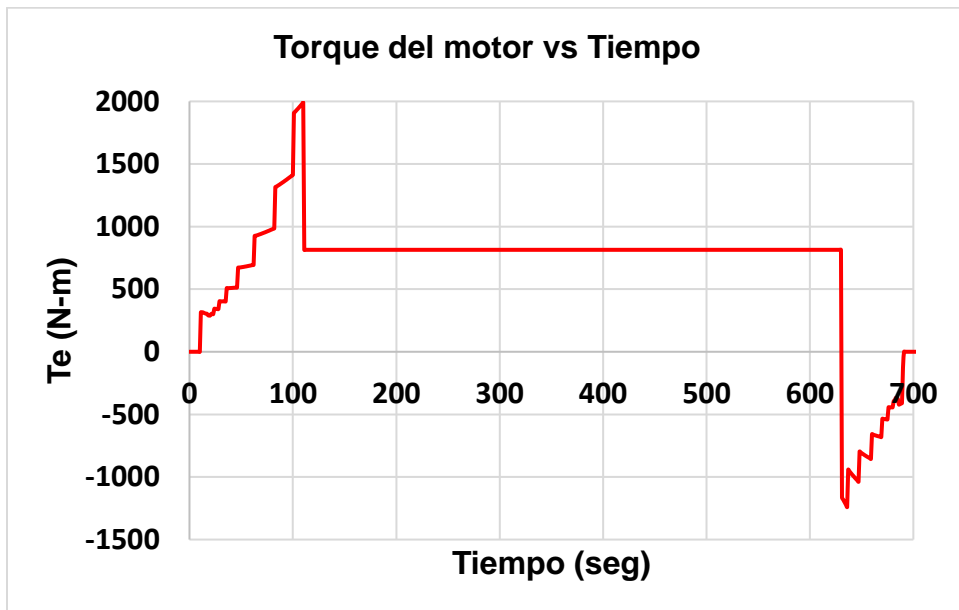


Figura 38. Torque necesario para mover el vehículo contra el tiempo.

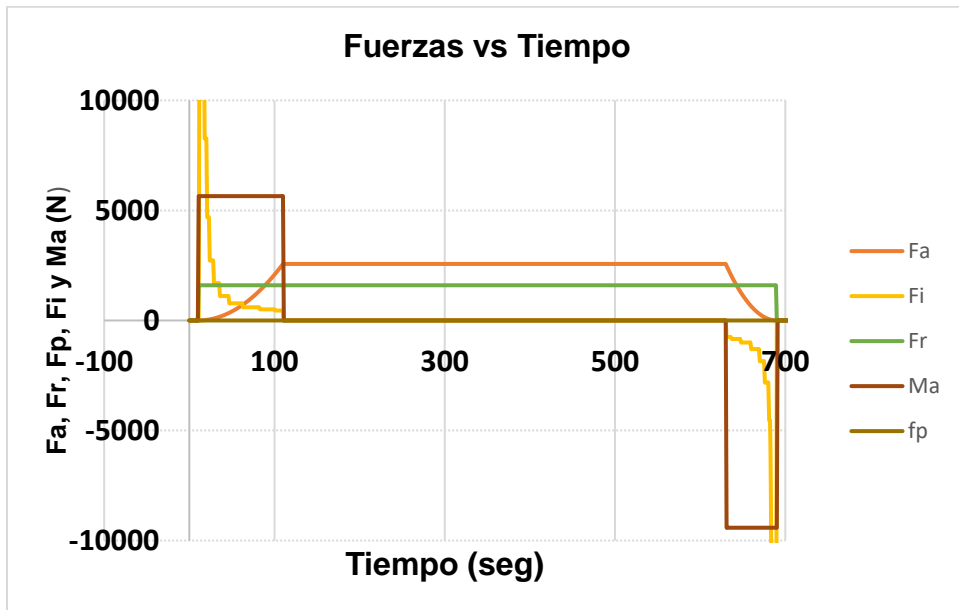


Figura 39. F_a , F_i , F_r , M_a , y F_p contra el tiempo.

12.2 Mapa de combustible para el motor a diésel de 455 HP.

En la figura 40 se muestra gráficamente parte del mapa de combustible para el motor a diésel de 455 HP [41]. Los datos para esta figura fueron obtenidos directamente de revisar el software del GEM. Una gráfica del mapa de combustible completo aparece en la referencia [21].

En la figura 40 se muestra con una línea negra gruesa el torque máximo del motor.

El torque es necesario para mover el vehículo tratando de alcanzar la rapidez descrita en el ciclo de conducción, pero sin que se pase de su máximo. También en los capítulos 6 y 7 se describe como a partir del torque máximo (la línea negra) se calcula la potencia máxima que proveerá el motor al multiplicar el torque por el rpm. Asimismo, en esos capítulos se calcula el consumo máximo que puede tener el motor que no es más que el consumo de combustible en el torque máximo que puede proporcionar el motor (o sea a lo largo de la línea negra). Una vez calculado el consumo máximo se calcula el consumo de combustible específico para el torque máximo, que no es más que el consumo de combustible máximo a lo largo de la línea negra dividido entre la potencia máxima (la potencia correspondiente al torque máximo).

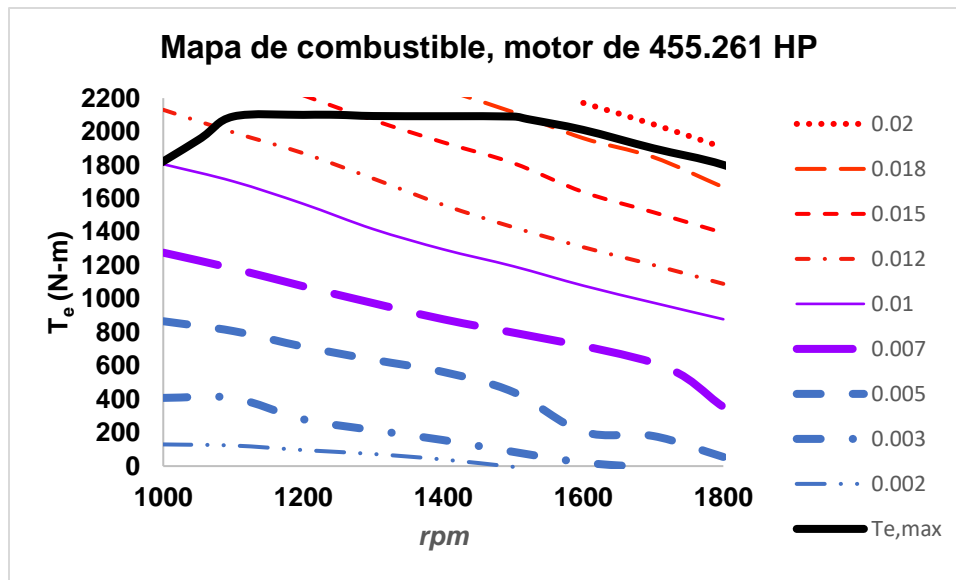


Figura 40. Parte del mapa del combustible del motor, de donde se obtiene el consumo de combustible (en kg/s). En la figura se señala con una línea negra el torque máximo que puede proporcionar el motor.

Al analizar la figura 40 se concluye que si el rpm del motor varía mientras el torque del motor se mantiene constante la variación en el consumo de combustible es menor que cuando las rpm del motor se mantienen constantes y cambia el torque del motor. Esta explicación se muestra gráficamente en la figura 41.

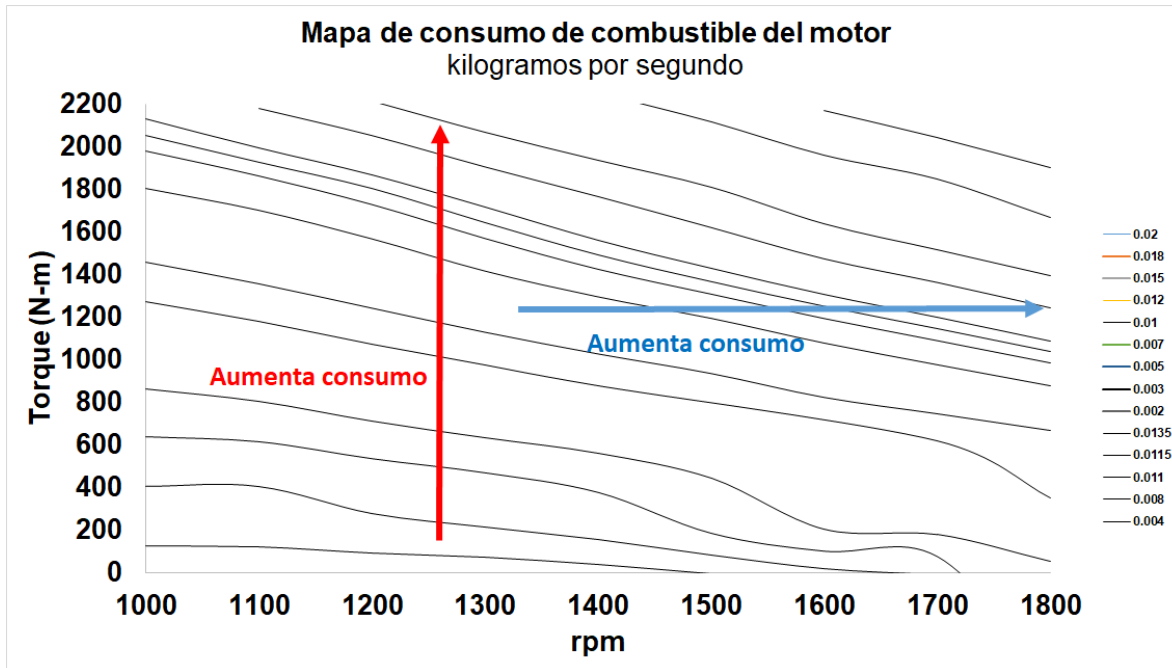


Figura 41. Gráfica que muestra que si el torque se mantiene constante y aumentan las rpm del motor el aumento en el consumo de combustible es menor que cuando se mantienen constantes las rpm del motor y se incrementa el torque del motor.

12.3 Cálculo del consumo instantáneo de combustible del motor

Con el valor del par o torque, T_e , que el motor debe proporcionar para que el vehículo se mueva con cierta velocidad y las rpm del motor, se obtiene el consumo de combustible. El consumo de combustible se obtiene del mapa de combustible del motor que consta de los valores del consumo de combustible para los valores de parejas de torque T_e , y rpm del motor. El mapa de combustible del motor suele ser proporcionado por los fabricantes, y en este capítulo se está utilizando un modelo EPA para un motor de 455 HP [5] [11][20].

El consumo de combustible se calcula del mapa del motor, que es una tabla con el consumo de diésel para parejas de torque y revoluciones por minuto (rpm) del motor.

En el modelo EPA, los valores del consumo de combustible se proporcionan para 17 valores del torque y 31 valores de rpm. A medida que cambia la velocidad del vehículo, el par del motor, T_e , y las rpm del motor cambian y los valores del consumo de combustible se obtienen interpolando dentro de la matriz de 31 por 17 para encontrar el consumo de combustible para un par específico rpm y T_e del motor. Para calcular el consumo de combustible para un par en particular (rpm, T_e), primero hay que encontrar en qué rectángulo de los 31 por 17 rectángulos se

encuentra el par de valores de rpm y torque. Supongamos que el par (rpm, T_e) está en el rectángulo dado por los vértices (rpm_1, T_{e1}) , (rpm_1, T_{e2}) , (rpm_2, T_{e1}) y (rpm_2, T_{e2}) , en los que el consumo de combustible es $C(rpm_1, T_{e1})$, $C(rpm_1, T_{e2})$, $C(rpm_2, T_{e1})$ y $C(rpm_2, T_{e2})$ respectivamente, ver figura 42. Entonces, el consumo de combustible $C(rpm, T_e)$, en el punto (rpm, T_e) , se calcula utilizando la ecuación 22.

$$C(rpm, T_e) = \frac{1}{(r_2 - r_1)(T_2 - T_1)} [C(rpm_1, T_{e1})(rpm_2 - rpm)(T_{e2} - T_e) + C(rpm_2, T_{e1})(rpm - rpm_1)(T_{e2} - T_e) + C(rpm_1, T_{e2})(rpm_2 - rpm)(T_e - T_{e1}) + C(rpm_2, T_{e2})(rpm - rpm_1)(T_e - T_{e1})]$$

(22)

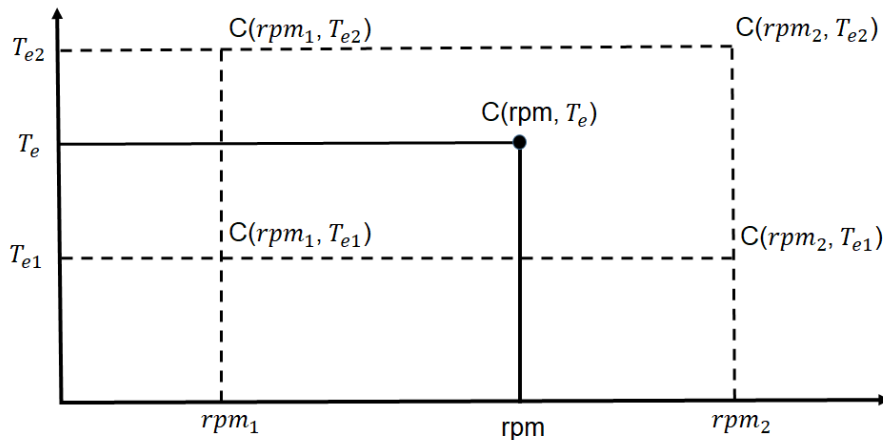


Figura 42. Arreglo para calcular el consumo de combustible para un par (rpm, T_e) .

El consumo de combustible instantáneo se muestra en la figura 43.

Como el consumo de combustible se proporciona en kg por segundo, para obtener el consumo de combustible en litros por segundo, el consumo de combustible en kg/s se divide por la densidad del combustible (diésel), que en este trabajo se considera de 0.847 kg/litro.

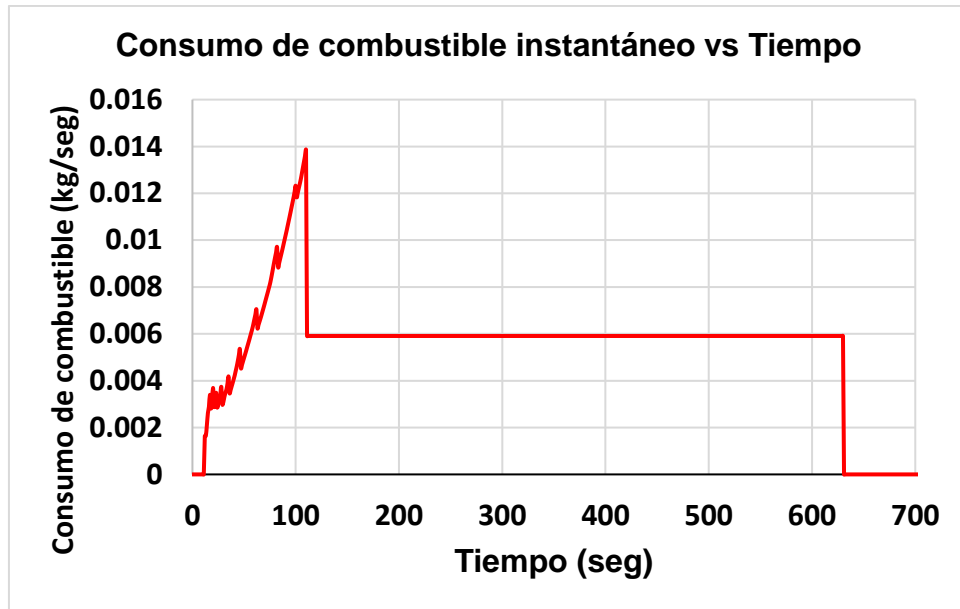


Figura 43. Consumo de combustible instantáneo del motor contra el tiempo.

12.4 Cálculo del rendimiento de combustible del vehículo

Una vez obtenido el consumo instantáneo de combustible, se calcula el rendimiento instantáneo de combustible dividiendo el número de kilómetros recorridos por la cantidad de litros consumidos en esa distancia. El rendimiento de combustible instantánea en km/litro en función del tiempo se muestra en la figura 44 y el rendimiento de combustible instantáneo en función de la rapidez se muestra en la figura 45. El rendimiento de combustible es máximo a velocidad de crucero, 88.514 km/hr (cuando el vehículo no acelera) y es de 3.324 km / litro. Este último resultado significa que el rendimiento de combustible depende de la velocidad del vehículo. La economía de combustible también depende de la carga que transporta el vehículo, las pendientes de las carreteras o calles por las que se mueve el vehículo y de la forma aerodinámica del vehículo, como se reporta en el siguiente capítulo.

Para calcular las emisiones de CO_2 , se multiplica el número de litros de diésel consumidos en el viaje por 2.6 kg/litro, ya que por cada litro de diésel quemado se emiten 2.6 kg de CO_2 . En el caso estudiado la cantidad total emitida es de 11.538 kg, debido a que el combustible consumido fue de 4.438 litros.

Se puede inferir la cantidad emitida de otros contaminantes de las especificaciones de las emisiones del motor, en gramos de contaminante por kilowatt-hora (kWh) proporcionado por el motor. Las emisiones de los otros contaminantes, diferentes al CO_2 , no se reportan aquí.

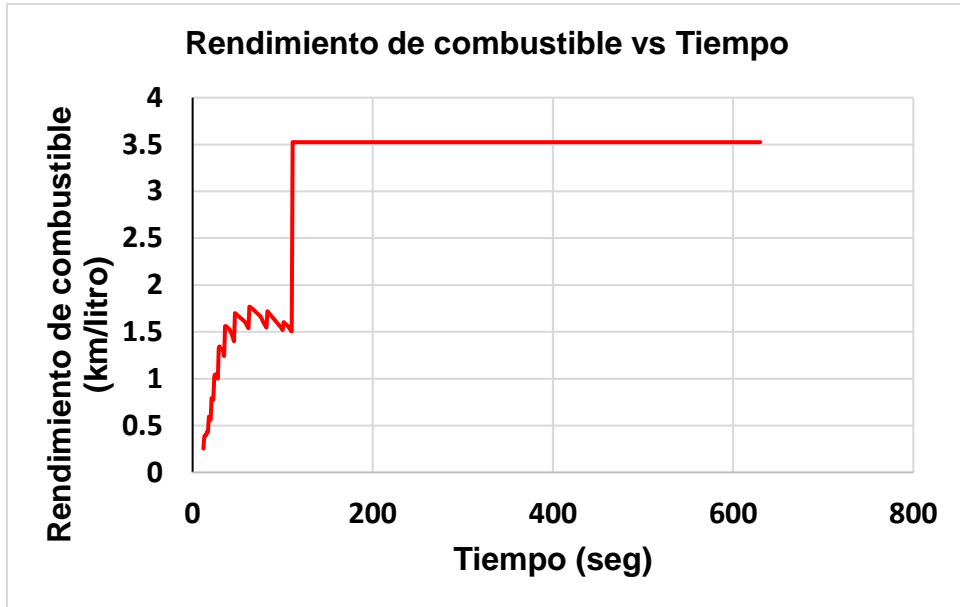


Figura 44. Rendimiento de combustible contra el tiempo.

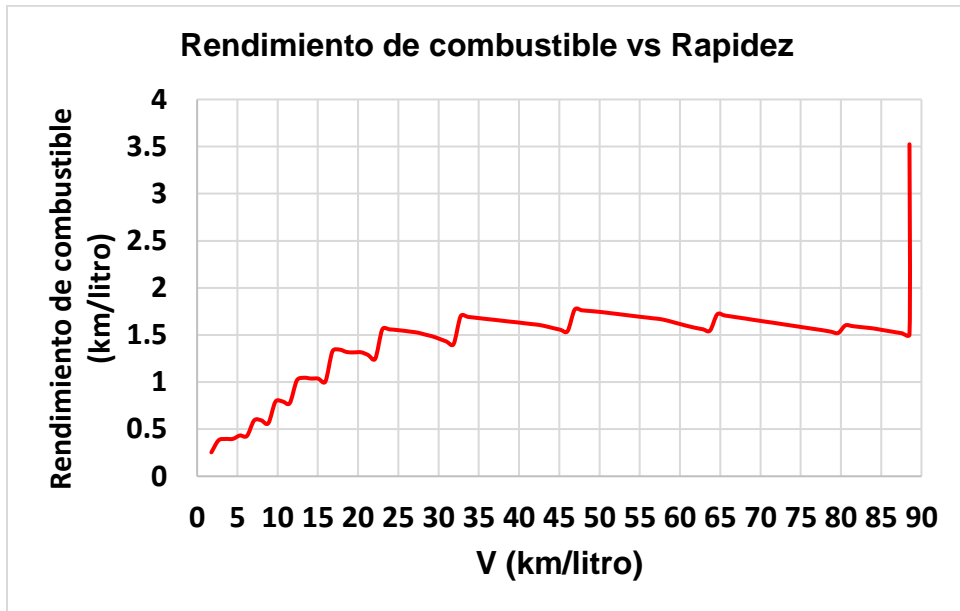


Figura 45. Rendimiento de combustible contra la rapidez.

12.5. Observaciones

El rendimiento de combustible de un vehículo depende de la velocidad del vehículo y, en el ejemplo elaborado en este capítulo, su máximo se alcanza a la velocidad de crucero. Como las emisiones de CO_2 son proporcionales al consumo de

combustible, las mayores emisiones de CO_2 se producen cuando el vehículo acelera justo antes de alcanzar la velocidad de crucero. La herramienta que se está desarrollando, UAMmero, se puede utilizar para evaluar el consumo de combustible de los vehículos pesados y sus emisiones de CO_2 , que es necesario regular para aumentar la independencia energética del país, así como para cumplir con sus compromisos internacionales sobre emisiones de gases de efecto invernadero.

CAPÍTULO 13. EFECTO DE LA MASA DE LA CARGA Y DE LA PENDIENTE DEL RECORRIDO EN EL RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE Y EN LAS EMISIONES DE BIÓXIDO DE CARBONO PARA UNA CAMIONETA PESADA

En este capítulo se presentan los resultados del efecto sobre el rendimiento de combustible y las emisiones de CO_2 de la masa de la carga transportada y la pendiente de la calle o carretera para una camioneta de 4.407 toneladas [39] usando UAMmero.

Es importante estudiar el efecto de las pendientes de la vía en el rendimiento de combustible porque los vehículos en México circulan por calles y carreteras con pendientes, a veces considerables, y también es importante considerar diferentes masas de las cargas porque los vehículos en algunas regiones del país suelen estar sobrecargados.

Si el vehículo transporta una carga pesada o la pendiente de la carretera es pronunciada, la velocidad del vehículo debe reducirse porque el motor del vehículo tiene una potencia máxima que no se puede superar. En esta tesis la pendiente de la carretera se considera constante a lo largo de la carretera.

13.1 Consumo de combustible y emisiones de bióxido de carbono de una camioneta sin carga que viaja en un camino plano

La figura 46 muestra la rapidez del vehículo (km/h) versus el tiempo (segundos) de las tres partes del ciclo de conducción para la camioneta pesada sin carga y una pendiente de la carretera de 0 grados (0°). La figura 47 muestra la rapidez del vehículo (km/h) contra las rpm del motor durante la segunda parte del ciclo de conducción. A medida que el vehículo aumenta su velocidad a una rapidez de crucero de 88.514 km/h, cambia del primer engrane al sexto y cuando el vehículo disminuye su velocidad desde su rapidez de crucero cambia del engrane de sexta velocidad al de primera velocidad. Las figuras 48, 49 y 50 muestran la fuerza aerodinámica, F_a , la fuerza inercial, F_i , la fuerza de fricción de los neumáticos contra el pavimento de la carretera, F_r , la fuerza debida a la gravedad, F_p , y la masa total del vehículo, M , multiplicada por la aceleración del vehículo, a , en Newtons (N) para cada una de las tres partes del ciclo de conducción.

Las fuerzas F_a , F_i , F_r y F_p , se han definido en capítulos anteriores. La figura 51 muestra el torque del motor (N-m) frente al tiempo (segundos) para las tres partes del ciclo de conducción. La figura 52 muestra el torque del motor (en N-m) contra

las rpm del motor durante la segunda parte del ciclo de conducción. La figura 53 muestra el par del motor (en N-m) contra la rapidez del vehículo (km/h) para la segunda y la tercera parte del ciclo de conducción. La figura 54 muestra el consumo de combustible (en kg/seg) contra tiempo (seg) para las tres partes del ciclo de conducción.

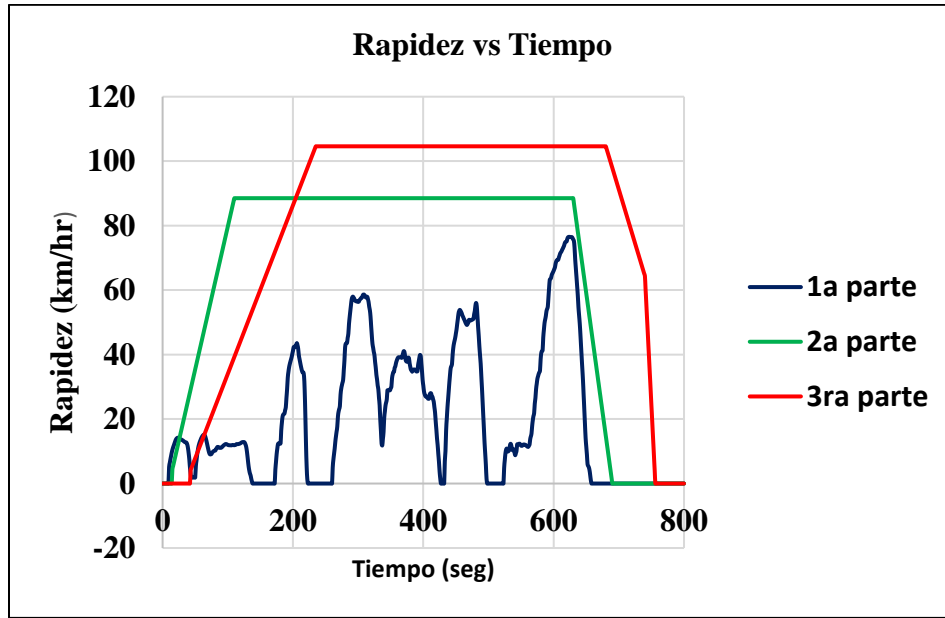


Figura 46. Rapidez del vehículo contra el tiempo. Se muestran las 3 partes del ciclo completo.

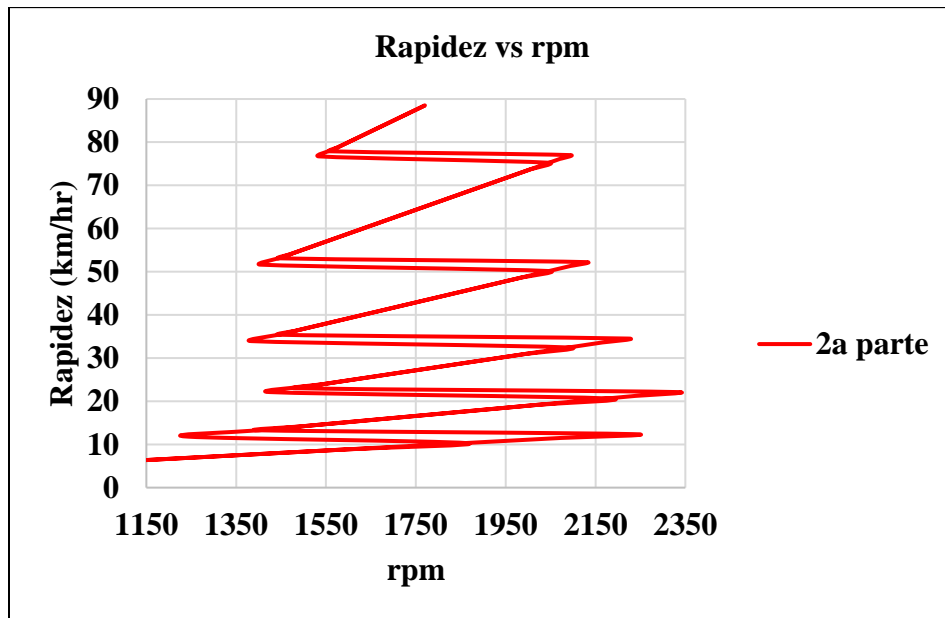


Figura 47. Rapidez del vehículo contra las rpm del motor para la segunda parte del ciclo de manejo. Motor 200 HP, $M = 4.407$ tons (sin carga), inclinación 0° .

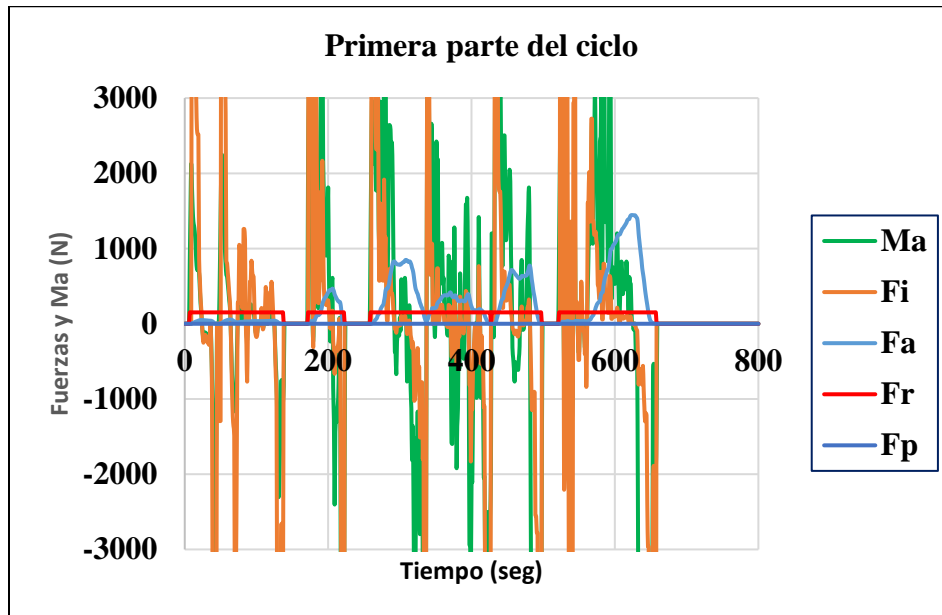


Figura 48. F_a , F_i , F_r , Ma y F_p contra el time para la primera parte del ciclo de manejo. Motor 200 HP, $M = 4.407$ tons (sin carga), inclinación 0° .

En la primera parte del ciclo de conducción, a medida que cambia la velocidad del vehículo, la fuerza aerodinámica, F_a , cambia, porque esta fuerza es proporcional al cuadrado de la rapidez. La aceleración del vehículo, a , también cambia muy rápidamente porque la velocidad varía constantemente, como se ve en la figura 46. La fuerza de inercia F_i , cambia porque la rapidez varía constantemente y por lo tanto hay muchos cambios de engranajes en la caja de velocidades que tienen razones de las relaciones muy diferentes y en general diferentes masas de inercia [21]. F_p es cero porque la inclinación de la carretera es cero. En este modelo F_r no depende de la velocidad, y en el caso estudiado es menor que la fuerza aerodinámica la mayor parte del tiempo. En la primera parte del ciclo de conducción el consumo instantáneo de combustible cambia mucho debido a los rápidos cambios en la rapidez como se puede ver en la figura 54.

En la segunda y tercera partes del ciclo de conducción, la fuerza aerodinámica F_a , es la fuerza más importante la mayor parte del tiempo, como se ve en las figuras 49 y 50. Para la tercera parte del ciclo de conducción F_a , puede alcanzar un valor más alto que en la segunda parte porque la velocidad máxima alcanzada es mayor que en la segunda parte. En la segunda parte del ciclo el consumo de combustible aumenta a medida que el vehículo aumenta su velocidad necesitando un torque más grande y por lo tanto más combustible, sin embargo a una velocidad de crucero de 88.514 km/h el par del motor necesario se reduce porque la aceleración es cero

y el consumo de combustible también es menor.

Asimismo, para la tercera parte del ciclo el consumo de combustible aumenta a medida que aumenta la velocidad y cerca de la velocidad de crucero el par del motor es máximo y por lo tanto el consumo instantáneo de combustible es máximo. Luego, una vez alcanzada la velocidad de crucero, ésta se mantiene durante 520 segundos, es decir, la aceleración es cero, por lo que se reduce el par del motor y en consecuencia descende el consumo de combustible. En la tercera parte del ciclo de conducción la velocidad de crucero es mayor que en la segunda parte y el par del motor necesario para viajar a la velocidad de crucero es mayor, como se ve en la figura 51, por lo que se consume más combustible en esta tercera parte del ciclo de conducción, como se ve en la figura 54. La cantidad total de combustible consumido en la primera, segunda y tercera parte del ciclo de conducción es de 0.865 lt, 2.536 lt y 3.821 lt, respectivamente. La cantidad total de emisiones de CO_2 en la primera, segunda y tercera parte del ciclo de conducción es de 2.250 kg, 6.595 kg y 9.935 kg, respectivamente.

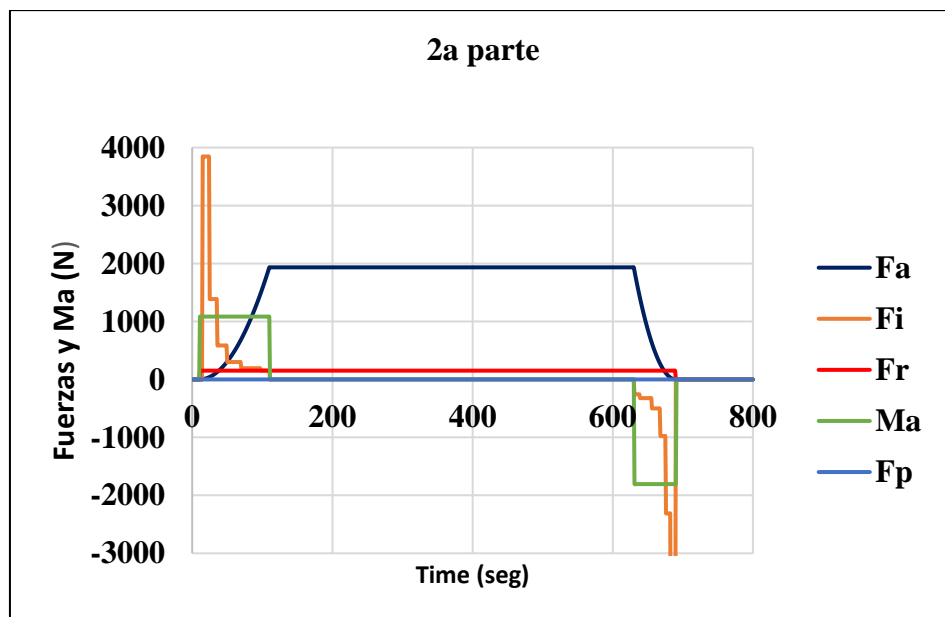


Figure 49. F_a , F_i , F_r , M_a y F_p contra el tiempo en la segunda parte del ciclo de conducción. Motor 200 HP, $M = 4.407$ tons (sin carga), inclinación 0° .

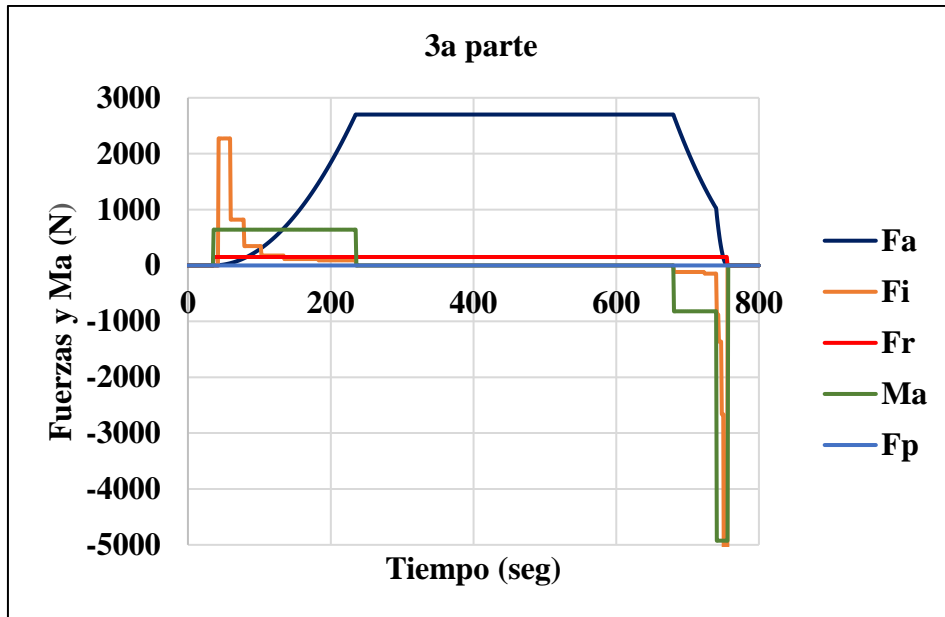


Figure 50. F_a , F_i , F_r , M_a y F_p contra el tiempo para la tercera parte del ciclo de conducción. Motor 200 HP, $M = 4.407$ tons (sin carga), inclinación 0° .

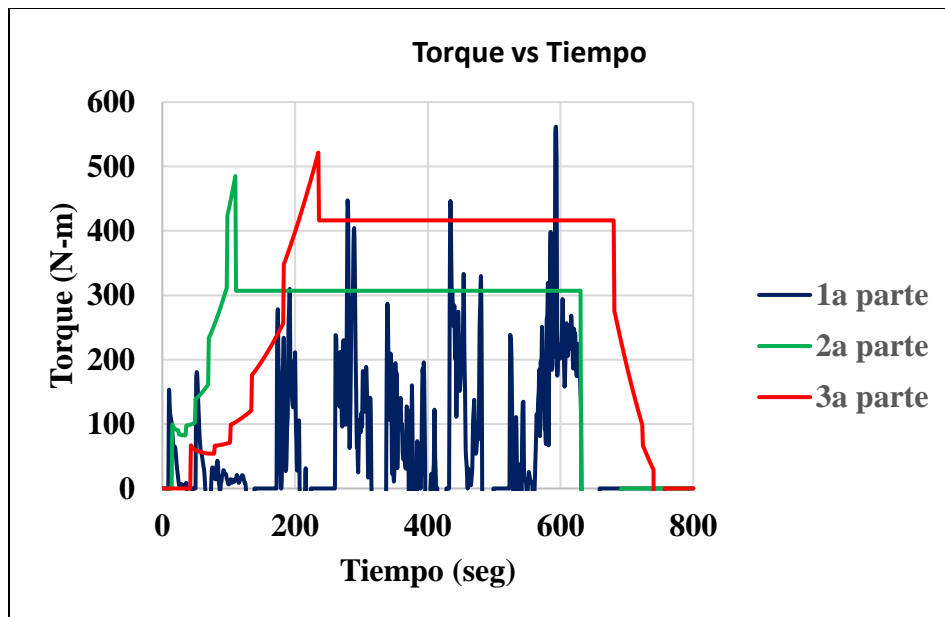


Figura 51. Torque contra el tiempo para las tres partes del ciclo de conducción. Motor 200 HP, $M = 4.407$ tons (sin carga), inclinación 0° .

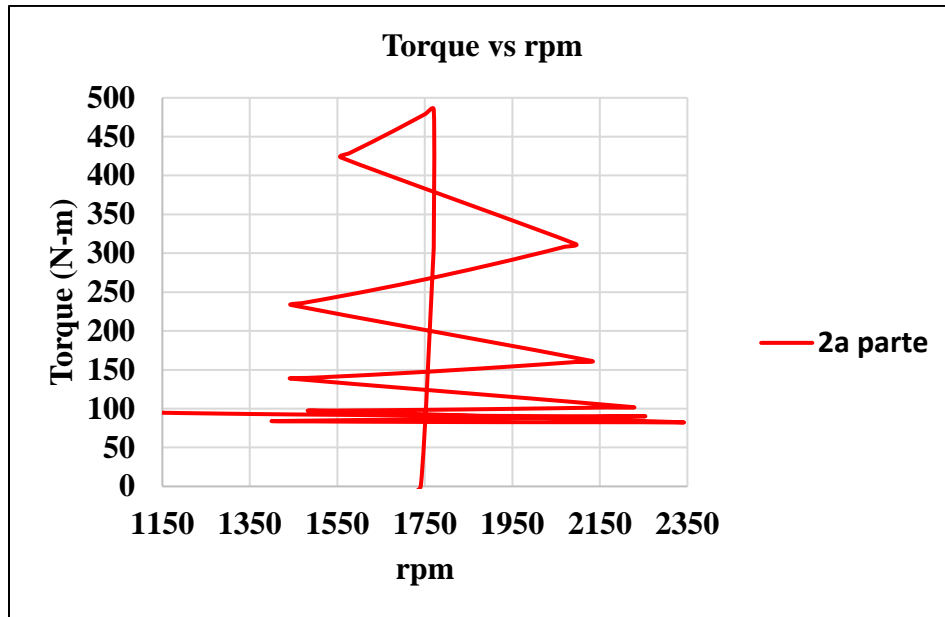


Figura 52. Torque contra las rpm del motor para la segunda parte del ciclo de conducción. Motor 200 HP, $M = 4.407$ tons (sin carga), inclinación 0° .

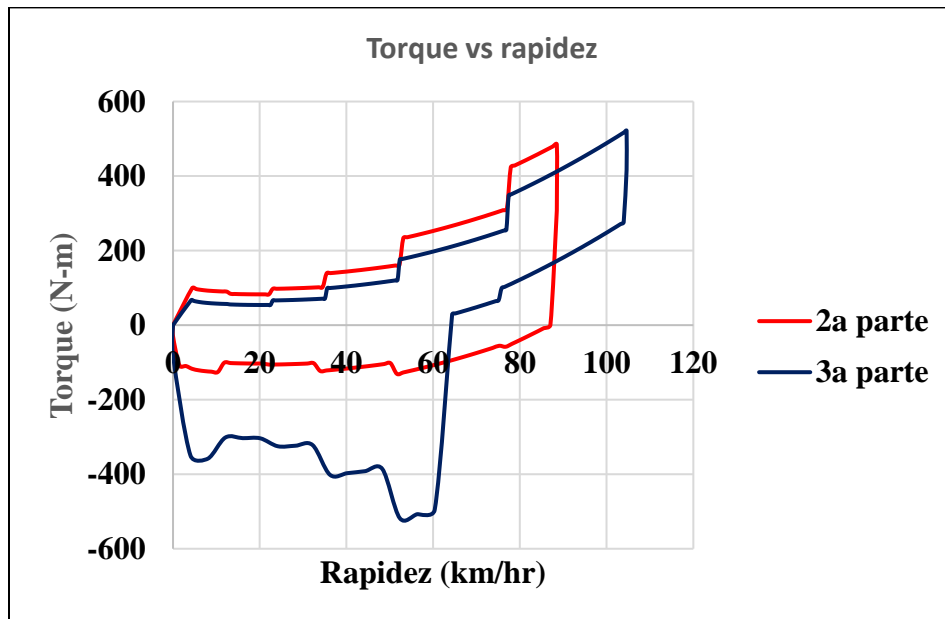


Figura 53. Torque contra la rapidez para la segunda y la tercera parte del ciclo de conducción. Motor 200 HP, $M = 4.407$ tons (sin carga), inclinación 0° .

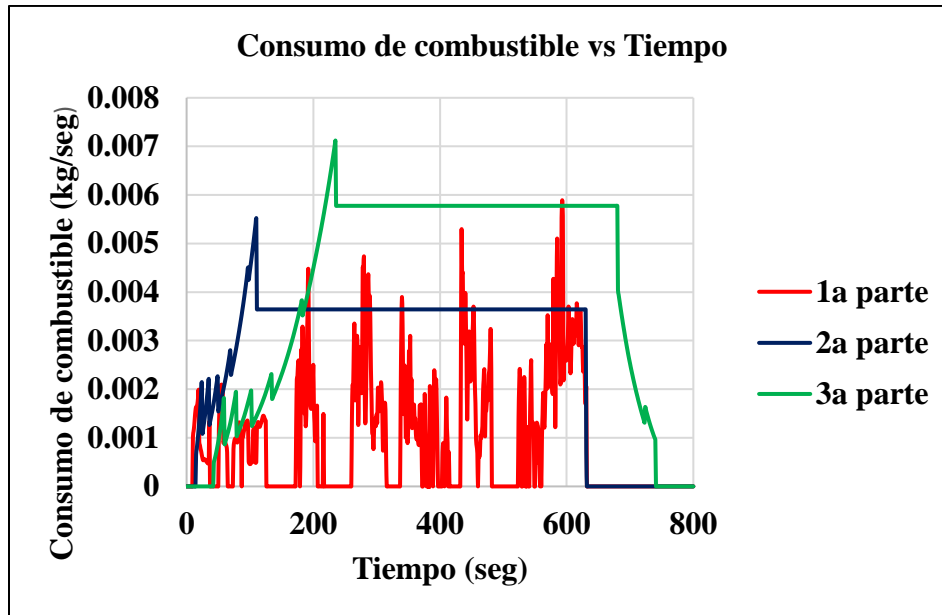


Figura 54. Consumo de combustible (kg/sec) contra el tiempo para las tres partes del ciclo de manejo. Motor 200 HP, $M = 4.407$ tons (sin carga), inclinación 0° .

13.2 Consumo de combustible y emisiones de bióxido de carbono de una camioneta pesada que transporta 2 toneladas de carga y viaja en un camino con pendiente de 6 grados

Para valores grandes de la carga y la pendiente de la carretera el motor no puede proporcionar el par necesario para mover el vehículo a la velocidad programada del ciclo de conducción y por lo tanto la velocidad se reduce al valor máximo que el torque puede sostener. Los resultados de la rapidez para las tres partes del ciclo de conducción se muestran en la figura 55. Las figuras 56, 57 y 58 muestran las variables F_a , F_i , F_r , F_p y Ma . F_p es constante en el tiempo y es la fuerza más grande para las tres partes del ciclo. F_r también tiene el mismo valor para las tres partes del ciclo, pero es menor que F_a y F_p , durante la mayor parte del tiempo. La fuerza aerodinámica aumenta a medida que aumenta la rapidez del vehículo. F_i cambia debido al cambio de engranes en la transmisión que tienen diferentes razones de relación y también diferentes masas de inercia. El cambio de marchas se produce a medida que aumenta o disminuye la velocidad. Ma aumenta cuando aumenta la velocidad y disminuye cuando disminuye la velocidad, y es cero durante el tiempo que la velocidad de cruce se mantiene constante o cuando el vehículo se detiene. La segunda y tercera partes del ciclo de manejo tienen valores muy cercanos en su velocidad de cruce pero la aceleración del vehículo en la segunda parte es mayor antes de alcanzar su velocidad de cruce, como se ve en la figura 55, por lo tanto

el par necesario para mover el vehículo es mayor, como se muestra en la figura 59, y por lo tanto el consumo de combustible es mayor para la segunda parte del ciclo justo antes de alcanzar la velocidad de crucero como se ve en la figura 60.

La cantidad total de combustible consumido en la primera, segunda y tercera parte del ciclo de conducción es de 2.615 lt, 5.016 lt y 5.220 lt, respectivamente. La cantidad total de emisiones de CO_2 en la primera, segunda y tercera parte del ciclo de conducción es de 6.800 kg, 13.041 kg, 13.571 kg, respectivamente.

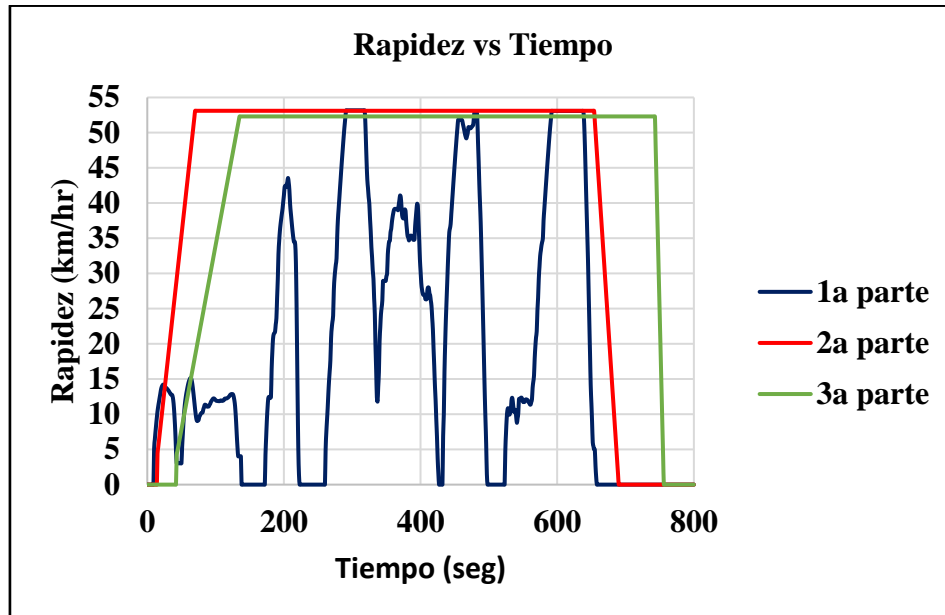


Figura 55. Rapidez contra tiempo para las tres partes del ciclo completo. Motor 200 HP, $M = 6.407$ tons (2 tons de carga), inclinación 6° .

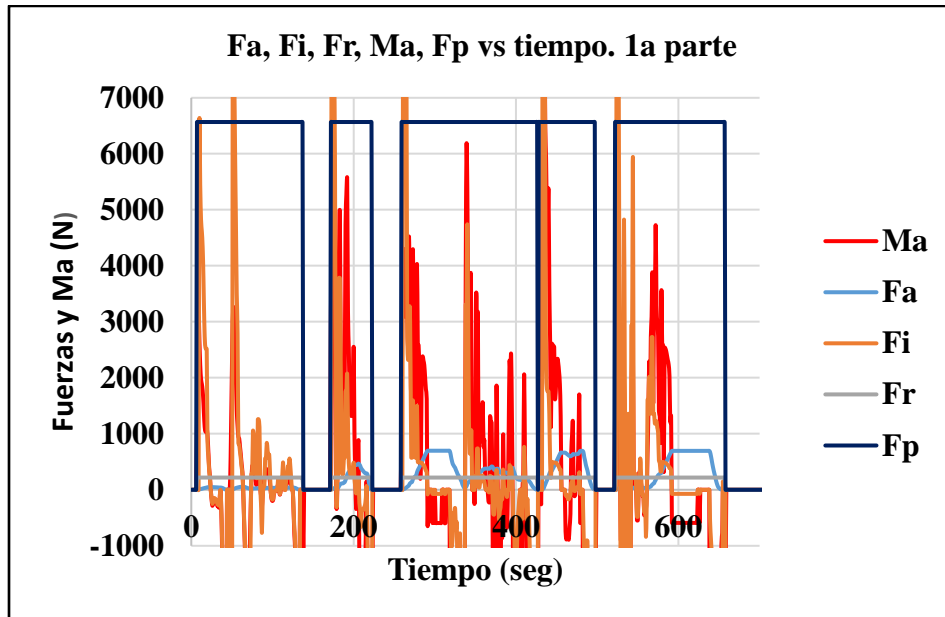


Figura 56. F_a , F_i , F_r , Ma y F_p contra el tiempo para la primera parte del ciclo de manejo. Motor 200 HP, $M = 6.407$ tons (2 tons de carga), inclinación 6° .

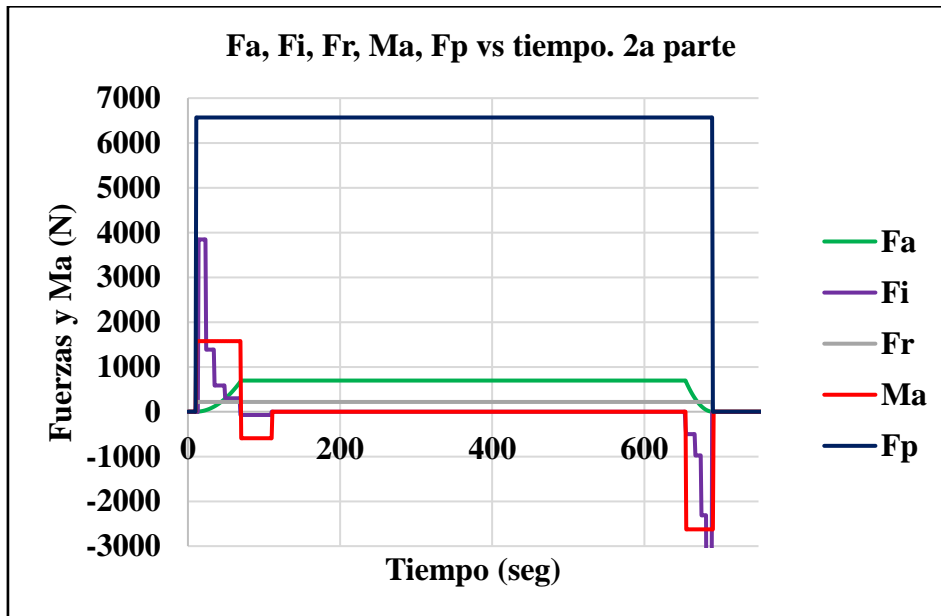


Figura 57. F_a , F_i , F_r , Ma y F_p contra el tiempo para la segunda parte del ciclo de manejo. Motor 200 HP, $M = 6.407$ tons (2 tons de carga), inclinación 6° .

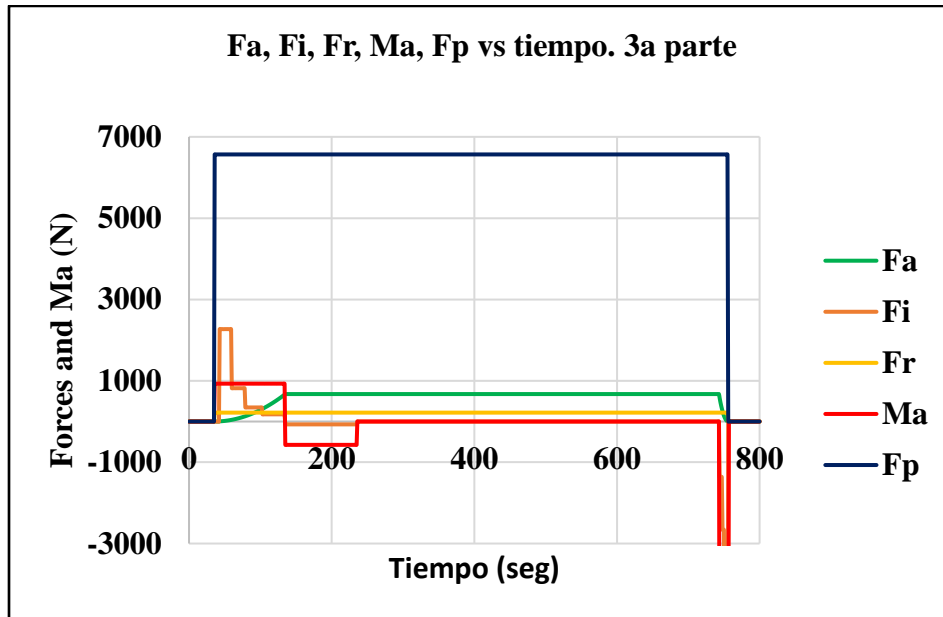


Figura 58. Fuerzas contra el tiempo para la tercera parte del ciclo de manejo. Motor 200 HP, $M = 6.407$ tons (2 tons de carga), inclinación 6° .

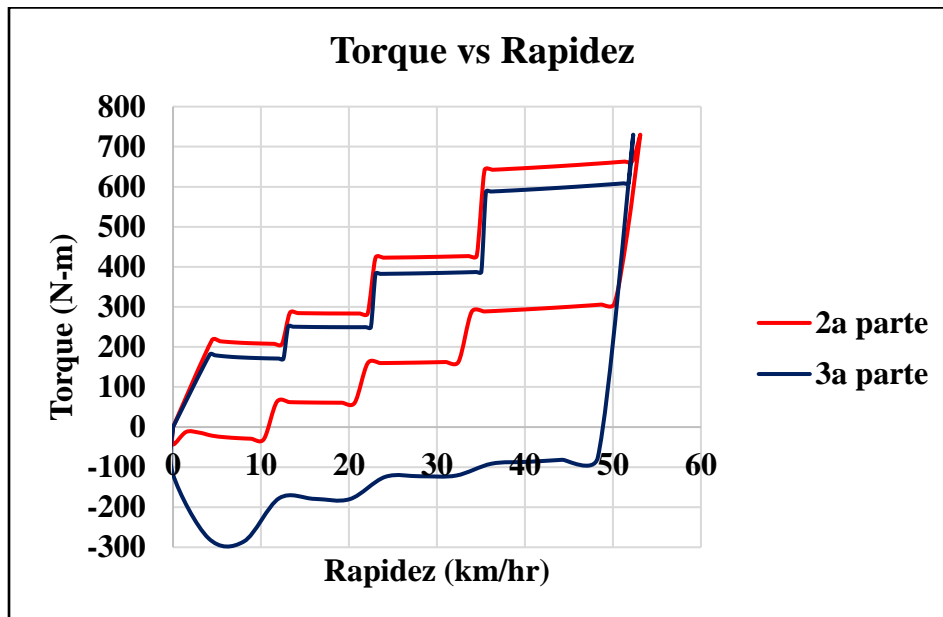


Figura 59. Torque contra la velocidad para la segunda y tercera partes del ciclo de manejo. Motor 200 HP, $M = 6.407$ tons (2 tons de carga), inclinación 6° .

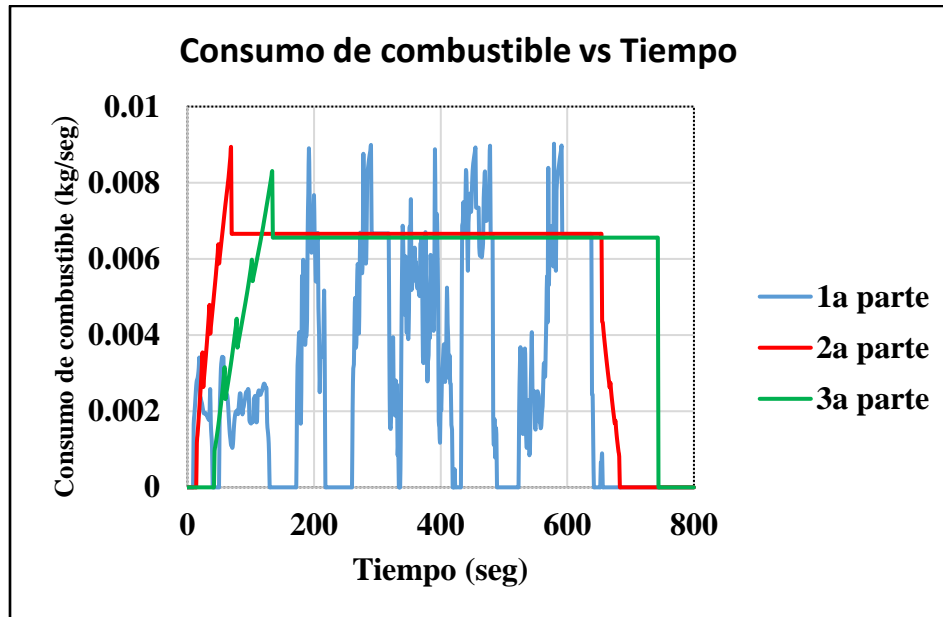


Figura 60. Consumo de combustible en kg/seg contra el tiempo en segundos para las tres partes del ciclo de manejo. Motor 200 HP, $M = 6.407$ tons (2 tons de carga), inclinación 6° .

13.3 Rendimiento de combustible de una camioneta pesada que viaja en un ciclo de manejo con una velocidad crucero de 77 km/hr

Es difícil que un vehículo circule a la velocidad programada del ciclo de conducción cuando está sobrecargado y circula por carreteras con pendientes considerables, porque el motor no puede proporcionar el torque necesario para alcanzar la velocidad máxima del ciclo. Para evaluar las tecnologías del vehículo, una forma podría ser considerar cargas pequeñas y carreteras con pequeñas pendientes porque en esos casos la rapidez del vehículo es cercana a la del ciclo de conducción programado. Sin embargo, en algunos países como México puede ser necesario considerar el desempeño de un vehículo con las cargas más comunes (que no necesariamente son pequeñas) y carreteras con pendientes que modelan la mayoría de las calles y carreteras del país. En este caso, una forma de evaluar el rendimiento de combustible de un vehículo podría ser reducir la velocidad máxima a alcanzar en el ciclo de conducción. En la figura 61 se muestran los resultados para la rapidez del vehículo y en las figuras 62 y 63 el rendimiento de combustible para el caso en el que la rapidez máxima del ciclo de conducción se establece en 77 km/h. Sin embargo, incluso en este caso la rapidez máxima del vehículo alcanzada en los viajes con diferentes cargas y pendientes de las carreteras no es la misma, es decir, la rapidez del vehículo versus el tiempo no es exactamente la misma para todos los casos reportados en las figuras 62 y 63, como puede verse en la figura 61. Se podría realizar una evaluación del rendimiento de combustible y las

emisiones de CO_2 de un vehículo con diferentes cargas y que circula por carreteras con diferentes pendientes calculando el par necesario para mover el vehículo en el ciclo de conducción que se muestra en la figura 61 (para 0 tons y 0 grados), pero no sería apropiado porque el motor del vehículo debe probarse incluyendo el torque máximo y todos los engranes de la transmisión. Otra forma sería utilizar un ciclo de conducción con una rapidez máxima muy pequeña, pero no sería útil.

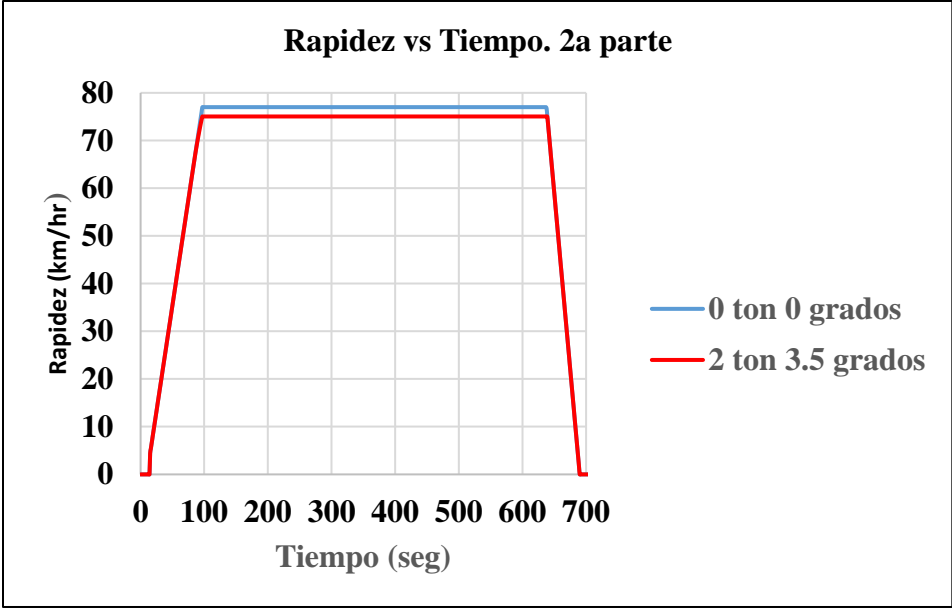


Figura 61. Rapidez contra el tiempo para la segunda parte del ciclo de manejo que tiene una rapidez máxima de 77 km/hr. Motor 200 HP.

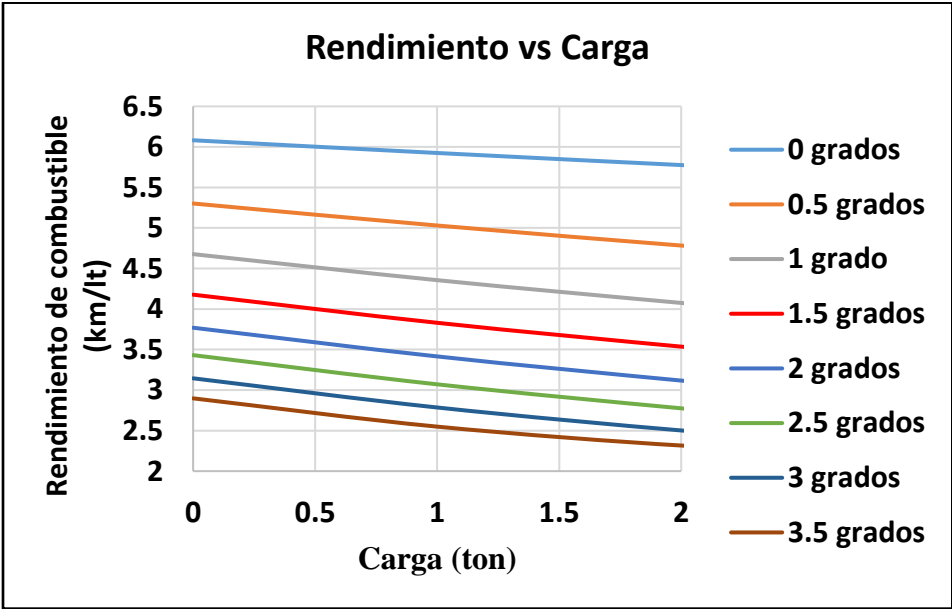


Figura 62. Rendimiento de combustible (km/lt) contra la carga transportada (tons) para el ciclo completo. Rapidez máxima de 77 km/hr. Motor 200 HP.

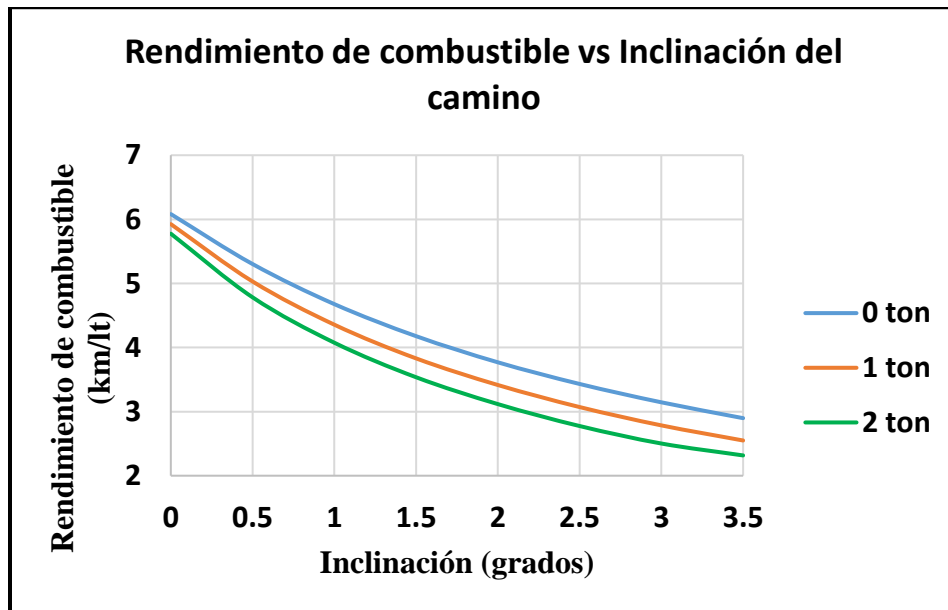


Figura 63. Rendimiento de combustible (km/lt) contra los grados de inclinación del recorrido (grado) para el ciclo de manejo. Rapidez máxima de 77 km/hr. Motor 200 HP.

Reducir la velocidad máxima de los ciclos de conducción para probar un vehículo, como se ha hecho en esta parte, no es conveniente, pues no se utilizan todas las marchas de la transmisión, solo se usan los engranes de las velocidades de 1ª, 2ª, 3ª y 4ª durante el viaje y, por lo tanto, el rendimiento de la caja de cambios no se probaría completamente, lo que es una desventaja. Por lo tanto, es posible que un conjunto diferente de ciclos de conducción sea más apropiado si se pudiera estudiar el comportamiento de los vehículos con cargas considerables y viajando en carreteras empinadas.

13.4 Observaciones

Las nuevas tecnologías para vehículos pesados ya disponibles en el mercado pueden hacer posible que los vehículos que circularán en México consuman menos combustible y emitan menos gases de efecto invernadero. Las nuevas tecnologías consisten en mejores motores, cajas de cambios, ruedas, diferenciales y formas aerodinámicas, entre otras. Una regulación sobre la economía de combustible y las emisiones de gases de efecto invernadero en México exigiría el uso de tecnologías para reducir el consumo de combustible y las emisiones. En UAMmero es posible

sustituir el motor por otro más eficiente. Con otro motor se podría consumir menos combustible para las parejas torque-rpm; o se tendrían que considerar mejores ruedas con coeficientes de fricción más adecuados para reducir la fuerza de fricción, pero al mismo tiempo garantizar la seguridad durante los viajes; o una caja de cambios con un menor momento de inercia y más eficiencia, o un vehículo con una mejor forma aerodinámica y además tecnologías para reducir la fuerza aerodinámica en las carreteras.

UAMmero puede ser una herramienta útil para evaluar el consumo de combustible y las emisiones de CO_2 de las camionetas pesadas ensambladas con diferentes paquetes tecnológicos, lo que es necesario para proponer límites a esas cantidades en una futura norma federal.

CAPÍTULO 14. EFECTO DE LA RAPIDEZ EN EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE, LA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y LAS EMISIONES DE BIÓXIDO DE CARBONO

En este capítulo se estudia el efecto de la rapidez en el consumo de combustible, la eficiencia energética y las emisiones de bióxido de carbono.

14.1 Vehículos que se mueven con rapidez constante

En esta sección se considera que el vehículo se mueve siempre con una velocidad constante puesto que nos concentramos en el efecto de la rapidez máxima en vías y calles de la Ciudad de México en el consumo de diésel y las emisiones de CO₂. La motivación de esta parte del estudio fue un nuevo reglamento de tránsito que estaba en efecto en el año 2016.

Se presentan el consumo de combustible y las emisiones de CO₂ para modelos de un tractocamión con un motor de 455 HP y una camioneta pesada con un motor de 200 HP, cuando cambiamos la rapidez a la que se mueven esos vehículos [29]. También el consumo de combustible cuando cambiamos la pendiente de la calle o carretera a la que se mueve el vehículo. Además del costo del combustible por el recorrido cuando varía la carga transportada. Se considera que el tractocamión tiene una masa sin carga de 12.978 tons y la camioneta pesada de 4.407 tons.

En la Figura 64 se muestran en el eje de las ordenadas, los resultados del consumo de combustible en litros por kilómetro versus la máxima rapidez en una vía en el eje de las abscisas, para un tractocamión con tres ejes en el tracto y dos ejes en el remolque o caja y también para una camioneta pesada.

Para los resultados de la figura 64 se consideró una inclinación del camino de 0 grados y que los vehículos no llevaban carga.

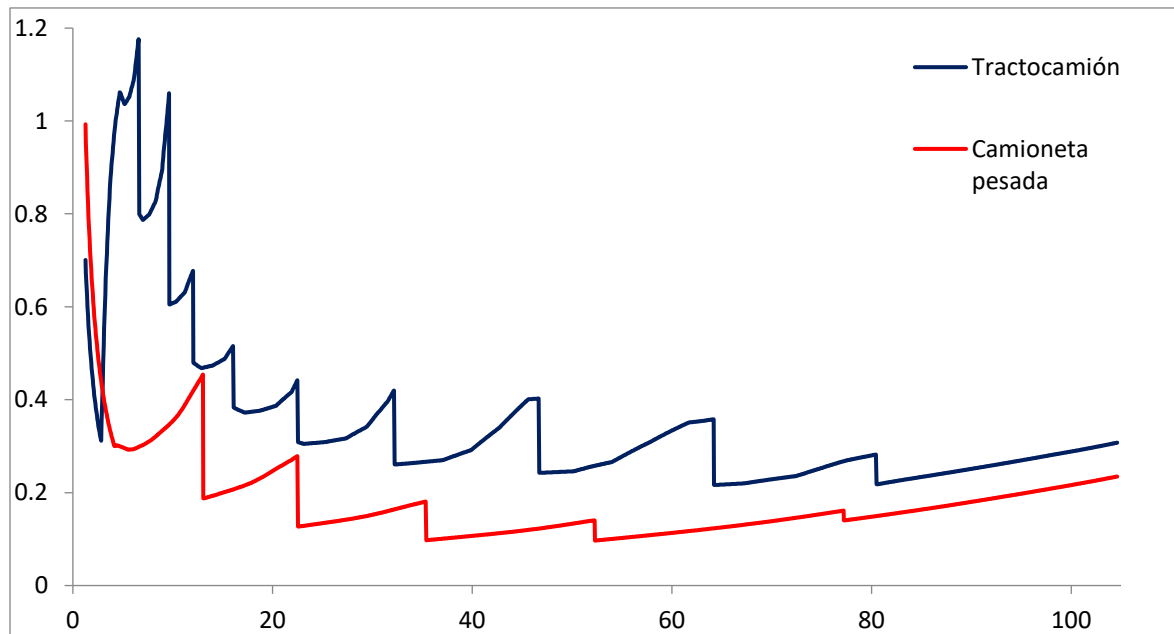


Figura 64. Consumo de combustible en litros por kilómetro (eje de las ordenadas) versus diferentes valores de rapidez constante del vehículo (eje de las abscisas). inclinación 0°. Motor 200 HP de la camioneta, motor 455 HP para el tractocamión. $M = 4.407$ tons de la camioneta, $M = 12.978$ tons del tractocamión. Sin carga.

Los resultados de la figura 64 muestran que el consumo de combustible y las emisiones de CO₂ no necesariamente aumentan cuando la rapidez máxima de los vehículos disminuye de 105 km/hr a 40 km/hr. Esto se debe a que cuando se disminuye la rapidez máxima se cambia de engrane en la transmisión y por lo tanto las rpm del motor cambian y pueden situarse en regiones de mínimos de consumo del combustible. O sea que los vehículos pesados no contaminan más cuando se reduce la rapidez máxima de 105 km/hr a 40 km/hr, por lo tanto el nuevo reglamento usado en el año 2016, no causaba un incremento en el consumo de combustible en esos vehículos al mandar una menor rapidez máxima. Tampoco aumentaban las emisiones de CO₂ porque estas son directamente proporcionales a la cantidad de combustible consumido.

El mayor consumo de combustible se obtiene para máximos de la rapidez menores a 20 km/hr, es decir las emisiones de CO₂ son mayores cuando se viaja cerca de escuelas, hospitales o albergues; aunque la disminución en los máximos de rapidez se realizó con el fin de evitar accidentes y no para disminuir la contaminación en algunos lugares.

En la figura 65, se presentan resultados para el costo del combustible en pesos por tonelada por kilómetro para diferentes valores de la máxima rapidez permitida, carga variable y pendiente igual a cero.

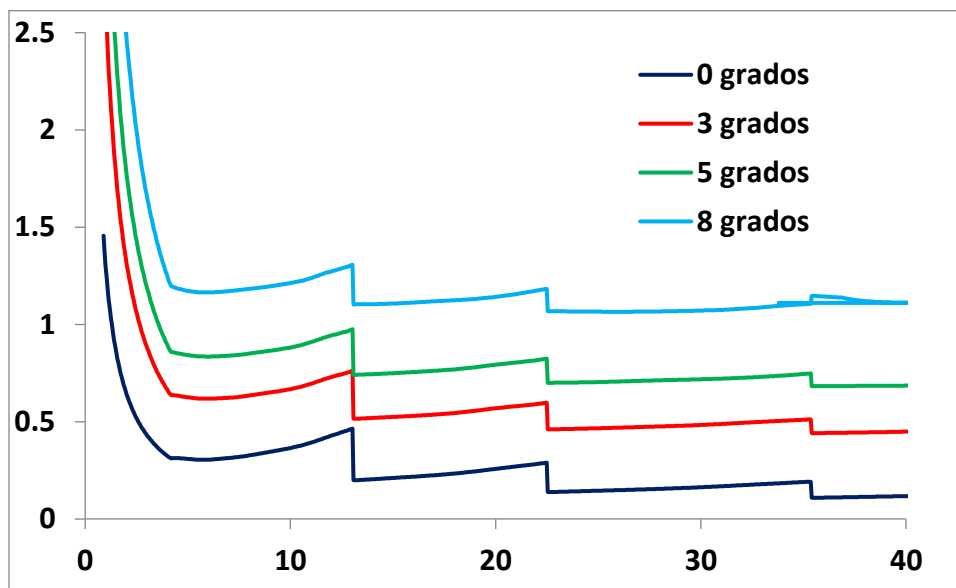


Figura 65. Costo en pesos por tonelada transportada por kilómetro recorrido (en el eje de las ordenadas) para diferentes valores de rapidez constante del vehículo en

km/hr (en el eje de las abscisas), pendiente igual a cero y carga variable. Los resultados corresponden a una camioneta pesada.

Los resultados de la figura 65 muestran el por qué los transportistas sobrecargan sus vehículos y es porque sale mucho más barato transportar la carga. Sin embargo al hacerlo dañan la infraestructura carretera del país. Los resultados de la figura 65 corresponden al caso de una camioneta pesada.

En la figura 66 se presentan los resultados para el consumo de combustible de una camioneta pesada para diferentes valores de la rapidez máxima permitida en la vialidad para una carga igual 0 toneladas y diferentes valores de la pendiente de la vía.

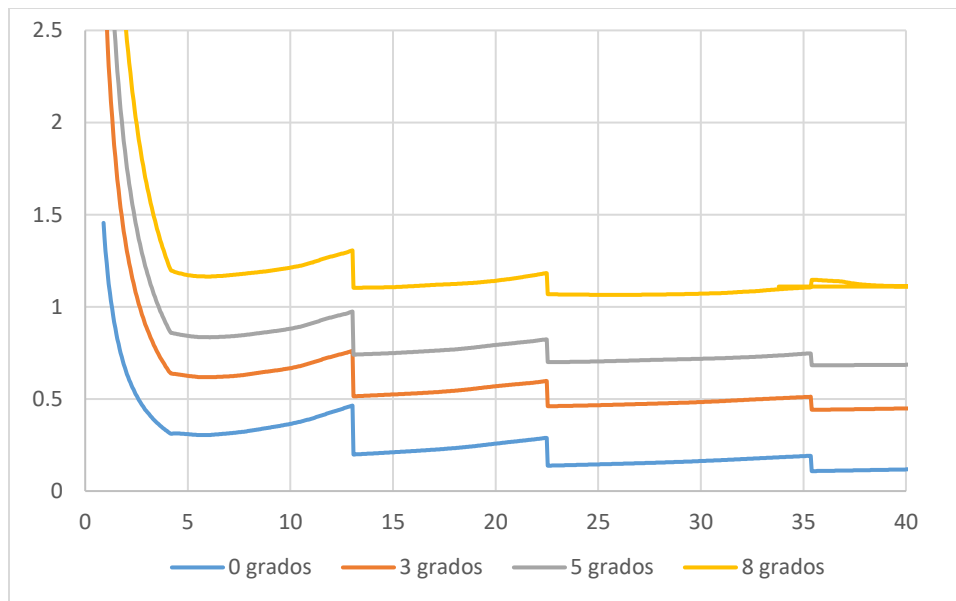


Figura 66. Consumo de combustible en litros por kilómetro (en el eje de las ordenadas) para diferentes valores de la máxima rapidez (en el eje de las abscisas) y valores diferentes valores de la pendiente del camino. Carga igual a 0 toneladas. Los resultados corresponden a una camioneta pesada.

El consumo de combustible de combustible aumenta mucho cuando la inclinación de la calle o carretera aumenta apreciablemente, como en los casos estudiados.

14.2 Rendimiento de combustible contra la rapidez para un tractocamión

En esta sección se considera un tractocamión con una masa total $M=31.978$ tons y con un motor de 455 HP.

La figura 67 muestra los resultados del rendimiento de combustible contra la rapidez del vehículo para las partes 2 y 3 del ciclo de conducción y para los casos de velocidad constante (para valores constantes de la rapidez desde 4 hasta 104.6074 Km/hr) [42]. Para valores de la rapidez inferiores a 35 km/h, el consumo de combustible aumenta (en promedio) a medida que el vehículo se mueve con mayor

rapidez, con algunos saltos bruscos cuando hay un cambio de engrane en el caso de las dos partes del ciclo de conducción, y cuando se utilizan diferentes engranes para distintos valores de la rapidez constante en el caso de que el vehículo circule a velocidad constante durante todo el viaje. El mayor rendimiento de combustible se alcanza para la rapidez de 64.33 km/hr y es de 3.71 km/litro; cuando el vehículo viaja a rapidez constante y por lo tanto no hay aceleración del vehículo y el torque necesario para mover el vehículo es menor. El rendimiento de combustible para el vehículo que se mueve en la parte 3 del ciclo de conducción es mayor que para el caso de la parte 2 porque la aceleración en la parte 3 del ciclo de conducción es menor que para la parte 2. Los resultados de las partes 2 y 3 muestran que la economía de combustible depende de la aceleración del vehículo y comparando estos dos casos, se concluye que cuando la aceleración es menor el rendimiento de combustible es mayor. Los resultados de las partes 2 y 3 del ciclo de conducción muestran que después de que el vehículo deja de acelerar, cuando el vehículo viaja a velocidad constante, el rendimiento de combustible aumenta considerablemente y que el rendimiento de combustible para el caso de la parte 2 del ciclo de conducción es mayor que para el caso de la parte 3 del ciclo de conducción. Este resultado se debe a que la rapidez constante final en la parte 3 del ciclo de conducción (104.6074 km/hr) es mayor que en la parte 2 (86.6081 km/hr) y por lo tanto F_a , la fuerza aerodinámica es mayor y entonces el par necesario para mover el vehículo es mayor, lo que conduce a un mayor consumo de combustible.

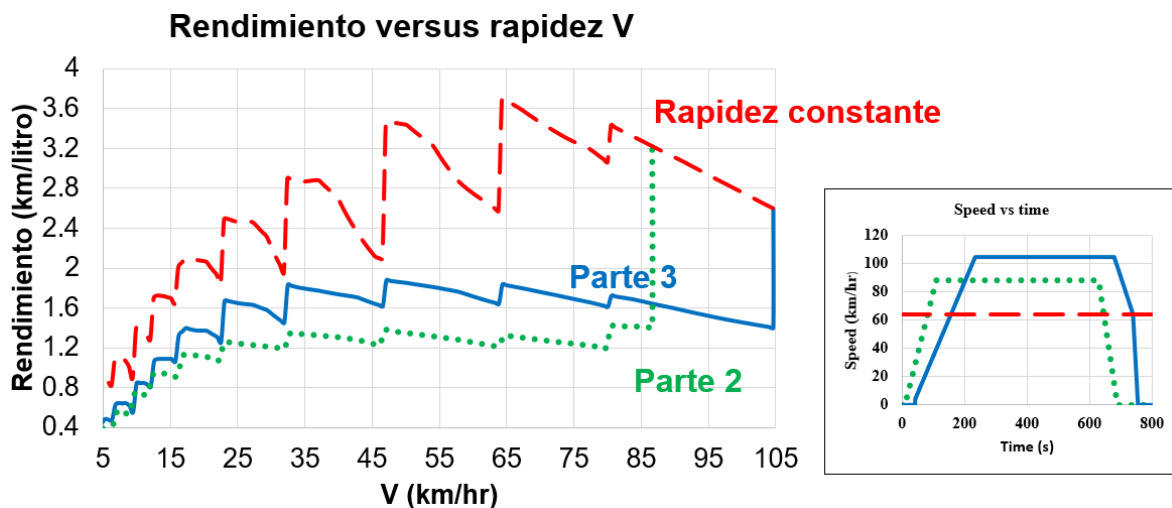


Figura 67. Rendimiento de combustible (km/litro) versus la rapidez del vehículo para el vehículo pesado de 455 HP que se desplaza en las partes 2 y 3 del ciclo de conducción y para los casos en que se mueve con una rapidez constante. Carga 17236 kg.

Nótese que cuando la rapidez es igual a 86.6081 km/hr el rendimiento de combustible de la parte 2 del ciclo de manejo y el de velocidad constante son los mismos (e iguales a 3.225 km/litro) como debe ser, porque la rapidez tiene el mismo valor en ambos casos (y es constante para ese valor de la rapidez en la segunda

parte del ciclo de conducción). Así mismo para la parte 3 del ciclo de conducción y el caso de velocidad constante a la rapidez de 104,6074 en la que ambos tienen un rendimiento de combustible de 2.599 km/litro. Definitivamente viajar a velocidad constante aumenta el rendimiento de combustible y la mejor rapidez constante en este caso es de 64.44 km/hr.

14.3 Observaciones

Para disminuir la contaminación es necesario contar con políticas públicas apropiadas que impulsen el uso de mejores tecnologías en el autotransporte, mejores combustibles, impulsar el transporte público, el crecimiento ordenado de las ciudades, disminuir las emisiones de la industria y una mejor educación ambiental. Es necesario construir herramientas apropiadas para estudiar las variables importantes en el consumo de combustible y las emisiones contaminantes. Al usar herramientas como UAMmero, se demuestra que no necesariamente al disminuir la máxima rapidez en recorridos por vías primarias aumenta el consumo de combustible y por lo tanto la contaminación por CO₂. Los resultados muestran que existen máximos y mínimos en el consumo de combustible conforme cambia la máxima rapidez permitida en las calles o vías rápidas, esto sugiere que los conductores de los vehículos debieran hacer un esfuerzo por conocer esos resultados o sea conocer más los tractocamiones o camionetas que ellos operan.

CAPÍTULO 15. MODELO PARA EVALUAR EL COSTO BENEFICIO DE ADQUIRIR TRACTOCAMIONES EFICIENTES

En este capítulo se explica un modelo de costo beneficio de la adquisición de vehículos más eficientes.

15.1. Modelo del costo beneficio de un aumento en la eficiencia energética de un tractocamión

Como un vehículo eficiente cuesta más, consideramos que el incremento en el costo de los vehículos pesados aumenta de acuerdo al aumento en su eficiencia energética (disminución del consumo de combustible por kilómetro) como se muestra en la ecuación 23 [43]. En esa ecuación P_c , es el precio del vehículo con consumo de combustible c . El consumo de combustible c , se proporciona en litros/km cuando se transporta una carga de 20 tons. P_{c0} es el precio del vehículo que tiene el mayor consumo de combustible c_0 , que es el consumo de referencia (el consumo del vehículo más ineficiente, energéticamente hablando) cuando el vehículo transporta una carga de 20 tons. c_0 sería el consumo de un vehículo pesado sin que existiera una norma de combustible y c sería el consumo que exigiría una norma de consumo de combustible. Suponemos en este trabajo que la norma establecerá que las pruebas de consumo de combustible de los tractocamiones se realicen con una carga de 20 tons, si no es así los cálculos en el futuro se tendrían que hacer con los datos que se requieran por la norma. En este trabajo, el consumo más ineficiente (más grande) de un vehículo nuevo se toma como 0.3 litros/km, o sea un rendimiento de combustible de 3.333 kilómetros por litro cuando transporta una carga de 20 tons. Usamos supuestos para una norma que todavía no está diseñada pero que antes de implementarla se deben tener las herramientas para calcular el consumo de combustible y el costo beneficio de su implantación.

El precio de los vehículos depende del paquete tecnológico (o sea las partes del vehículo, que son motor, transmisión, llantas, diferencial, etcétera) que se use para lograr disminuir el consumo de combustible. Los paquetes tecnológicos pueden ser diferentes para lograr el mismo consumo, aunque con precios distintos. Se considera que el precio de toda la unidad de carga (tracto (parte motriz) más el remolque (en el que se deposita la carga) al que denominamos tractocamión) es de \$2800000.00 pesos para el vehículo con la eficiencia más baja, o sea el del consumo de combustible más alto que es c_0 . Todos los precios de los vehículos con diferentes consumos se estiman para el año en el que suponemos entraría en operación una norma, que en este trabajo suponemos que es en el año de 2021, únicamente para mostrar cómo funciona el modelo y porque es más fácil suponer los costos de los tractocamiones y el precio del diésel.

$$P_c = P_{c0} + \mu * P_{c0} * \left(\frac{c_0 - c}{c_0}\right) + \alpha * P_{c0} * \left(\frac{c_0 - c}{c_0}\right)^\beta \quad (23)$$

En la Ecuación 23 los dos últimos términos representan el incremento en el costo por la adquisición de un vehículo más eficiente que el que tiene un consumo de c_0 . En la ecuación 23, las variables μ , a y β son parámetros. En este trabajo se considera $\mu = \frac{1}{2}$, es decir que para valores de consumo c cercanos a c_0 el aumento en el precio del vehículo más eficiente será la mitad de la disminución relativa del consumo. Si el consumo relativo disminuye en 0.06 (6 por ciento) el incremento en el precio del vehículo será aproximadamente de $(0.06/2) * P_{c_0}$, o sea como del 3% del valor de P_{c_0} . Lo anterior es consistente con la relación de los precios de los vehículos pesados con sus consumos de combustible en la norma de Estados Unidos, en la que se tiene que si el consumo de combustible disminuye en un 13% el precio del vehículo se incrementa en alrededor del 6% [6]. Aparte del término lineal agregamos en la ecuación 19 otro término con los parámetros $a = 500$ y $\beta = 6$ para modelar que cuando la reducción del consumo de combustible es muy grande el precio aumenta más rápidamente. En todos los cálculos de esta sección, el consumo de combustible de los tractocamiones se considera para una carga de 20 tons.

Se considera que el precio del litro del combustible (diésel) en el año 2021 ($t=0$) es de \$20.50 pesos. Consideramos un aumento del precio del litro del diésel después del año 2021 solamente de acuerdo a la inflación anual, que se considera de 3.4% cada año.

Los cálculos del VPN son para once tractocamiones que se adquieren en el año 2021, con consumos desde c_0 (0.3 litros/km) hasta 0.225 litros/km con diferencias en sus consumos de (0.0075 litros/km). Se realiza el cálculo del VPN para varios años de uso de los once vehículos en intervalos de 5 años, comenzando desde el año 2021. Se supone que conforme los vehículos se hacen más viejos aumentan su consumo de combustible en un 0.1992% cada año (o sea que pierden eficiencia energética). Se hace la consideración de que un vehículo nuevo recorre 50000 kilómetros por año en su primer año de uso (en el año 2021), pero que cada año posterior disminuye el kilometraje recorrido en 1000 kilómetros cada año; o sea que conforme el vehículo se va haciendo viejo, se le usa menos.

Para evaluar el costo-beneficio de la adquisición de un tractocamión, con consumo de combustible c , calculamos el Valor Presente Neto (VPN_c), como se muestra en la ecuación 24 [43], suponiendo que la adquisición del vehículo eficiente se realiza en el año 2021. El VPN_c se calcula para varios años, a 5, 10, 15, 20 y 25 años.

$$VPN_c = \sum_{t=2021}^t \left[\frac{(\text{Consumo diésel}_{c_0}(t) - \text{Consumo diésel}_c(t)) * P_{diésel}(t)}{(1+r)^{(t-2021)}} \right] - (P_c - P_{c_0}) \quad (24)$$

Donde $\text{Consumo diésel}_{c_0}(t)$ es el consumo de diésel anual durante el año t del vehículo con consumo c_0 . $\text{Consumo diésel}_c(t)$ es el consumo de diésel anual en el año t del vehículo más eficiente que tiene un consumo de c . $P_{diésel}(t)$, es el precio promedio de un litro de diésel durante el año t . En la ecuación 20, r es la tasa de descuento, que suponemos del 10%, o sea de 0.10.

El consumo de diésel en litros para el vehículo con consumo de combustible inicial c , durante el año t se evalúa como se indica en la ecuación 25.

$$\text{Consumo diésel}_c(t) = [\text{kilometraje en 2021} - 1000(t - 2021)]\text{km} * [c * (1 + 0.001992 * (t - 2021))] \quad (25)$$

De la misma manera el consumo de diésel en litros para el vehículo con consumo de combustible inicial c_0 , durante el año t se evalúa como se indica en la ecuación 26.

$$\text{Consumo diésel}_{c_0}(t) = [\text{kilometraje en 2021} - 1000(t - 2021)]\text{km} * [c_0 * (1 + 0.001992 * (t - 2021))] \quad (26)$$

En la tabla 2, se listan todos los parámetros que se usan para el cálculo del VPN_c , para un solo vehículo con consumo de combustible c .

Tabla 2. Variables y valores usados para el cálculo del Valor Presente Neto de un solo vehículo con un consumo de combustible inicial c_0 (año 2021).

Variable	Valor	Variable	Valor
Precio inicial del diésel	\$20.5	c mínimo (litros/km)	0.225
Inflación	3.4%	Aumento de consumo anual del vehículo (litros/km)	0.1992%
Precio del tractocamión con, P_{c_0}	\$ 2800000.00	Kilometraje en 2021 (km)	50000
μ	0.5	Disminución anual del kilometraje (km)	1000
α	500	Año de inicio del VPN	2021
β	6	Tasa de descuento	10%
c_0 (litros/km)	0.3		

15.2. Resultados del Valor Presente Neto para un tractocamión en varios años

Usando los parámetros de la tabla 2 se obtienen los resultados que se muestran en la tabla 3 y en la figura 68 para los once tractocamiones que tienen diferentes consumos de combustible (primera columna) en el año 2021 comenzando por el

que tiene un consumo de 0.3 litros/km (3.33 km/litro) hasta llegar al que consume 0.225 litros/km por combustible (4.44 km/litro). La diferencia en consumo de 0.3 litros/km a 0.225 litros/km es de 25%. El precio del tractocamión en pesos (columna 2) depende de su disminución en el consumo de diésel. En la tercera columna se muestra el incremento en el precio del tractocamión conforme disminuye el consumo de diésel (aumenta su eficiencia energética). La cuarta columna muestra el gasto en pesos del consumo de combustible en 5 años para los tractocamiones. En la quinta columna se muestra el ahorro de combustible en los 5 años para cada tractocamión. Finalmente en la última columna se muestra el Valor Presente Neto para cada vehículo en 5 años del uso del vehículo. Como se muestra en la tabla 3, el VPN es negativo para los tractocamiones más eficientes, porque son más caros.

Tabla 3. Consumo de combustible y precios de los tractocamiones. El gasto por el consumo de combustible, el ahorro de combustible y el Valor Presente Neto se calculan para 5 años, del año 2021 al año 2025.

Consumo	Precio camión	Incremento en precio	5 años		
			Gasto Diésel	Ahorro Total	VPN
0.3	\$2,800,000.00	\$0.00	\$1,545,381.88	\$0.00	\$0.00
0.2925	\$2,835,000.34	\$35,000.34	\$1,506,747.34	\$38,634.55	-\$2,869.38
0.285	\$2,870,021.88	\$70,021.88	\$1,468,112.79	\$77,269.09	-\$5,759.96
0.2775	\$2,905,249.17	\$105,249.17	\$1,429,478.24	\$115,903.64	-\$8,856.30
0.27	\$2,941,400.00	\$141,400.00	\$1,390,843.70	\$154,538.19	-\$12,876.17
0.2625	\$2,980,340.58	\$180,340.58	\$1,352,209.15	\$193,172.74	-\$19,685.79
0.255	\$3,025,946.88	\$225,946.88	\$1,313,574.60	\$231,807.28	-\$33,161.13
0.2475	\$3,085,212.06	\$285,212.06	\$1,274,940.05	\$270,441.83	-\$60,295.35
0.24	\$3,169,600.00	\$369,600.00	\$1,236,305.51	\$309,076.38	- \$112,552.34
0.2325	\$3,296,644.87	\$496,644.87	\$1,197,670.96	\$347,710.92	- \$207,466.25
0.225	\$3,491,796.88	\$691,796.88	\$1,159,036.41	\$386,345.47	- \$370,487.29

En la figura 68 se puede observar que a los 5 años el ahorro total por el diésel es mayor que el incremento en el costo del tractocamión para todos los vehículos más eficientes, excepto los que tienen consumos de 0.24, 0.2325 y 0.225 litros/km.

Si se realiza el cálculo del VPN a 10 años resulta ser positivo para todos los primeros nueve tractocamiones, como se muestra en la figura 69, debido a que el ahorro de combustible es más grande. A 15 años el VPN es positivo para los diez primeros tractocamiones. Para 20 años, el VPN es positivo para todos los once tractocamiones considerados.

Si se considera que los vehículos en lugar de recorrer 50000 kilómetros anuales en el año 2021 recorren un kilometraje de 70000 kilómetros, los ahorros en el consumo de combustible serán mayores por el mayor kilometraje que recorren en los años siguientes y por lo tanto el VPN será mayor, como se muestra en la figura 70. En un uso del vehículo a 5 años el VPN es cero o positivo para todos los tractocamiones excepto los que tienen consumos de 0.24, 0.2325 y 0.225 litros/km, pero el VPN es positivo aún para esos tractocamiones cuando se consideran usos de los tractocamiones de 10 o más años. Esto se debe a que se consume más combustible al tener mayores kilometrajes y por lo tanto los vehículos más eficientes serán más rentables para el precio de combustible considerado en la tabla 2.

Si se consideran todos los parámetros en la tabla 2 y solamente se aumenta el precio del diésel del año 2021 de \$20.5 pesos a \$24 pesos el VPN aumenta, como se muestra en la figura 71. En este caso a partir de un consumo de 0.2475 litros/km el VPN es negativo pero a 10 años el VPN es positivo para los once valores del consumo de combustible considerados. O sea que un vehículo eficiente es una mejor inversión cuando aumentan los precios de los combustibles. Si el precio del diésel es muy bajo los vehículos eficientes no son una muy buena inversión; por ejemplo, con los parámetros de la Tabla 2 y solamente considerando un precio del diésel de 10 pesos, el VPN es negativo para todos los tractocamiones para 5, 10 y 15 años. Para 20 años el VPN solamente es positivo para aquellos que tienen un consumo de 0.3, 0.2925, 0.285, 0.2775, 0.27, 0.2625 y 0.255 litros/km.

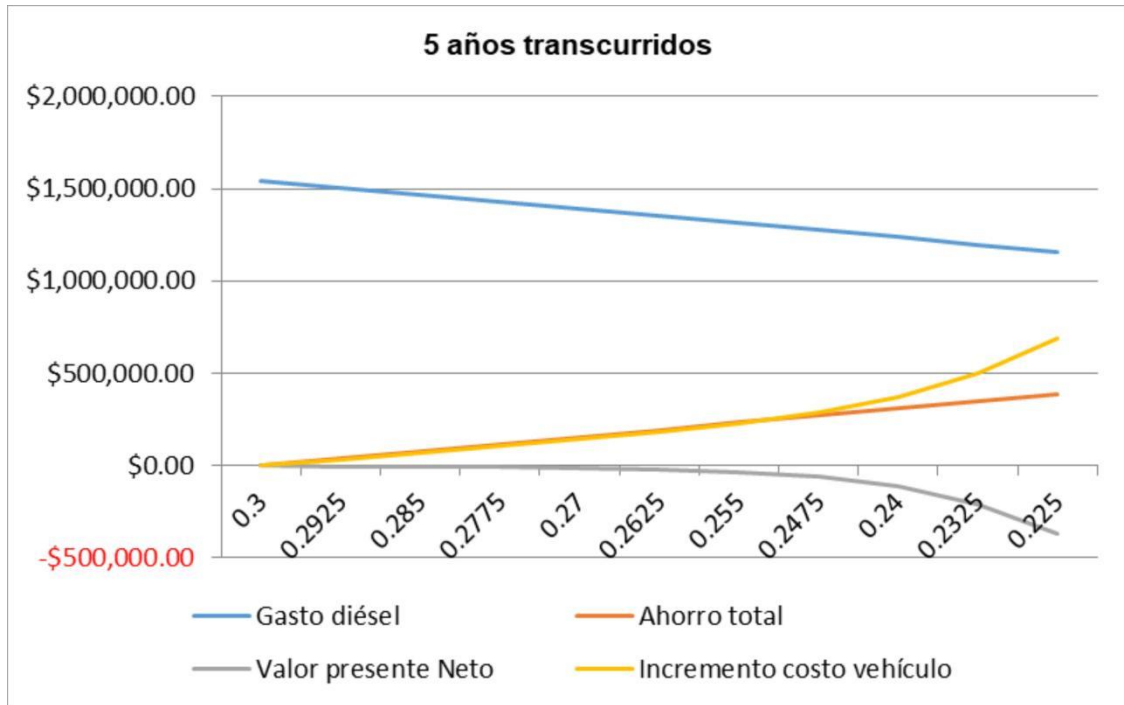


Figura 68. Gráfica con los resultados de la tabla 3.

Junto con la herramienta para el cálculo del consumo de combustible de los vehículos pesados debe tenerse otra para evaluar el costo beneficio de obtener vehículos más eficientes que es lo que se presenta en este capítulo. También se ha desarrollado una más para evaluar el costo-beneficio de la introducción de toda una flota de miles de vehículos pesados al parque vehicular, lo que se reportará en alguna publicación.

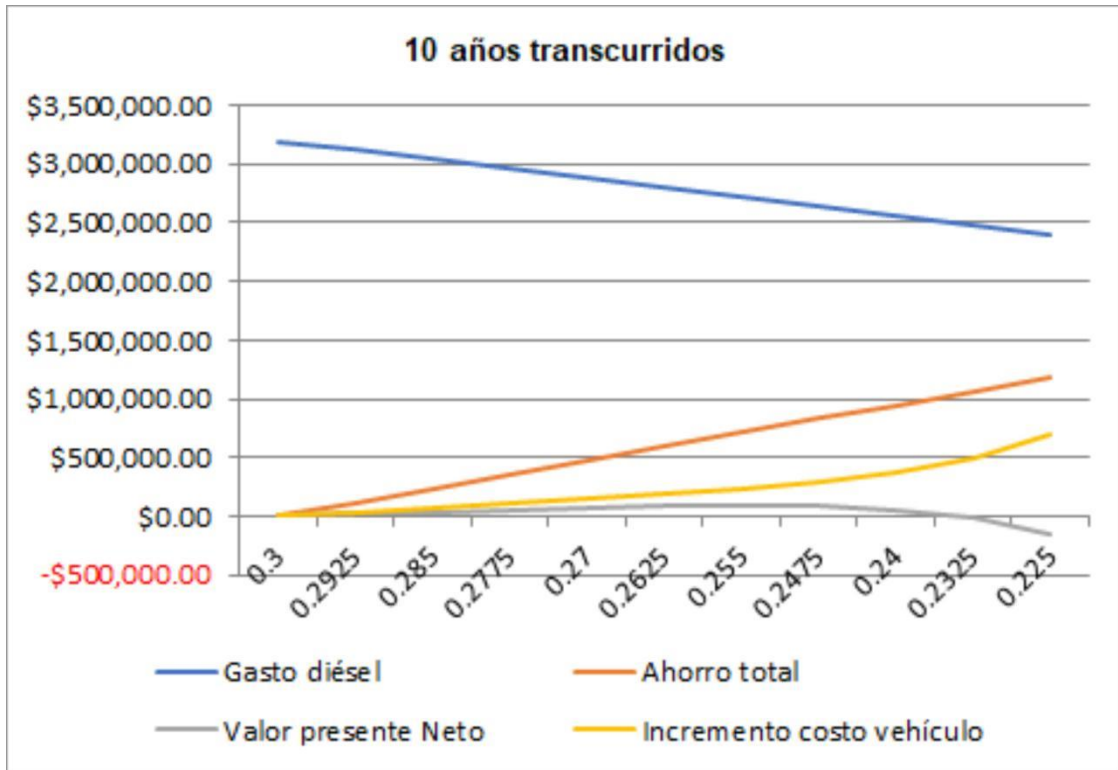


Figura 69. Resultados cuando se considera un uso del tractocamión de 10 años.

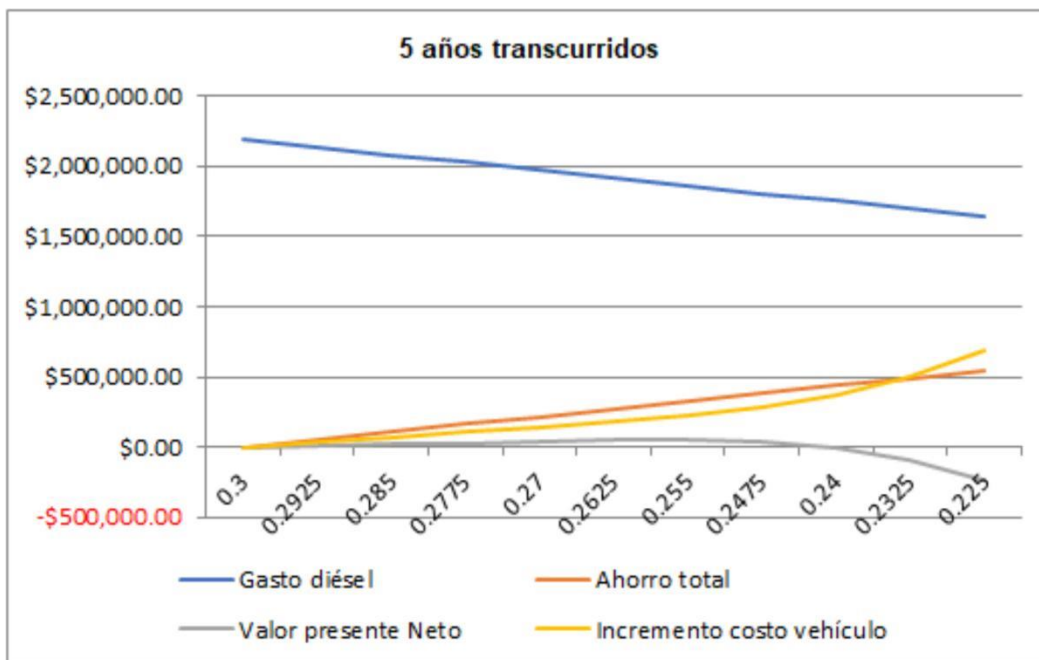


Figura 70. Gráfica con los resultados de aumentar el kilometraje en el año 2021 de 50000 a 70000 kilómetros por año.

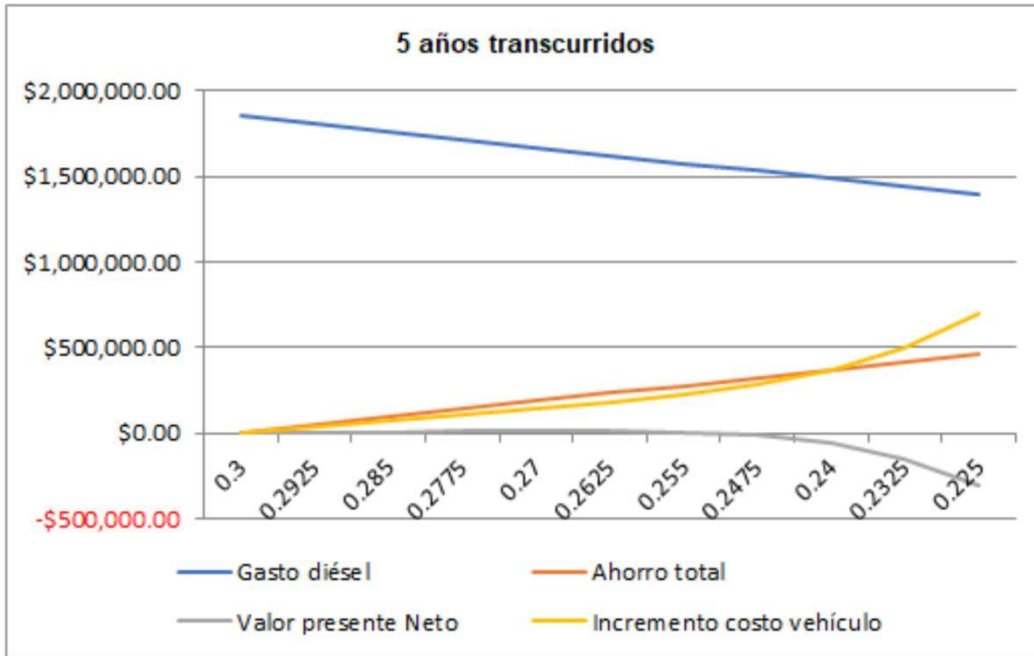


Figura 71. VPN para un precio del diésel de 24 pesos por litro en el año 2021.

15.3 Observaciones

Se ha mostrado el desarrollo y uso de una herramienta para el cálculo del costo beneficio de usar tractocamiones más eficientes en el transporte de bienes por carretera que se puede aplicar también al resto de los vehículos pesados. La herramienta se puede usar con los datos que requiera la norma, cuando se le diseñe, para calcular las bondades de una normatividad de consumo de combustible y emisiones de gases de efecto invernadero. El cálculo de los precios de los vehículos nuevos más eficientes se podrá sustituir por los precios reales que existan en el mercado en el año que se implemente la norma.

CAPÍTULO 16. CONCLUSIONES

En esta tesis se ha descrito al programa de computación UAMmero que sirve para evaluar el consumo de combustible, las emisiones de CO₂ y el rendimiento de combustible de los vehículos pesados; además se mostraron resultados para algunos de esos vehículos incluyendo el efecto de la carga y la pendiente de la trayectoria.

Entre las innovaciones que presenta UAMmero se encuentran [40]:

- a) Calcula el consumo de combustible y las emisiones de CO₂ tanto para un ciclo de manejo como para viajes en carretera o en calles; el ciclo de conducción se puede modificar para considerar otros que se usan en el mundo.
- b) Se desarrolló con software libre y se corre con software libre.
- c) Modela carreteras y calles con pendientes considerables, por lo que es apropiado para México.
- d) Modela vehículos sobrecargados, de más de 75 toneladas de masa total de los tractocamiones, por lo que es apropiado para México.
- e) Puede modelar vehículos pesados viejos al incorporarle los datos de ellos.
- f) Funciona para obtener el consumo de combustible cuando se cambia la configuración, por lo que puede ser útil para administrar la carga transportada.
- g) Su uso simple puede ser muy útil para capacitar operadores de vehículos pesados.
- h) En UAMmero se estiman las emisiones de contaminantes diferentes al CO₂ emitidos por los vehículos pesados.
- i) UAMmero tiene incorporados muchos modelos de transmisiones para poder modelar un rango amplio de vehículos pesados.
- j) UAMmero puede analizar el efecto económico del transporte de gasolina y diésel por carretera (en lugar de usar ductos) causado por el huachicoleo de combustibles, pues tiene incorporadas varias carreteras para simular el viaje de autotanques que transportan combustible.
- k) UAMmero calcula el costo del combustible por viaje. El costo depende del precio del litro del diésel. Debido a que el precio del combustible fluctúa porque el precio del barril del petróleo varía mucho constantemente, UAMmero ofrece dos opciones, en una de ellas el usuario proporciona el precio del litro del diésel y en la otra usa un precio establecido en el software.
- l) UAMmero es un programa computacional que tiene incorporados muchos diagnósticos, como gráficas que muestran el rendimiento de combustible como función de la rapidez del vehículo y de la pendiente en el camino, por lo que se pueden comparar los resultados en campo con las simulaciones.
- m) Nos hace independientes de las políticas del exterior respecto a la adquisición de estas herramientas porque Estados Unidos de América podría restringir que otros países usen sus paquetes computacionales o puede cobrar por su uso.

- n) Permite cambiar las tecnologías con las que está ensamblado un vehículo, lo que permite recomendar paquetes tecnológicos que disminuyan el consumo de combustible.

UAMmero es una herramienta muy útil que sirve a la sociedad y ha sido desarrollado en la UAM-Azcapotzalco.

Debido a que México ha importado más del 60% el diésel que se consume en el país en los últimos años, es necesario que la flota vehicular pesada sea más eficiente, para que con ello disminuyan las importaciones de ese combustible. Por otra parte, es necesario disminuir el consumo de combustible para reducir las emisiones de CO₂ que se emite a la atmósfera y que contribuyen al calentamiento de la tierra. El consumo de combustible y las emisiones de CO₂ dependen de las tecnologías con las que se ensambla un vehículo y son esas tecnologías las que se prueban cuando se corre UAMmero como se explica en los capítulos de esta tesis. Aun cuando los vehículos pesados que tienen mejores tecnologías para disminuir su consumo de combustible y las emisiones de CO₂ son más caros se muestra en el análisis de esta tesis que es una buena inversión. Las investigaciones de este trabajo están enfocadas a resolver dos de los grandes problemas nacionales que son: dejar de importar menos diésel, con los que se podría aumentar la soberanía energética en los combustibles automotrices y disminuir las emisiones de CO₂ que ayuda a México a cumplir con los compromisos internacionales que tiene para reducir la amenaza de que aumente la temperatura de la tierra. El software que se está desarrollando es un desarrollo tecnológico muy útil que también ayuda a disminuir nuestra dependencia tecnológica.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change Summary for Policymakers*. IPCC; 2021. Disponible en: https://report.ipcc.ch/ar6wg3/pdf/IPCC_AR6_WGIII_FinalDraft_FullReport.pdf
- [2] Dominguez-Vergara N, Pantoja-Gallegos JL, Dominguez-Perez DN. Education, science and technology to reduce fuel consumption and greenhouse gas emissions of heavy duty vehicles in Mexico. Proceedings INTED 2020 of the 14th International Technology, Education, and Development Conference; 2020; Valencia, España. p. 4237-4246. ISBN: 978-84-09-17939-8.
- [3] Garcia-Osorio FJ, Maldonado-Susano A, Dominguez-Vergara N. Methods and results of training economically technical driving in Mexico. EDULEARN 2019 Proceedings; 2019; Palma, España. p. 7439-7448.
- [4] United States of America Environmental Protection Agency. Greenhouse Gas Emissions Model (GEM) for Medium- and Heavy-Duty Vehicle Compliance [Internet]; [citado 3 julio 2022]. Disponible en: <https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/greenhouse-gas-emissions-model-gem-medium-and-heavy-duty>
- [5] United States Federal Register. Greenhouse Gas Emissions and Fuel Efficiency Standards for Medium and Heavy-Duty Engines and Vehicles — Phase 2 [Internet]; 2016 [citado 3 enero 2020]. Disponible en: <https://www.federalregister.gov/documents/2016/10/25/2016-21203/greenhouse-gas-emissions-and-fuel-efficiency-standards-for-medium--and-heavy-duty-engines-and>
- [6] United States Federal Register. Greenhouse Gas Emissions Standards and Fuel Efficiency Standards for Medium- and Heavy-Duty Engines and Vehicles [Internet]; 2011 [citado 3 enero 2020]. Disponible en: <https://www.federalregister.gov/documents/2011/09/15/2011-20740/greenhouse-gas-emissions-standards-and-fuel-efficiency-standards-for-medium--and-heavy-duty-engines>
- [7] Environmental Protection Agency and National Highway Traffic Safety Administration. Final Rulemaking to Establish Greenhouse Gas Emissions Standards and Fuel Efficiency Standards for Medium- and Heavy-Duty Engines and

Vehicles: Regulatory Impact Analysis [Internet]; 2011 [citado 5 marzo 2020]. Disponible en: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/P100EG9C.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2011+Thru+2015&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CIndex%20Data%5C11thru15%5CTxt%5C00000004%5CP100EG9C.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyPURL#>

[8] European Commission. Vehicle Energy Consumption calculation TOol – VECTO [Internet]; 2019 [citado 2 enero 2020]. Disponible en: https://ec.europa.eu/clima/politicas/transport/vehiculos/vecto_en

[9] Zacharof NG, Fontaras G. Report on VECTO Technology Simulation Capabilities and Future Outlook [Internet]; 2016. Luxembourg: European Union; 2016 [citado 20 enero 2020]. Disponible en: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwil_MOzudn7AhUmkWoFHfVkBMsQFnoECA4QAQ&url=https%3A%2F%2Fpublications.jrc.ec.europa.eu%2Frepository%2Fbitstream%2FJRC103864%2Freport%2520on%2520vecto%2520technology%2520simulation%2520capabilities%2520and%2520future%2520outlook.pdf&usg=AOvVaw0oVcvmHZznNsORbY5c5nqU

[10] Domínguez Vergara N, Pantoja Gallegos JL, Domínguez Pérez DN. UAMmero, software para estimar el consumo de combustible y las emisiones de bióxido de carbono de vehículos pesados. COMCAPLA 2018 Proceedings; 2019. p. 600-606.

[11] Domínguez-Pérez DN, Pantoja-Gallegos JL, Domínguez-Vergara N. Dynamics of a heavy-duty vehicle in a driving cycle. Journal of Physics: Conference Series. 2021; **1723** 012035. doi:10.1088/1742-6596/1723/1/012035.

[12] Nancy Balderas Serrato. Autosuficiencia energética: ¿Pemex podrá producir todo el diesel UBA que se requiere? [Internet]; 2022 [citado 30 de noviembre de 2022]. Disponible en: <https://www.tyt.com.mx/nota/autosuficiencia-energetica-pemex-podra-producir-todo-el-diesel-uba-que-se-requiere>

[13] Nancy Balderas Serrato. Total disponibilidad de diésel UBA, en solo 9 estados [Internet]; 2021 [citado 30 de agosto 2021]. Disponible en: <https://www.tyt.com.mx/nota/total-disponibilidad-de-diesel-uba-en-solo-9-estados-estudio>

[14] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. NOM-044-SEMARNAT-2017 [Internet]; 2018 [citado 3 enero 2020]. Disponible en: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5513626&fecha=19/02/2018

[15] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Secretaría de Energía, Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. NOM-163-SEMARNAT-ENER-SCFI-2013 [Internet]; 2018 [citado 3 de enero 2020]. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5539494&fecha=28/09/2018

[16] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. ACUERDO por el que se modifica la vigencia del periodo establecido en las notas al pie de las tablas 1, 2 y 4, de los numerales 4.1 y 4.2, únicamente en lo que se refiere a los Estándares AA, de la Norma Oficial Mexicana NOM-044-SEMARNAT-2017 [Internet]; 2020 [citado 26 de noviembre 2021]. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5636495&fecha=26/11/2021&print=true#:~:text=Resoluci%C3%B3n%20n%C3%BAmero%20RES%2F1817%2F2019,%2DCRE%2D2016%2C%20Especificaciones%20de

[17] Garcia-Osorio J, Maldonado-Susano A, Tovar-Paulino I, Dominguez-Vergara N. The novel Mexican energy efficiency learning networks. ICERI 2019 Proceedings; 2019; Seville, Spain. p. 1645-1654.

[18] Kiencke U, Nielsen L. Automotive Control Systems, For Engine, Driveline, and Vehicle. New York: Springer-Verlag; 2005.

[19] Gillespie TD. Fundamentals of Vehicle Dynamics. Warrendale: SAE International; 1992.

[20] Environmental Protection Agency. Greenhouse Gas Emissions Model (GEM) User Guide. United States: EPA; 2010.

[21] Peer Review of the Greenhouse Gas Emissions Model (GEM) and EPA's Response to Comments. United States: EPA; 2011.

[22] Domínguez N, Moreno A. Análisis de un modelo para la certificación de vehículos pesados que considera la eficiencia energética y las emisiones de gases de efecto invernadero. Libro Científico I, 2013, del Congreso Internacional Mujeres en las Ciencias y todas las disciplinas. Editorial UAM; 2013: p. 21-30.

[23] IEA. The Future of Trucks: Implications for energy and the environment. Paris:

IEA; 2017.

[24] Khatib H. The Discount Rate - A Tool for Managing Risk in Energy Investments. IAEE Energy Forum, 4th Quarter; 2015.

[25] Busse MR, Knittel CR, Zettelmeyer F. Are Consumers Myopic? Evidence from New and Used Car Purchases. American Economic Review. 2013; 103(1): 220-56. DOI: 10.1257/aer.103.1.220

[26] Verboven F. Implicit Interest Rates in Consumer Durables Purchasing Decisions: Evidence from Automobiles. Center for Economic Research. 1999.

[27] Goh K, Jianyun H, Yi O. The Costs and Benefits of Fuel-Efficient Cars: How High Are the Returns? Economic survey of Singapore [Internet]; 2012 [citado 3 enero 2020]. Disponible en: <https://www.mti.gov.sg/Resources/feature-articles/2013/The-Costs-and-Benefits-of-Fuel-Efficient-Cars---How-High-are-the>Returns>

[28] Gobierno de la Ciudad de México. Activación del Programa para Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA) en la ZMVM Contingencias (Fase I y Fase II) [Internet]; 2022 [citado 24 septiembre 2016]. Disponible en: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/ultima-hora/calidad-aire/pcaa/pcaa-historico-contingencias.pdf>

[29] Domínguez Vergara N, Pantoja Gallegos JL, Domínguez Pérez D. La contaminación del aire en la Ciudad de México en la primavera del 2016. Libro Científico I del V Congreso Internacional de las Mujeres en las Ciencias, las Humanidades y Todas las Disciplinas, del 29-30 de septiembre de 2016. Editorial UAM; 2018. p. 113-126.

[30] Gobierno de la Ciudad de México. Estaciones de monitoreo [Internet]. [Citado 16 septiembre 2016]. Disponible en: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnml=%27&dc=ZA==>.

[31] Gobierno de la Ciudad de México. Índice Aire y Salud [Internet]; 2020 [citado 16 septiembre 2016]. Disponible en: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnml=%27&dc=Zw==>.

[32] Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. Inventario de emisiones de la Ciudad de México, Contaminantes Criterio, Tóxicos y de Efecto Invernadero [Interent]; 2014 [citado 16 septiembre 2016]. Disponible en:

<http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/inventario-emisiones-cdmx2014-2/>

[33] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. NOM-EM-167-SEMARNAT-2016 [Internet]; 2016 [citado 2 febrero 2020]. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5440157&fecha=07/06/2016#gs_c.tab=0

[34] Delgada Peralta M. Los errores de la contingencia atmosférica. *Revista Este País*. 2016; 304: 8-15.

[35] Gaceta del Senado. Proposiciones de Ciudadanos Legisladores [Internet]; 2017 [citado 30 enero 2020]. Disponible en: https://www.senado.gob.mx/64/gaceta_del_senado/documento/82171

[36] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005 [Internet]; 2006 [citado 20 enero 2020]. Disponible en: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=2107972&fecha=30/01/2006

[37] Comisión Reguladora de Energía. NOM-016-CRE-2016 [Internet]; 2016 [citado 20 enero 2020]. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5450011&fecha=29/08/2016#gs_c.tab=0

[38] Pantoja-Gallegos JL, Dominguez-Vergara N, Dominguez-Perez DN. Calculation of the fuel consumption, fuel economy and carbon dioxide emissions of a heavy-duty vehicle. *J. Phys. Conf. Ser.* 2022; **2307** 012025. DOI 10.1088/1742-6596/2307/1/012025

[39] Dominguez-Perez DN, Dominguez-Vergara N, Pantoja-Gallegos JL. Effect of the mass of the load and slope of the road on fuel economy and carbon dioxide emissions for a heavy-duty pickup. *J. Phys. Conf. Ser.* 2022; **2307** 012051. DOI 10.1088/1742-6596/2307/1/012051

[40] Pantoja-Gallegos JL, Dominguez-Perez DN, Dominguez-Vergara N. El programa computacional UAMmero para evaluar el rendimiento de combustible y las emisiones contaminantes de vehículos pesados. *Programación Matemática y Software*. 2022; 14(2): 29-42.

[41] Dominguez-Vergara N, Dominguez-Perez DN, Pantoja-Gallegos JL. Analysis of

the Fuel Economy and Carbon Dioxide Emissions of a Heavy-Duty Vehicle in Part of a Driving Cycle. RDST. 2022; 8: 157-69. <https://doi.org/10.9734/bpi/rdst/v8/6763F>

[42] N. Dominguez-Vergara, D.N. Dominguez-Perez & J.L. Pantoja-Gallegos. Dependence of fuel economy on speed for two heavy duty vehicles. London Journal of Research in Science: Natural and Formal. Aceptado para publicarse.

[43] Domínguez Pérez RM, Pantoja Gallegos JL, Domínguez Pérez DN, Domínguez Vergara N. Modelo para el cálculo del costo beneficio de una regulación del consumo de combustible y emisiones de bióxido de carbono de tractocamiones. Memorias del V Congreso multidisciplinario de ciencias aplicadas en Latinoamérica, COMCAPLA; 2020; San José, Costa Rica. p. 377-389.