



UNS
UNIVERSIDAD
NACIONAL DEL SANTA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TÍTULO:

“OPTIMIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICO-TRACCIONALES DEL HIGH WAY MINING TRUCK CATERPILLAR PARA DIFERENTES CONDICIONES DE OPERACIÓN”

Autor(es):

Bach. TUYA GAMBINI, Rafael Alejandro

Bach. CISNEROS FLORES, Daniel Raúl

Asesor:

Dr. Ing. QUILLOS RUÍZ, Serapio Agapito

Nuevo Chimbote

-2020-



UNS
UNIVERSIDAD
NACIONAL DEL SANTA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

CARTA DE CONFORMIDAD DEL ASESOR

La presente Tesis titulada **“OPTIMIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICO-TRACCIONALES DEL HIGH WAY MINING TRUCK CATERPILLAR PARA DIFERENTES CONDICIONES DE OPERACIÓN”**, elaborado por los **Bachilleres: Rafael Alejandro Tuya Gambini y Daniel Raúl Cisneros Flores**, ha sido revisada y desarrollada en cumplimiento al Reglamento General de Grados y Títulos de la Universidad, dando fe de cumplimiento al presente informe.


Dr. Serapio Agapito Quillos Ruiz
Asesor



UNS
UNIVERSIDAD
NACIONAL DEL SANTA

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA

HOJA DE CONFORMIDAD DEL JURADO EVALUADOR

El presente informe de Tesis titulado “**OPTIMIZACION DE LAS PROPIEDADES DINAMICO-TRACCIONALES DEL HIGH WAY MINIG TRUCK CATERPILLAR PARA DIFERENTES CONDICIONES DE OPERACION**”, elaborado por los bachilleres **CISNEROS FLORES DANIEL RAUL** y **TUYA GAMBINI RAFAEL ALEJANDRO** para optar el Título Profesional de Ingeniería Mecánica.

Fue revisado y Aprobado por el siguiente Jurado Evaluador

Ing. RUSBER ALBERTO RISCO OJEDA

PRESIDENTE

Ms. NELVER JAVIER ESCALANTE ESPINOZA

SECRETARIO

Dr. SERAPIO AGAPITO QUILLOS RUIZ

INTEGRANTE

ACTA DE SUSTENTACIÓN INFORME FINAL DE TESIS

Siendo las 18:30 horas del veintidos de febrero del año dos mil veintiuno, el Jurado Evaluador integrado por los docentes:

Ing. Rusber Alberto Risco Ojeda – Presidente

Ms. Nelver Javier Escalante Espinoza – Secretario

Dr. Serapio Agapito Quillos Ruiz – Integrante

En cumplimiento a la Resoluciones N° 174-2020-UNS-CFI y Resolución de Expedito N° 068-2021-UNS-FI, mediante la plataforma virtual ZOOM <https://uns-edu-pe.zoom.us/j/87311688175?pwd=Z05XKzUyQVhoS05lY1gwdlVlN2s1UT09>. En

cumplimiento a la Directiva N° 003-2020-UNSVRAC, se da inicio a la sustentación de la Tesis titulada:

“Optimización de las propiedades dinámico-traccionales del High Way Minig Truck Caterpillar para diferentes condiciones de operación”.

Bachilleres: TUYA GAMBINI RAFAEL ALEJANDRO, código N° 0201216039 y CISNEROS FLORES DANIEL RAUL, código N° 0201016049.

Asesor: Dr. SERAPIO AGAPITO QUILLOS RUIZ.

El Jurado Evaluador, después de deliberar los actos de la sustentación virtual, según los instrumentos de evaluación emitidos por la Dirección de Escuela de Ingeniería Mecánica y en concordancia con el Reglamento General de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Santa, declaran:

APROBAR LA SUSTENTACION CON LA NOTA DE:

BACHILLER	PROMEDIO VIGESIMAL	PONDERACIÓN
CISNEROS FLORES DANIEL RAUL	16	BUENO

Siendo las 19:15 horas del mismo día, se dio por terminado el Acto de Sustentación, firmando la presente acta en señal de conformidad.

Nuevo Chimbote, 22 de Febrero del 2021.



Ms. Nelver Javier Escalante Espinoza
Secretario



Ing. Rusber Alberto Risco Ojeda
Presidente



Dr. Serapio Agapito Quillos Ruiz
Integrante



ACTA DE SUSTENTACIÓN INFORME FINAL DE TESIS

Siendo las 18:30 horas del veintidos de febrero del año dos mil veintiuno, el Jurado Evaluador integrado por los docentes:

Ing. Rusber Alberto Risco Ojeda – Presidente

Ms. Nelver Javier Escalante Espinoza – Secretario

Dr. Serapio Agapito Quillos Ruiz – Integrante

En cumplimiento a la Resoluciones N° 174-2020-UNS-CFI y Resolución de Expedito N° 068-2021-UNS-FI, mediante la plataforma virtual ZOOM <https://uns-edu-pe.zoom.us/j/87311688175?pwd=Z05XKzUyQVhoS05lY1gwdlVlN2s1UT09>. En

cumplimiento a la Directiva N° 003-2020-UNSVRAC, se da inicio a la sustentación de la Tesis titulada:

“Optimización de las propiedades dinamico-traccionales del High Way Minig Truck Caterpillar para diferentes condiciones de operación”.

Bachilleres: TUYA GAMBINI RAFAEL ALEJANDRO, código N° 0201216039 y CISNEROS FLORES DANIEL RAUL, código N° 0201016049.

Asesor: Dr. SERAPIO AGAPITO QUILLOS RUIZ.

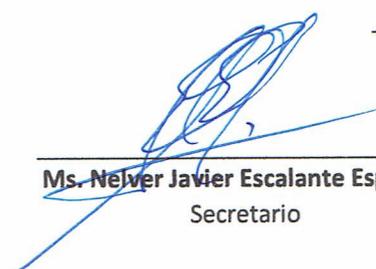
El Jurado Evaluador, después de deliberar los actos de la sustentación virtual, según los instrumentos de evaluación emitidos por la Dirección de Escuela de Ingeniería Mecánica y en concordancia con el Reglamento General de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Santa, declaran:

APROBAR LA SUSTENTACION CON LA NOTA DE:

BACHILLER	PROMEDIO VIGESIMAL	PONDERACIÓN
TUYA GAMBINI RAFAEL ALEJANDRO	16	BUENO

Siendo las 19:15 horas del mismo día, se dio por terminado el Acto de Sustentación, firmando la presente acta en señal de conformidad.

Nuevo Chimbote, 22 de Febrero del 2021.



Ms. Nelver Javier Escalante Espinoza
Secretario



Ing. Rusber Alberto Risco Ojeda
Presidente



Dr. Serapio Agapito Quillos Ruiz
Integrante

Dedicatoria

Gracias a Dios porque siempre estuvo con nosotros guiando nuestro camino y premiando nuestro esfuerzo. A nuestras familias que siempre estuvo presente y orgullosos de lograr nuestro objetivo cumplido.

A nuestros Padres y seres queridos:

De parte de Daniel Raúl Cisneros Flores

- Nasario Cisneros y Virginia Flores (Padres)
- Gloria Garcilazo Meza (Esposa)

De parte de Rafael Alejandro Tuya Gambini

- Amadeo Tuya y Irene Gambini (Padres)
- Frida Casimiro Cadillo (Esposa)
- Luana Nicole Tuya Casimiro (Hija)

quien debemos el valor del estudio y la perseverancia en la búsqueda del conocimiento brindándonos su apoyo y consejos de manera incondicional que han sido la masa de nuestro desarrollo como personas y desempeño profesional.

A nuestros profesores y asesor quien nos brindó su valioso tiempo en la revisión de los documentos de tesis y apporto con sus consejos, críticas y exigencias para lograr el objetivo trazados.

Agradecimiento

Nuestro profundo agradecimiento a nuestra alma mater Universidad Nacional del Santa por haber creado la carrera de ingeniería mecánica y formar parte de las primeras promociones, labor importante donde se tiene que institucionalizar la carrera. Agradecer también a la escuela profesional de ingeniería mecánica por habernos acogido durante los años de estudio en cuyas aulas perseveran el recuerdo como fuente de sacrificio, esfuerzo, dedicación y éxito.

A Dios quien ha forjado nuestro camino y nos a dirigido por el sendero correcto, en que todo momento estuvo con nosotros ayudándonos aprender nuestros errores y no cometerlos otra vez, es quien guía nuestra vida te lo agradecemos padre celestial.

A nuestros docentes que asumieron el sacrificado reto de inculcar las enseñanzas, conocimiento y consejos oportunos los cuales fortalecieron y reafirmaron nuestra formación en esta sociedad como ingenieros mecánicos.

A nuestros padres y familiares porque siempre confiaron en nuestras capacidades y nos motivaron a dar lo mejor de nosotros cada día.

Un especial agradecimiento a nuestro asesor, el Dr. Serapio Agapito Quillos Ruiz, por sus aportes, apoyo durante el inicio, desarrollo y culminación del presente proyecto de investigación, sin los cuales no hubiéramos podido finalizar este proyecto de tesis.

A los amigos y todas las personas que en forma directa e indirecta y desinteresada nos apoyaron en la elaboración del presente proyecto de investigación.

Índice general

Hoja de conformidad del asesor	
Jurado evaluador	
Dedicatoria	
Agradecimiento	
Índice general	
Índice de tablas	
Índice de figuras	
Resumen	
Abstract	
I. Capítulo 1	
Introducción.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Formulación del problema.....	4
1.3. Objetivo general.....	5
1.4. Objetivos específicos.....	5
1.5. Formulación de la hipótesis.....	5
1.6. Importancia y justificación.....	6
1.7. Limitación del trabajo.....	7
II. Capítulo 2	
Marco teórico.....	8
2.1. Problemas clásicos de la ingeniería automotriz.....	8
2.2. Fuerzas actuantes en el automóvil.....	9
a) Fuerza de gravedad.....	9
b) Reacciones de la carretera.....	9
c) Reacciones aerodinámicas.....	10
2.3. Dinámica motriz del sistema motor-transmisión del automóvil.....	10

III.	Capítulo 3	
	Materiales y métodos.....	11
	3.1. Especificaciones técnicas de la unidad vehicular High Way Mining Truck CAT 797F.....	11
	3.2. Dimensiones generales del vehículo.....	12
	3.2.1. Motor.....	13
	3.2.2. Caja de cambios.....	14
	3.2.3. Neumáticos.....	14
	3.2.4. Suspensión.....	15
	3.2.5. Distribución de pesos.....	15
	3.2.6. Especificaciones de operación.....	16
	3.2.7. Capacidades de llenado de servicio.....	16
	3.3. Método de análisis.....	17
	a) Consideraciones del sistema vehículo y del movimiento.....	17
	3.4. Metodología de cálculo.....	17
	a) Cálculo de las curvas características externas de la potencia efectiva y torque efectivo.....	18
	b) Cálculo del nomograma de velocidades.....	19
	c) Cálculo del balance traccional del vehículo.....	19
	d) Característica universal o pasaporte del vehículo automóvil.....	21
	e) Balance de la potencia del vehículo automóvil.....	22
	f) Aceleración del vehículo automóvil.....	23
	g) Tiempo y distancia de aceleración del automóvil.....	23
	h) Consumo económico del combustible.....	24
IV.	Capítulo 4	
	Resultados y discusión.....	26
V.	Capítulo 5	
	Conclusiones y recomendaciones.....	37
	5.1. Conclusiones.....	37
	5.2. Recomendaciones.....	38
VI.	Capítulo 6	
	Referencias bibliográficas.....	39

VII. Capítulo 7

Anexos.....41

Tabla N° 01. Especificaciones técnicas de la unidad vehicular

Tabla N° 02. Potencia y torque para diferentes velocidades angulares

Tabla N° 03. Velocidad del vehículo en cada marcha

Tabla N° 04. Fuerza de tracción bruta desarrolladas en las ruedas motrices

Tabla N° 05. Fuerza requerida para vencer diferentes pendientes

Tabla N° 06. Factor dinámico del vehículo

Tabla N° 07. Potencia traccional del vehículo

Tabla N° 08. Potencia requerida del vehículo para diferentes pendientes

Tabla N° 09. Aceleración del vehículo

Tabla N° 10. Tiempo y distancia de aceleración del vehículo

Tabla N° 11. Consumo de combustible en carretera

Índice de Tablas

Tabla 1.1. Variable independiente y dependiente.....	6
Tabla 3.1. Valores de las dimensiones generales de la unidad vehicular.....	11
Tabla 3.2. Características del motor.....	13
Tabla 3.3. Características de la caja de cambios.....	14
Tabla 3.4. Características de los neumáticos.....	14
Tabla 3.5. Características de la suspensión.....	15
Tabla 3.6. Pesos aproximados y Distribuciones aproximadas del peso.....	15
Tabla 3.7. Valores de las especificaciones de operación.....	16
Tabla 3.8. Valores de las capacidades de llenado de servicio.....	16

Índice de Figuras

Figura 2.1. Esquema de Análisis del Vehículo en Carretera.....	9
Figura 2.2. Esquema de la Dinámica Motriz del Vehículo.....	10
Figura 3.1. Unidad vehicular High Way Mining Truck CAT 797F.....	11
Figura 4.1. Curvas externas de velocidad del vehículo.....	26
Figura 4.2. Régimen de velocidad en cada marcha.....	27
Figura 4.3. Cronograma de cambio de velocidades.....	28
Figura 4.4. Fuerza de tracción bruta y fuerzas de resistencia al avance.....	29
Figura 4.5. Factor dinámico del vehículo.....	31
Figura 4.6. Pasaporte dinámico del vehículo.....	32
Figura 4.7. Balance de potencia del vehículo.....	33
Figura 4.8. Aceleración del vehículo.....	34
Figura 4.9. Tiempo y distancia de aceleración del vehículo.....	35
Figura 4.10. Consumo de combustible en carretera.....	36

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo analizar y optimizar las propiedades dinámico-traccionales y el consumo de combustible de la unidad vehicular pesada CAT 797F al variar sus condiciones de operación en carretera como son el régimen de marcha, velocidad y pendiente de la carretera, mediante la aplicación de procedimientos analíticos y gráficos obtenidos a partir de la teoría del automóvil. Además, se considera que el centro de gravedad del vehículo se desplaza en un movimiento plano, reduciéndose a un análisis de tipo bidimensional, se desprecia las irregularidades de la carretera, se asume una relación simple entre la frecuencia de giro de todas las masas giratorias y la frecuencia de giro del cigüeñal, el vehículo se mueve en régimen estabilizado, entre otras. Se determinó que la velocidad y aceleración máxima que puede desarrollar el vehículo a máxima carga es de 68 km/h y 0.60 m/s^2 respectivamente. En las condiciones de pendiente más adversas, el vehículo es capaz de vencer fuerzas de resistencia de la carretera equivalentes a la mitad del PBV. Se halló que el régimen de velocidad de máxima economía de combustible se encuentra en el rango de 35 y 55 Km/h, siendo el valor óptimo de aproximadamente 42.5 Km/h para una carretera de coeficiente de fricción $f = 0.0175$ y pendiente $i_{\text{máx.}} = 14.16^\circ$.

Palabras Claves:

Propiedades dinámico-traccionales, consumo de combustible, método analítico, camión pesado, CAT 797F.

Abstract

The objective of this work is to analyze and optimize the dynamic-tractional properties and fuel consumption of the CAT 797F heavy vehicle unit by varying its operating conditions on the road such as the speed, speed and slope of the road, by means of the application of analytical and graphical procedures obtained from automobile theory. In addition, the vehicle's center of gravity is considered to move in flat motion, reducing to a two-dimensional analysis, road irregularities are neglected, a simple relationship is assumed between the turning frequency of all rotating masses and the frequency of rotation of the crankshaft, the vehicle moves in a stabilized regime, among others. It was determined that the maximum speed and acceleration that the vehicle can develop at maximum load is 68 km/h and 0.60 m/s^2 respectively. In the most adverse slope conditions, the vehicle is capable of overcoming road resistance forces equivalent to half the PBV. It was found that the maximum fuel economy speed regime is in the range of 35 and 55 km/h, with the optimum value being approximately 42.5 km/h for a road with a coefficient of friction $f = 0.0175$ and a slope of $\text{Imax.} = 14.16^\circ$.

Keywords:

Dynamic-tractional properties, fuel consumption, analytical method, heavy truck, CAT 797F.

Capítulo 1: Introducción

1.1. Antecedentes

El actual nivel de consumo mundial de Petróleo supera los 86 millones de barriles al día, se presagia futura escases con la consiguiente alza constante del precio de los combustibles. La experiencia muestra que cuando el precio no sube, los patrones de consumo no cambian, no se buscan sustitutos y no se reduce su consumo. En el Perú el recorrido promedio de un auto particular es de 20 000 km anuales. Si tenemos un auto con más de 8 años que rinde, por antigüedad y desgaste, un promedio de 30 km por galón, necesitaremos comprar 666 galones de gasolina. Si lo cambiamos por un auto nuevo de similar potencia, pero con motor más chico y con 6 velocidades que tenga un rendimiento promedio de 42 km por galón, deberemos comprar solo 476 galones (AAP, 2013). En forma similar sucede en vehículos semipesados y pesados, lo que nos evidencia que conocer la franja de velocidades donde se tiene el menor consumo de combustible resulta de vital importancia en la explotación de vehículos.

Como resulta evidente, conocer las condiciones explotacionales adecuadas de una unidad vehicular se vuelve preponderante para el aprovechamiento total del mismo. Sin embargo, no existe vasta información del tema lo que hace inevitable dar todos los alcances conocidos hasta la actualidad.

Cuando se habla de uso de combustibles se hace inevitable tener que hablar de la polución del aire. La política ambiental se ve a menudo forzada hacia el equilibrio entre aire más limpio y viabilidad económica. Se estima que los costos en la salud provienen de material particulado y el ozono asimismo la evidencia actual sugiere que este constituye el grueso del daño causado, debido a la contaminación del aire causada por vehículos motorizados en países desarrollados (Small, K.A. & Kazimic, C., 1995)

Se realizaron la simulación dinámica integrada de un vehículo pesado con el auxilio de la interface de programación y simulación del Matlab-Simulink. El análisis transitorio planteado incluyó un modelo de motor multicilindro vinculado con modelos para la transmisión, la caja de transferencia y diferenciales. El modelo del motor está basado en el enlace del número de módulos de cilindro individuales con modelos termodinámicos de los procesos en el interior de los cilindros. Con este modelo fue analizado vehículos con motores Diesel de 6 cilindros en línea y 12 cilindros en V turboalimentados con y sin enfriamiento intermedios, siendo enlazados con tres tipos de modelos dinámicos incluyendo el modelo de masa puntual y multi-cuerpos integrados a un modelo de tren de fuerza completo (Assanis, D., Bryik, W., Chalhoub, N., Fiipi, Z. et al., 1999).

Se propuso un modelo dinámico simple para estimar los niveles de aceleración máxima de camiones basado en la fuerza traccional, la aerodinámica y las fuerzas de resistencia del camino. El modelo se evaluó para diferentes vehículos y parámetros a considerar como pavimento, características del neumático (Rakha, P.; Lucic, I.; Demarchi, S.E.; Setti, J.R. & Van Aerde, M., 2001), asimismo, el modelo se empleó para la predicción de velocidades del vehículo en zonas específicas.

Se realizaron un análisis comparativo de varios modelos de regresión para la predicción del consumo de combustible y tasas de emisión (CO , HC y NO_x) en vehículos livianos y semipesados. Como variables de entrada se requirió los valores de las mediciones de la velocidad y aceleración instantánea. Encontrándose que los modelos para el consumo de combustible y tasas de emisión tienen alta precisión con el de resultados experimentales, estando sus coeficientes de determinación en el rango de 0,92 a 0,99. Asimismo, prevén que la aplicación de estos modelos en la evaluación de impactos ambientales de proyectos que incluyen sistemas de transporte inteligentes (Ahn, K., Rakha, H., Trani, A. & Van Aerde, M., 2002). Finalmente, los modelos fueron incorporados dentro un modelo para simulación de tráfico microscópico.

Se plantearon un modelo dinámico del vehículo introduciendo el concepto de potencia variable de incremento lineal para estimación de la aceleración de vehículos pesados. Realizando mejoras en las curvas de rendimiento especialmente en bajas velocidades

cuando los vehículos están sujetos al cambio de marcha (Rakha, P. & Lucic, I., 2002). Asimismo, con la implementación de este modelo se puede desarrollar las curvas de rendimiento de un camión los cuales brindan resultados consistentes con los procedimientos del manual de capacidad de carretera (Rakha, P. & Lucic, I., 2002).

Se analizaron el impacto del frenado del vehículo en el consumo de combustible y en las emisiones de hidrocarburos (C_xH_y), monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NO_x). Indicando que la tasa de consumo de combustible del vehículo, es más sensible a las velocidades de carretera que a las velocidades de frenado. La intensidad del frenado del vehículo siendo verificado por la aceleración del vehículo y el nivel de deceleración teniendo un impacto significativo en las tasas de emisión del vehículo. Específicamente, las tasas de emisión de hidrocarburos carretera y monóxido de carbono son altamente sensibles al nivel de aceleración cuando se comparan a las velocidades en el rango de 10 – 120 *km/h*. Asimismo, aseveran que el impacto de los niveles de deceleración en todas las medidas de efectividad es relativamente pequeño. Concluyendo finalmente que la introducción de frenados del vehículo que involucran ligeros niveles de deceleración y aceleración pueden reducir las tasas de emisión de la unidad vehicular (Rakha, H. & Ding, Y., 2003).

Se realizó una evaluación de la eficiencia de una unidad vehicular que recorre un camino con cinco tramos de pendientes diferentes relacionando los conceptos de eficiencia energética y mecánica, y teniendo en cuenta la recuperación parcial de energía, determinando asimismo la energía de uso y la energía improductiva en cada tramo de la carretera considerada (Aleksandrov, I.K., 2007).

Se propuso un nuevo método para calcular la tracción de los vehículos, el método toma en cuenta la adaptación traccional entre la carga y el motor eléctrico, manteniendo la relación de transmisión constante. Asimismo, se verifica los beneficios de usar motores eléctricos traccionales con una curva característica torque versus rpm del eje en forma hiperbólica asegurando una operación a potencia constante (Aleksandrov, I.K., Nesgovorov, E.V. & Rakov, V.A., 2010).

La propuesta de un método de optimización que minimiza el consumo de energía considerando el alineamiento de la pista, límite de velocidad y cumplimiento de

horarios. Siendo la función objetivo el consumo de energía total y dentro de las variables de decisión se incluye los regímenes de movimiento del vehículo. Se establece un algoritmo el cual es simulado hallándose el régimen de operación óptima (Kim, K. & Chien, S.I., 2011).

En vista que los vehículos automóviles son máquinas complejas y las propiedades que se exigen de estos son tan variadas, se necesita disponer de un conjunto de cualidades explotacionales con el objetivo de caracterizar la eficacia del trabajo del vehículo en diversas condiciones. Asimismo, para evaluar la influencia de cierto tipo de explotación en la eficacia del vehículo es necesario establecer índices sobre estas cualidades obviamente fundamentadas, así como los métodos para su determinación. Dentro de las cualidades explotacionales más importantes tenemos las referidas al aspecto técnicoeconómico, que evalúan el rendimiento del vehículo para realizar una operación dada como el transporte de una carga y la velocidad con que la realiza, así también por el costo requerido en insumos como combustible para realizar dicha operación (Chudakov, D.A., 1985).

El análisis de las propiedades dinámico-fraccionales de las unidades vehiculares conlleva al conocimiento de su explotación adecuada, las cuales juegan un rol importante en el transporte de cargas a diferentes condiciones de carretera y en particular las que se presentan en nuestro país. La explotación adecuada de vehículos de carga en general tiene relevancia ya que ésta implica el empleo justo y necesario de potencia para realizar un determinado transporte de carga en condiciones dadas, asimismo dicha carga puede ser variable sin exceder la capacidad máxima del vehículo, y esto se traduce en un empleo óptimo de combustible y menos elementos contaminantes producto de la combustión en el motor del vehículo, contribuyendo de esta manera a la disminución de la contaminación ambiental.

1.2. Formulación del problema

El parque automotriz de nuestro país es de alrededor de 2,1 millones de unidades vehiculares a nivel nacional (MTC, 2012), y se estima que su crecimiento será de 260 000 unidades en el 2015 (BBVA, 2013). Asimismo, este crecimiento trae consigo problemas inherentes como son accidentes de tránsito, caos vehicular, contaminación sonora y contaminación ambiental.

La explotación técnica de los vehículos de automoción constituye parte del sistema automóvil, conductor, carretera y medio ambiente. Además, las propiedades de los vehículos se revelan de la interacción de los elementos de este sistema. Asimismo, la aplicación de técnicas y procedimientos de la ingeniería automotriz permiten mejorar los niveles explotacionales normales de los parámetros energéticos, económicos y ecológicos de los vehículos en carretera de modo que se garantice el funcionamiento normal de la unidad vehicular con la máxima eficiencia y la más alta economía. Siendo el combustible un elemento preponderante para la operación del vehículo automóvil, el cual se encuentra directamente vinculado a la economía de éste.

La principal problemática de esta investigación se refleja en la siguiente pregunta:
¿Cómo analizar y determinar los valores óptimos de las propiedades dinámico-traccionales y del consumo de combustible del High Way Mining Truck CAT 797F para diferentes condiciones de operación en carretera?

1.3. Objetivo general

Analizar y optimizar las condiciones de explotación de unidades vehiculares de carga pesada del High Way Mining Truck CAT 797F para diferentes condiciones de operación en carretera.

1.4. Objetivos específicos

- a) Realizar el balance traccional de la unidad vehicular en régimen estabilizado.
- b) Realizar el balance energético de la unidad vehicular en régimen estabilizado.
- c) Analizar las características dinámicas de la unidad vehicular en diferentes regímenes de carga.
- d) Analizar el consumo económico de combustible en carretera.

1.5. Formulación de la hipótesis

Mediante el empleo de métodos grafo-analíticos, es factible analizar y determinar los valores óptimos de las propiedades dinámico-traccionales y del consumo de combustible del High Way Mining Truck CAT 797F variando sus condiciones de operación en carretera.

Tabla 1. Variable independiente y dependiente.

Variable independiente	Variar sus condiciones de operación en carretera del High Way Mining CAT 797F
Variable dependiente	Optimización de las propiedades y del consumo de combustible

Fuente. Elaboración propia

1.6. Importancia y Justificación

El desarrollo del presente trabajo conllevará a la extensión del conocimiento de explotación óptima de unidades vehiculares semipesados y pesadas, las cuales juegan un rol importante en el transporte de cargas a diferentes condiciones de carretera presentes en nuestro país.

La explotación óptima de vehículos de carga semipesado y pesada en general tiene relevancia ya que ésta implica el empleo justo y necesario de potencia para realizar un determinado transporte de carga en condiciones dadas, asimismo dicha carga puede ser variable sin exceder la capacidad máxima del vehículo, y esto se traduce en un empleo óptimo de combustible y menos elementos contaminantes producto de la combustión en el motor del vehículo. Contribuyendo de esta manera a la disminución de la contaminación ambiental.

Además, hay que destacar la importancia de los métodos grafo-analíticos, los cuales nos permitirán obtener resultados de buena aproximación a la realidad, ahorrándonos procedimientos experimentales que toman mucho tiempo y son costosos.

Finalmente, el desarrollo del presente trabajo motivará y enriquecerá a la generación de futuras investigaciones en el campo de la ingeniería automotriz.

Esta investigación se justifica en los siguientes ámbitos:

1. Técnica: Las propiedades dinámico-traccionales y el consumo del combustible al variar sus condiciones de operación en carretera de los camiones de acarreo en el sector minero son muy importantes ya que estos parámetros representan el comportamiento físico de la unidad en estudio y con eso nos orienta a tomar decisiones apropiadas.
2. Económica: Las propiedades dinámico-traccionales y el consumo del combustible al variar sus condiciones de operación en carretera de los camiones de acarreo en

el sector minero demandan un costo económico, se requiere disminuir los gastos económicos y por ello con los valores obtenidos del cálculo se tendrá el panorama más claro y tomar decisiones adecuadas.

1.7. Limitación del trabajo

Las limitaciones de la presente tesis están referidas a:

Limitaciones técnicas: El estudio se hará sólo para unidad vehicular High Way Mining CAT 797F.

Limitaciones económicas: Dentro de las limitaciones económicas de la presente investigación tenemos el presupuesto asignado por los tesisistas los cuales no cubren los gastos de las pruebas y ensayos en la unidad vehicular en estudio.

Limitaciones sociales: La presente investigación no toma en cuenta el efecto del diseño de la unidad vehicular sobre el personal que labora dentro de la empresa o en la mejora en las condiciones de trabajo del personal que trabaja en taller, ni en el personal que laborara en la etapa de montaje y ensayos de la unidad vehicular en estudio.

Limitaciones ambientales: Dentro de las limitaciones de tipo ambiental no se determinará dentro del proyecto la reducción de gases emitidos por las unidades vehiculares que producen el efecto invernadero entre otras contaminaciones.

Capítulo 2: Marco Teórico

2.1. Problemas Clásicos de la Ingeniería Automotriz

En el servicio de transporte el conductor selecciona la velocidad de marcha a partir de las condiciones de explotación. Esta selección es limitada por la banda de velocidades, desde la máxima determinada por la potencia máxima del motor o por la adherencia de las ruedas motrices con la carretera hasta la mínima de acuerdo a las condiciones de trabajo estable del motor.

Cuanto más severas son las condiciones de la carretera tanto más estrecha es esta banda y menores las aceleraciones posibles. En ciertas condiciones esta banda de elección se puede reducir a un único valor posible de la velocidad. Esta condición de carretera constituye una condición límite, en condiciones más severas de la carretera la marcha del vehículo no es posible. De acuerdo a los fundamentos de la teoría de automóviles, los métodos de estimación de las propiedades dinámico-traccionales pueden ser empleados dos problemas clásicos tipo de la ingeniería automotriz:

Problema de Análisis

El cual consiste en determinar las velocidades, las aceleraciones y las condiciones límites de la carretera donde es posible el movimiento del vehículo con ciertos parámetros de diseño como variable de entrada.

Problema de Síntesis

El cual consiste en el proceso inverso, es decir en determinar los parámetros de diseño que pueden garantizar determinados valores de las velocidades y aceleraciones en condiciones particulares de carreteras, así como determinar las condiciones límites de éstas.

2.2. Fuerzas Actuantes en el Automóvil

Para la evaluación y/o análisis de las propiedades dinámico traccionales de una unidad vehicular, debemos en primer lugar establecer las interacciones que tiene este con su medio colindante, como se puede ver esquematizado en la Figura.

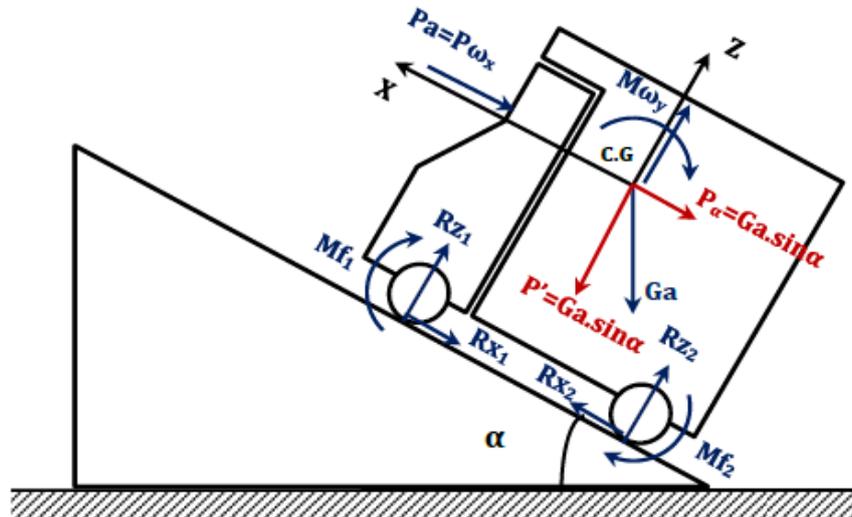


Figura 1. Esquema de Análisis del Vehículo en Carretera

Fuente. Fundamentos de la Teoría y el Cálculo de Tractores y Automóviles.

a) Fuerzas de Gravedad

G_a : Peso bruto vehicular (PBV), incluye el peso y carga del vehículo.

G_{a1} : Parte del PBV que soporta el puente delantero.

G_{a2} : Parte del PBV que soporta el puente posterior o motriz.

G_0 : Peso seco del vehículo, solamente es el peso del vehículo sin carga.

G_{01} : Parte del peso seco que soporta el puente delantero.

G_{02} : Parte del peso seco que soporta el puente posterior o motriz.

P_α : Igual a $G_a \cdot \sin \alpha$, fuerza de resistencia a la pendiente.

P' : Igual a $G_a \cdot \cos \alpha$, parte del PBV que influye en fuerza de resistencia a la rodadura del vehículo.

b) Reacciones de la Carretera

R_{x1} : Fuerza de fricción en las ruedas delanteras

R_{x2} : Fuerza de fricción o motriz en las ruedas posteriores.

R_{z1} : Fuerza normal de la carretera sobre las ruedas delanteras

R_{z2} : Fuerza normal de la carretera sobre las ruedas posteriores.

M_{f1} : Momento suministrado a las ruedas delanteras del semiejes o frenos.

Mf_2 : Momento suministrado a las ruedas posteriores del semiejes o frenos.

c) Reacciones Aerodinámicas

$P\omega_x$: Fuerza aerodinámica total en dirección paralela a la carretera.

$P\omega_z$: Fuerza de sustentación debido a la diferencia de presión del viento.

$M\omega_y$: Momento en dirección “y” del momento resultante de las fuerzas.

2.3. Dinámica Motriz del Sistema Motor-Transmisión del Automóvil

Para entender los elementos y parámetros que están involucrados en la dinámica motriz del automóvil, mostramos el siguiente esquema de bloques.

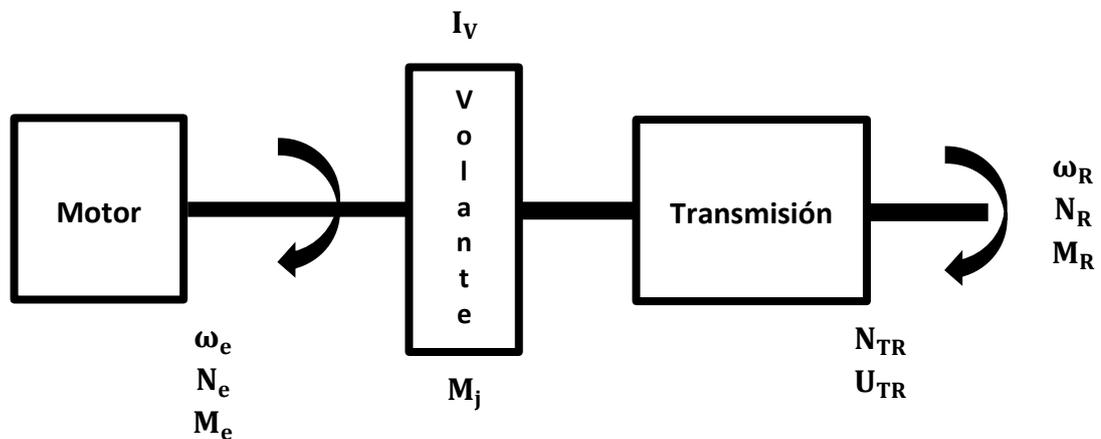


Figura 2. Esquema de la Dinámica Motriz del Vehículo

Fuente. Elaboración propia

Donde:

ω_e : Velocidad angular en el eje del cigüeñal del motor en régimen estabilizado.

N_e : Potencia desarrollada en el cigüeñal, mientras trabaja en régimen estabilizado.

M_e : Torque desarrollado en el cigüeñal, mientras trabaja en régimen estabilizado.

ω_R : Velocidad angular en los semiejes de las ruedas conductoras o motrices.

N_R : Potencia desarrollada en los semiejes de las ruedas conductoras o motrices.

M_R : Torque desarrollado en los semiejes de las ruedas conductoras o motrices.

N_{TR} : Potencia perdida en la transmisión.

M_j : Momento de inercia de las piezas giratorias del motor y la transmisión, reducidas al volante convencional del vehículo e iguales al momento de inercia reducido I_v .

U_{TR} : Relación de transmisión total de los diferentes órganos de transmisión ubicados en la línea de propulsión del vehículo.

Capítulo 3: Materiales y Métodos

3.1. Especificaciones técnicas de la Unidad vehicular High Way Mining Truck CAT 797F.

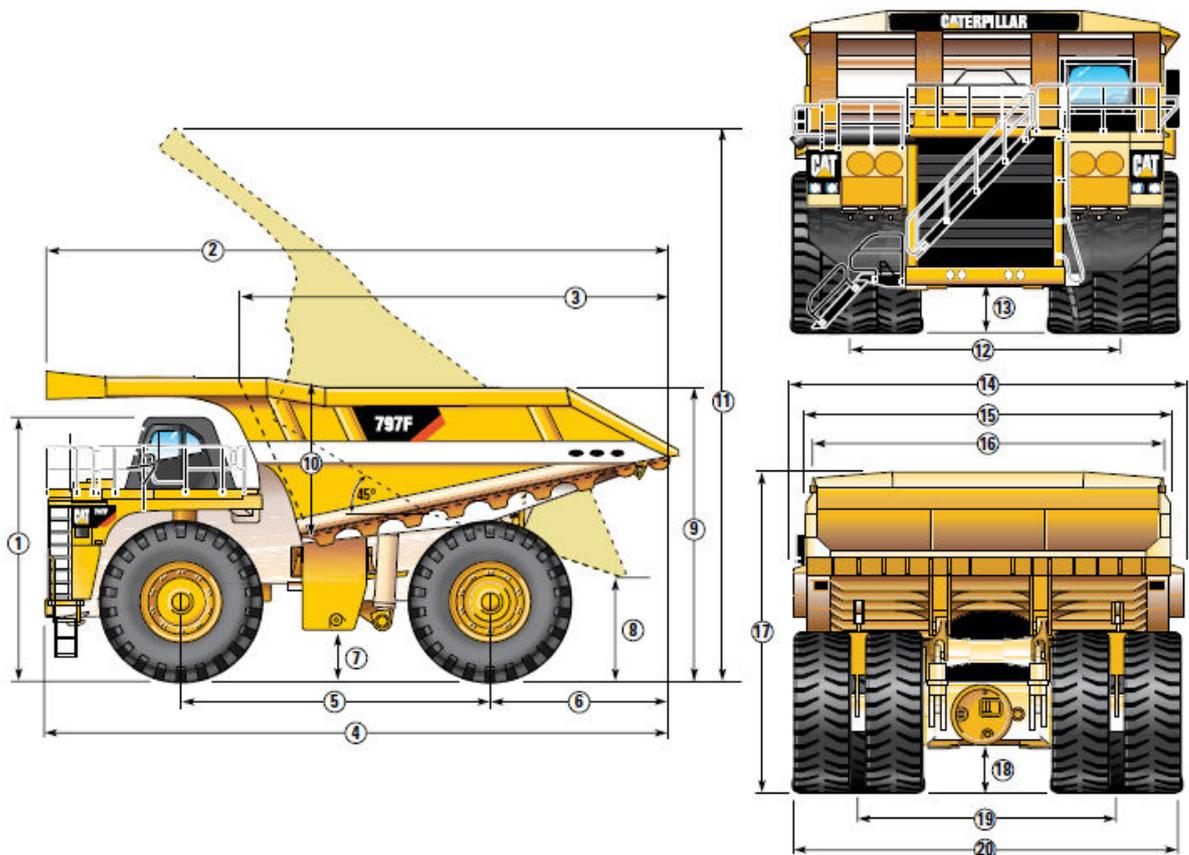


Figura 3. Unidad vehicular High Way Mining Truck CAT 797F.
Fuente. Manual Caterpillar.

3.1.1. Dimensiones Generales del Vehículo

Tabla 2. Valores de las dimensiones generales de la unidad vehicular.

ITEMS	DESCRIPCION	LONGITUD	
1	Altura hasta la parte superior de la ROPS: vacío	6 526 mm	21'5''
2	Longitud total de la caja	14 802 mm	48'7''
3	Longitud interior de la caja	9 976 mm	32'9''
4	Longitud total	15 080 mm	49'6''
5	Distancia entre ejes	7 195 mm	23'7''
6	Eje trasero a la cola	3 944 mm	12'11''
7	Espacio libre sobre el suelo con carga	786 mm	2'7''
8	Espacio libre de descarga	2 017 mm	6'7''
9	Altura de carga: vacío	6 998 mm	23'0''
10	Profundidad interior de la caja: máxima	3 363 mm	11'0''
11	Altura total: caja levantada	15 701 mm	51'6''
12	Ancho del neumático delantero de la línea de centro	6 534 mm	21'5''
13	Espacio libre del protector del motor: cargado	1 025 mm	3'4''
14	Ancho exterior de la caja	9 755 mm	32'0''
15	Ancho total del techo	9 116 mm	29'11''
16	Ancho interior de la caja	8 513 mm	27'11''
17	Altura del techo delantero: vacío	7 79 mm	25'4''
18	Espacio libre del eje trasero: cargado	947 mm	3'1''
19	Ancho del neumático doble trasero de la línea de centro	6 233 mm	20'5''
20	Ancho total entre neumáticos	9 529 mm	31'3''

Fuente. Manual Caterpillar.

3.1.2. Motor

El motor diésel Cat® C175-20 con posenfriador aire a aire y turbocompresor cuádruple que ha mejorado la capacidad de administración de potencia para máximo rendimiento de acarreo en las aplicaciones de minería más exigentes.

Tabla 3. Características del motor

DESCRIPCION	VALORES	
Modelo del motor	Cat C175-20	
Potencia bruta: SAE J1995	2 983 kW	4 000 hp
Potencia neta: SAE J1349	2 828 kW	3 793 hp
Calibre	175 mm	6.9''
Carrera	220 mm	8.7''
Cilindrada	106 L	6 469 pulg ³

Fuente. Manual Caterpillar.

- Las clasificaciones de potencia se aplican a 1 750 rpm cuando se prueban según las condiciones indicadas para la norma especificada.
- Las clasificaciones están basadas en la norma SAE J1995 sobre las condiciones del aire a 25 °C (77 °F) y 99 kPa (29.32 Hg) de presión barométrica. La potencia está basada en el combustible API de 35 a 16 °C (69 °F) y un poder calorífico de 42 780 kJ/kg (18 390 BTU/lb) con el motor a 30 °C (38 °F).
- No se requiere una reducción de potencia del motor en una configuración de baja altitud (LAA) hasta 2 134 m (7 000').
- No se requiere reducción de potencia del motor en una configuración de altitud elevada (HAA) hasta 4 877 m (16 000').
- Cumple con los requisitos de la EPA. Según corresponda, el motor Cat 175-20 cumple con los requisitos sobre emisiones de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.

3.1.3. Caja de Cambios (transmisión)

Tabla 4. Características de la caja de cambios.

VARIANTE	VELOCIDAD ALCANZADA	
Avance 1	11.3 km/h	7 mph
Avance 2	15.2 km/h	9.5 mph
Avance 3	20.5 km/h	12.7 mph
Avance 4	27.7 km/h	17.2 mph
Avance 5	37.2 km/h	23.1 mph
Avance 6	50.3 km/h	31.2 mph
Avance 7	67.6 km/h	43 mph
Retroceso	11.9 km/h	7.4 mph

Fuente. Manual Caterpillar.

3.1.4. Neumáticos

Tabla 5. Características de los neumáticos

NEUMÁTICO	TIPO DE NEUMATICO
Neumático	59/80R63: Michelin o Bridgestone

Fuente. Manual Caterpillar.

- La capacidad de producción del 797F es tal que, en determinada condiciones de trabajo, podría exceder la capacidad de los neumático estándar u operación en TKPH (TMPH) y, por lo tanto, limitaría l producción.

3.1.5. Suspensión

Tabla 6. Características de la suspensión

DESCRIPCION	MEDIDA	
Carrera efectiva del cilindro: delantera	313.6 mm	12.3''
Carrera efectiva del cilindro: trasera	165.1 mm	6.5''
Oscilación del eje trasero	$\pm 4.0^\circ$	

Fuente. Manual Caterpillar.

3.1.6. Distribución de pesos

Tabla 7. Pesos aproximados y distribuciones aproximadas del peso

Pesos aproximados: MSD II	PORCENTAJE
Eje delantero vacío	47.2 %
Eje delantero cargado	33.3 %
Eje trasero vacío	52.8 %
Eje trasero cargado	66.7 %
Distribuciones aproximadas del peso	
Eje delantero	47.2 %
Eje trasero vacío	52.8 %
Eje delantero cargado	33.3 %
Eje trasero cargado	66.7 %

Fuente. Manual Caterpillar.

3.1.7. Especificaciones de operación

Tabla 8. Valores de las especificaciones de operación

DESCRIPCION	VALORES	
Capacidad de carga útil nominal	363 tons métricas	400 tons EE.UU.
Capacidad colmada SAE (2:1)	240-267 m ³	314-350 yd ³
Velocidad máxima: cargado	67.6 km/h	42 mph
Ángulo de dirección	40 °	
Diámetro de giro de espacio libre de la máquina	42 m	138'

Fuente. Manual Caterpillar.

3.1.8. Capacidades de llenado de servicio

Tabla 9. Valores de las capacidades de llenado de servicio

DESCRIPCION	VALORES	
Tanque de combustible	3 785 l	1 000 gal EE.UU.
Sistema de enfriamiento	1 160 l	306 gal EE.UU.
Carter	319 l	84 gal EE.UU.
Ruedas delanteras, cada una	61 l	16 gal EE.UU.
Mandos finales, cada una	185 l	49 gal EE.UU.
Diferenciales	1 176 l	311 gal EE.UU.
Tanque de dirección	254 l	67 gal EE.UU.
Sistema de dirección (incluye tanque)	355 l	67 gal EE.UU.
Tuberías hidráulicas de frenos/dispositivos de levantamiento	830 l	219 gal EE.UU.
Sistema de frenos/dispositivo de levantamiento (incluye tanque).	1 600 l	441 gal EE.UU.
Tanque con frenos/dispositivo de levantamiento	770 l	203 gal EE.UU.
Sumidero de par/sistema	303 l	80 gal EE.UU.

Convertidor de par/sistema de 629 l 166 gal EE.UU.
transmisión (incluye sumidero)

Fuente. Manual Caterpillar.

3.2. Modelo de análisis

Se considerará al vehículo en régimen traccional, régimen durante el cual desde el motor se suministra una potencia o un torque a las ruedas motrices que es suficiente para vencer la resistencia que se opone a la marcha del vehículo. Cuando más severas son las condiciones de la carretera tanto más estrecho es el rango de velocidades y menores las aceleraciones posibles. En ciertas condiciones la gama se reduce hasta un único valor posible de la velocidad, estas condiciones de la carretera constituyen condiciones límites que más allá de ellas no es posible la marcha del vehículo.

a) Consideraciones del sistema vehículo y del movimiento

En la determinación de las velocidades y aceleraciones del vehículo automóvil es necesario establecer suposiciones respecto a la composición del sistema vehículo en cuanto al número de masas que la componen como la distribución de ellas, así también del carácter del movimiento de la unidad vehicular, para lo cual asumiremos las siguientes:

- El vehículo automóvil posee transmisión mecánica con relación simple entre la frecuencia de giro de todas las masas giratorias del vehículo y la frecuencia de giro del cigüeñal del motor.
- Se desprecian los desplazamientos mutuos de las diversas masas excepto de la rotación relativa de las piezas del motor, de la transmisión y de las ruedas.
- Se considera que el centro de gravedad del automóvil realiza un movimiento plano (bidimensional), copiando el perfil longitudinal de la carretera sin considerar las oscilaciones producidas por los desniveles del camino.
- Se asume que todas las fuerzas externas que actúan sobre el automóvil se encuentran en el plano del movimiento lo que reduce el análisis a un caso bidimensional en vez de tridimensional.
- Se denominará velocidad y aceleración del automóvil a las velocidades y aceleraciones de su centro de gravedad, por lo que para su determinación es suficiente conocer las fuerzas externas sobre el automóvil.

3.3. Metodología de Cálculo

Para la obtención de los diversos parámetros a estimar, se ha establecido la siguiente secuencia de cálculo basada en la teoría del automóvil (Chudakov, D.A, 1985).

- a) Cálculo de las curvas características externas de la potencia efectiva y torque efectivo, las curvas características de la potencia y el torque efectivo $Ne = f(n)$ y $Me = f(n)$, se pueden aproximar con suficiente precisión a través de las ecuaciones de Leiderman (UNT, 2007).

$$Ne = Ne_{m\acute{a}x} \left[a \left(\frac{n}{n_N} \right) + b \left(\frac{n}{n_N} \right)^2 - c \left(\frac{n}{n_N} \right)^3 \right] \dots\dots\dots(1)$$

Donde:

Ne = Potencia efectiva

$Ne_{m\acute{a}x}$ = Potencia máxima

a, b, c = Coeficientes

n = rpm

N = El torque efectivo, se calcula:

$$Me = Me_N \left[a + b \left(\frac{n}{n_N} \right) - c \left(\frac{n}{n_N} \right)^2 \right] \dots\dots\dots(2)$$

Se conoce también:

$$a = 1 - \frac{M_r}{100} * \frac{k_n(2-k_n)}{(k_n-1)^2} \dots\dots\dots(3)$$

$$b = 2 - \frac{M_r}{100} * \frac{k_n}{(k_n-1)^2} \dots\dots\dots(4)$$

$$c = \frac{M_r}{100} \left(\frac{k_n}{k_n-1} \right)^2 \dots\dots\dots(5)$$

$$M_r = \left(\frac{Me_{m\acute{a}x} - M_N}{M_N} \right) * 100 \dots\dots\dots(6)$$

$$k_n = \frac{n_N}{n_M} \dots\dots\dots(7)$$

$$k_m = \frac{Me_{m\acute{a}x}}{M_n} \dots\dots\dots(8)$$

$$M_N = \frac{3 \times 10^4}{\pi} * \frac{Ne_{m\acute{a}x}}{n_N} \dots\dots\dots(9)$$

Donde:

Ne : Potencia del motor en régimen estabilizado; [kW]

$Ne_{m\acute{a}x}$: Potencia máxima del motor; [kW]

Me : Torque en régimen estabilizado; [Nm]

M_N : Torque correspondiente al régimen de máxima potencia; [Nm]

$Me_{m\acute{a}x}$: Torque máximo; [Nm]

M_r : Reserva del troque; [%]

n_N : Velocidad del motor en régimen de máxima potencia; [rpm]

n_M : Velocidad del motor en régimen de máxima torque; [rpm]

k_n : Coeficiente de adaptabilidad por frecuencia de giro del motor

k_m : Coeficiente de adaptabilidad por torque del motor

a, b, c : Coeficientes de Leiderman para un determinado motor

b) Cálculo del nomograma de cambio de velocidades

b.1) El radio de rodadura

Para su evaluación empleamos la fórmula empírica siguiente:

$$r_r = 0,0127d + 0,00085B; [m] \dots \dots \dots (10)$$

Donde:

d : Diámetro del aro; [plg]

B : Ancho del perfil del neumático; [mm]

Reemplazando los términos de la ecuación obtenemos:

$$r_r = 0,98 m$$

b.2) La selección de las relaciones de transmisión en las diferentes posiciones de la caja de velocidades

Aplicando la ecuación de la velocidad de desplazamiento del vehículo automóvil

$$V = 0,377 * \frac{r_r \cdot n_e}{u_{tr}}; \left[\frac{km}{h} \right] \dots \dots \dots (11)$$

Donde:

n_e : Velocidad de giro del motor; [rpm]

u_{tr} : Relación de transmisión de la caja de velocidades (en alta)

Como en las especificaciones de esta unidad vehicular nos dan sus velocidades en todas las marchas para un determinado rpm, entonces podemos hallar u_{tr} para cada una de las marchas con la siguiente expresión:

$$u_{tr} = 0,377 * \frac{r_r \cdot n_e}{V} \dots \dots \dots (12)$$

c) Cálculo del balance traccional del vehículo

c.1) La fuerza de tracción bruta (desarrollada en las ruedas motrices)

$$P_T = \frac{M_e \cdot u_{tr} \cdot \eta_{tr}}{r_r} \dots \dots \dots (13)$$

$$u_{tr} = u_{cv} \cdot u_{ca} \cdot u_{pm} \dots \dots \dots (14)$$

Donde:

u_{tr} : Relación de transmisión total

u_{ca} : Relación de transmisión de la caja auxiliar

u_{pm} : Relación de transmisión del puente motriz

η_{tr} : Rendimiento de la transmisión

c.2) La fuerza de resistencia del vehículo

$$P_T = P_{\Psi+\omega+j} = P_{\Psi} + P_{\omega} + P_j \dots \dots \dots (15)$$

En condición de marcha estabilizada

$$P_j = 0$$

Luego:

$$P_T = P_{\Psi+\omega} = P_{\Psi} + P_{\omega} \dots \dots \dots (16)$$

Además:

$$P_{\Psi} = G_a \cdot \Psi \dots \dots \dots (17)$$

$$P_{\omega} = K \cdot F \cdot V^2 \dots \dots \dots (18)$$

$$\Psi = f \cdot \cos \alpha \pm \text{sen } \alpha \dots \dots \dots (19)$$

(Para pendientes menores de 10°)

$$\Psi = f \pm i \dots \dots \dots (19a)$$

$$i = \tan \alpha \dots \dots \dots (20)$$

Donde:

$P_{\Psi+\omega}$: Fuerza traccional requerida; [N]

P_{Ψ} : Fuerza de resistencia total del camino; [N]

P_{ω} : Fuerza de resistencia del viento; [N]

P_j : Fuerza de resistencia a la aceleración; [N]

G_a : Peso bruto vehicular; [N]

f : Coeficiente de resistencia a la rodadura ($f = 0,0175$)

i : Pendiente dl camino

K : Coeficiente de resistencia del aire ($K = 0,7 \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$)

F : Área frontal del vehículo automóvil; [m^2]

V: Velocidad de desplazamiento del vehículo automóvil; [km/h]

d) Característica universal o pasaporte del vehículo automóvil

El pasaporte dinámico del vehículo automóvil se configura simplemente agregando a la característica dinámica un nomograma de carga y el diagrama de control de patinaje.

d.1) Factor dinámico del vehículo automóvil

$$D = \frac{P_T - P_\omega}{G_a} \dots\dots\dots(21)$$

d.2) Construcción del nomograma de carga

Tenemos:

$$D_x = \frac{G_a}{G_x} \cdot D_{100} \dots\dots\dots(22)$$

Donde:

D_{100} : Factor dinámico del vehículo con carga completa

D_x : Factor dinámico del vehículo con carga parcial

G_x : Carga parcial del vehículo automóvil

Estableciendo las condiciones dinámicas para el vehículo completamente descargado.

Tenemos:

$$D_0 = \frac{G_a}{G_0} \cdot D_{100} \dots\dots\dots(23)$$

Donde:

G_0 : Peso seco del vehículo automóvil

Escala para el % de carga

$$10 \text{ mm} \dots\dots\dots 1 \% \text{ carga}$$

Escala para D_{100}

$$D_{100} = 0,1 \text{ N/N} \dots\dots\dots a_{100} = 20 \text{ mm}$$

Escala para D_0 :

$$a_0 = \frac{G_0}{G_a} \cdot a_{100} \dots\dots\dots(24)$$

$$a_0 = 5,607 \text{ mm}$$

d.3) Construcción de la característica universal o Pasaporte dinámico

En el estado límite de la primera condición de marcha, tenemos:

$$P_T = P_\varphi$$

Luego:

$$D_\varphi = \frac{P_\varphi - P_\omega}{G_a} \dots\dots\dots(25)$$

$$P_\varphi = \varphi \cdot RZ_2 \dots\dots\dots(26)$$

$$m_{R2} = \frac{RZ_2}{G_2} \dots\dots\dots(27)$$

Donde:

D_φ : Factor dinámico por adherencia

P_φ : Fuerza de adherencia; [N]

φ : Coeficiente de adherencia

RZ_2 : Reacción normal en el eje posterior; [N]

m_{R2} : Coeficiente de redistribución de carga en el eje posterior

Durante el patinaje del vehículo, la velocidad de desplazamiento es relativamente pequeña. Por lo tanto, se puede asumir:

$$P_\omega = 0$$

Además, durante el patinaje se puede considerar que la reacción normal sobre las ruedas posteriores es igual a la carga soportada por el eje posterior, entonces:

$$m_{R2} = \frac{RZ_2}{G_2} = 1$$

Con las consideraciones mencionadas y de las ecuaciones anteriores, obtenemos:

$$D_\varphi = \frac{G_2}{G_a} \cdot \varphi \dots\dots\dots(28)$$

Para carga completa y descarga tenemos:

$$D\varphi_{100} = \frac{Ga_2}{G_a} \cdot \varphi \dots\dots\dots(29)$$

$$D\varphi_0 = \frac{Go_2}{G_o} \cdot \varphi \dots\dots\dots(30)$$

Escala para $D\varphi_{100}$:

$$b_{100} = \frac{Ga_2}{G_a} \cdot a_{100} \dots\dots\dots(31)$$

$$b_{100} = 15,710 \text{ mm}$$

Escala para $D\varphi_0$:

$$b_o = \frac{Go_2}{G_o} \cdot a_o \dots\dots\dots(32)$$

$$b_o = 2,643 \text{ mm}$$

e) Balance de la potencia del vehículo automóvil

e.1) La potencia traccional disponible

$$N_T = \frac{P_T \cdot V}{3600}; [kW] \dots\dots\dots(33)$$

e.2) La potencia traccional requerida

Del balance de potencias tenemos:

$$N_T = N_\psi + N_\omega + N_j \dots\dots\dots(34)$$

Condición de marcha estabilizada:

$$N_j = 0$$

Luego:

$$N_T = N_{\psi+\omega} = N_\psi + N_\omega \dots\dots\dots(35)$$

Además:

$$N_\psi = \frac{P_\psi \cdot V}{3600} \dots\dots\dots(36)$$

$$N_\omega = \frac{P_\omega \cdot V}{3600} \dots\dots\dots(37)$$

Donde:

$N_{\psi+\omega}$: Potencia traccional requerida; [kW]

N_ψ : Potencia invertida en vencer la resistencia total del camino; [kW]

N_ω : Potencia invertida en vencer la resistencia del viento; [kW]

N_j : Potencia invertida en vencer la resistencia a la aceleración; [kW]

f) Aceleración del vehículo automóvil

$$j = \frac{g}{\delta_{rot}} \cdot (D - \psi); [m/s^2] \dots\dots\dots(38)$$

$$\delta_{rot} = 1,04 + 0,04u_{cv}^2 \dots\dots\dots(39)$$

Donde:

g : Aceleración de la gravedad; [9,81 m/s²]

δ_{rot} : Coeficiente que considera las masas en rotación del vehículo

La condición del camino la asumiremos cuando:

$$i = 0 \%, \text{ entonces: } \psi = f = 0,0175$$

Luego evaluamos los valores de δ_{rot} en cada marcha.

g) Tiempo y distancia de aceleración del vehículo

La determinación del tiempo y aceleración del vehículo se puede a través de las relaciones siguientes:

$$j_m = \frac{j_i + j_{i+1}}{2} \dots\dots\dots(40)$$

$$\Delta t_i = \frac{V_{i+1} - V_i}{3,6 \cdot j_m} \dots\dots\dots(41)$$

$$t_{ac} = \sum_{i=1}^{i=n} \Delta t_i \dots\dots\dots(42)$$

$$\Delta S_i = \frac{V_m \cdot \Delta t_i}{3,6} \dots\dots\dots(43)$$

$$S_{ac} = \sum_{i=1}^{i=n} \Delta S_i \dots\dots\dots(44)$$

$$V_m = \frac{V_i + V_{i+1}}{2} \dots\dots\dots(45)$$

Donde:

Δt_i : Intervalo de tiempo desde V_i hasta V_{i+1} ; [s]

t_{ac} : Tiempo total de aceleración; [s]

ΔS_i : Distancia recorrida mientras acelera desde V_i hasta V_{i+1} ; [m]

j_m : Aceleración media durante el intervalo de tiempo Δt_i ; [m/s^2]

V_m : Velocidad media durante el intervalo de tiempo Δt_i ; [km/h]

h) Consumo económico del combustible en carretera

Para la evaluación de la economía de combustible de un automóvil en carretera, se usa como índice fundamental la cantidad de combustible en litros que consume el automóvil por cada 100 km de recorrido en movimiento uniforme, bajo determinadas condiciones de carretera.

$$Q_S = \frac{g_e \cdot N \cdot \psi + \omega}{10 \cdot \rho_c \cdot \eta_{tr} \cdot V} \dots\dots\dots(46)$$

$$g_e = k' \cdot k'' \cdot g_N \dots\dots\dots(47)$$

$$k' = f\left(\frac{n}{n_N}\right) \dots\dots\dots(48)$$

$$k'' = f\left(\frac{N_e}{N'_e}\right) \dots\dots\dots(49)$$

Donde:

Q_S : Consumo de combustible; $\left[\frac{l}{100 \text{ km}}\right]$

ρ_c : Densidad de la transmisión ($\rho_c = 0,731 \text{ kg/l}$)

η_{tr} : Rendimiento de la transmisión ($\eta_{tr} = 0,85$)

g_e : Consumo específico correspondiente al régimen de funcionamiento del motor;
 $\left[\frac{g}{kW-h}\right]$

g_N : Consumo específico correspondiente en el régimen de máxima potencia; ($g_N = 209 \frac{g}{kW-h}$)

k' : Coeficiente que considera la dependencia del consumo específico del combustible en función de la velocidad de giro del cigüeñal

k'' : Coeficiente que considera la dependencia del consumo específico del combustible en función del grado de utilización de la potencia

La característica económica del consumo de combustible se evalúa a través de la gráfica de la función:

$$Q_s = f(V, \psi)$$

Internacionalmente se acepta que la prueba experimental del vehículo sea en la marcha en directa y se deba realizar para las siguientes condiciones resistivas del terreno:

1°) $\psi_1 = f$

$$\psi_1 = 0,0175$$

2°) $\psi_2 = \frac{f+0,8.\psi_{m\acute{a}x}}{2}$

$$\psi_2 = 0,03027$$

3°) $\psi_3 = 0,8.\psi_{m\acute{a}x}$

$$\psi_3 = 0,04304$$

Capítulo 4: Resultados y Discusión

4.1. Curvas características

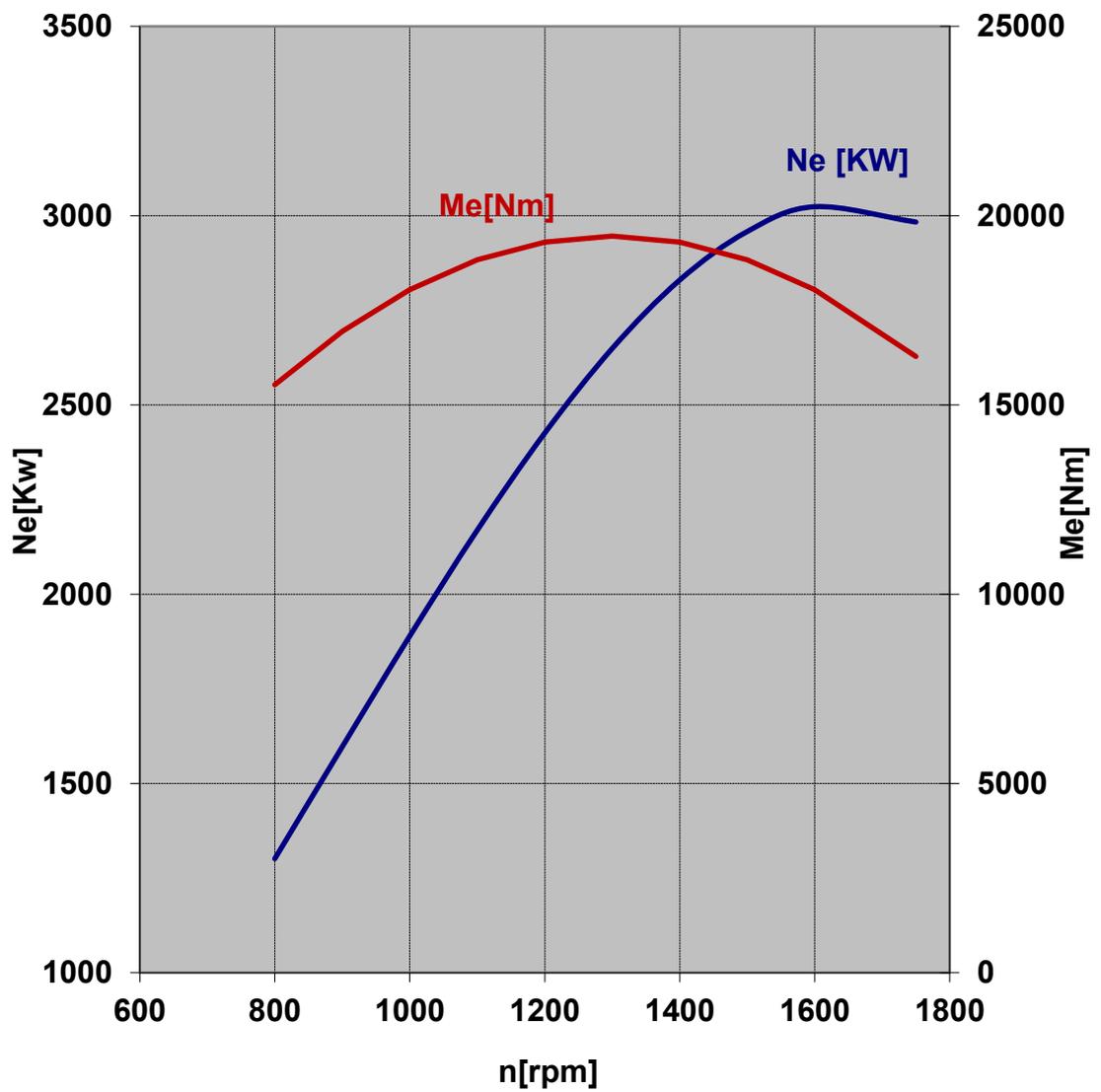


Figura 4. Curvas características del motor
Fuente. Elaboración propia

En la Figura 4, se aprecia el comportamiento de las curvas características del torque y la potencia, obtenidas a partir del método de Leiderman. Las cuales resultan preponderante para la determinación del comportamiento dinámico-traccional y de consumo de combustible del vehículo, en vista que el fabricante no provee esta información.

4.2. Velocidades del motor

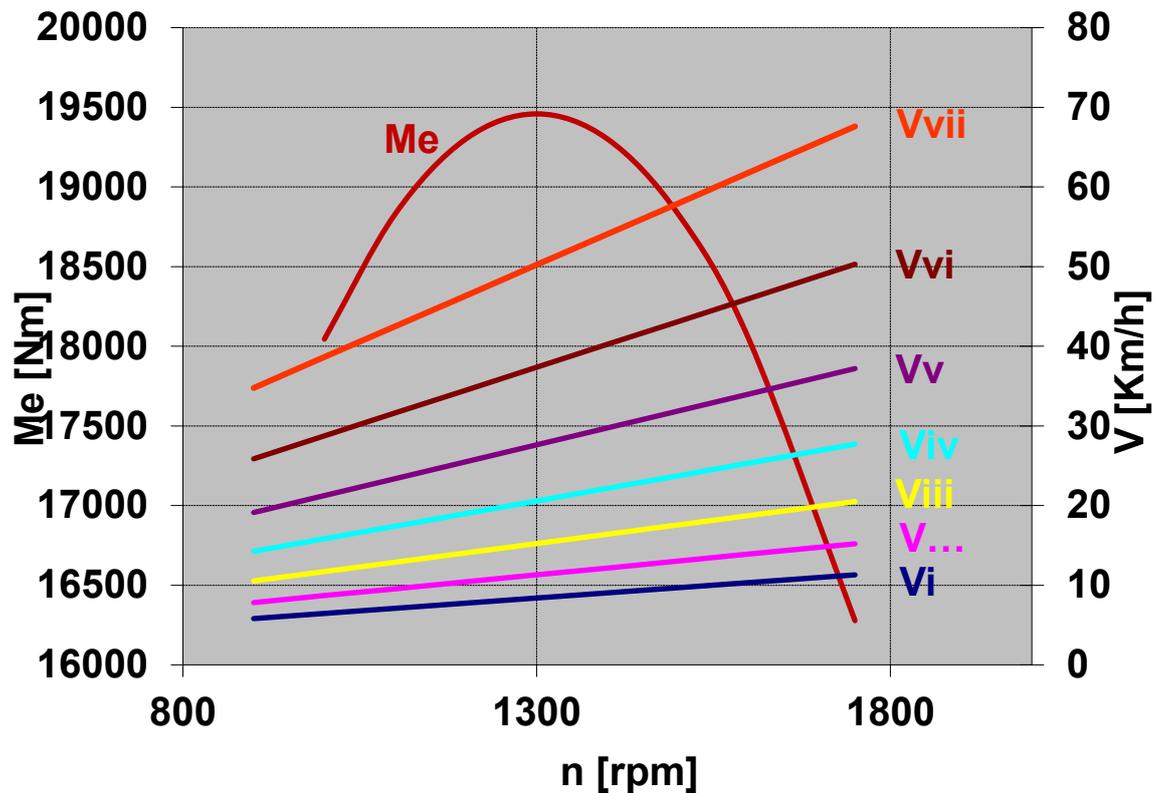
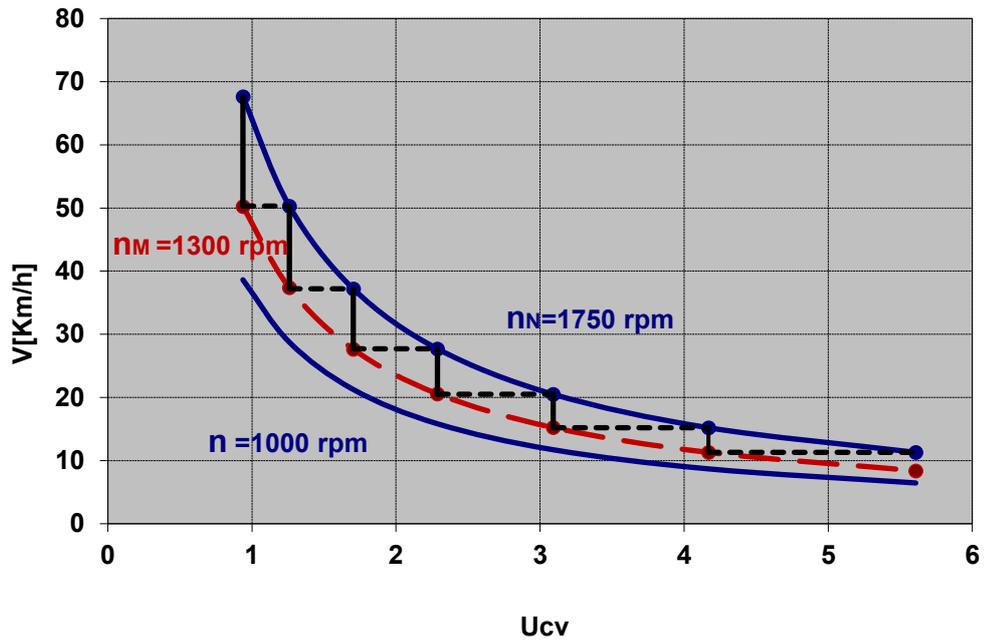


Figura 5. Régimen de velocidad en cada marcha

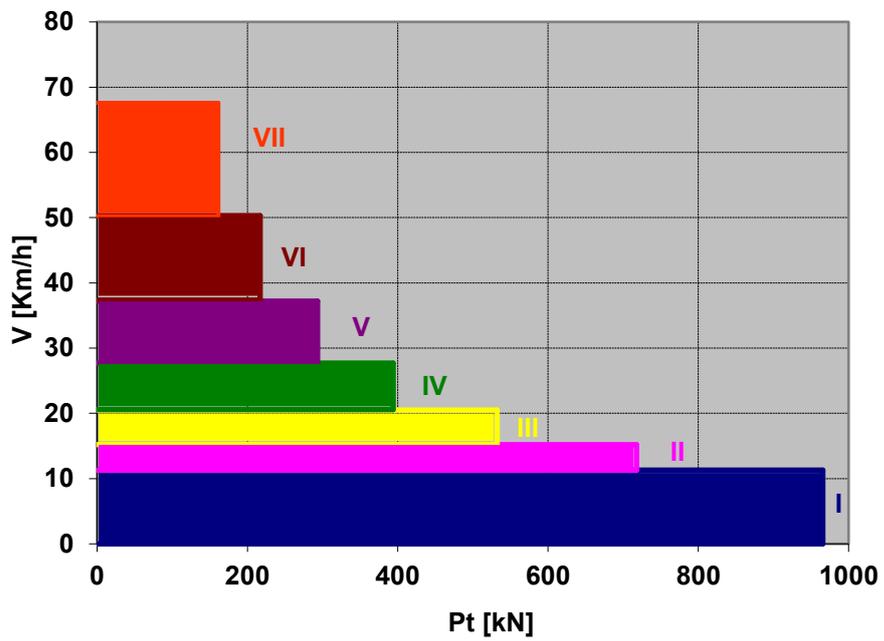
Fuente. Elaboración propia

Asimismo, en la Figura 5, se puede ver como oscila la velocidad del vehículo en cada una de las 7 marchas consideradas. Alcanzando como velocidades máximas para las siete marchas desde la primera a la séptima: 11.300, 15.200, 20.500, 27.700, 37.200, 50.300 y 67.600 km/h, respectivamente.

4.3. Cambio de velocidades



a)



b)

Figura 6. Cronograma de cambio de velocidades, a) En función de la relación de transmisión; b) En función de la potencia

Fuente. Elaboración propia

Las Figuras 6a y 6b representan el cronograma de cambio de velocidades. En Figura 6a se esquematiza como se realizará el cambio de marcha desde la primera a la séptima. El cual se llevará a cabo a partir de lograr el máximo de revoluciones (n_N) en la primera marcha desembragando hasta llegar a un número de revoluciones cercano al del máximo torque (n_M) pero nunca menor a éste (ej. 1300 rpm) y luego ejecutar la segunda marcha, repitiendo sucesivamente este procedimiento hasta la séptima marcha. Mientras en la Figura 6b se puede observar la fuerza traccional que la rueda motriz ejerce sobre la carretera en cada una de las marchas ejecutadas en el régimen de máximo torque (n_M) las cuales varían desde 161.423 kN en la séptima marcha hasta 965.681 kN en la primera marcha.

4.4. Fuerza de tracción y fuerzas de resistencia

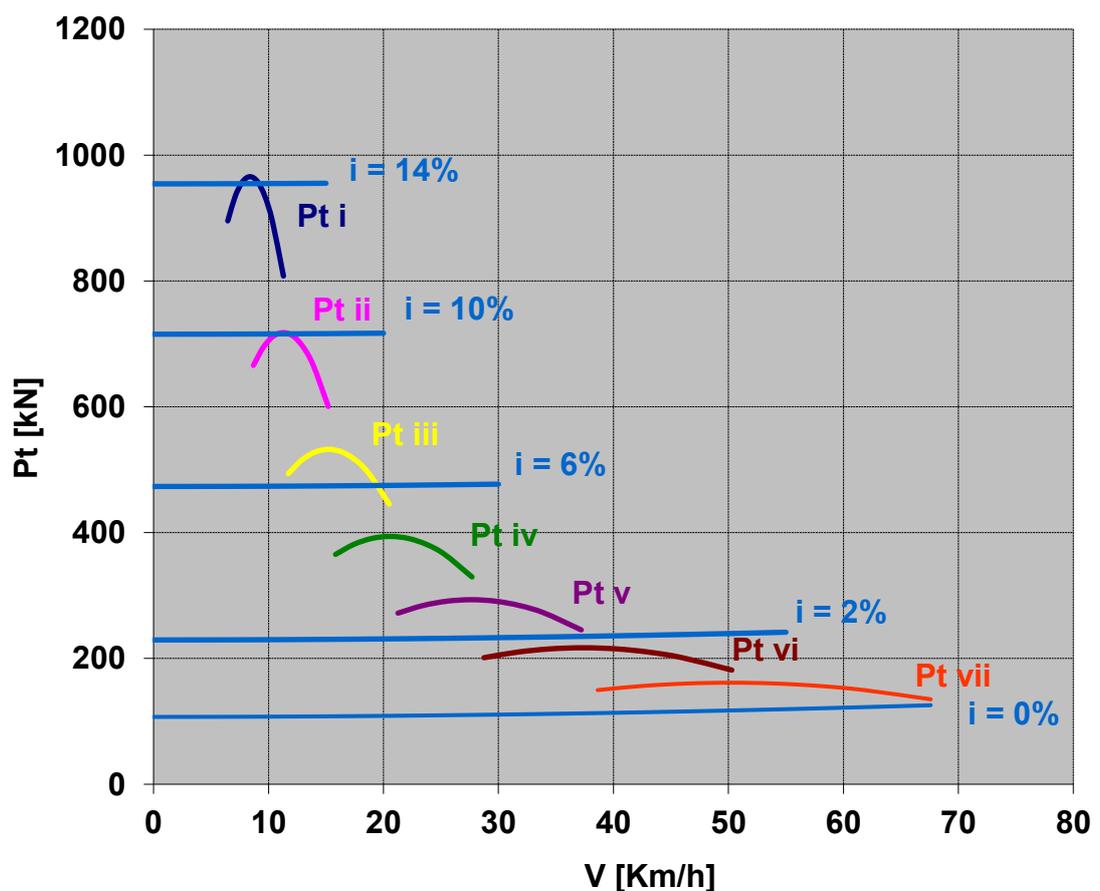


Figura 7. Fuerza de tracción bruta y fuerzas de resistencia al avance

Fuente. Elaboración propia

En la Figura 7, tenemos el comportamiento de la fuerza de tracción bruta o simplemente fuerza de tracción. La cual tendrá que ser suficiente para vencer la fuerza de resistencia al avance la cual se compone de la resistencia a la pendiente del camino, la fricción del camino, la resistencia del viento y las fuerzas inerciales debido al movimiento inestable del vehículo.

De la figura se aprecia que, a mayor pendiente, la resistencia al avance es mucho mayor y por lo tanto la marcha del vehículo tiene que ser menor para tener una fuerza de tracción mayor que permita que éste continúe avanzando. Claramente, todos los puntos de intersección entre ambas curvas son todas las posibilidades de movimiento en régimen estabilizado. Se puede notar además que en pendientes muy pequeñas menores al 2% el vehículo puede desplazarse en su máxima velocidad manteniendo una fuerza de tracción casi constante. Finalmente, se estimó que el vehículo puede superar una pendiente máxima no mayor al 14% en las mejores condiciones de carretera (carretera asfaltada en buen estado), no mayor al 10% en condiciones intermedia de ésta (carreteras de suelo después de lluvia) y no mayor al 6% en las peores condiciones de carretera (carreteras arenosas).

4.5. Factor dinámico del vehículo

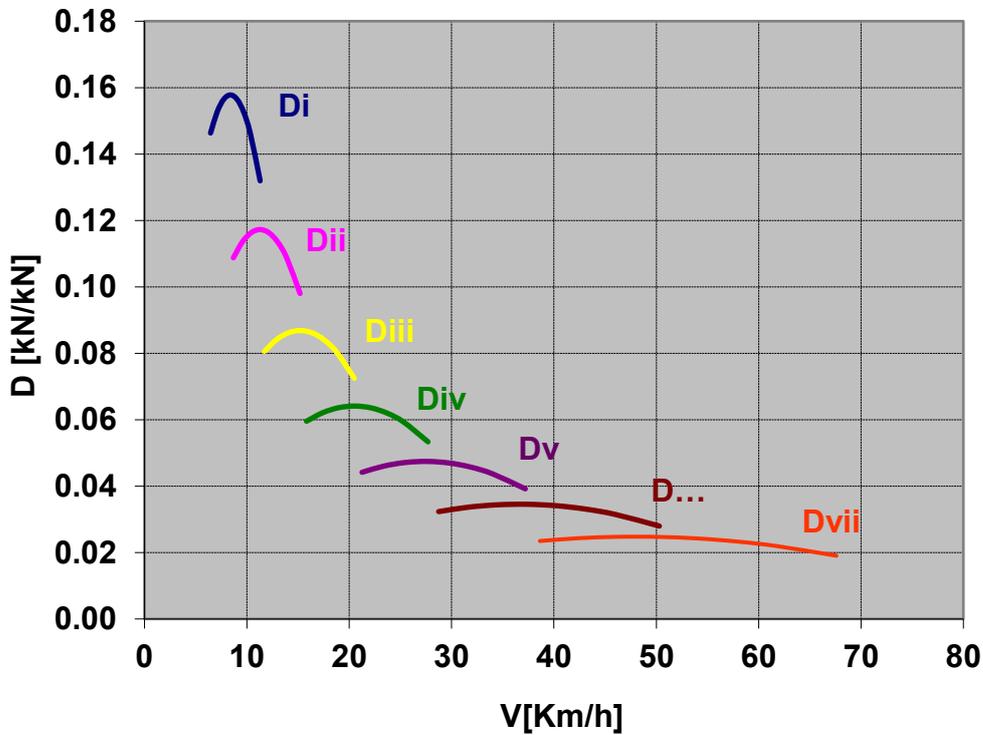


Figura 8. Factor dinámico del vehículo

Fuente. Elaboración propia

En la Figura 8, tenemos el comportamiento del factor dinámico en cada una de las marchas del vehículo, el cual tiene el mismo comportamiento que el de la fuerza traccional, ya que éste representa la cantidad de fuerza por cada unidad de peso del vehículo para poder vencer la resistencia de la carretera y las fuerzas inerciales del vehículo, sin considerar la resistencia de viento. En las condiciones de pendientes más adversas estas fuerzas de resistencia representan el 50% del peso bruto vehicular (PBV) mientras que menor al 5% del PBV en pendientes pequeñas (menores al 5%).

4.6. Pasaporte dinámico

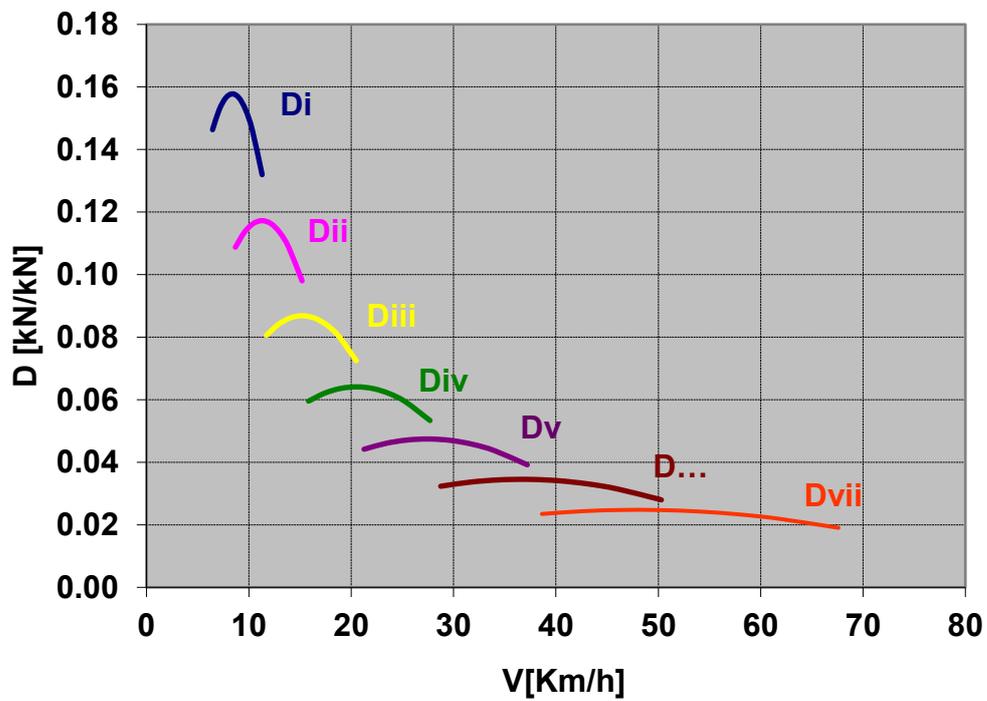
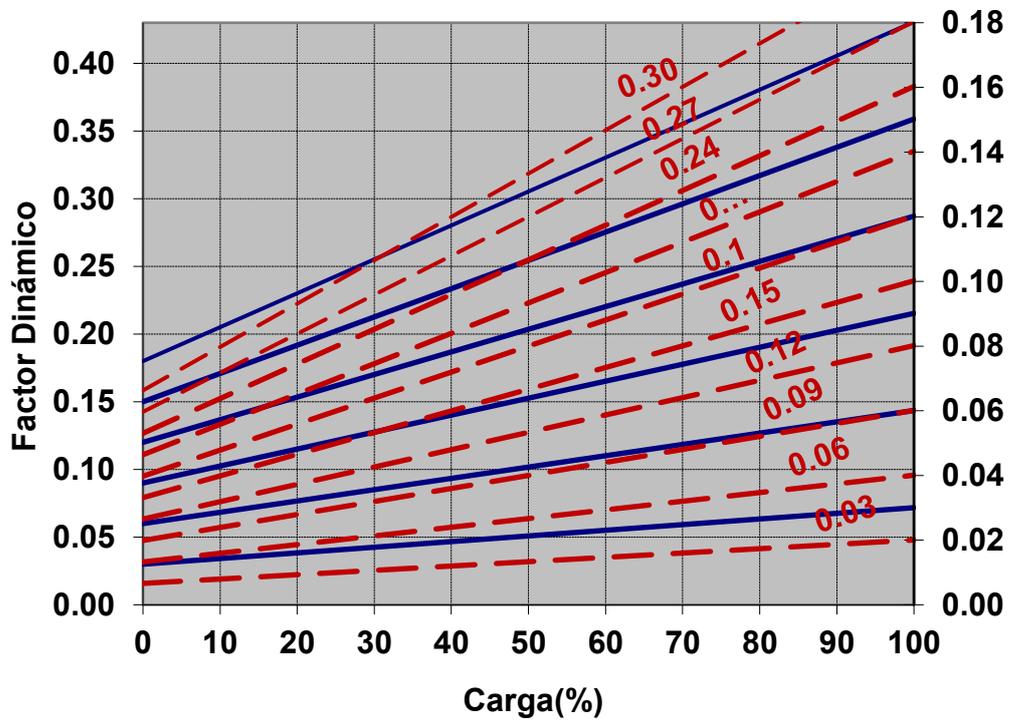


Figura 9. Pasaporte dinámico del vehículo

Fuente. Elaboración propia

Asimismo, en la Figura 9, se muestra la característica universal del vehículo o pasaporte dinámico, el cual es el acoplamiento del diagrama del factor dinámico con el nomograma de carga y el control de patinaje. En este diagrama se puede analizar y determinar gráficamente los valores del factor dinámico al variar la carga del vehículo, así como sus límites para que éste no patine en carretera.

4.7. Balance de potencia del vehículo

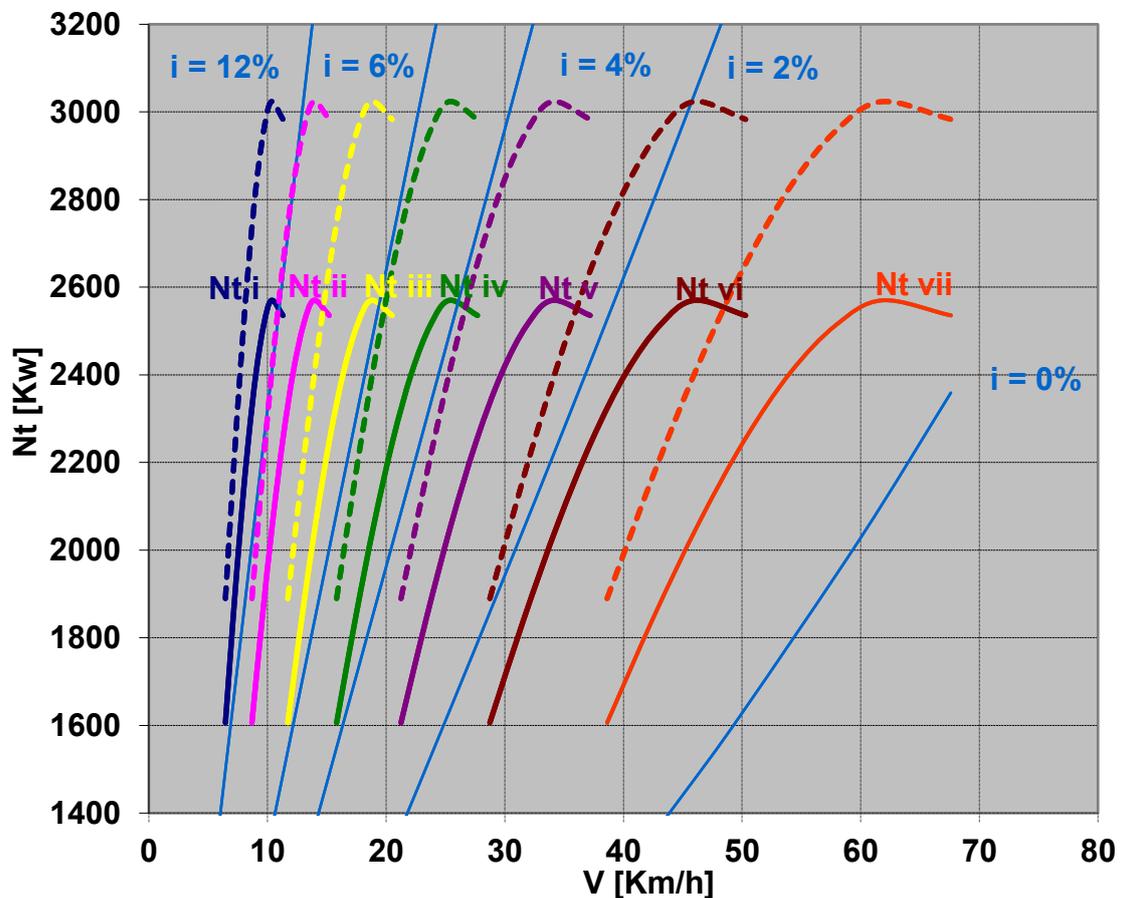


Figura 10. Balance de potencia del vehículo

Fuente. Elaboración propia

En la Figura 10, se muestra el comportamiento de la potencia traccional a desarrollar por el vehículo en los diferentes regímenes de marcha y gama de velocidades en los

que se puede realizar, notándose claramente que a medida que las resistencias debido a la carretera (las cuales incluyen la fricción del camino y la pendiente del mismo) y el viento aumentan líneas de color celeste), el régimen de marcha necesariamente debe disminuirse a fin de que el vehículo siga en marcha. Además, se puede notar para cada régimen de marcha en líneas discontinuas sus respectivas curvas de potencia efectiva desarrollada por el motor donde la diferencia de ésta con la de la potencia traccional es debido a las pérdidas en la transmisión, alcanzándose una pérdida máxima de 447.46 kW.

4.8. Aceleración del vehículo

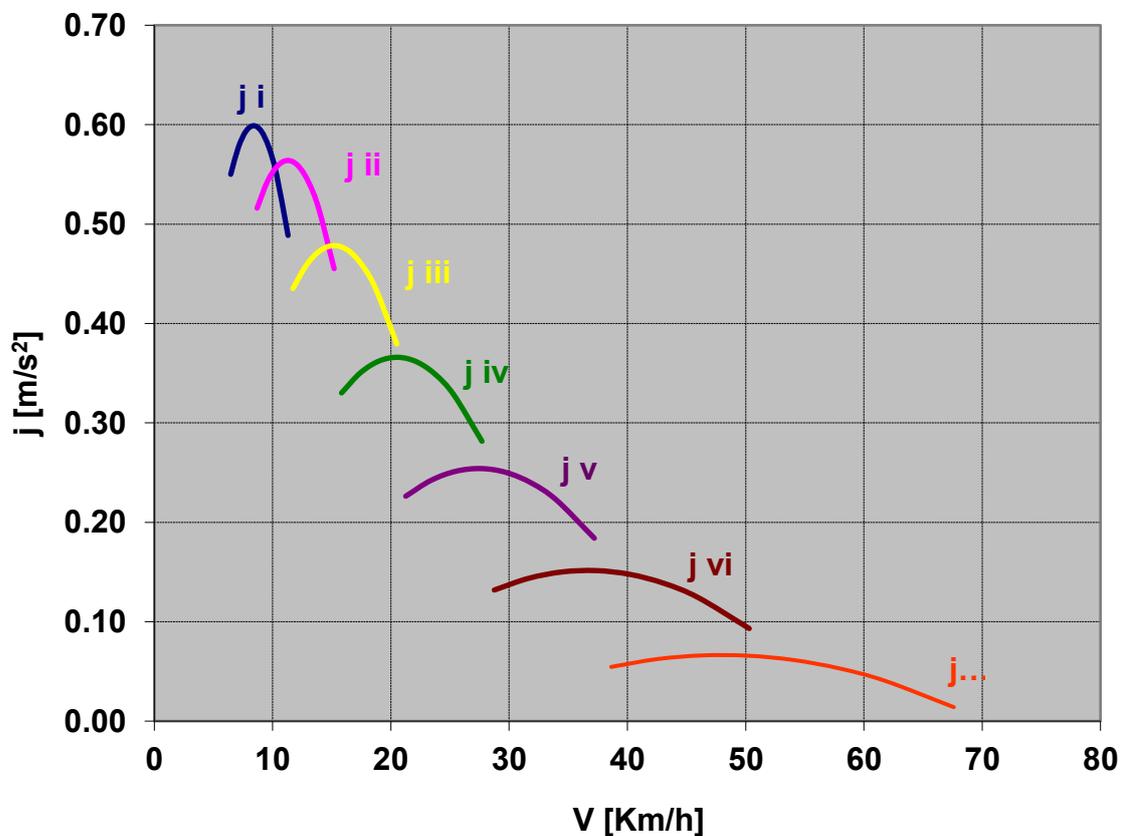


Figura 11. Aceleración del vehículo
Fuente. Elaboración propia

En la Figura 11, se puede apreciar el comportamiento de las curvas de la aceleración del vehículo en sus diferentes regímenes de velocidad, mostrando el clásico comportamiento verificado en los vehículos pesados y semipesados, es decir con

curvas entrecruzadas en las primeras marchas, mostrando para nuestro vehículo que la aceleración máxima alcanza un valor de 0.6 m/s^2 en la segunda marcha y una aceleración mínima de 0.01 m/s^2 en la séptima marcha.

4.9. Tiempo y distancia de aceleración

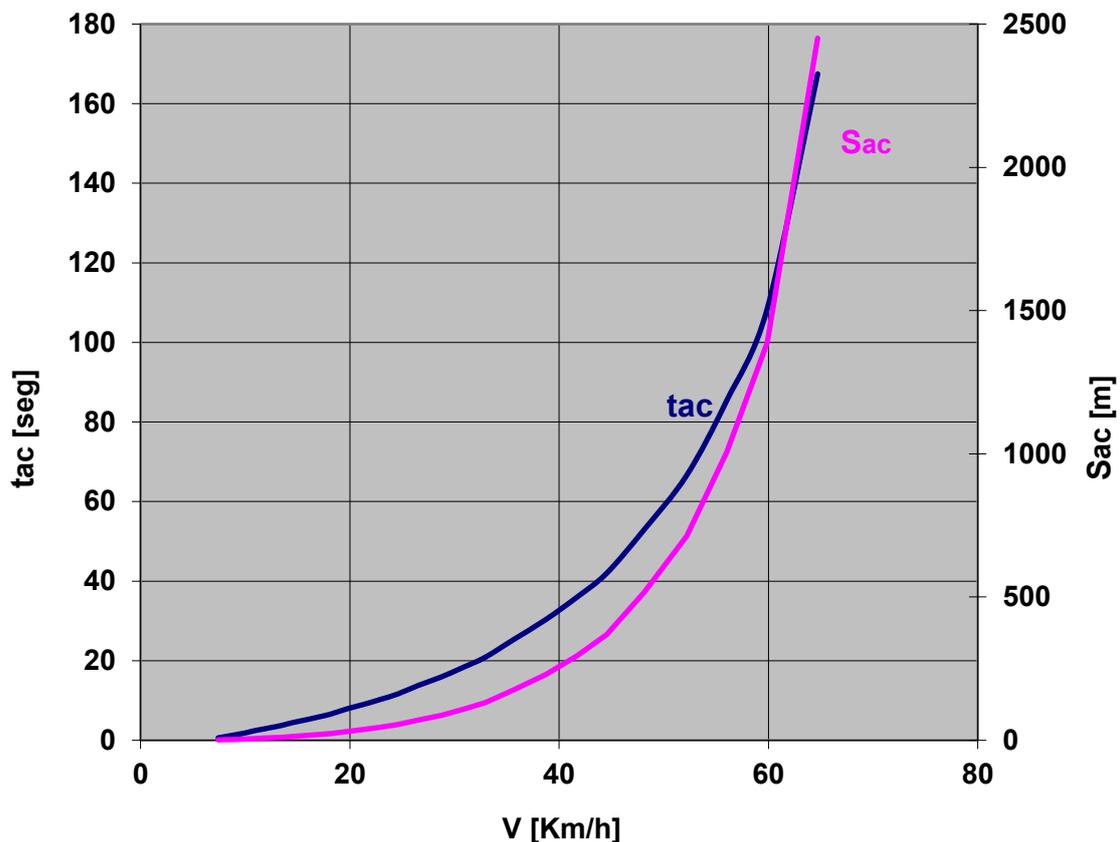


Figura 12. Tiempo y distancia de aceleración del vehículo
Fuente. Elaboración propia

La Figura 12 nos muestra el comportamiento de dos parámetros que nos indican la susceptibilidad de los automóviles, es decir la capacidad que tiene éste a la elevación del régimen de velocidad, siendo estos parámetros el tiempo máximo de aceleración (es decir el tiempo hasta alcanzar la máxima velocidad posible) y la distancia máxima de aceleración. Es evidente que ambas curvas son crecientes mostrando asimismo un comportamiento parabólico. Alcanzando en este caso para el vehículo CAT 797F una distancia máxima de aceleración de 2450.735 m y un tiempo máximo de aceleración de 167.482 s.

4.10. Consumo de combustible

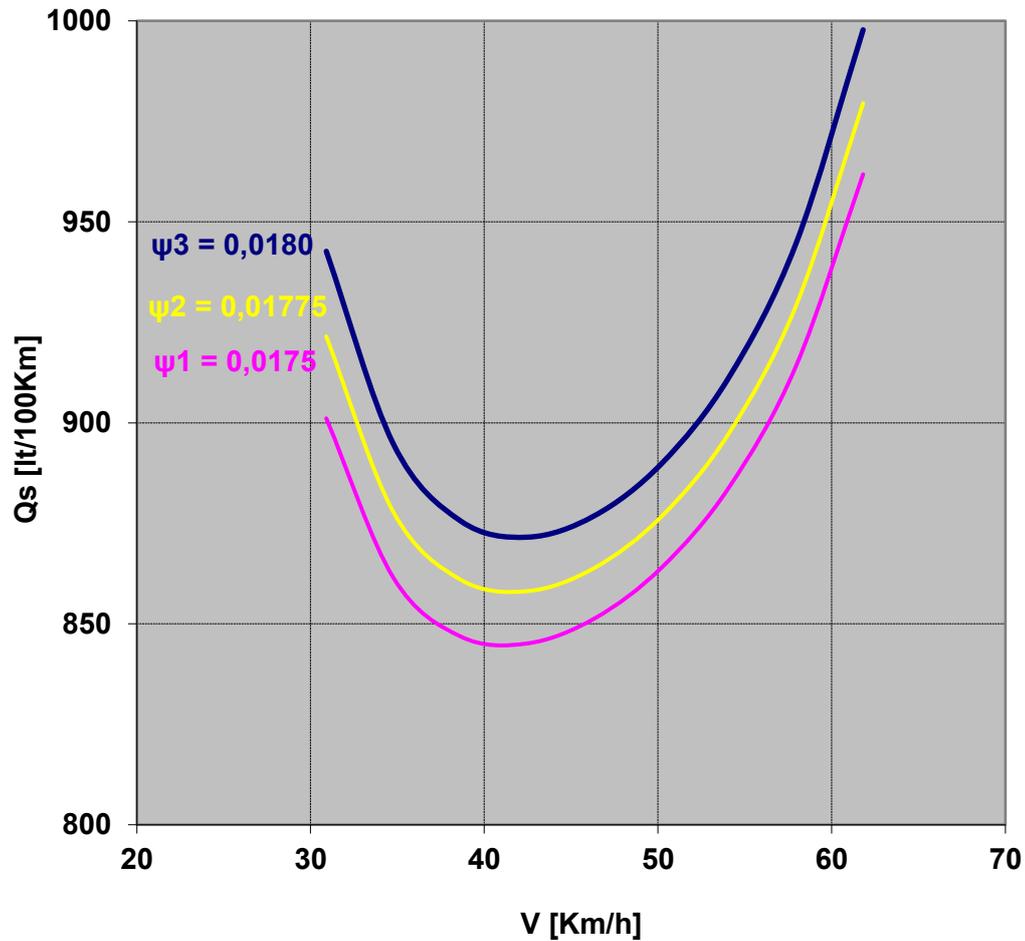


Figura 13. Consumo de combustible en carretera

Fuente. Elaboración propia

Finalmente, en la Figura 13, podemos ver la característica económica del consumo de combustible en carretera para condiciones estacionarias y para tres tipos de carreteras estandarizadas. Para las condiciones de carretera $\psi_1=0.0175$ y $\psi_2=0.01775$ un rango de velocidades recomendable sería entre 32 y 60 km/h alcanzando sus valores óptimos de velocidad es de 42.491 km/h para ambos casos. Para la condición de carretera $\psi_3=0.0180$ un rango recomendable de velocidades sería entre 35 y 55 km/h alcanzando un valor óptimo de 42.491 km/h.

Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

1. Se comprobó que la mayor fuerza de tracción bruta desarrollada por el vehículo se presentó en la menor marcha de éste alcanzando el valor de 965.681 kN, además se encontró que la máxima velocidad que puede desarrollar la unidad vehicular a plena carga es de aproximadamente 68 km/h en carretera sin pendiente.
2. Se encontró que la potencia traccional máxima desarrollada por el vehículo es de 2983.070 kW. Asimismo, la máxima pérdida debido a los elementos de transmisión es de 447.46 kW, además se verificó que, para mayores pendientes de la carretera, el vehículo logra un funcionamiento posible en regímenes de menores marchas o mayores relaciones de transmisión.
3. Se determinó que la mayor resistencia ofrecida por la carretera que puede vencer la unidad vehicular en régimen estabilizado es de $\psi = 0,1560$, siendo la pendiente máxima a vencer de 14% ($7,9696^\circ$) en carretera asfaltada y 6% ($3,4346^\circ$) en carretera arenosa, el factor dinámico en las condiciones más adversas de la carretera resulto ser de aproximadamente 0.5, lo que significa que en estas condiciones las fuerzas del camino a vencer representan la mitad del peso bruto vehicular, además se determinó que la máxima aceleración desarrollada por la unidad vehicular fue de 0.60 m/s^2 y el tiempo máximo de aceleración y la distancia máxima fueron de 167.482 s y 2450.735 m respectivamente.
4. Se encontró que la economía de combustible que se puede explotar en la unidad vehicular se produce en el rango de velocidades de 35 a 55 km/h con un valor óptimo de alrededor de 42 km/h para la condición de carretera.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda investigar las características aerodinámicas en este tipo de unidades vehiculares para obtener valores más fiables en los coeficientes aerodinámicos y en consecuencia obtener resultados más precisos.
- Se sugiere realizar el análisis del consumo de combustible, usando diferentes biocombustibles las cuales serán de gran utilidad para optimizar el consumo económico de combustible en carretera y reducir emisiones de gases dañinos.
- Se recomienda repetir el análisis desarrollado, pero en el caso de régimen inestable, lo cual nos ayudara a comprender mejor esta unidad vehicular, así como de desarrollar nuevos modelos para la mejor predicción de los parámetros dinámico-traccionales.

Capítulo VI: Referencias Bibliográficas

- Ahn, K., Rakha, H., Trani, A. & Van Aerde, M. (2002). Estimating Vehicle Fuel Consumption on Instantaneous Speed and Acceleration Levels. *Journal of Transportation Engineering*. 128(2): 182-190.
- AAP. (2013). Boletín Informático N° 69. 6p. Recuperado el 5 de julio de <http://www.aap.org.pe/boletin/>.
- Assanis, D., Bryik, W., Chalhoub, N., Fiipi, Z. et al. (1999). Integration and Use of Diesel Engine and Vehicle Dynamics Model for Heavy Duty Truck Simulation. *Society of Automotive Engineers*. Documento técnico SAE 1999-01-0970.16p.
- Aleksandrov, I.K. (2007). Energy Efficiency of a Machine with Partial Energy Recuperation. *Russian Engineering Research*. 27(9): 581-583.
- Aleksandrov, I.K., Nesgovorov, E.V. & Rakov, V.A. (2010). Tractional calculations for vehicles with adaptive motors. *RussJan. Engineering. Research*. 30, 122–124. <https://doi.org/10.3103/S1068798X1002005X>.
- BBVA (2013) Perú: Situación Automotriz.14p. BBVA Research Perú.
- Chudakov, D.A. (1985). Fundamentos de Tractores y Automóviles. Editorial Mir, Moscú.
- Kim, K. & Chien, S.I. (2011). Optimal Train Operation for Minimum Energy Consumption Considering Track Alignment, Speed Limit and Schedule Adherence. *Journal of Transportation Engineering* 137(9): 665-674.

- MTC (2012). Parque Vehicular Nacional Estimado, Segun Clase De Vehiculo: 2003-2012. Sitio web: <http://www.mtc.gob.pe/estadisticas/t-carretero.html>. Visitado 18/07/2019.
- Rakha, H. & Ding, Y. (2003). Impact of Stops on Vehicle Fuel Consumption and emissions 129(1): 23-32.
- Rakha, P. & Lucic, I. (2002). Variable Power Dynamics Model for Estimating Truck Accelerations. *Journal of Transportation Engineering* 128(5): 412-419.
- Rakha, P.; Lucic, I.; Demarchi, S.E.; Setti, J.R. & Van Aerde, M. (2001). Vehicle Dynamics Model for Predicting Maximum Truck Acceleration Levels. *Journal of Transportation Engineering* 127(5): 418-425.
- Rakha, P. & Yu, B. (2004). Truck Performance Curves Reflective of Truck and Pavement Characteristics. *Journal of Transportation Engineering* 130(6): 753-767.
- Small, K.A. & Kazimic, C. (1995). On the Costs of Air Pollution from Motor Vehicles. *Journal of Transport Economics & Policy* 29(1): 7-32.
- UNT, (2007). Apuntes del Curso Ingeniería Automotriz, Trujillo. Perú

Capítulo VII

Anexos

Tabla N° 01. Especificaciones técnicas de la unidad vehicular

Tabla N° 02. Potencia y torque para diferentes velocidades angulares

Tabla N° 03. Velocidad del vehículo en cada marcha

Tabla N° 04. Fuerza de tracción bruta desarrolladas en las ruedas motrices

Tabla N° 05. Fuerza requerida para vencer diferentes pendientes

Tabla N° 06. Factor dinámico del vehículo

Tabla N° 07. Potencia traccional del vehículo

Tabla N° 08. Potencia requerida del vehículo para diferentes pendientes

Tabla N° 09. Aceleración del vehículo

Tabla N° 10. Tiempo y distancia de aceleración del vehículo

Tabla N° 11. Consumo de combustible en carretera

Tabla N° 01. Especificaciones técnicas de la unidad vehicular

Especificaciones	Símbolo	CAT C175-20
Combustible	D2	Diesel
n° Cilindros	i	20
Diámetro (mm)	D	175
Carrera (mm)	S	220
Cilindrada (lt)	i.Vh	106
Potencia Máxima (Kw)	$N_{e_{máx}}$	2983
RPM de Potencia Máxima	n_N	1750
Torque Máximo (Nm)	$M_{e_{máx}}$	19458.7
RPM de Torque Máximo	n_M	1300
Torque en Máxima Potencia	M_N	16277.5
Reserva de Torque (%)	M_r	19.544
Coef. de Adapt. por Torque	k_m	1.195
Coef. de Adapt. por Frec. Giro	k_n	1.346
Coeficientes de Leidermann	a	-0.436
	b	4.391
	c	2.956

Tabla N° 02. Potencia y torque para diferentes velocidades angulares

		Motor	
n[rpm]	n/n_N	Ne [KW]	Me[Nm]
800	0.4571	1301.142	15531.241
900	0.5143	1597.041	16945.126
1000	0.5714	1889.649	18044.815
1100	0.6286	2169.096	18830.307
1200	0.6857	2425.511	19301.602
1300	0.7429	2649.023	19458.700
1400	0.8000	2829.763	19301.602
1500	0.8571	2957.858	18830.307
1600	0.9143	3023.438	18044.815
1750	1.0000	2983.000	16277.458

Tabla N° 03. Velocidad del vehículo en cada marcha

	1º marcha	2º marcha	3º marcha	4º marcha	5º marcha	6º marcha	7º marcha	
Utr	119.219	88.630	65.716	48.635	36.214	26.783	19.929	Me
n [rpm]	Vi	Vii	Viii	Viv	Vv	Vvi	Vvii	
800	5.166	6.949	9.371	12.663	17.006	22.994	30.903	15531.241
900	5.811	7.817	10.543	14.246	19.131	25.869	34.766	16945.126
1000	6.457	8.686	11.714	15.829	21.257	28.743	38.629	18044.815
1100	7.103	9.554	12.886	17.411	23.383	31.617	42.491	18830.307
1200	7.749	10.423	14.057	18.994	25.509	34.491	46.354	19301.602
1300	8.394	11.291	15.229	20.577	27.634	37.366	50.217	19458.700
1400	9.040	12.160	16.400	22.160	29.760	40.240	54.080	19301.602
1500	9.686	13.029	17.571	23.743	31.886	43.114	57.943	18830.307
1600	10.331	13.897	18.743	25.326	34.011	45.989	61.806	18044.815
1750	11.300	15.200	20.500	27.700	37.200	50.300	67.600	16277.458

Tabla N° 04. Fuerza de tracción bruta desarrolladas en las ruedas motrices

		1° Marcha		2° Marcha		3° Marcha		4° Marcha		5° Marcha		6° Marcha		7° Marcha	
		Utr1	119.219	Utr2	88.630	Utr3	65.716	Utr4	48.635	Utr5	36.214	Utr6	26.783	Utr7	19.929
n[rpm]	Me[Nm]	V[Km/h]	Pt i	V[Km/h]	Pt ii	V[Km/h]	Pt iii	V[Km/h]	Pt iv	V[Km/h]	Pt v	V[Km/h]	Pt vi	V[Km/h]	Pt vii
1000	18044.815	6.457	895.514	8.686	665.744	11.714	493.625	15.829	365.318	21.257	272.024	28.743	201.179	38.629	149.694
1100	18830.307	7.103	934.496	9.554	694.724	12.886	515.112	17.411	381.220	23.383	283.866	31.617	209.936	42.491	156.210
1200	19301.602	7.749	957.885	10.423	712.112	14.057	528.005	18.994	390.762	25.509	290.970	34.491	215.191	46.354	160.120
1300	19458.700	8.394	965.681	11.291	717.908	15.229	532.302	20.577	393.942	27.634	293.339	37.366	216.942	50.217	161.423
1400	19301.602	9.040	957.885	12.160	712.112	16.400	528.005	22.160	390.762	29.760	290.970	40.240	215.191	54.080	160.120
1500	18830.307	9.686	934.496	13.029	694.724	17.571	515.112	23.743	381.220	31.886	283.866	43.114	209.936	57.943	156.210
1600	18044.815	10.331	895.514	13.897	665.744	18.743	493.625	25.326	365.318	34.011	272.024	45.989	201.179	61.806	149.694
1750	16277.458	11.300	807.805	15.200	600.539	20.500	445.278	27.700	329.538	37.200	245.382	50.300	181.475	67.600	135.032

Tabla N° 05. Fuerza requerida para vencer diferentes pendientes

f=0.0175		P _{ψ+ω} [N]										
		i = 0%	i = 2%	i = 4%	i = 6%	i = 8%	i = 10%	i = 12%	i = 13%	i = 14%	i = 15%	i = 20%
V[Km/h]	i	0.0000	0.0200	0.0400	0.0600	0.0800	0.1000	0.1200	0.1300	0.1400	0.1500	0.2000
	α	0.0000	1.1458	2.2906	3.4336	4.5739	5.7106	6.8428	7.4069	7.9696	8.5308	11.3099
	ψ	0.0175	0.0375	0.0575	0.0774	0.0972	0.1169	0.1365	0.1463	0.1560	0.1656	0.2133
0.000		107.072	229.394	351.527	473.325	594.644	715.344	835.287	894.933	954.341	1013.493	1304.909
5.000		107.174	229.496	351.628	473.426	594.746	715.446	835.389	895.035	954.442	1013.595	1305.011
10.000		107.478	229.800	351.933	473.731	595.050	715.750	835.693	895.340	954.747	1013.900	1305.316
15.000		107.986	230.308	352.441	474.239	595.558	716.258	836.201	895.847	955.255	1014.407	1305.823
20.000		108.697	231.019	353.152	474.949	596.269	716.969	836.912	896.558	955.965	1015.118	1306.534
25.000		109.611	231.933	354.065	475.863	597.183	717.883	837.826	897.472	956.879	1016.032	1307.448
30.000		110.728	233.050	355.182	476.980	598.300	719.000	838.943	898.589	957.996	1017.149	1308.565
35.000		112.048	234.370	356.503	478.300	599.620	720.320	840.263	899.909	959.316	1018.469	1309.885
40.000		113.571	235.893	358.026	479.824	601.143	721.843	841.786	901.432	960.840	1019.992	1311.408
45.000		115.297	237.619	359.752	481.550	602.869	723.569	843.512	903.158	962.566	1021.719	1313.135
50.000		117.226	239.549	361.681	483.479	604.799	725.499	845.442	905.088	964.495	1023.648	1315.064
55.000		119.359	241.681	363.814	485.612	606.931	727.631	847.574	907.220	966.628	1025.780	1317.196
60.000		121.694	244.017	366.149	487.947	609.267	729.967	849.910	909.556	968.963	1028.116	1319.532
65.000		124.233	246.555	368.688	490.486	611.805	732.505	852.448	912.094	971.502	1030.655	1322.071
67.600		125.633	247.956	370.088	491.886	613.206	733.905	853.849	913.495	972.902	1032.055	1323.471

NOTA: Para Condición de Carretera f=0.0175 tenemos que imax=14.16%.

Tabla N° 06. Factor dinámico del vehículo

n[rpm]	Me[Nm]	1° Marcha			2° Marcha			3° Marcha			4° Marcha		
		Pt i [kN]	V[Km/h]	Di	Pt ii [kN]	V[Km/h]	Dii	Pt iii[kN]	V[Km/h]	Diii	Pt iv[kN]	V[Km/h]	Div
1000	18044.815	895.514	6.457	0.146	665.744	8.686	0.109	493.625	11.714	0.081	365.318	15.829	0.060
1100	18830.307	934.496	7.103	0.153	694.724	9.554	0.113	515.112	12.886	0.084	381.220	17.411	0.062
1200	19301.602	957.885	7.749	0.157	712.112	10.423	0.116	528.005	14.057	0.086	390.762	18.994	0.064
1300	19458.700	965.681	8.394	0.158	717.908	11.291	0.117	532.302	15.229	0.087	393.942	20.577	0.064
1400	19301.602	957.885	9.040	0.157	712.112	12.160	0.116	528.005	16.400	0.086	390.762	22.160	0.064
1500	18830.307	934.496	9.686	0.153	694.724	13.029	0.113	515.112	17.571	0.084	381.220	23.743	0.062
1600	18044.815	895.514	10.331	0.146	665.744	13.897	0.109	493.625	18.743	0.080	365.318	25.326	0.059
1750	16277.458	807.805	11.300	0.132	600.539	15.200	0.098	445.278	20.500	0.072	329.538	27.700	0.053

5° Marcha			6° Marcha			7° Marcha		
Pt v [kN]	V[Km/h]	Dv	Pt vi[kN]	V[Km/h]	Dvi	Pt vii[kN]	V[Km/h]	Dvii
272.024	21.257	0.044	201.179	28.743	0.032	149.694	38.629	0.023
283.866	23.383	0.046	209.936	31.617	0.034	156.210	42.491	0.024
290.970	25.509	0.047	215.191	34.491	0.034	160.120	46.354	0.025
293.339	27.634	0.047	216.942	37.366	0.035	161.423	50.217	0.025
290.970	29.760	0.047	215.191	40.240	0.034	160.120	54.080	0.024
283.866	31.886	0.046	209.936	43.114	0.033	156.210	57.943	0.023
272.024	34.011	0.044	201.179	45.989	0.031	149.694	61.806	0.022
245.382	37.200	0.039	181.475	50.300	0.028	135.032	67.600	0.019

Tabla N° 07. Potencia traccional del vehículo

n[rpm]	Me[Nm]	1° Marcha				2° Marcha			
		Pt i [kN]	V[Km/h]	Nt i	Ne i	Pt ii [kN]	V[Km/h]	Nt ii	Ne ii
1000.000	18044.815	895.514	6.457	1606.239	1889.693	665.744	8.686	1606.239	1889.693
1100.000	18830.307	934.496	7.103	1843.775	2169.147	694.724	9.554	1843.775	2169.147
1200.000	19301.602	957.885	7.749	2061.733	2425.568	712.112	10.423	2061.733	2425.568
1300.000	19458.700	965.681	8.394	2251.723	2649.086	717.908	11.291	2251.723	2649.086
1400.000	19301.602	957.885	9.040	2405.355	2829.829	712.112	12.160	2405.355	2829.829
1500.000	18830.307	934.496	9.686	2514.238	2957.927	694.724	13.029	2514.238	2957.927
1600.000	18044.815	895.514	10.331	2569.983	3023.509	665.744	13.897	2569.983	3023.509
1750.000	16277.458	807.805	11.300	2535.610	2983.070	600.539	15.200	2535.610	2983.070

3° Marcha				4° Marcha			
Pt iii[kN]	V[Km/h]	Nt iii	Ne iii	Pt iv[kN]	V[Km/h]	Nt iv	Ne iv
493.625	11.714	1606.239	1889.693	365.318	15.829	1606.239	1889.693
515.112	12.886	1843.775	2169.147	381.220	17.411	1843.775	2169.147
528.005	14.057	2061.733	2425.568	390.762	18.994	2061.733	2425.568
532.302	15.229	2251.723	2649.086	393.942	20.577	2251.723	2649.086
528.005	16.400	2405.355	2829.829	390.762	22.160	2405.355	2829.829
515.112	17.571	2514.238	2957.927	381.220	23.743	2514.238	2957.927
493.625	18.743	2569.983	3023.509	365.318	25.326	2569.983	3023.509
445.278	20.500	2535.610	2983.070	329.538	27.700	2535.610	2983.070

5° Marcha				6° Marcha				7° Marcha			
Pt v [kN]	V[Km/h]	Nt v	Ne v	Pt vi[kN]	V[Km/h]	Nt vi	Ne vi	Pt vii[kN]	V[Km/h]	Nt vii	Ne vii
272.024	21.257	1606.239	1889.693	201.179	28.743	1606.239	1889.693	149.694	38.629	1606.239	1889.693
283.866	23.383	1843.775	2169.147	209.936	31.617	1843.775	2169.147	156.210	42.491	1843.775	2169.147
290.970	25.509	2061.733	2425.568	215.191	34.491	2061.733	2425.568	160.120	46.354	2061.733	2425.568
293.339	27.634	2251.723	2649.086	216.942	37.366	2251.723	2649.086	161.423	50.217	2251.723	2649.086
290.970	29.760	2405.355	2829.829	215.191	40.240	2405.355	2829.829	160.120	54.080	2405.355	2829.829
283.866	31.886	2514.238	2957.927	209.936	43.114	2514.238	2957.927	156.210	57.943	2514.238	2957.927
272.024	34.011	2569.983	3023.509	201.179	45.989	2569.983	3023.509	149.694	61.806	2569.983	3023.509
245.382	37.200	2535.610	2983.070	181.475	50.300	2535.610	2983.070	135.032	67.600	2535.610	2983.070

Tabla N° 08. Potencia requerida del vehículo automóvil para diferentes pendientes

f=0.0175		N _{ψ+ω}										
		i = 0%	i = 2%	i = 4%	i = 6%	i = 8%	i = 10%	i = 12%	i = 13%	i = 14%	i = 15%	i = 20%
V[Km/h]	i	0.0000	0.0200	0.0400	0.0600	0.0800	0.1000	0.1200	0.1300	0.1400	0.1500	0.2000
	α	0.0000	1.1458	2.2906	3.4336	4.5739	5.7106	6.8428	7.4069	7.9696	8.5308	11.3099
	ψ	0.0175	0.0375	0.0575	0.0774	0.0972	0.1169	0.1365	0.1463	0.1560	0.1656	0.2133
0.000		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.000		29.743	63.722	97.647	131.480	165.180	198.708	232.025	248.594	265.096	281.527	362.476
2.000		59.493	127.450	195.302	262.967	330.367	397.422	464.058	497.194	530.198	563.061	724.959
3.000		89.257	191.192	292.969	394.468	495.567	596.151	696.103	745.808	795.314	844.608	1087.455
4.000		119.041	254.955	390.658	525.989	660.788	794.899	928.169	994.443	1060.451	1126.176	1449.972
5.000		148.852	318.744	488.373	657.536	826.036	993.674	1160.262	1243.104	1325.614	1407.771	1812.515
10.000		298.550	638.334	977.592	1315.919	1652.917	1988.195	2321.371	2487.054	2652.075	2816.388	3625.877
15.000		449.941	959.617	1468.503	1975.994	2481.492	2984.408	3484.172	3732.697	3980.227	4226.697	5440.931
20.000		603.871	1283.438	1961.953	2638.608	3312.604	3983.160	4649.511	4980.878	5310.919	5639.545	7258.523
25.000		761.185	1610.644	2458.788	3304.606	4147.102	4985.296	5818.235	6232.444	6644.995	7055.778	9079.501
30.000		922.730	1942.081	2959.854	3974.836	4985.831	5991.664	6991.191	7488.241	7983.302	8476.242	10904.709
35.000		1089.352	2278.595	3465.997	4650.143	5829.637	7003.109	8169.223	8749.116	9326.687	9901.783	12734.995
40.000		1261.898	2621.033	3978.063	5331.373	6679.366	8020.477	9353.179	10015.913	10675.995	11333.248	14571.204
45.000		1441.214	2970.240	4496.900	6019.373	7535.865	9044.615	10543.905	11289.481	12032.073	12771.482	16414.183
50.000		1628.146	3327.064	5023.352	6714.989	8399.980	10076.369	11742.247	12570.664	13395.766	14217.332	18264.777
60.000		2028.241	4066.943	6102.488	8132.453	10154.442	12166.109	14165.163	15159.263	16149.386	17135.265	21992.199
67.600		2359.117	4656.054	6949.435	9236.529	11514.637	13781.114	16033.382	17153.402	18268.940	19379.697	24851.843

Tabla N° 09. Aceleración del vehículo

		1° Marcha			2° Marcha			3° Marcha		
		U _{cv}	5.608	U _{cv}	4.169	U _{cv}	3.091			
		δrot	2.298	δrot	1.735	δrot	1.422			
n[rpm]	Me[Nm]	V[Km/h]	Di	j i	V[Km/h]	Dii	j ii	V[Km/h]	Diii	j iii
1000.000	18044.815	6.457	0.146	0.550	8.686	0.109	0.516	11.714	0.081	0.435
1100.000	18830.307	7.103	0.153	0.577	9.554	0.113	0.543	12.886	0.084	0.459
1200.000	19301.602	7.749	0.157	0.594	10.423	0.116	0.559	14.057	0.086	0.474
1300.000	19458.700	8.394	0.158	0.599	11.291	0.117	0.564	15.229	0.087	0.478
1400.000	19301.602	9.040	0.157	0.593	12.160	0.116	0.559	16.400	0.086	0.473
1500.000	18830.307	9.686	0.153	0.577	13.029	0.113	0.542	17.571	0.084	0.459
1600.000	18044.815	10.331	0.146	0.550	13.897	0.109	0.516	18.743	0.080	0.434
1750.000	16277.458	11.300	0.132	0.489	15.200	0.098	0.455	20.500	0.072	0.379

4° Marcha			5° Marcha			6° Marcha			7° Marcha						
U _{cv}			2.288	U _{cv}			1.703	U _{cv}			1.260	U _{cv}			0.937
δrot			1.249	δrot			1.156	δrot			1.103	δrot			1.075
V[Km/h]	Div	j iv	V[Km/h]	Dv	j v	V[Km/h]	Dvi	j vi	V[Km/h]	Dvii	j vii				
15.829	0.060	0.330	21.257	0.044	0.226	28.743	0.032	0.132	38.629	0.023	0.055				
17.411	0.062	0.350	23.383	0.046	0.242	31.617	0.034	0.144	42.491	0.024	0.062				
18.994	0.064	0.362	25.509	0.047	0.251	34.491	0.034	0.150	46.354	0.025	0.066				
20.577	0.064	0.366	27.634	0.047	0.254	37.366	0.035	0.151	50.217	0.025	0.066				
22.160	0.064	0.362	29.760	0.047	0.250	40.240	0.034	0.148	54.080	0.024	0.061				
23.743	0.062	0.349	31.886	0.046	0.239	43.114	0.033	0.138	57.943	0.023	0.053				
25.326	0.059	0.328	34.011	0.044	0.222	45.989	0.031	0.124	61.806	0.022	0.040				
27.700	0.053	0.282	37.200	0.039	0.184	50.300	0.028	0.093	67.600	0.019	0.014				

Tabla N° 10. Tiempo y distancia de aceleración del vehículo

Velocidad			Aceleración			Tiempo		Distancia	
Vi [Km/h]	Vf [Km/h]	Vm [Km/h]	ji [m/s ²]	jf [m/s ²]	jm [m/s ²]	Δt[seg]	tac	ΔS[m]	Sac
6.457	7.103	6.780	0.550	0.577	0.564	0.318		0.599	
7.103	7.749	7.426	0.577	0.594	0.585	0.306	0.625	0.632	1.231
7.749	8.394	8.071	0.594	0.599	0.596	0.301	0.926	0.675	1.906
8.394	9.040	8.717	0.599	0.593	0.596	0.301	1.226	0.729	2.634
9.040	9.686	9.363	0.593	0.577	0.585	0.306	1.533	0.797	3.431
9.686	10.331	10.009	0.577	0.550	0.563	0.318	1.851	0.885	4.316
10.331	11.300	10.816	0.550	0.489	0.519	0.518	2.369	1.557	5.873
11.300	12.160	11.730	0.489	0.559	0.524	0.456	2.826	1.487	7.360
12.160	13.029	12.594	0.559	0.542	0.550	0.438	3.264	1.533	8.893
13.029	13.897	13.463	0.542	0.516	0.529	0.456	3.720	1.706	10.599
13.897	15.229	14.563	0.516	0.478	0.497	0.744	4.464	3.011	13.610
15.229	16.400	15.814	0.478	0.473	0.476	0.684	5.148	3.004	16.614
16.400	17.571	16.986	0.473	0.459	0.466	0.698	5.847	3.295	19.909
17.571	18.743	18.157	0.459	0.434	0.446	0.729	6.575	3.677	23.585
18.743	20.577	19.660	0.434	0.366	0.400	1.274	7.849	6.955	30.541
20.577	22.160	21.369	0.366	0.362	0.364	1.209	9.058	7.175	37.716
22.160	23.743	22.951	0.362	0.349	0.355	1.238	10.296	7.892	45.607
23.743	25.326	24.534	0.349	0.328	0.338	1.299	11.595	8.852	54.460
25.326	27.700	26.513	0.328	0.282	0.305	2.164	13.758	15.936	70.395
27.700	29.760	28.730	0.282	0.250	0.266	2.153	15.911	17.182	87.577
29.760	31.886	30.823	0.250	0.239	0.245	2.412	18.324	20.655	108.232
31.886	34.011	32.949	0.239	0.222	0.231	2.558	20.881	23.409	131.641
34.011	37.200	35.606	0.222	0.184	0.203	4.360	25.241	43.123	174.764
37.200	40.240	38.720	0.184	0.148	0.166	5.094	30.335	54.785	229.549
40.240	43.114	41.677	0.148	0.138	0.143	5.583	35.918	64.631	294.179
43.114	45.989	44.551	0.138	0.124	0.131	6.077	41.995	75.210	369.390
45.989	50.300	48.144	0.124	0.093	0.109	11.016	53.011	147.322	516.712
50.300	54.080	52.190	0.093	0.061	0.077	13.586	66.597	196.960	713.672
54.080	57.943	56.011	0.061	0.053	0.057	18.769	85.367	292.028	1005.700
57.943	61.806	59.874	0.053	0.040	0.047	22.985	108.352	382.284	1387.984
61.806	67.600	64.703	0.040	0.014	0.027	59.130	167.482	1062.751	2450.735

Tabla N° 11. Consumo de combustible en carretera

Densidad [Kg/L] 0.850 gN [g/kW-h] 244.95

					$\Psi_1 = 0,0175$				
n[rpm]	V[Km/h]	Ne'[Kw]	n/nN	k'	Ne1[Kw]	Ne1/Ne'	k1''	ge1[gr/Kw-h]	Qs1
800	30.903	1301.142	0.457	0.988	1120.491	0.861	0.872	211.244	901.105
900	34.766	1597.041	0.514	0.972	1272.258	0.797	0.840	200.091	861.456
1000	38.629	1889.649	0.571	0.961	1428.157	0.756	0.827	194.695	846.845
1100	42.491	2169.096	0.629	0.953	1588.647	0.732	0.823	192.138	845.122
1200	46.354	2425.511	0.686	0.950	1754.186	0.723	0.822	191.223	851.350
1300	50.217	2649.023	0.743	0.951	1925.234	0.727	0.822	191.563	864.023
1400	54.080	2829.763	0.800	0.957	2102.251	0.743	0.825	193.270	883.880
1500	57.943	2957.858	0.857	0.967	2285.693	0.773	0.832	196.966	914.091
1600	61.806	3023.438	0.914	0.981	2476.022	0.819	0.850	204.077	961.834
1750	67.600	2983.000	1.000	1.010	2775.431	0.930	0.924	228.634	1104.349

NOTA: El $\psi_{max}=0.02250$ para la marcha en directa

$\Psi_2 = 0,01775$					$\Psi_3 = 0,0180$				
Ne2[Kw]	Ne2/Ne'	k2''	ge2[gr/Kw-h]	Qs2	Ne3[Kw]	Ne3/Ne'	k3''	ge3[gr/Kw-h]	Qs3
1135.938	0.873	0.880	213.089	921.508	1151.385	0.885	0.888	215.059	942.674
1289.636	0.808	0.844	201.139	877.796	1307.015	0.818	0.849	202.290	894.714
1447.466	0.766	0.830	195.305	860.984	1466.776	0.776	0.833	196.005	875.596
1609.887	0.742	0.825	192.521	858.128	1631.127	0.752	0.827	192.985	871.549
1777.357	0.733	0.823	191.520	863.934	1800.528	0.742	0.825	191.895	876.908
1950.336	0.736	0.823	191.886	876.765	1975.438	0.746	0.825	192.286	889.898
2129.283	0.752	0.827	193.730	897.376	2156.316	0.762	0.829	194.268	911.293
2314.657	0.783	0.835	197.696	929.106	2343.621	0.792	0.838	198.509	944.602
2506.917	0.829	0.854	205.266	979.512	2537.812	0.839	0.860	206.547	997.772
2809.222	0.942	0.934	231.140	1130.044	2843.014	0.953	0.945	233.761	1156.608



DECLARACION JURADA DE AUTORÍA

Yo, Daniel Raúl Cisneros Flores
estudiante / docente de la

Facultad:	Ciencias		Educación		Ingeniería	<input checked="" type="checkbox"/>
Escuela Profesional:	Ingeniería Mecánica					
Departamento Académico:	Mecánica					
Escuela de Posgrado	Maestría			Doctorado		
	Manual					
Programa:	Proyecto de tesis					
De la Universidad Nacional del Santa; Declaro que el trabajo de investigación intitulado:						
"OPTIMIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINAMICO-TRACCIONALES DEL HIGH WAY MINIG TRUCK CATERPILLAR PARA DIFERENTES CONDICIONES DE OPERACIÓN"						
presentado en <u>52</u> folios, para la obtención del Grado académico:						()
Título profesional:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Investigación anual:	()		

- He citado todas las fuentes empleadas, no he utilizado otra fuente distinta a las declaradas en el presente trabajo.
- Este trabajo de investigación no ha sido presentado con anterioridad ni completa ni parcialmente para la obtención de grado académico o título profesional.
- Comprendo que el trabajo de investigación será público y por lo tanto sujeto a ser revisado electrónicamente para la detección de plagio por el VRIN.
- De encontrarse uso de material intelectual sin el reconocimiento de su fuente o autor, me someto a las sanciones que determinan el proceso disciplinario.

Nuevo Chimbote, 12 de Marzo de 2021

Firma:



Nombres y Apellidos: Daniel Raúl Cisneros Flores

DNI: 46185767

NOTA: Esta Declaración Jurada simple indicando que su investigación es un trabajo inédito, no exime a tesis e investigadores, que no bien se retome el servicio con el software antiplagio, ésta tendrá que ser aplicado antes que el informe final sea publicado en el Repositorio Institucional Digital UNS.



DECLARACION JURADA DE AUTORÍA

Yo, Rafael Alejandro Tuya Cambini
estudiante / docente de la

Facultad:	Ciencias		Educación		Ingeniería	
Escuela Profesional:	Ingeniería mecánica					
Departamento Académico:	Mecánica					
Escuela de Posgrado	Maestría			Doctorado		
	Manual					
Programa:						
De la Universidad Nacional del Santa; Declaro que el trabajo de investigación intitulado:						
.....						
Optimización de las propiedades dinámico traccionales						
.....						
DEL HIGH WAY MINING TRUCK CATERPILLAR						
.....						
PARA DIFERENTES CONDICIONES DE						
OPERACIÓN						
presentado en folios, para la obtención del Grado académico:						()
Título profesional:	(X)		Investigación anual:			()
		<input type="checkbox"/>				

- He citado todas las fuentes empleadas, no he utilizado otra fuente distinta a las declaradas en el presente trabajo.
- Este trabajo de investigación no ha sido presentado con anterioridad ni completa ni parcialmente para la obtención de grado académico o título profesional.
- Comprendo que el trabajo de investigación será público y por lo tanto sujeto a ser revisado electrónicamente para la detección de plagio por el VRIN.
- De encontrarse uso de material intelectual sin el reconocimiento de su fuente o autor, me someto a las sanciones que determinan el proceso disciplinario.

Nuevo Chimbote, ...11... de ...mayo... de 20 21..

Firma:



Nombres y Apellidos:

Rafael Alejandro Tuya Gamboni

DNI:

46316826

NOTA: Esta Declaración Jurada simple indicando que su investigación es un trabajo inédito, no exime a tesis e investigadores, que no bien se retome el servicio con el software antiplagio, ésta tendrá que ser aplicado antes que el informe final sea publicado en el Repositorio Institucional Digital UNS.