



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA

“Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”

Moa, Holguín.

FACULTAD DE METALÚRGIA-ELECTROMECAÁNICA.

Tesis en opción al Título Master en Ciencias Electromecánicas



**Título: Caracterización y mejoras en la explotación del
transporte ferroviario de la empresa
Cmdte. René Ramos Latour.**

Autor: Ing. Joaquín Adolfo Figueras Méndez.

Tutores: Dr. Luís Delfín Rojas Purón.

Dr. Secundino Marrero Ramírez.

2008.

■ **Dedicatoria:**

A toda mi querida familia.

A mi tutor Dr. Luís Delfín Rojas Purón.

A todos los profesores que me guiaron por la vida.

A todos nuestros colegas ferroviarios, patriotas de profesión.

A este hermoso país que me vio nacer, crecer y me verá morir.

A todas aquellas personas que estuvieron siempre colaborando conmigo.

A la memoria de mi profesora, Dra. Ksieñia Ivanovna Rudaya, cuyos textos, enseñanzas y ejemplo son seguidos por muchísimos ferroviarios de innumerables países del mundo.

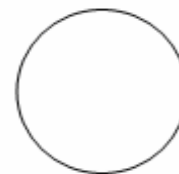
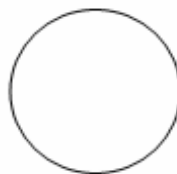
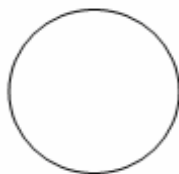
A todos vosotros va dedicado este trabajo, como modesto granito de arena y contribución al ferrocarril, donde trabajan personas abnegadas y cuya profesión llevamos en el corazón.

Agradecimientos:

A Dios todopoderoso,
quien nos creó
a su imagen
y semejanza.
[Génesis, 1:26]

A mis queridos padres, que me engendraron y educaron.
A mi paciente esposa Gisela Joa Crespo, toda una heroína.
A mis hermanos familiares y amigos que me brindaron su apoyo.
A mi hermana Norma Rodríguez Suárez, con su mano firme y oportuna.
A mi tutor Dr. Luís Delfín Rojas Purón, quien muy sabiamente guió esta tesis.
A mi oponente en esta tesis MSc. Roberto Sierra Pérez, por sus valiosas críticas.
Al artífice de nuestra hermosa revolución, nuestro siempre Cmdte. Fidel Castro Ruz.
A los Drs. Manuel García Renté, Dr Alberto Turro Breff, Dr Israel Rodríguez Domínguez,
Dr Secundino Marrero Ramírez, Dra. Mercedes Ramírez Mendoza, Lic. Joaquín González,
A todos los profesores que desinteresadamente guiaron y forjaron mi formación académica.
A mis amigos Ing. Carlos Góngora Tamayo, Eduardo Villoch López y Diunis Argüello Basto
A todos mis compañeros de trabajo y de lucha, dignos patriotas de la profesión ferroviaria
A las muchas, muchas personas más, que me ayudaron y alentaron y dejo de nombrar,

A todos vosotros..... Nuestro respeto... y eterno agradecimiento...



Joakín Adolfo Figueras Méndez.

Pensamientos:

“Dadme un punto de apoyo y moveré el mundo”

Arquímedes (287-212 a.C.)

“Seleccionad correctamente su locomotora y halará un mundo”

Figueras Méndez (2008. d.C.)

Resumen

Este trabajo: "Caracterización y mejoras en la explotación del transporte ferroviario de la empresa Cmdte. René Ramos Latour de Nicaro", constituye un estudio de las principales variables que definen el comportamiento eficiente del ferrocarril para las condiciones de la empresa Cmdte. René Ramos Latour.

En esta investigación se establecen las principales características de las locomotoras y los rieles, que dimensionan su ferrocarril acorde al tráfico, demandado por los planes de producción de Ni+Co.

Se ofrece un procedimiento para evaluar el sistema de locomotoras; sus magnitudes de tracción y potencia; así como el peso métrico de los rieles, aplicando el criterio de Shajuniants; también se presenta los gráficos de las demandas del tráfico del ferrocarril.

El efecto técnico económico avalado en este estudio arroja \$ 668 926,00 CUC/año y \$170 454.00 CUP)/año, por concepto de combustible dejado de consumir en pérdidas.

Índice	Pág.
Dedicatoria.	
Agradecimiento.	
Pensamiento.	
Resumen.	
Índice.	
Introducción.....	1
Capítulo I FUNDAMENTO TEÓRICO Y METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.	
1.1 Introducción.....	6
1.2 Caracterización del ferrocarril de Nicaro.....	6
1.3 Clasificación de las vías férreas.....	12
1.4 Los rieles.....	13
1.5 El material rodante.....	18
1.6 Definición de las variables del ferrocarril.....	20
1.7 Trabajos precedentes.....	21
1.8 Metodología y diseño de la investigación.....	26
1.9 Conclusiones parciales del Capítulo I.....	29
Capítulo II MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.	
2.1 Introducción.....	30
2.2 Evaluación de los parámetros y variables de la vía férrea.....	35
2.3 Análisis de los resultados de la evaluación de los rieles.....	40
2.4 La locomotora diesel eléctrica.....	41
2.5 Confección del modelo del tren y la locomotora.....	45
2.6 Evaluación de parámetros y variables del material rodante.....	55
2.7 Programa en MATLAB para los cálculos de tracción.....	68
2.8 Comparación de los resultados del ajuste de potencia.....	71
2.8 Cálculo y comparación de la productividad.....	72
2.9 Cálculo y comparación de la eficiencia.....	75
2.10 Comparación de las características de las locomotoras.....	76
2.11 Conclusiones parciales del Capítulo II.....	94
2.12 Análisis de los resultados.....	77
2.13 Conclusiones parciales.....	79
Capítulo III ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN.	
3.1 Introducción.....	80
3.2 Ahorro de costos de inversión.....	80
3.6 Ahorro en costos de mantenimiento.....	81
3.7 Ahorro en mano de obra.....	83
3.8 Ahorro por reducción de afectaciones.....	84
3.9 Evaluación de las variantes de inversión.....	85
3.10 Evaluación medioambiental.....	87
3.10 Conclusiones parciales del Capítulo III.....	88
CONCLUSIONES.....	89
RECOMENDACIONES.....	90
BIBLIOGRAFÍA.....	91
ANEXOS.....	100

Introducción.

El transporte es una rama vital en la economía de cualquier país y constituye un factor estratégico en su funcionamiento, pues aunque no genere nuevos productos, permite el traslado de cargas y pasajeros, dentro y fuera de este (Marx, 1986. [63]). En este ámbito el transporte ferroviario juega un papel preponderante, sin embargo existen entidades ferroviarias que no poseen un ferrocarril dimensionado a las necesidades demandadas por sus planes, lo que va en detrimento de su eficiencia (Maloziomov, 2003. [61]).

En la figura 1 vemos el papel preponderante que juega el ferrocarril como medio de transporte a nivel mundial.

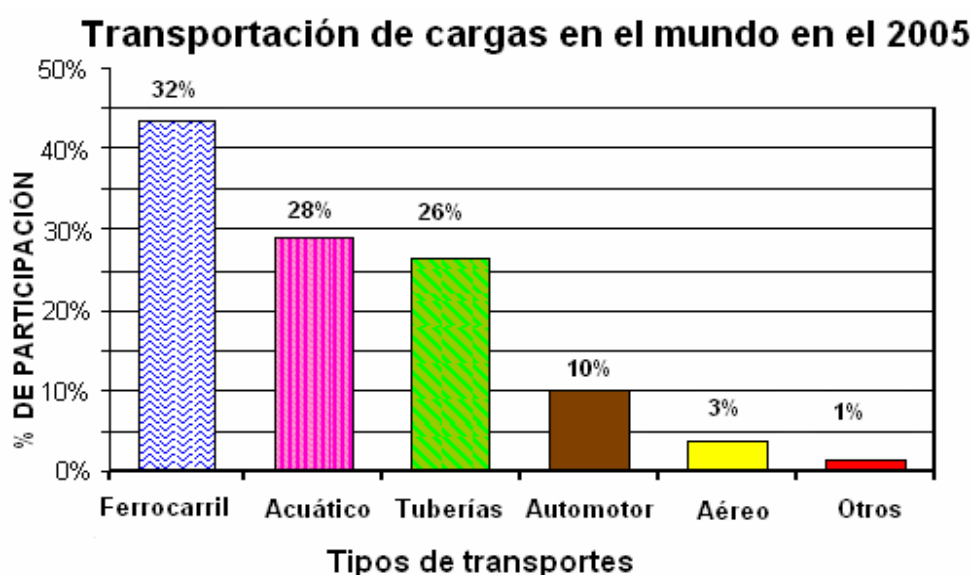


Figura 1. Participación de tipos de transporte en el traslado de cargas mundial, 2005.

(Fuentes: Hernández 2000[38], Encarta 2006[23], Statistics UIC 2005[117])

En la resolución económica del V Congreso del Partido Comunista de Cuba de 1997 [99], se plantea que para la recuperación y mejora de la economía cubana es necesario intensificar el desarrollo minero-metalúrgico y como objetivo estratégico incrementar la producción de concentrados de Níquel, desde una mayor eficiencia en las inversiones.

Nuestra economía nacional necesita crecer en rubros exportables como la producción de Níquel, es por eso que las empresas niquelíferas del oriente cubano juegan un papel determinante en nuestro desarrollo. Una de ellas es la pionera del níquel, la empresa Comandante René Ramos Latour, la cual está ubicada al Norte y centro de la provincia Holguín, exactamente en la costa Norte del municipio Mayarí, su misión principal es la producción de níquel más cobalto. Su materia prima, el mineral laterítico (Ver anexo1), es transportado por ferrocarril, que lo convierte de hecho, en un eslabón vital para ella.

Introducción.

Hasta el 2004 el 40% del mineral se transportaba desde Mina Martí, situado a siete kilómetros y el resto desde Piedra Gorda, Pinares de Mayarí, ubicado a treinta y un kilómetros del depósito exterior de mineral de la RRL. A finales del 2004 Mina Martí cierra por agotamiento, desde entonces solo se transporta desde los yacimientos de Pinares.

Situación problemática

Nuestro país gasta solamente en combustibles para el transporte cerca de tres mil millones de dólares anuales según Villarroel, 2003 [130]. El transporte ferroviario posee elevados costos iniciales de inversión, pero permite transportar cargas masivas, de forma rápida, con regularidad y a muy bajos costos. En la medida que los costos totales por unidad de trabajo realizado por el sistema ferroviario, sean menores, mayor será su eficiencia; en esto, las locomotoras y su vía férrea juegan un papel preponderante (Beckmann, 1989. [6]). Para la RRL esto cobra vital importancia, pues el ferrocarril es la vena aorta que le da vida.

La década de los años 90 y los primeros años del 2000 fueron funestos para el ferrocarril a escala internacional por las políticas llevadas a cabo y otras razones existentes en muchos países (Memorias del X Congreso Panamericano de Ferrocarriles, 2000. [68]). Cuba no estuvo exenta de esto y como agravante a esta situación, sufría las consecuencias del derrumbe del campo socialista. El ferrocarril de Nicaro tampoco escapó a las inclemencias de este período especial para Cuba, cuestiones acentuadas por el cierre de la mina Martí, por agotamiento de sus reservas, lo que incrementó los costos del ferrocarril de Nicaro.

La acentuada crisis de desabastecimiento de piezas de repuesto y pérdida de los mercados, en este período especial, obligó a tomar medidas extremas de supervivencia para poder mantener la transportación de mineral a fábrica: Redimensionamiento de su vía férrea, disminuyendo la densidad de traviesas por kilómetros; desmantelamiento de algunos tramos para poder mantener el tráfico en la vía principal; empleo de traviesas de madera, labradas a dos caras, muchas fuera de especificaciones; rieles con diferentes especificaciones, etc., esto unido al aumento de los recorridos promedios y los volúmenes de carga, movidos con locomotoras con una base rígida grande, en un ferrocarril con un trazado tan sinuoso y fuerte, provocó un deterioro general del sistema ferroviario de Nicaro, reflejado en el aumento de las averías; desgaste acelerado de las ruedas del material rodante y los rieles de las vías; las afectaciones al plan de producción y las pérdidas, consecuencias que trascienden hasta los días actuales.

Introducción.

En el trabajo del Dr Kúrishev [51], Capítulo II “Material Rodante”; § 2.1. “*Parque tractivo necesario*”, el autor del capítulo, MSc. Alexander Dimitrievich Buyakov plantea para el ferrocarril de Nicaro una demanda en parque de inventario de 10 locomotoras, basado en una eficiencia operativa de 0,86 para las locomotoras TEM-2TK que proponía, distribuidas de la siguiente forma:

- Disponibles 7: 1 en Patio Nicaro; 1 Camino Pinares; 1 camino Martí; 1 en Patio Piedra Gorda; 1 en Sandín y 1 en Pinares más 1 en reserva, por cálculo.
- 1 en RC y 1 en Mantenimiento.
- 1 para imprevistos (averías, movimientos misceláneos, en tiro de carbón, otros).

El ferrocarril fue rehabilitado para garantizar el mineral necesario en fábrica para planes de hasta 18000 TM de Ni+Co, concebía el 40% de la transportación desde Mina Martí, situada a 7 km y el resto desde Mina Pinares de Mayará a 30 km. del depósito de la fábrica; se dotó con una superestructura con rieles R43 y 1760 traviesas/km de Pino ruso creosotadas. Para los 90 este escenario había variado: Eliminado el tramo del 0 al 2,6 km y con él la transportación por ferrocarril desde el puerto; muchas traviesas podridas, otras habían sido sustituidas por traviesas de hormigón Cuba 73 y de madera; su densidad se llevó a 20 y 19 traviesas por campo; muchos rieles defectuosos, otros sustituidos. A finales del 2004 Mina Martí cerró por agotamiento; en el 2006 arrancó el transportador Pinares-Piedra Gorda Nuevo; quedaron obsoletas tres locomotoras: Martí, Sandín y Pinares y eliminado el tramo más peligroso y crítico del ferrocarril de la RRL, “Winche superior – Criba Pinares”, con pendiente de 28‰ y promedio sostenida 27,1‰ en 4,5 km; actualmente se trabaja en un perfil más suave con pendiente de 11‰. El traslado de toda la transportación al ramal Pinares, situado a 30 km aumentó el Tráfico Bruto Anual (TBA) y los costos del ferrocarril. Todo lo anteriormente expuesto, impone reconsiderar: Parque, potencia, carga por ejes, cantidad de ruedas; tipos de locomotora, carriles y traviesas; densidad; o sea, una revisión al dimensionamiento ferroviario RRL. Partiendo de esto, encontramos problemas como:

1. Poco conocimiento de las variables del ferrocarril de Nicaro;
2. Cambio de escenario productivo;
3. Inadecuado dimensionamiento ferroviario;
4. Frecuentes descarrilamientos y averías;
5. Rápido desgaste de ruedas y rieles;
6. Elevados costos de mantenimiento y de explotación.

Introducción.

Basados en la problemática existente definimos como,

Problema de la investigación:

Insuficiente conocimientos de las variables relacionadas con el transporte ferroviario para el mineral laterítico de la empresa Cmdte. René Ramos Latour de Nicaro.

Sobre esta base establecemos nuestra,

Hipótesis:

Mediante la caracterización del proceso de transporte ferroviario del mineral laterítico de la RRL, es posible establecer sus vías de dimensionamiento, en aras de mejorar su productividad con menores costos.

En correspondencia con la hipótesis planteada definimos como,

Objetivo general de la investigación:

- Identificación de las características técnicas de las locomotoras y los rieles del ferrocarril de Nicaro, acorde a las necesidades actuales y perspectiva hasta el 2015 de dicha empresa.

Para cumplir con el objetivo general planteado para la investigación definimos como,

Objetivos específicos:

1. Caracterizar el sistema ferroviario de Nicaro y definir las variables que intervienen en su funcionamiento.
2. Identificar las variables más representativas de las locomotoras y rieles que rigen el comportamiento del ferrocarril de Nicaro.
3. Recomendar medidas que disminuyan costos y mejoren la eficiencia del ferrocarril.

Para garantizar el desarrollo exitoso de la investigación proponemos las siguientes tareas.

Tareas a realizar:

1. Revisión y análisis de las fuentes bibliográficas sobre el tema.
2. Establecer modelo de investigación y vías de solución.
3. Establecer metodología de cálculo de las principales variables, que caracterizan las locomotoras y los rieles del ferrocarril de Nicaro.
4. Establecer relación de las variables seleccionadas con los planes de producción.
5. Demostrar viabilidad del trabajo realizado, incluyendo los impactos medio ambientales y económicos.
6. Confeccionar la memoria y su defensa exitosa.

Introducción.

Teniendo en cuenta la problemática planteada y el problema de la investigación definimos,

Objeto de la investigación:

Las locomotoras y los rieles del ferrocarril de Nicaro.

Dada la importancia de una concepción sistémica del objeto de estudio, lo específico del problema y el objetivo propuesto establecemos.

Campo de acción:

El ferrocarril de la empresa Cmdte. René Ramos Latour.

En el desarrollo de la investigación se aplican los siguientes,

Métodos investigativos:

1. Método de investigación teórica. En este contexto empleamos las siguientes técnicas investigativas:

- Investigación documental y bibliográfica en los archivos de empresas ferroviarias de nuestro país y en internet, para caracterizar el objeto de estudio, así como sus principales variables y la sistematización del conjunto de teorías relacionadas con él.
- Modelación de los componentes del sistema de accionamiento eléctrico de la locomotora basado en su principio físico de operación, incluye la simulación computacional asistida por MATLAB de los esquemas diseñados.
- Análisis estadístico de los datos históricos de archivo del Dpto. de F.C. de Nicaro

Con nuestra investigación nos proponemos los siguientes,

Resultados esperados más relevantes:

1. Definición de las principales características de las locomotoras y los rieles, que más inciden en el comportamiento del ferrocarril de Nicaro.
2. Establecimiento de una metodología para el cálculo de las principales características de las locomotoras y los rieles, que conlleve al correcto dimensionamiento del ferrocarril Nicaro.
3. Contribución en la disminución de los costos de mantenimiento y explotación del ferrocarril de Nicaro.

Capítulo I. FUNDAMENTO TEÓRICO – METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.

- 1.1 Introducción
- 1.2 Caracterización del ferrocarril de Nicaro.
- 1.3 Clasificación de las vías férreas
- 1.4 Los rieles.
- 1.5 El material rodante.
- 1.6 Definición de las variables del ferrocarril.
- 1.7 Trabajos precedentes.
- 1.8 Metodología y diseño de la investigación.
- 1.9 Conclusiones parciales.

1.1 Introducción.

El marco teórico-metodológico como parte importante en la caracterización del objeto de estudio permite detectar de forma preliminar las diferentes características e interacciones que existen entre los múltiples elementos presentes en la investigación (Rojas, 2005. [104]). En este capítulo estableceremos el Marco Teórico-Metodológico de la investigación, partiendo del estado del arte sobre el tema, basados en el análisis de los trabajos precedentes y una revisión crítica de la bibliografía, descripción de la metodología seguida para su ejecución así como la base teórica que sustenta la investigación y una caracterización integral del estado actual del objeto de estudio: Las locomotoras y los rieles del ferrocarril de Nicaro.

Los objetivos del capítulo son:

1. Caracterizar el estado actual del ferrocarril de Nicaro.
2. Establecer las variables que mejor reflejan el dimensionamiento correcto de su parque tractivo y rieles.

1.2. Caracterización del ferrocarril de Nicaro.

Sistema ferroviario: Es el conjunto integrado por personas, material rodante, vías, obras de fábrica, comunicaciones, operaciones, normas y procedimientos que garantizan el funcionamiento seguro del transporte ferroviario, según establece la NRMT 178:85 [76].
Transporte ferroviario: Es el que se realiza por ferrocarril. Ferrocarril proviene de dos palabras latinas: ferrum, significa hierro y carril – camino (Enciclopedia Encarta, 2008, [23]), por tanto ferrocarril ó ferrovía, significa camino de hierro, no obstante esta definición, también se habla de ferrocarril aludiendo al sistema ferroviario. (Filippov, 2005 [29]). En el anexo 1, puede verse la distribución del ferrocarril en el mundo.

El material ó equipos rodantes: Todos los que circulan sobre las vías férreas clasificados en, material de arrastre y equipos tractivos. (Según establece la NRMT 178:85 [76]).

Capítulo I. FUNDAMENTO TEÓRICO – METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.

En la figura 2 puede verse la composición del ferrocarril y la interrelación entre sus diferentes actividades y parámetros.

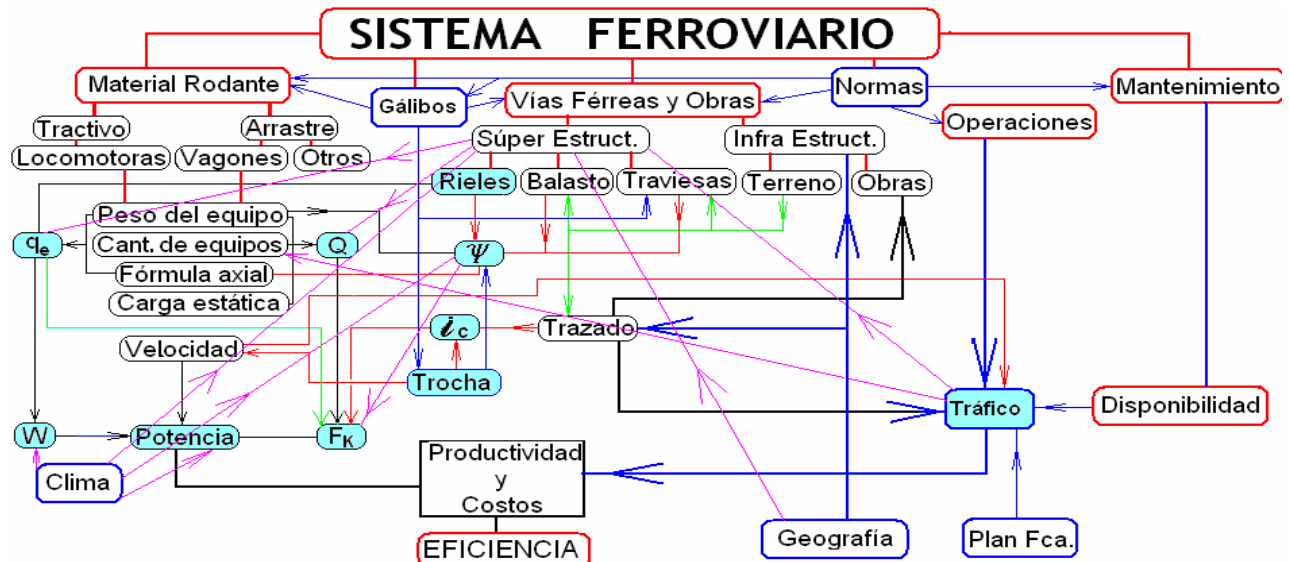


Figura 2. El ferrocarril e interrelación de sus principales componentes.

(Golobatii, 2003. [35]).

Estrucct... Estructura.

q_e — Es la Carga por eje.

W — Es la Resistencia total al movimiento del tren.

Q — Es el Peso total del tren.

i_c — Es la Pendiente de cálculo, ó dominante.

Ψ — Es el coeficiente de adhesión.

F_K — Es la Fuerza de tracción tangencial.

La vía férrea es un complejo de obras ingenieras con el fin de permitir la corrida sobre ella, de trenes a la velocidad exigida. La vía férrea constituye la base del ferrocarril. El tráfico ininterrumpido, la seguridad del movimiento de los trenes y la efectividad del ferrocarril dependen en gran medida de sus características y estado técnico. (Amelín. 2004. [2]).

La vía férrea está compuesta por la súper y la infra estructuras. La primera son los rieles, fijaciones, anclajes, traviesas, balasto y los empalmes entre rieles. La segunda son el terreno, los puentes, las alcantarillas, las estructuras de contención, los túneles, etc.

Las condiciones de trabajo de la vía férrea son muy difíciles, pues está sometida a una amplia variabilidad de cargas, intemperismo, etc. debe permanecer siempre expedita y garantizar la seguridad del movimiento ininterrumpido de trenes, (Machín.1995. [58 y 59]).

En el ferrocarril de Nicaro, los gastos de la vía representan el 28% del costo de transportación, según FIGUERAS, 1984-2008 [27].

Capítulo I. FUNDAMENTO TEÓRICO – METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.

La superestructura de la vía tiene dos funciones principales; darle dirección al movimiento de las ruedas del material rodante y recibir las cargas de estas, según Kantor, 2003 [48].

1. Los Rieles ó carriles: Son perfiles de acero que reciben directamente la carga del material rodante por intermedio de las ruedas. En Nicaro se usan de 50, 43 y 41 kg/m.
2. Los durmientes ó traviesas: Vigas transversales, de madera, hormigón armado o metálicas en las cuales se apoyan los rieles. Estas mantienen fijos a los rieles en su posición y transmiten su carga al balasto de forma uniforme. En Nicaro se emplean de hormigón, metálicas, de madera maquinada y de madera labrada manualmente.
3. Balasto: Material pétreo que recibe la carga del durmiente y la transmite en forma uniforme a la plataforma del terreno. En Nicaro es de piedra caliza picada de 1½" y 2".
4. Elementos de Sujeción: Piezas metálicas que sujetan firmemente los rieles a los durmientes y entre sí. Son los tornillos, tuercas, arandelas, presillas y empalmes. En Nicaro se usan empalmes de mordazas elásticas, presillas RN, rígidas y criollas.

Las principales exigencias que la vía férrea debe garantizar son:

- Solidez, resistencia y estabilidad suficiente de todos sus elementos.
- Alta fiabilidad en la explotación con bajos costos de mantenimiento y explotación.
- Largo período de vida útil.

En el esquema de la figura 3 se muestra la composición del ferrocarril de Nicaro.

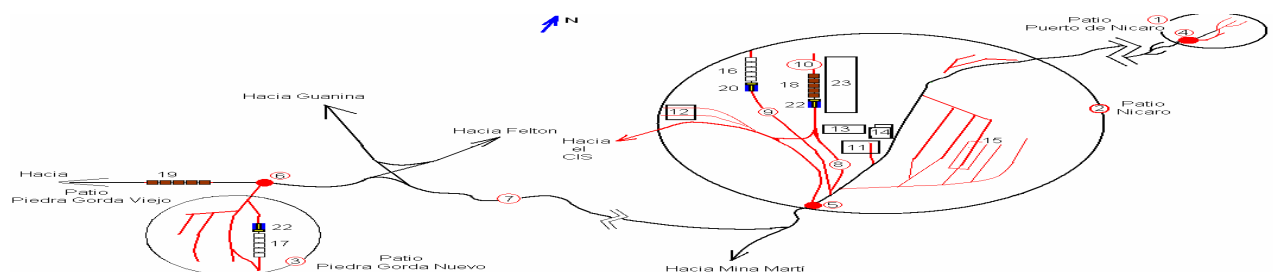


Figura 3. Esquema de Ferrocarril de la RRL. (Fuente: PEEVA MITEVA, N. 2002 [95])

1, 2 y 3 – Patios Puerto, Nicaro y Piedra Gorda Nuevo; 4, 5 y 6 – Chuchos de entrada-Salida a los patios; 7, 8, 9 y 10 – Vías: Principal, de vagones cargados, de vacíos y en descarga; 11, 12 –Talleres de Locomotoras y Vagones; 13 y 14 – Oficinas de Operaciones y Dirección; 15 – Zanja de Mantenimientos; 16 y 17— Formación de vagones vacíos saliendo de Nicaro y entrando al cargadero en el Patio de Piedra Gorda Nuevo; 18 y 19— Formación de vagones cargados entrando al descargadero en Nicaro y saliendo de Piedra Gorda; 20— Locomotora de camino; 21 y 22— Locomotoras de patio; 23— Descargadero ó viradero de vagones; ____ Vías principales; ____ Vías de patio; N— El Norte.

Capítulo I. FUNDAMENTO TEÓRICO – METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.

El proceso tecnológico de la transportación empieza en el Patio de Nicaro (2), donde la formación de vagones una vez descargados ó vacíos en el viradero (23) por la locomotora del patio de Nicaro (21), es depositada en la vía de vagones vacíos (9), esta locomotora después engancha la formación de vagones cargados (18) y va a descargarlos a la vía de descarga ó del Viradero (10). La locomotora de camino (20) engancha la formación de los vagones vacíos (16) y la arrastra con destino al Patio de Piedra Gorda Nuevo (3), el cual está situado a 28,421 km del Patio Nicaro. Al llegar al chucho de entrada del Patio de Piedra Gorda, deja los vagones vacíos en la Vía Principal y se corre sola por la misma vía hasta el otro lado del chucho, donde engancha la formación de vagones cargados (19), que le había depositado la locomotora del Patio de Piedra Gorda (22), la cual ahora recoge la formación de vacíos (17), dejados por la Loco de Camino (20) en el chucho de entrada.

Una vez hecho esto, la locomotora (22) entra al patio para cargarlos, seguidamente la locomotora de camino (20) con la formación de vagones llenos (19) sale con destino a Nicaro, en donde al llegar este tren, se completa el ciclo productivo del ferrocarril.

La vía férrea principal Nicaro-Piedra Gorda posee una trocha de 1435 mm, está construida en un relieve montañoso sobre un trazado sinuoso y fuerte, característico del ferrocarril de montañas ó cordilleras, donde predominan curvas cerradas (radios inferiores a 450m) y consecutivas (índice de curvas superior al 0.2 u/km), grandes pendientes (mayores a 10‰), (Timovskii, 1989. [121]), empeoradas por gradientes positivos en la dirección de los trenes cargados. Todo esto incrementa el índice de obras de fábrica (superior a 1 u/km) y eleva los costos de la vía férrea y de la transportación. Esta vía está construida con rieles rusos R-50 en un 80% y R-43 el resto, aunque se han realizado diferentes inversiones, en las que se han reparados de forma capital tramos de vía, nunca se ha hecho con integralidad, lo que ha conllevado al deterioro prematuro de los tramos reparados, por eso es frecuente encontrar rieles con aplastamientos, desgastes, exfoliados; traviesas de hormigón en un 67%, de madera 31% y 2% metálicas, con ellas ocurre una situación parecida a la de los rieles, por eso existen muchas deterioradas; el balasto es de piedra caliza de 1½" y 2", con espesor entre 200 y 300 mm, posee 12 puentes, 1 paso superior, 11 pasos a nivel, 63 alcantarillas de ellas 19 tienen más de 1m de diámetro. Su extensión total es de 31,026 km, de ellos, actualmente se explotan 28,42 km, pues del 0 km al 2,6 km están desmantelados, a consecuencias del período especial. La densidad de su tráfico bruto anual promedio es de 7 615 920 t.km/km; sobre ella transitan diariamente seis ó más pares de trenes.

Capítulo I. FUNDAMENTO TEÓRICO – METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.

Las formaciones oscilan entre 20 y 27 volquetas, a veces pasados de tonelaje; un caboose y una ó dos locomotoras. El tráfico de vacíos es en sentido ascendente y los cargados en el descendente, la velocidad comercial promedio es de 18.75 km/h. Las vías de los ramales del Patio Nicaro están construidas con rieles rusos R-43, R-50, y escasos rieles norteamericanos ASCE- 75 y AREA-90, predominando el R-43 y el R-50 en las vías de mayor tráfico. Las traviesas son de hormigón, madera y metálicas (construidas de rieles). El balasto es piedra caliza picada a 1½", a 250 mm. El patio Piedra Gorda Nuevo está en su totalidad construido con rieles P-50; traviesas de hormigón en vías y metálicas en conexiones; balasto de piedra de 1½"; Patio Viejo posee rieles R-43 y R-50 y muy pocos AREA-90; traviesas de hormigón, madera y metálicas; balasto de piedra de 1½", muy contaminado. Actualmente funciona solamente para algunas actividades auxiliares.

Singularidad del ferrocarril de Nicaro sobre otros sistemas ferroviarios cubanos.

En la tabla 1 ofrecemos una comparación de los principales indicadores de toda la red ferroviaria central y nuestro ferrocarril de la RRL, que corrobora lo arriba dicho.

Tabla 1. Principales indicadores de explotación ferroviaria del FC Central y el RRL.

 OFICINA NACIONAL DE ESTADÍSTICAS República de Cuba			
13.7 - Indicadores seleccionados de explotación del transporte ferroviario. <i>Selected indicators on the exploitation of freight rail transport for public use (a)</i>			
CONCEPTO	UM	Promedio 2002 2007	Nicaró
Parque de Locomotoras promedio	U	53	9
Locomotoras promedio en servicio	U	12	4
CDT de locomotoras diario	%	22	47
Vagones promedio en servicio	U	3.662	106
Distancia media de una tonelada transportada	km	281	29,0
Tiempo de trabajo diario de una locomotora diesel	h	18	19,5
Recorrido diario prom. de una locomotora diesel	km	393	360
Rendimiento promedio diario de una locomotora diesel	Mtkmb	0,402	0,445
Peso bruto promedio de un tren (incluye locomotora)	t	1 025	1 240
Vagones promedio por tren	U	23	20
Velocidad comercial promedio	km/h	22	18.75
Carga estática por vagón	t	41	50
Carga por eje promedio	t	20	21,5
Período de rotación de un vagón en servicio	días	12	0,33
Coeficiente de aprovechamiento del recorrido del vagón	%	60	50
(a) Excluye MINAZ y el SIME.			

(Fuente: Oficina nacional de estadística, 2007. Disponible en <http://www.mitrans.com.cu>)

Capítulo I. FUNDAMENTO TEÓRICO – METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.

Entre las características que hacen al ferrocarril de Nicaro muy singular, tenemos:

1. Alta intensidad explotación, superior al 80%, o sea 19,5 h diarias promedio;
2. Curvas cerradas, radios inferiores a 450m, 45% tanto en vertical como horizontal;
3. Relativamente alta carga por eje, cerca de los 250 kN/eje;
4. Trazado fuerte, 83% del recorrido total es en pendientes, cuya dominante es 11‰;
5. Alta densidad de cargas, su TBA es superior a 0.20 GN/km-año.

Definición de conceptos básicos

El transporte por ferrocarril se fundamenta en los siguientes conceptos propios de la vía y el material rodante (Amelín. 2004. [2]), el estudio de su dimensionamiento será la tarea fundamental que nos ocupará; ellos son:

- **Apoyo:** Los esfuerzos de la gravedad y el viento están compensados por reacciones entre sólidos. En el caso del ferrocarril la función de soporte o apoyo se encomienda directamente al riel y por su intermedio a los durmientes, balasto y plataforma de la vía.
- **Guiado, encausado ó trazado:** En los sistemas de transporte que adoptan el agua, el aire o la carretera, la marcha se produce con dos o más grados de libertad.

En el caso del ferrocarril, los rieles o carriles guían el material rodante, coaccionando su movimiento u obligándolo a inscribir su marcha dentro de la geometría que se ha establecido previamente, por lo que el vehículo y la vía habrán de poseer unas características resistentes que respondan a las condiciones que en cada momento se deriven del proceso de guiado. El del ferrocarril de Nicaro es muy sinuoso, se destacan el 90% de curvas cerradas en perfil y planta con radios inferiores a 750 m.

- **Circulación unidireccional:** Al quedar incorporado al ferrocarril el concepto de guiado, se obliga al vehículo a seguir su marcha por el eje geométrico del camino de rodadura; esta circunstancia le lleva a aceptar el carácter unidireccional en el sentido longitudinal indicado. Este aspecto afecta de modo fundamental a la explotación al presentar los problemas de cruces, adelantos, etc. El ferrocarril de Nicaro no cuenta con doble vía, lo cual dicta operatividad excelente.
- **Adherencia:** Este concepto de carácter general no se manifiesta en los sistemas de transporte por agua o aire, pero sí en el terrestre, ya sea por carretera o ferrocarril. La adherencia entre la rueda y el riel impone un límite teórico y práctico a las gradientes.
- **Ancho de la Vía:** El ancho de la vía, o trocha, es la separación que hay entre los dos rieles de una vía. Es el parámetro que más fuertemente caracteriza el camino de hierro.

Capítulo I. FUNDAMENTO TEÓRICO – METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.**1.3. Clasificación de las vías férreas.**

1. En cuanto al ancho de vía ó trocha: Según Kantor, 2003 [48].

- De vía estrecha, generalmente de ferrocarriles mineros e industriales (la de los Monos de Pinares) y centrales azucareros (la de Cayo Mambí).
- De vía estándar ó normal: La del ferrocarril de Nicaro cuya trocha es de 1435 mm.
- De vía ó trocha ancha: La rusa, india y la española.

En la tabla 2 se relacionan las trochas más usuales utilizadas actualmente en el mundo.

Tabla 2. Anchos de vía ó trochas, más usados en el mundo.

30"	762 mm	principalmente en minería	Algunos ferrocarriles de América del sur
36"	914 mm	usos específicos, poco utilizada	MINAZ, Cuba; Mono de Pinares, Cuba
39 3/16"	1.000 mm	uso general	Algunos ferrocarriles de América del sur
42"	1.067 mm	uso general	África, Japón, América del sur (part.)
56 3/8"	1.435 mm	trocha estándar o internacional	Cuba, América, Europa, USA.
60"	1520 mm	trocha ancha rusa	Rusia, países de la antigua URSS
63"	1.600 mm	trocha ancha India	India, Paquistán, Irán, Brazil
66"	1.676 mm	trocha ancha española	España, Portugal, Chile, Bolivia

(Fuente: En: <http://www.secta/cont.cl/metodology/transport/redefe/section 1-10.htm>.)

Por su Categoría ó clasificación.

El diseño de la superestructura ferroviaria depende de muchos factores. Entre los más relevantes tenemos las cargas por ejes, tráfico y velocidades proyectadas, otro criterio muy importante es el destino de la vía, la connotación de la misma y el tiempo esperado de vida útil de la misma.

La clasificación de las vías férreas, según la NRMT 249:2003 [82], se recoge en la tabla 3.

Tabla 3. Clasificación de las vías férreas.

Categoría.	Tipo, características, Importancia y uso de las Vías férreas.	Parámetros de clasificación		
		V _{máx} (km/h)	T año (t-km/km)	n Trenes (par/d)
I	Principales de trocha 1435 mm, transportan dentro de la red nac. ferroviaria y arterias vinculadas. Otras de importancia nacional.	> 100	> 5 x 10 ⁶	> 20
II	Principales de trocha 1435 mm, de importancia regional, pueden servir de vías alternativas ó desvíos a las arterias fundamentales.	100	> 3 x 10 ⁶	>10
III	Secundarias de cualquier trocha; importancia regional ó local; de servicio público ó propio, para trenes de carga y/o pasajeros.	80	1 - 3 x 10 ⁶	Hasta 10
IV	Secundarias de cualquier ancho, de importancia local y de uso público ó propio, así como, las vías de enlace en las estaciones.	60	< 1 x 10 ⁶	hasta 10

(Fuente: NRMT 249:2003 [82]). Por su destino ó utilización.

- Vías ó caminos: Principales; ramales y subramales.
- Auxiliares: Apartaderos; desviaderos; triángulos.
- Patios: Todas las vías de un patio de operaciones ferroviarias, menos la principal.

Capítulo I. FUNDAMENTO TEÓRICO – METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.

La vía principal de Nicaro, por su importancia e incidencia en la economía nacional, su elevada carga por eje y la densidad de su tráfico (trabajo) bruto anual (TBA), clasifica como vía de categoría I, según la norma NRMT 249:2003, aunque su velocidad media sea baja.

En la figura 4 podemos ver las partes de una vía férrea (según Amelín, 2004. [2]).

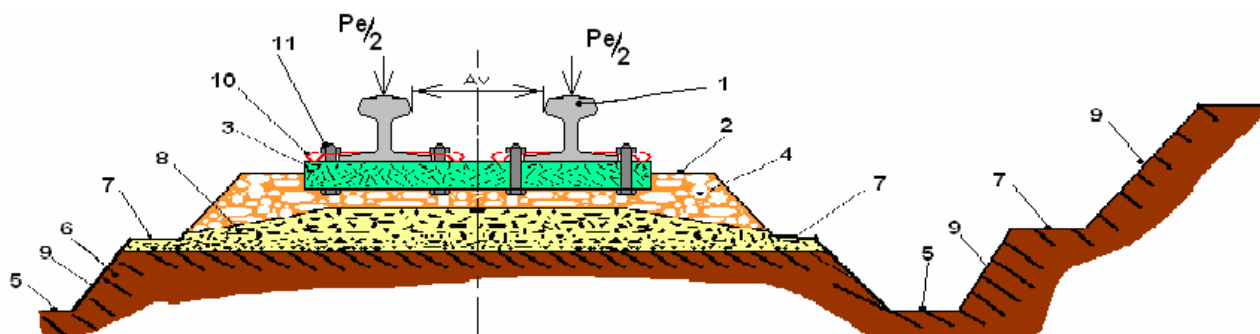


Figura 4. Partes de la vía férrea.

Donde: 1-Riel; 2- Hombro del prisma; 3- Traviesa; 4- Prisma de Balasto; 5-Cunetas; 6-Terreno; 7- Bermas; 8-Subbalasto ó asentamiento; 9-Talud; 10-Presillas elásticas; 11- Tornillos de fijación; $Pe/2$ —carga por rueda ó mitad por eje; Av — Ancho de vía.

En el ferrocarril de Nicaro los problemas más agudos de la superestructura se centran en los rieles, pues el balasto empleado es de calidad aceptable, aunque el tipo de carga transportada, el mineral, lo contamina con relativa rapidez, provocando que no cumpla su función a lo largo de su vida, al no ser renovado ó saneado con la regularidad demandada. Las traviesas defectuosas se están sustituyendo, lo que se hace imprescindible es restablecer la densidad de 1680 traviesas/km en recta y 1760 en curvas y en los tramos de aceleración y frenaje, según establece la norma NRMT 249:2003 [82]; se deben resolver también los problemas de insuficiencia en las fijaciones. En la infraestructura, los problemas de puentes, alcantarillas, pasos superiores e inferiores; la preparación del terreno, plataformas, cunetas y drenajes de la vía, se ven a las claras y se trabaja en su solución, por lo que no los estudiaremos. Resumiendo, los rieles serán el centro de nuestro objeto de estudio en lo concerniente a las vías, por la interacción directa rueda-carril.

1.4. Los rieles.

Los rieles: Son el elemento principal de la superestructura de la vía férrea. Entre sus principales funciones está; recibir las cargas de las ruedas del material rodante y transmitir las a las traviesas; direccionar el movimiento del tren y servir de conductor eléctrico.

Capítulo I. FUNDAMENTO TEÓRICO – METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.

La forma del riel, su largo y composición química definen el peso de la vía, su potencia y principales características técnico económicas de ésta. Para su estudio, los rieles son considerados como una viga con apoyos múltiples (op. cit.).

La forma y composición química: El perfil del riel asemeja una doble T, forma que mejor trabaja al esfuerzo de flexión. La parte superior del riel se somete a la flexión y al desgaste, lo que obliga a aumentar ahí más cantidad de metal que en la inferior, dando origen a la forma del riel moderno, llamado riel de Vignola, el cual consta de tres partes fundamentales:

1. La parte superior, llamada cabeza ó patente con ancho, altura y superficie de rodadura suficiente para transmitir las cargas desde las ruedas a su parte central. En la figura 5 puede verse los detalles de la forma de los rieles
2. La parte central llamada alma ó garganta, es alargada y estrecha, de forma recta en Francia, Bélgica, RCh etc. y curvilínea en Rusia, USA. Debe poseer el grueso necesario para transmitir las cargas a la parte inferior y soportar la corrosión.
3. La parte inferior llamada pié ó patín, debe ser suficientemente ancha para garantizar la rigidez del carril en el plano horizontal y su estabilidad al vuelco.

Los rieles del ferrocarril de Nicaro poseen como defecto más frecuente, el desgaste lateral, principalmente en las zonas de curvas, aplastamientos en los extremos de la cabeza sobre los empalmes, exfoliación de material, etc. El método de control de la forma más usado es la medición periódica, para determinar el desgaste de la cabeza del riel, tanto en la parte lateral como la superior, las que determinan el desgaste equivalente y la condenación del riel para su continuidad en explotación. En la tabla 4 se muestran los rieles estándares de diferentes países del mundo y sombreados los utilizados en Cuba.

Tabla 4. Principales características de los rieles más usados en Cuba y el mundo.

Carril	ASCE-75	ORE-71	UIC-54	UIC-60	60-S	R-43	R-50	R-65	AREA-140	BS-113A
Produce	USA	USA	España y otros UE	Aleman	ZDR, otros exsocialistas	USA	B.R			
H(mm)	123	186	159	172	172	140	152	172	185.7	158.8
b(mm)	51,3	77,3	70	73	71,3	70	70,95	72	76,2	69,9
G(mm)	123	160	140	150	150	114	132	150	152	139.7
S(mm ²)	7540	9079	6934	7686	7683	5700	6590	7173	8850	7255
P(kg/m)	36.33	71.24	54.43	60.34	60.31	44.65	51.63	64.64	69.40	56.80
Eq. T	1.3	1.54	1.66	1.56	1.33	1.5	1.5	1.44	1.55	1.36
J _v (cm ⁴)	201	735.06	417.5	512.9	552	260	375	546	710	417.47
J _h (cm ⁴)	1102	4151.6	2346	3055	3082	1419	2018	3090	4029	2352.11
W _v (cm ³)	61.9	91.9	59.44	68.4	73.60	57	65.9	72.89	94.50	59.63
W _h (cm ³)	198	499.73	279.19	355.5	322	217	286	436	403	313.97
δ (mm) I	4	6	4	6	6	4	4	6	6	4

(Fuente: REDEFE, Sección 7-1[97]. en inglés)

Capítulo I. FUNDAMENTO TEÓRICO – METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.

Leyenda Tabla 4.

Norma AREA- American Railway Engineering Association; ASCE- American Society of Civil Engineering; BS- British Standard; ORE- Organization for Railway Engineering; UIC- Unión Internacional Ferroviaria; DB- Ferrocarriles Federales Alemanes; ZDR- Zelieznie Dorogui Rozíi- Ferrocarriles Rusos. Resaltados en amarillo los rieles usados en Nicaro.

En la figura 5 se muestra el esquema del riel, de la Norma GOST 69344-63, del perfil R-50, uno de los carriles más usado actualmente en Nicaro.

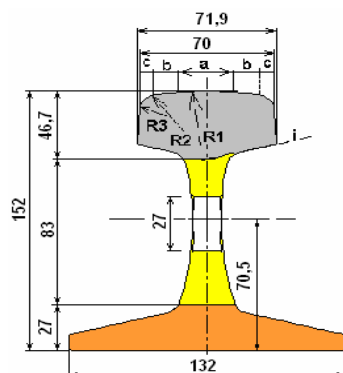


Figura 5. Dimensiones del perfil de los rieles de la Norma GOST.

(Fuente: REDEFE, Sección 7-1[97]. en inglés)

El largo: El largo de los rieles, es muy importante, pues determina el peso de la vía, la resistencia al movimiento del material rodante y la suavidad de la marcha. Nicaro emplea rieles de 12,5 m, que son más caros que los de 25 m y aumentan la resistencia a la marcha del tren. En la Tabla 5 se ven estándares de rieles de diferentes países del mundo.

Tabla 5. Principales características físico químicas de los rieles en diferentes países.

Países	Rusia	Fr.yBelg.	USA	RFA	UK	España	Cuba	Japón
Largo std. (m)	25 y 50	18;24y36	11.8 y 23.9	30 y 60	18y29	30;45y60	12.5;25	25
Peso/m (kg/m)	75	30 - 62	30 - 77	30 - 64	56.5	54 - 60	38 - 50	50-60
ToBN (M tmb)	600	500-600	650	450	500	600	300	400
Normas (Rieles)			GOST M-75 (R50)		AREMA		UIC (60)	
Propiedades químicas	Carbono	C	0.69 – 0.80		0.74 – 0.84		0.68 – 0.78	
	Manganeso	Mn	0.75 – 1.05		0.8 – 1.1		0.76 – 1.0	
	Silicio	Si	0.2 – 0.4		0.1 – 0.6		0.2 – 0.4	
	Fósforo	P	≤ 0.035		≤ 0.035		≤ 0.035	
	Azufre S	S	≤ 0.045		≤ 0.037		≤ 0.037	
	Impurezas	%	≤ 0.15		≤ 0.14		≤ 0.14	
Propiedades físicas	Dureza	HRB	300 – 340		341 – 348		325 – 335	
	Límite fluencia	kg/cm ²	4920		4920 – 7730		4900	
	Límite rot. tracc.	kg/cm ²	8800		9840 – 11950		8400	
	Alargam. / 50mm	%	4		9		5	
	Peso específico	ton/m ³	7.83		7.84		7.83	
	Coefic. dilatación L	kg/cm ²	1.05 * 10 ⁵		1.05 * 10 ⁵		1.05 * 10 ⁵	
	Módulo elástico	–	2.01 * 10 ⁶		2 * 10 ⁶		2.01 * 10 ⁶	

(Fuente: REDEFE, Sección 7-1[97]. en inglés)

Capítulo I. FUNDAMENTO TEÓRICO – METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.

Leyenda Tabla 5.

ToBN- Tráfico Bruto Normativo hasta el desecho; GOST- Gosudarstviennii Standart, norma estatal rusa. (Amelín. 2004. [2]; NRMT 157:85[75]; REDEFE, Sección 7-1[97]).

La dureza: Debe corresponderse con la dureza de las ruedas, para que la interacción entre ambos sea la correcta y el desgaste tenga un adecuado balance económico. En general, la dureza de los rieles normas UIC y GOST es menor que la de norma AREMA, y por la misma razón, las ruedas y llantas de la norma UIC y GOST tienen también menor dureza. Cuestión a tener en cuenta a la hora de seleccionarlos.

El peso de los rieles: Es un parámetro de suma importancia, se expresa en kg por metro lineal, a excepción de Norteamérica, Inglaterra y países de su influencia, donde lo expresan en libras por yarda ($1 \text{ kg/m} = 2,016 \text{ lb/yd}$). En general, el peso del riel está estrechamente ligado, sobre todo, a la carga por eje, a la velocidad de circulación y a la densidad del tráfico, pero la mayor dependencia es a la carga por eje. Para determinar el peso óptimo del riel no hay un método con bases teóricas que considere todos los factores relevantes. Sin embargo, en la práctica los rieles se sustituyen, preferentemente, por efecto del proceso de desgaste y fatiga, es lógico no basar su elección sólo su capacidad resistente, establecida por medio del cálculo del riel como una viga sometida a la acción de determinadas cargas. Hay que tomar en cuenta que usar rieles de mayor peso que el determinado en forma estricta por consideraciones estructurales, acarrea en la práctica otros beneficios (Amelín, 2004 [2]; Bejerano, 1998 [7]), entre los que se destacan:

- Una mayor duración de la vía;
- Una disminución de la resistencia al movimiento del material rodante;
- Una reducción de los gastos de mantenimiento;

Para determinar el peso óptimo del carril se emplean varios criterios, siendo los más usados el del profesor Shagunians, el de AREMA y el de ORE, en nuestro trabajo emplearemos el criterio propuesto por Shagunians, por ser el más acertado y usado en todo el mundo.

Resumiendo, los parámetros de la vía más incidentes en la eficiencia del ferrocarril son:

1. Tipo de riel: Define la forma, la dureza, desgaste equivalente de condensación; resistencia al movimiento del material rodante; vida útil de la vía; peso métrico, etc. todos incidentes en la carga por eje y la velocidad máxima, soportadas por la vía y determinantes en la productividad y eficiencia del ferrocarril.
2. El trazado, define dos cosas importantes:

Capítulo I. FUNDAMENTO TEÓRICO – METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.

- Radio de las curvas: Representado R , [m]- Determina largo total de la vía, velocidad de inscripción del material rodante y resistencia al movimiento del material rodante.
- Pendientes ó gradientes: p_c , [%]- Ídem al anterior, además incide en el peso del tren y potencia de la locomotora.

3. La velocidad máxima: V_m , [m/s] - Define la productividad y eficiencia del ferrocarril.

4. Vida útil del riel: t , [años]- Según se establece en la MRMT-249-03 [82] para vías nuevas de categoría I, es de 15 años, con cambios aislados de 6 rieles por kilómetro en un año para vías con rieles R-43; con rieles R-50 - 5 y 4 u. para vías con R-65 y R-75. Para vías reconstruidas es de 10 años, para iguales cambios aislados.

5. El tráfico: T , en [GNBA](Giga Newtons bruto anual). - En función del plan de la empresa, incide sobre los anteriores.

La tarea consiste en dimensionar la vía de tal forma que su vida útil se acerque a la normativa al menor costo. Todo esto será evaluado utilizando el criterio de Shaguniants.

Del trazado del ferrocarril de Nicaro, según KURISHEV, Alexander, 1976 [51], plano RES-M37-1002 como tramo para los cálculos, teniendo en cuenta las condiciones reales del terreno y las recomendaciones de (Schanoes 2003 [110] y Astaj 2000 [3]), escogimos:

El tramo desde el 14,300 al 12,700 km (descendente), mostrado en la Figura 6, con pendiente de 11%, 1627 m de longitud y curva derecha con radio de 795 m.

Este tramo por sus características clasifica en la categoría №1, según (op. cit.)

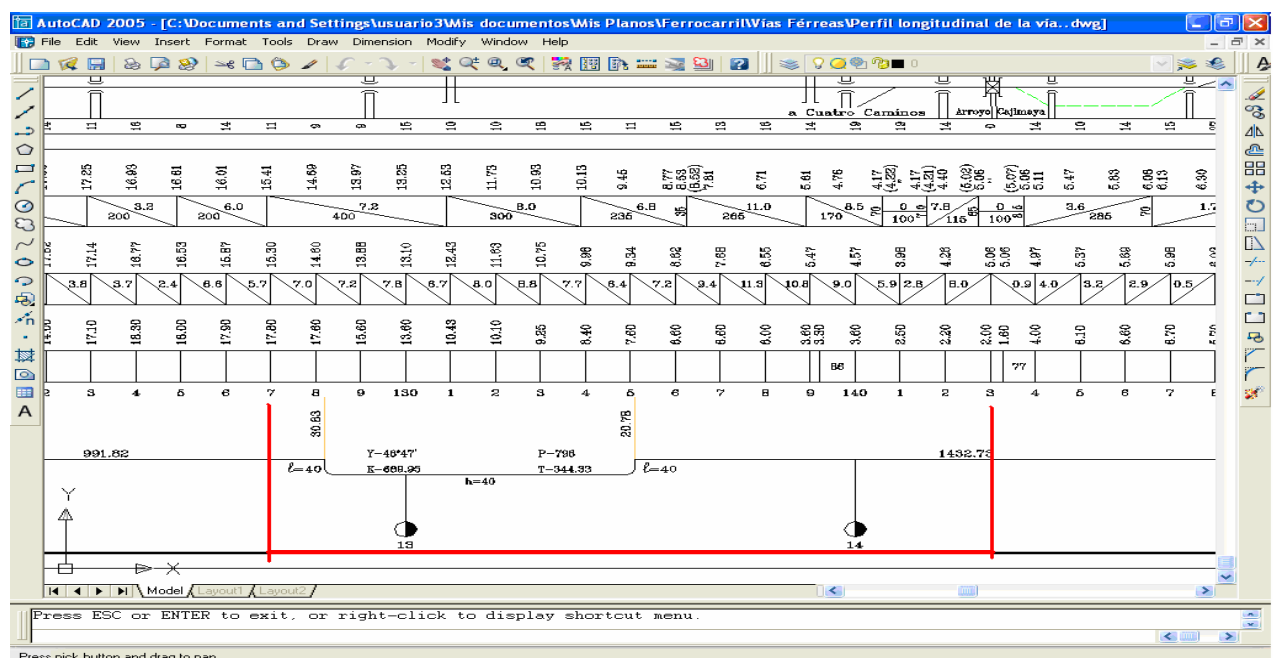


Figura 6. Tramo de cálculo escogido, desde el K14.300 hasta el 12.700, descendente.

Capítulo I. FUNDAMENTO TEÓRICO – METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.

1.5. El material rodante.

El parque tractivo cubano está formado por una amplia diversidad de locomotoras, mayormente de la primera generación, con diferentes tipos de transmisión y destino [64]. Las locomotoras de los ferrocarriles del MINAZ son casi en su totalidad, rusas diesel hidráulicas, de cuatro ejes, primera generación. Las de ACINOX, son locomotoras de seis ejes, de la General Electric primera generación, con dos ejes de sustentación, lo que las limita del pleno desempeño de su fuerza de tracción. Mayor diversidad aún presenta el parque de arrastre a lo largo de todo el país.

El material rodante de arrastre del ferrocarril de Nicaro lo componen vagones volquetas, con volteo accionado neumáticamente hacia la derecha; el 52% de ellos son japoneses de la firma Fuji Nipón Car LTD.; 39% son canadienses de la firma Hawker Siddeley Car Co. (ver anexo 9), 8% son vagones rusos tipo VSNII 31-673 y el resto planchas y otros.

Las locomotoras del Níquel, son diesel eléctricas de la primera generación, rusas de seis ejes serie TEM-2TK de 750 kW, fórmula axial $C_0 - C_0$, para trabajos de maniobras.

También una Alco RS-410, de 660 kW y fórmula axial $B_0 - B_0$, rediseñada para trabajos universales. Todas son usadas en labores de cargas pesadas con recorridos diarios en el entorno de 250 km. Constituyendo este un segundo punto de análisis en nuestro estudio.

En la figura 7a se muestra la clasificación de las locomotoras.

CABINAS	CARROCERIA	DESTINO	FUENTE DE PODER	TRANSMISIÓN	TIPO <-- RODAJE -->	FORM.
Dos	Cerrada	Pasaje	Locomotora de Vapor	Mecánica P<500 Hp	Solidarios ó s/ Bogies	Chumaceras
		Carga	 de turbina		No Solidarios ó C/ Bogies	Rodamiento
		Universal	... Acumuladora	Hidráulica P<1000 Hp		
		Maniobras	 Diesel	Estática	Suspensión Magnética	
		Industrial	 eléctrica	Dinámica		TROCHA
			 Híbridas	C. Continua		
			DE -- ADE -- EEC -- EA	Eléctrica P=ilimitada	Alterna - Continua	
					Alterna - Alterna	
MANEJO					CARGAS TRANSMITIDAS	
Único		Múltiple			Ligeras	Estrecha
Una	Varias	Acopladas			Medianas	Ancha
		No Acopladas			Pesadas	Estándar
					Cantidad de Secciones	
					Una	Varias

Figura 7a. Clasificación y generaciones del desarrollo de las locomotoras.

- Criterio de Clasificación
- Perteneciente a la Primera Generación de locomotoras.
- Perteneciente a la Primera y segunda generación.
- Perteneciente a la segunda generación.
- Perteneciente a la tercera generación.
- Perteneciente a todas las generaciones.

DE-E – Locomotora híbrida Diesel eléctrica – eléctrica. DE-A – Locomotora híbrida diesel eléctrica – acumuladora. EC –Locomotora híbrida eléctrica en corriente directa. y EA –corriente alterna. P— Potencia de la transmisión.

(Fuente: FIGUERAS MÉNDEZ, Joaquín. 1984-2008[27y 28]).

En la tabla del Anexo №1 se muestra la distribución de locomotoras y vías férreas en el mundo, hasta el año 2003.

Capítulo I. FUNDAMENTO TEÓRICO – METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.

Clasificación de las locomotoras.

1. Atendiendo a su destino. (Según AIZINBUD, S. Y. 2000[1])
 1. Locomotoras para trenes de cargas.
 2. Locomotoras para trenes de pasajeros.
 3. Locomotoras de maniobras.
 4. Locomotoras universales.
 5. Locomotoras industriales ó de procesos.
2. Atendiendo a la cantidad de secciones que la integran, pueden ser:
 1. Monosección, unisección ó de una sola sección.
 2. Bisección ó de dos secciones ó dobles ó gemelas.
 3. Multisección. Cuando poseen más de dos secciones.
3. Atendiendo la forma y tipo de rodaje:
 1. Locomotoras con carretillas (trucks ó bogies).
 2. Locomotoras sin carretillas.
4. Atendiendo a la forma de accionamiento de sus ejes motrices:
 1. Accionamiento individual de los pares de ruedas motrices.
 2. Accionamiento en grupos de los pares de ruedas motrices.
5. Atendiendo al ancho de vía ó trocha, pueden ser:
 1. De trocha ancha:
 2. De trocha estándar AAR ó normal.
 3. De vía estrecha.
6. Atendiendo al tipo de construcción de su carrocería, las locomotoras se clasifican en:
 1. Locomotoras con carrocería de capota.
 2. Locomotoras con carrocería cerrada, de cajón, o tipo vagón.
7. Atendiendo al tipo de fuente primaria de energía, las locomotoras se clasifican en:
 1. Locomotoras de vapor.
 2. Locomotoras de turbinas.
 3. Locomotoras diesel.
 4. Locomotoras eléctricas.
 5. Locomotoras híbridas.

Capítulo I. FUNDAMENTO TEÓRICO – METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.

8. Atendiendo a la forma de transmisión de la potencia desde la fuente primaria hasta los pares de ruedas, las locomotoras se clasifican en:

1. Mecánicas.
2. Hidráulicas.
3. Eléctricas.

Las locomotoras con transmisión mecánica encontraron poca aplicación en el ferrocarril, por su estrecho rango de potencias transmitida, se reemplazaron por las locomotoras con transmisión hidráulica y con transmisión eléctrica en ambos tipos de corriente.

1.6. Definición de las variables del ferrocarril.

Seguidamente relacionamos todas las variables y parámetros, que están involucradas en el ferrocarril y el concepto por el que se seleccionan:

1. Tipo Material rodante: Aunque define su rodaje, cantidad de ejes, peso, destino por diseño, que redundan en las cargas que se transmiten a la vía y la resistencia al movimiento. En nuestro caso, locomotora tipo universal de cuatro ejes.
2. Tipo de rieles: Define su dureza, largo y el peso métrico, que redundan en las cargas que se transmiten a la vía y la resistencia al movimiento, en Nicaro riel R-50 R-43;
3. Trocha: Ídem al anterior, imponen además un límite a las pendientes, la trocha ó ancho de vía se representa A_v y se expresa en [mm];
4. Masa métrica del carril: Define la potencia del carril y las cargas que es capaz de soportar, se representa P_{mc} y se expresa en [kg/m];
5. Desgaste máximo equivalente del carril: Define la vida útil del carril y los costos de mantenimiento, se representa S_0 y se expresa en [mm²];
6. Tara: Ligada junto al tipo de equipo con la resistencia al movimiento, limita las pendientes y la potencia de la locomotora, se representa P_t , y expresa en [kN] ó [tm];
7. Peso de servicio: Determinante en el peso adherente, P_s en [kN] ó [t];
8. Peso adherente: Determinante en la fuerza de tracción en arranque P_a en [kN] ó [t];
9. Carga estática máxima y promedio: Define junto a la cantidad de ruedas la carga por eje, es además un indicador económico, se representa $P_{NMáx}$ y P_{Nm} , en [kN] ó [tm];
10. Carga por eje: Define el tipo de riel a usar y las características fundamentales del ferrocarril en general, se representa q_e y se expresa en [kN/eje] ó [tf/eje];
11. Fuerza de tracción de arranque: Define el peso máximo del tren, F_a ; en [kN] ó [tf];
12. Fuerza de ilimitada: Define junto a V_c la productividad, F_∞ ; en [kN] ó [tf];

Capítulo I. FUNDAMENTO TEÓRICO – METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.

13. Fuerza de tracción tangencial máxima: Define las características tractivas y productividad. Se representa F_T y se expresa en [kN] ó [tf];
14. El coeficiente de adhesión de la rueda al riel. Define la fuerza de tracción y con ello el peso del tren que puede arrastrar la locomotora, se representa Ψ , sin unidades;
15. Número total de ejes: Define junto al peso de servicio la carga por eje, nte.
16. Número de ejes tractivos: Junto al peso adherente, define la fuerza de tracción, net.
17. La velocidad crucero media: Define junto a F_a la productividad de la locomotora, se representa V_{cm} y se expresa en [m/s] ó [km/h];
18. Velocidad constructiva: Importante para los cálculos de tráfico de cargas y la productividad del ferrocarril, se representa V_c y se expresa en [m/s] ó [km/h];
19. La potencia: Incide en la productividad del ferrocarril y los consumos principales de combustible, lubricantes, y otros; P_d para el diesel y N_G para el generador, en [kW];
20. Vida útil: Define costos; Se representa T_{vu} y se expresa en [años] y en [t*kmb];
21. Pendiente del tramo: Define las resistencias adicionales por pendiente, p_t , en [%];
22. Radio de curva: Define las resistencias adicionales por la curva, R , en [m];
23. Largo de la curva: Define las resistencias adicionales por la curva, L_R , en [m];
24. Tráfico, es la productividad de la locomotora, T , en [GN*kmb] ó en [Mt*kmb]
25. Densidad de tráfico: Tráfico por km de vías, DT , en [GN*kmb/km] ó en [Mt*kmb/km]

1.7. Trabajos precedentes.

A pesar de ser el transporte ferroviario un puntal de la red transportista del país y las locomotoras llevar el peso preponderante en el traslado de cargas y consumo de diesel total del mismo, al tema de la correcta selección de las mismas y el dimensionamiento correcto del ferrocarril acorde a las necesidades de las empresas transportistas, no se le ha prestado la debida atención, pues la literatura especializada, al tema en términos generales no se dan criterios ni definen con exactitud los parámetros técnicos acorde al lugar de trabajo y destino (Borzov, 2000[10]; Dieiev, 2002[16,17 y 18]; y Schanoes, 2003[110]).

El ferrocarril de Nicaro tuvo varias etapas en su desarrollo en las que fue dimensionándose y redimensionándose hasta el ferrocarril de hoy. Partiremos de la rehabilitación ferroviaria general efectuada del 1975 hasta el 1980, donde se realizó un profundo proceso inversionista en la reconstrucción de la vía férrea y adquisición de material rodante tractivo y de arrastre, para lo cual el Dr Alexandr Kurishev, quien fungía como Ing. Mayor del grupo

Capítulo I. FUNDAMENTO TEÓRICO – METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.

de proyecto soviético en Nicaro, en el trabajo “*Análisis y fundamentación de la rehabilitación ferroviaria RRL*” [51], realizó las siguientes investigaciones de las cuales estamos tomando referencia:

1. Medición de las resistencias específicas al movimiento de vagones y locomotoras.
2. Trazado de la vía férrea actual Nicaro – Piedra Gorda.
3. Trazado de las vías de los patios de Piedra Gorda antiguo, Sandín y Pinares.
4. Determinación del parque tractivo de locomotoras de Nicaro.

En este trabajo no se profundiza en la investigación sobre las vías férreas de Nicaro, limitándose a mejorar el trazado antiguo y cambio de traviesas de madera dura de caguairán que existían por traviesas de pino ruso creosotadas y la sustitución de rieles AREA-90 y ASCE-75 por rieles rusos R-43 de 12,5 m de largo. Tampoco hace una asociación Potencia vía vs. Plan de producción empresarial.

Aunque realizó la investigación sobre las resistencias al movimiento del material rodante no efectuó ningún cálculo de tracción para determinar el tipo de locomotora a usar, por lo que estas fueron implantadas por similitud en potencia y fuerza tractiva, incluso algo superiores en estos aspectos a las norteamericanas existentes, pero que cedían terreno en cuanto a la dinámica del movimiento y maniobrabilidad. Esto desde entonces, ha repercutido desfavorablemente, originando problemas de desgaste de ruedas y rieles en este ferrocarril. Igualmente se puede decir sobre los rieles empleados, que aunque son algo superiores en peso métrico a los norteamericanos son de mucho menos dureza, lo que acorta su vida útil. Machín Purón, 1995 [58] establece un llamado coeficiente de utilidad de los carriles, que viene dado por la expresión:

$$U = W / P\ell ; \quad [\text{cm}^3/\text{kg}/\text{m}]; \quad (1)$$

Donde: W – Es el módulo de la sección en cm^3 ;

$P\ell$ – Es el peso métrico ó peso por metro lineal del riel en kg/m .

En base a lo cual plantea que el riel más idóneo es aquel que tenga el mayor módulo de resistencia con el menor peso lineal y menores gastos de mantenimiento.

Por otra parte Shajunians [111] y Normas AREMA C-18 [73], nos sugieren que es preferible seleccionar rieles más pesados que los demandados por los cálculos estructurales, porque ofrecen las siguientes ventajas:

- Disminución de cambios aislados de rieles en 10%

Capítulo I. FUNDAMENTO TEÓRICO – METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.

- Disminución de los gastos de mantenimiento de 1,5 a 1,8%;
- Disminución de los gastos en materiales en 1,4%.

Esto se explica, debido a que el riel más pesado distribuye las cargas que le solicita el material rodante sobre más traviesas y posee mayor vida útil al tener la cabeza más gruesa. El Dr Stepan Vacilievich Amelín, 2004 [2] introduce el concepto de área de desgaste de cálculo, la cual se define la vida útil del riel y criterios de desecho vinculados al tonelaje.

$$S_0 = \beta * T; \quad [\text{mm}] \quad (2)$$

Donde: S_0 – Es el área equivalente máxima de desgaste en la cabeza del riel, en $[\text{mm}^2]$;

$$S_0 = (b * Z_0) - \Delta; \quad (3)$$

b – Es el ancho de la cabeza del riel en $[\text{mm}]$;

Z_0 – Es el desgaste vertical máximo normado, en $[\text{mm}]$; Según las Normas GOST M-75 8160-85 y la AREMA C-18, para vías de Categoría I, con velocidades hasta 60 km/h con rieles R-65 es de 12 mm; con rieles R- 50 es 10 mm; con rieles R-43 es 9 mm.

Δ – Es el coeficiente de equivalencia entre área real y la calculada por las mediciones por la forma de cabeza del riel; Para los rieles R-43; R-50 y R-65, $\Delta = 70 \text{ mm}^2$.

β – Es el desgaste equivalente específico, referido al tráfico, en $[\text{mm}^2 / \text{M t.kmb}]$.

Desgaste Característico de los rieles

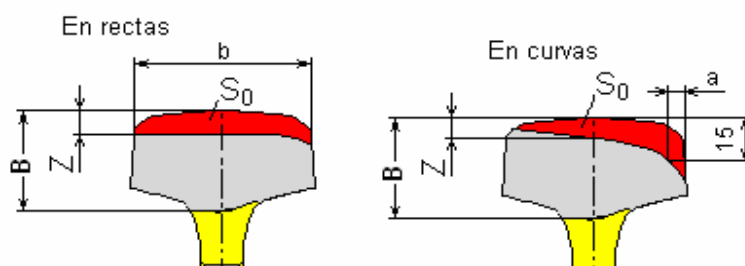


Figura 7b. Desgaste característico de los rieles en tramos rectos y en curvas.

Fuente: YAKOLEV, V. F. *La Vía Férrea, I y II partes*. [134]

En la figura 7b vemos que en tramos rectos predomina el desgaste vertical del riel- Z ; en curvas predomina el desgaste lateral a .

$$\text{El desgaste equivalente } S_0 = Z * a/2; \text{ en } [\text{mm}^2] \quad (4)$$

donde a – Es el desgaste lateral en $[\text{mm}]$, medido a 15 mm por debajo de la rodadura;

Z – Es el desgaste vertical en $[\text{mm}]$, medido desde la rodadura por el eje longitudinal.

$$\text{El desgaste global } \delta_T = Z + a/2, \text{ en } [\text{mm}] \quad (5)$$

Las normas de desecho de los rieles por desgaste, están recogidas en la tabla 6.

Capítulo I. FUNDAMENTO TEÓRICO – METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.**Tabla 6. Desgastes máximos permisibles de acuerdo al tipo de vía, riel y tráfico.**

Nº	Tipo de desgaste y clasificación de la vía	P-43	P-50	P-65
1	Vías Categoría I; TBA > 100 GNBA: Desgaste equivalente máximo; S_o [mm ²]	630	640	790
2	Para vías principales I; TBA < 10 Mtmb: Desgate Global máximo ; δ_T [mm]	9	13	16
3	Vías principales con TBA mayor de 10×10^6 .Desgaste lateral max. a_o [mm]	10	13	14
4	Vías de todo tipo con mordazas dobles. Desgaste vertical máximo Z_o [mm]	10	10	12

(Fuentes: AMELÍN, S.V., 2004[2] y MACHÍN PURÓN, Livia, 1995 [58]; NRMT 157:85[75]).

El Dr Alexandr Kurishev en su investigación de campo estableció que los vagones volquetas del ferrocarril de Nicaro cargados de mineral poseen la siguiente resistencia principal específica a su movimiento ó marcha;

$$\omega_{PC} = 0,7 + (3 + 0,1 \cdot V_m + 0,0025 \cdot V^2 m) / q_0 ; \text{ en [kg /ton]}. \quad (6)$$

Donde, V_m – Es la velocidad de marcha del tren

q_0 – Es la carga por eje del vagón;

$$q_0 = P_v / n_e ; \text{ en [kN/eje]} \quad (7)$$

Donde P_v – Es el peso del vagón en [kN].

n_e – Cantidad de ejes del vagón.

En dicho trabajó dejó también establecido que la resistencia principal al movimiento de los vagones vacíos era;

$$\omega_{PV} = 1,0 + 0,044 \cdot V_m + 0,0024 \cdot V_m^2 ; \text{ en [kg /ton]}. \quad (8)$$

y la resistencia adicional de los vagones a la puesta en marcha:

$$\omega_a = k \cdot (28 / (q_0 + 7)); \text{ en [kg /ton]}. \quad (9)$$

Donde: k – Coeficiente de corrección introducido por el Dr Kurishev en la fórmula establecida por la Norma GOST 1342:1988 “Reglas de los Cálculos de tracción para los trabajos de tren” del MPS de Rusia. El cual toma los valores expuestos en la tabla 7;

Tabla 7. Dependencia del coeficiente de corrección k de la cantidad de vagones.

Cant. Vag. n_v	1	2	3	4	5	6	7	> 7
Valor k	1,8	1,6	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	1,0

(Fuente: Kurishev, 1976 [51])

En su trabajo Kurishev no tuvo en cuenta las resistencias adicionales por las curvas ni por el aire, que proponen la AREMA[73]; Dieiev, 2002 [17]; Osipov, 2000 [89] y otros.

En curvas con radios inferiores a 700 m, dada por la expresión, la resistencia adicional será;

1. Cuando el largo del tren es menor ó igual a la longitud de la curva:

$$\omega_R = 700 / R; \text{ en [kg /tm]}. \quad (10)$$

Donde R – Es el radio de la curva en [m].

Capítulo I. FUNDAMENTO TEÓRICO – METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.

La fórmula (7) puede ser expresada a través de los grados y el largo de la curva, así;

$$\omega_R^0 \ell_R'' = 12,2 * (\alpha^0 / \ell_R); \text{ en [kg /ton]}. \quad (11)$$

Donde α^0 – Son los grados de la curva y ℓ_R – Su largo en [m];

2. Cuando el largo del tren (ℓ_T) es superior al largo de la curva (ℓ_R):

$$\omega_R'' = 700 * \ell_R / (R * \ell_T); \text{ en [kg /ton]}. \quad (12)$$

Las resistencias adicionales específicas producto del viento lateral ó en contra de la marcha del tren, no fueron tenidas en cuenta en ninguna de las literaturas anteriores, las mismas están reflejadas (según Novikov, 2004 [88]), luego de innumerables pruebas de polígono, en la tabla 8. Para viento en contra, se considera el ángulo de incidencia $\gamma = 0^0$; para viento lateral $\gamma = 30^0$, se asume el 80% de los valores de resistencia en por cientos de la resistencia principal, reflejados en dicha tabla. Para ángulos de incidencia superiores a 30^0 la resistencia del aire se desprecia.

Tabla 8. Resistencia específica adicional al movimiento del tren, causada por el aire.

Va [m/s]	ω_V'' kg /ton	Velocidad del tren [km/h]						
		10	20	40	60	80	100	120
8	% ω_P''	24	21	16	13	10	8	6
10		38	31	24	18	14	11	9

(Fuente: Novikov, 2004 [88]).

Para poder establecer criterios de selección del tipo de locomotora a emplear partimos de las recomendaciones de Panov, 2004 [90], quien nos sugiere que a partir de los 800 kW de potencia el único tipo de transmisión a emplear es la eléctrica. Fufriansk, 2002[31] nos plantea que la tendencia a nivel mundial es el empleo de la transmisión eléctrica. Medel - 1998 y 2004[65 y 66], plantean que para el cambio a la tracción eléctrica pura, se requiere: Tráfico no inferior a 30 pares de trenes/día, para amortizar los gastos de la inversión. Según Vorodulin, 1999 [131], al calcular la potencia efectiva del diesel se debe tener en cuenta la dependencia de esta en función de la temperatura, humedad relativa y presión atmosférica existente recomendada por SIMSOM, A.E., 1990 [116], que versa:

$$P_{0C} = P_N (\frac{t_a}{t_n})^2 * (t_a - 40); \text{ en [kW]} \quad (13)$$

Donde P_{0C} y P_N – Son las potencias de la locomotora real calculada para la temperatura del aire de alimentación y la nominal por pasaporte, en [kW].

t_a – Temperatura del aire de alimentación del motor, en [°C].

Capítulo I. FUNDAMENTO TEÓRICO – METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.

Para nuestro país, en régimen establecido en locomotoras con purificador de acción continua en baño de aceite, esta se considera de 5 a 7 °C superior a la ambiente.

(⁺–) Se toma el signo (+) para los cálculos, cuando la temperatura del aire de alimentación es inferior ó igual a 40°C; y el signo (–) para temperaturas superiores a 40°C. Esto es muy importante porque para una temperatura del aire del medio ambiente de 40°C, de verano en Cuba, tendremos una temperatura del aire de alimentación de 45°C, que implica para una potencia de pasaporte de 1000 kW una potencia de cálculo:

$$P_{oC} = 1000 - 2 * (45 - 40);$$

$$P_{oC} = 990 \text{ kW}.$$

Esta corrección de la potencia que realmente entrega el equipo para la temperatura del aire dada, deberá ser tomada en cuenta para los cálculos de tracción.

1.8 Metodología y diseño de la investigación.

La metodología utilizada para el desarrollo de la investigación, sigue varias etapas de trabajo que presentamos a continuación y no difiere en su esencia de la metodología de investigación clásica utilizada para estudios de sistemas a controlar en procesos industriales, sólo que al aplicarla en un proceso real (accionamiento eléctrico de una locomotora) de cierta complejidad con peculiaridades específicas en más de un objeto, resulta de interés su desarrollo.

Primera Parte: Preliminar ó inicial de la investigación documental, donde analizamos los planes de producción y las perspectivas de los mismos para establecer mediante cálculos, el tráfico demandado por los mismos al ferrocarril, esta data nos permitió graficar la dependencia Tráfico en función del plan. Seguidamente el segundo paso lo constituyó la selección de los 10 lugares más representativos del trabajo del ferrocarril. O sea aquellos que más incidencias de desgaste de los rieles, accidentabilidad y sustituciones aisladas presentaban. Esta selección se hizo partiendo del análisis estadístico de los accidentes y cambios de rieles en la vía principal del ferrocarril de la RRL entre los años 1995 y 2000. Seguidamente se analizó el desgaste de los rieles en los puntos seleccionados para los tráficos de 2×10^6 , 4×10^6 20×10^6 t.kmb para graficar el desgaste equivalente vs. Trabajo y con ello establecer la dependencia de la vida útil de los rieles del plan de producción de la empresa para su adecuado dimensionamiento, aplicando el criterio del Dr. Shajunians.

Capítulo I. FUNDAMENTO TEÓRICO – METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.

La aplicación del criterio de Shajuniants [11] y el modelo simplificado del tren propuesto por Dieiev [18], generan el siguiente modelo de nuestra investigación, expuesto en la figura 8.

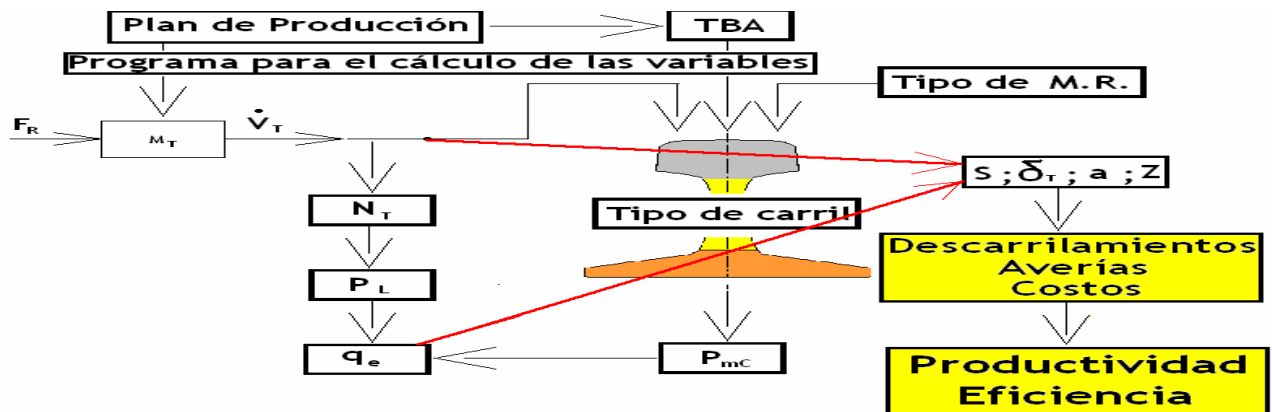


Figura 8. Diseño de la investigación.

En el que intervienen 5 variables para los dos niveles de investigación, que hace necesario realizar 128 mediciones, cuestión que no es ningún problema, pues nuestro catastro cuenta con 1460 mediciones. En esta fase inicial además de la Revisión bibliográfica, se realizaron encuestas al personal de mantenimiento; Revisión de la documentación técnica del ferrocarril de Nicaro; Reglamento de operaciones; trabajos investigativos específicos, trabajos de campo destinados a la observación del trabajo de las locomotoras y la vía; así como también se realizó la revisión de trabajos precedentes y se estableció la base teórica que sustenta la investigación; para de esta forma seleccionar los materiales primarios.

Segunda parte: Experimental y de Simulaciones. Este está dividido en tres etapas;

Primera etapa: La caracterización integral del objeto de estudio; es decir, las locomotoras y rieles del ferrocarril de Nicaro; una breve descripción de los principales momentos del flujo tecnológico y los principales elementos del proceso de transporte ferroviario, donde se estableció un análisis del diagrama y se seleccionaron las variables.

La segunda etapa: Recopilación de los datos necesarios para establecer los parámetros de las variables, correr los modelos de rieles y locomotoras. Se evalúa la demanda de tráfico de cargas al ferrocarril en función del plan de producción de la empresa para diferentes escenarios, en base a la cual se calcula y comprueba la correcta selección de los carriles para las vías de Nicaro utilizando MATLAB y el criterio sugerido internacionalmente por el comité ORE, el de Shajuniants, que junto con el análisis del factor de uso de los carriles, permite calcular su tiempo de vida y con ello estimar y controlar costos de la vía.

Se confeccionan los modelos físico y matemático del tren y la locomotora.

Capítulo I. FUNDAMENTO TEÓRICO – METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.

Con los modelos se confecciona el programa en MATLAB, para evaluar la fuerza de tracción de la locomotora en dependencia de su velocidad, o sea la característica tractiva de esta; la potencia necesaria de la locomotora en dependencia del peso del tren. Esto permite establecer el dimensionamiento de la transmisión eléctrica de la locomotora. Se ofrecen conclusiones parciales del análisis.

La tercera y última etapa corresponde al análisis de los resultados, obteniendo la base de conocimientos de las variables que mejor caracterizan el comportamiento del ferrocarril.

Se efectúa una valoración económica, social y ecológica sobre el impacto de los resultados.

Se realizan las conclusiones y se dan recomendaciones generales del trabajo.

1.9. Conclusiones parciales del Capítulo I.

1. El nuevo escenario productivo de la RRL dicta un redimensionamiento del ferrocarril, en cuanto a: Parque tractivo; tipos de locomotoras y tipo de superestructura de la vía.
2. El plan de producción de la empresa está directa y proporcionalmente ligado con el tráfico anual de cargas demandado a ferrocarril y este, junto a la carga por eje y la velocidad de circulación con el desgaste y la vida útil de rieles y ruedas y con los costos;
3. Los tramos más representativos del trabajo del ferrocarril se ubican en las curvas con radios inferiores a 300m y con gradientes negativos ascendentes (ver Tabla 9).
4. Los parámetros y variables que caracterizan el funcionamiento del ferrocarril, se relacionan en la tabla 10a.
5. Las variables que mejor reflejan el vínculo plan Ni+Co Trabajo de ferrocarril en general son: potencia de la locomotora; velocidad media; peso métrico de los carriles; carga por eje y peso del tren, en función del tráfico, se relacionan en la tabla 10b.

Tabla 9 Características de los puntos más representativos de la vía Pinares.

Nº	Tramo	Infl. Desc.	PC[m]	PT[m]	L[km]	‰	h[mm]	Y	R[m]	K[m]
1	Curva	D	4430	4650	220	2,4	70	38°51'	285	223,3
2	Recta	–	9300	9700	400	(-7,7& -4,9)	0	0	0	0
3	Curva	I	14953	15138	185	0	30	43°30'	290	185,25
4	Curva	I	15429	15551	122	(-4,2)	30	290°46'	236	122,61
5	Curva	I	18736	19199	463	(-4,6; 1,4; -0,5)	70	81°48'	290	454,03
6	Curva	I	21162	21579	417	0	70	69°40'	290	417,61
7	Curva	I	23530	23757	227	(-1,7; -2,0; -5,3)	70	38°48'	291	227,06
8	Curva	D	25652	26342	690	0	60	42°	338	277,77
9	Curva	D	26926	27292	366	(-3 & 5 & 0)	30	59°28'	290	300,99
10	Curva	D	27451	27679	228	-4,2	70	25°57'	274	164,1

Capítulo I. FUNDAMENTO TEÓRICO – METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.**Tabla 10a. Relación de variables y parámetros objeto de estudio y su representación en los programas computacionales creados para su evaluación.**

Nº	Parámetros y variables a estudiar	Símbolo	Repres.
1	Tipo de rieles, caracterizado por el peso métrico,	R-(pm)	R(pm)
2	Tipo de Locomotora, caracterizada por el destino.	Uni	Uni
3	Trocha; en [mm]	Tr	Tr
4	Masa métrica del riel; en [kg/m],	Pmc	q
5	Desgaste máximo equivalente del riel; en [mm ²]	S ₀	S0
6	Peso de tara, en [kN]; también en [tm]	Pt	Pt
7	Peso de servicio; en [kN]	Ps	Ps
8	Peso adherente; en [kN]	Padh	Pa
9	Carga estática; en [kN]	C _e	Ce
10	Carga por eje; en [kN/eje]	q _e	qe
11	Fuerza de tracción en arranque; en [kN] y [kgf]	Fa	Fa
12	Fuerza de tracción ilimitada ó continuada; en [kN] y [kgf]	Fc	Fc
13	Fuerza de tracción máxima; en [kN] y [kgf]	Fmax	Fmax
14	Coeficiente de adhesión rueda-riel	ψ	Y
15	Cantidad ó número total de ejes;	ne	ne
16	Cantidad de ejes tractivos;	net	net
17	Velocidad crucero promedio; en [m/s] y en [km/h]	V _{cm}	V
18	Velocidad constructiva; en [m/s] y en km/h]	V _c	Vc
19	Potencia; en [kW] y en [Hp]	P	P
20	Vida útil; en [años] y en [t*kmb]	Tvu	Tvu
21	Pendiente de cálculo; en [‰]	i	pc
22	Radio mínimo de curva; en [m]	R _{min}	Rmc
23	Largo de la curva; en [m]	Lc	lc
24	Tráfico; en [G N*mb], también en [M t*kmb]	T	T
25	Densidad de tráfico; en [G N*mb/m] ó M t*kmb/km	DT	DT

Tabla 10b. Relación de las variables mas representativas del trabajo del ferrocarril.

No	Variables	Símbolo	Repres.
1	Velocidad crucero promedio; en [m/s] y en [km/h]	V _{cm}	V
2	Masa métrica del riel; en [kg/m],	Pm	q
3	Carga por eje; en [kN/eje]	q _e	qe
4	Peso del tren	PT	PT
5	Tráfico; en [G N*mb], también en [M t*kmb]	T	T
6	Potencia; en [kW] y en [Hp]	P	P

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

- 2.1 Introducción.
- 2.2 Evaluación de los parámetros y las variables de la vía férrea.
- 2.3 Análisis de los resultados de la evaluación de los rieles.
- 2.4 La locomotora diesel eléctrica.
- 2.5 Confección del modelo físico y matemático del tren y la locomotora.
- 2.6 Evaluación de los parámetros y variables del material rodante.
- 2.7 Programa en MATLAB para los cálculos de tracción de trenes.
- 2.8 Comparación de los resultados del ajuste de potencia simulado y el real
- 2.9 Cálculo y comparación de la productividad actual y la proyectada.
- 2.10 Cálculo y comparación de la eficiencia de la locomotora actual y propuesta.
- 2.11 Comparación de las características de las locomotoras.
- 2.12 Análisis de los resultados obtenidos de la evaluación de las locomotoras
- 2.13 Conclusiones parciales del Capítulo II.

2.1 Introducción.

Primeramente analizaremos la composición de las afectaciones propias del ferrocarril al plan de producción de la empresa, mostrado en la tabla 11.

Tabla 11. Composición de afectaciones propias del ferrocarril al plan de producción.

Nº	Criterios de afectación	Incidencia en %
1	Descarrilamientos por vía férrea	41,1
2	Descarrilamientos por material rodante	30,5
3	Descarrilamiento por la operación	7
4	Averías de locomotoras	4,1
5	Averías de vagones	5,4
6	Disponibilidad de locomotoras	1,4
7	Disponibilidad de vagones	2,6
8	Técnico-organizativas y otras	11,9

(Fuente: Revisión de archivo Dpto. Ferrocarril RRL años 1995 -2005 [27]).

Del análisis de Pareto a lo anterior, como mostramos en la figura 9, nos damos cuenta que es precisamente sobre los problemas de la vía y el material rodante donde debemos centrar nuestro estudio. Las afectaciones, descarrilamientos por vía férrea; material rodante, etc.: Son las afectaciones originadas por los descarrilamientos en los que la comisión de averías dictamina que imputables a la vía; material rodante, etc. Comprende el tiempo transcurrido desde que ocurre (se informa) la avería, hasta que nuevamente se restablecen las operaciones (se da paso). Las afectaciones: descarrilamientos por operación, son las imputables a la mala operación de los equipos; Exceso de velocidad y otras violaciones del reglamento de operaciones. Las técnico-organizativas y otras: Falta de medios de protección e higiene del trabajo, viradero, combustible, personal, lluvia, falta MPHT, etc.

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

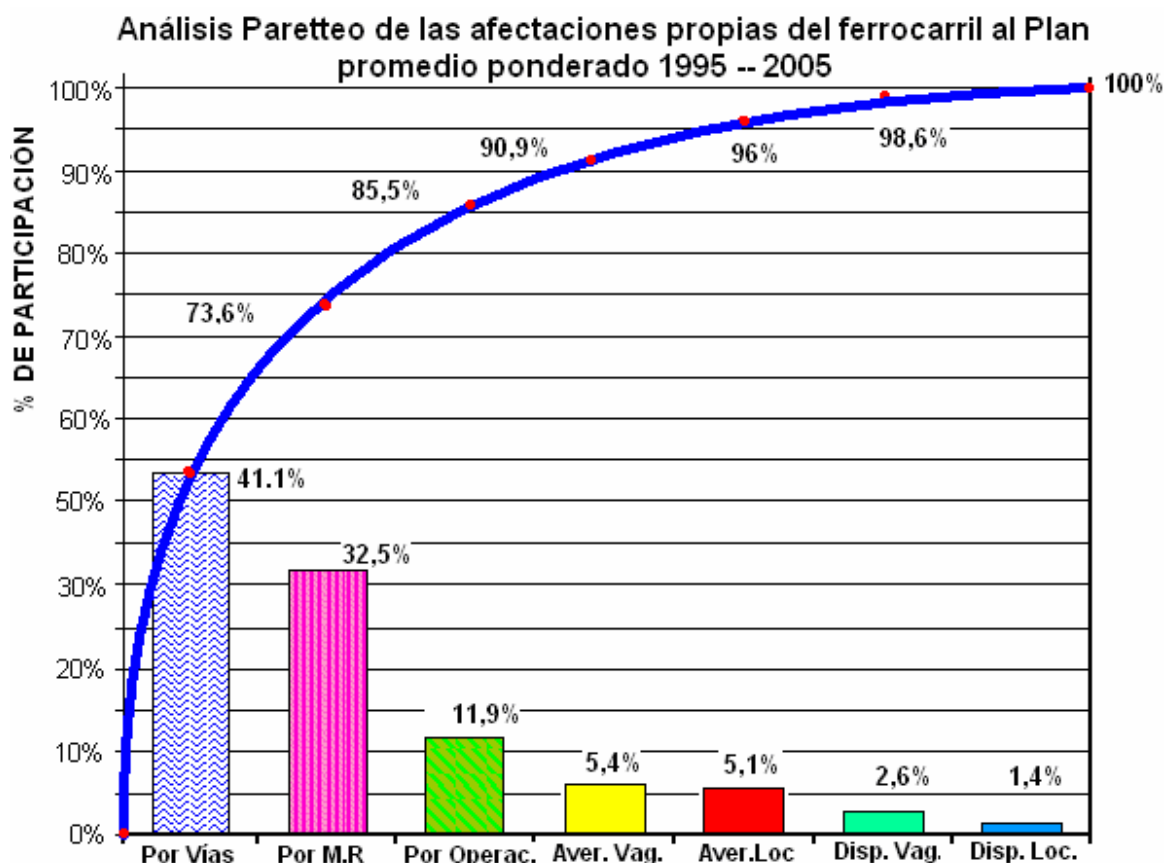


Figura 9. Análisis de Pareto a las afectaciones propias del ferrocarril 1995-2005.

Del análisis de Pareto establecemos, que analizando la cuarta parte de las causas, solucionamos las tres cuartas partes de las afectaciones. Escogimos la locomotora por poseer mayores problemas de dimensionamiento y su rol en los consumos y los rieles. Ya vimos el estado de necesidad en torno al asunto, solo que no hemos definido claramente para qué ó respecto a qué. Un ferrocarril a la medida de las necesidades, implica mayor eficiencia en su explotación con la consiguiente disminución de sus costos (Maloziomov. 2003 [61], esto nos da la respuesta buscada. La correcta selección de los elementos componentes del ferrocarril, disminuye los costos y proporciona un mejor aprovechamiento de sus potencialidades (VSNII, VSNII Guizatulin, 2001 [132]). Según AIZINBUD, 2000 [1] la economía de las locomotoras se caracteriza por los gastos referidos a su potencia ó al trabajo realizado en t.kmb, eficiencia es la relación de los gastos potenciales instalados, sobre los reales, que siempre serán superiores por las contingencias y otras causas. Entre esas otras está el empeoramiento del equipo durante la explotación, que también incide en el aumento de los gastos reales. O sea dos vías para mejorar de eficiencia son:

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Mantener correctamente ajustados los parámetros técnicos del equipo y la otra es disminuir los costos de su explotación y mantenimiento.

En este capítulo nuestros cálculos se hacen para varios escenarios productivos que prevén perspectivas de crecimiento hasta el 2015 de la producción de Ni+Co de la empresa. Se establecen las relaciones entre las variables que definen el comportamiento del ferrocarril y el tráfico de cargas demandado por el plan de producción de la empresa.

Los objetivos del capítulo son:

1. Establecer un análisis del comportamiento y relación de las variables del ferrocarril.
2. Interpretación correcta de los resultados obtenidos.

Lo primero fue establecer una relación entre el plan de producción de la empresa y el tráfico de cargas demandado por este al ferrocarril para darle una dimensión acertada al mismo.

Esto, como ya hemos dicho, con una proyección hasta el 2015 para diferentes escenarios productivos: Plan de producción "in crescendo" desde 12 000 hasta 18 000 tm de Ni+Co; Ley de níquel "in decrescendo" de 1,16;.....1.13;....1,1; Eficiencia asumida 60%. Introducimos el concepto de índice de transportación del mineral, que refleja el tráfico en toneladas kilómetros bruto, que demanda al ferrocarril producir una tonelada de producción final de Ni+Co. Los cálculos de estas variables se hacen partiendo de una base teórica, soportada en programas computacionales desarrollados en EXEL y MATLAB.

Partiendo de la data estadística del catastro de vía en los puntos más representativos del trabajo del ferrocarril de Nicaro, aplicando la T-de Student establecemos los valores de desgaste, que nos permiten encontrar la ecuación de regresión para el desgaste equivalente y específico en el riel vs. tráfico de cargas y seguidamente con el coeficiente de utilidad, pronosticaremos la vida útil para dichos rieles. El resultado obtenido lo comparamos con las normas NRMT 157:85; GOST M-75 8160-85 y AREMA C-18 para establecer su dimensión. Para este fin, utilizaremos el criterio del Dr Shajunians [111], usado en casi todo el mundo y recomendado también por las Normas AREMA; UIC y ORE, que nos servirá además, para hacer la evaluación del peso óptimo del carril necesitado.

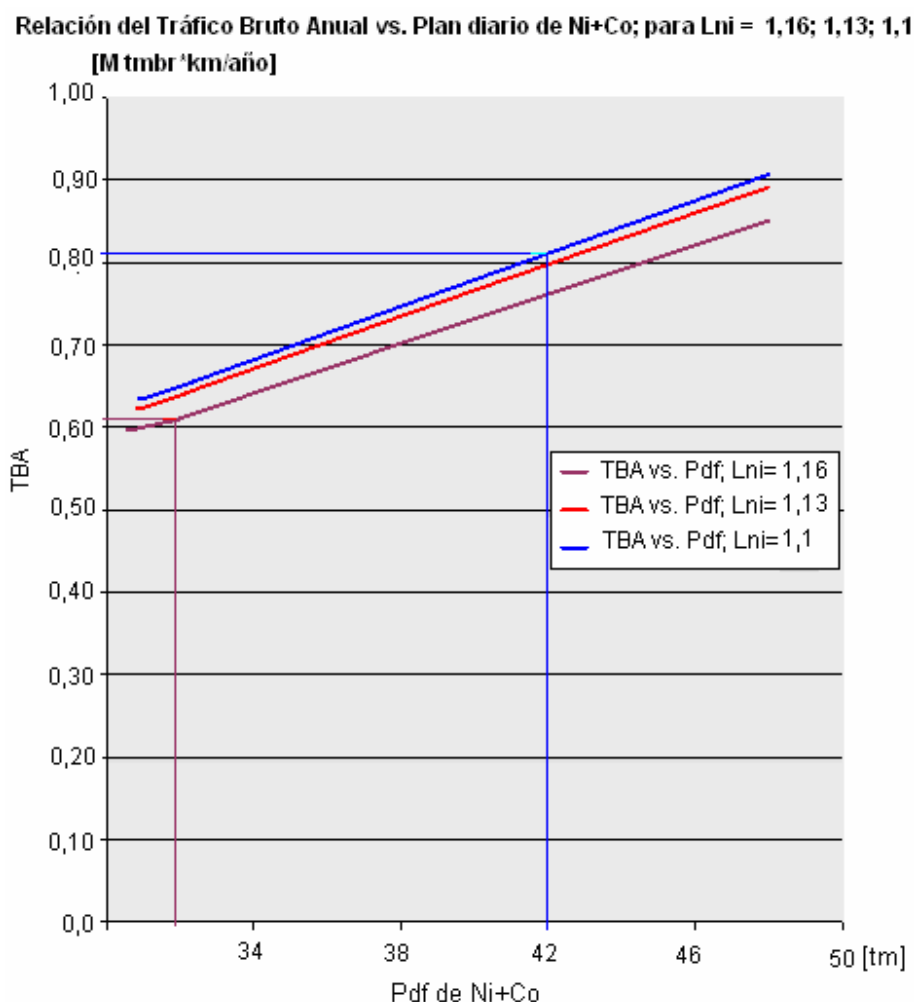
En base al carril obtenido, podemos definir los parámetros del material rodante relacionados a ellos: Carga por eje; Pendiente de cálculo; Peso máximo admisible en el tren; Potencia de la locomotora; Potencia de la transmisión eléctrica; cantidad de ejes tractivos; resistencia al movimiento; coeficiente de adhesión; Tráfico diario de cargas admisible. Esto nos permite analizar las reservas reales de la vía con los rieles seleccionados vs. Plan de producción.

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.**Escenarios para el cálculo.**

- Plan de Ni+Co en cinco variantes: 12 000, 13 500, 15 000 16 500 y 18 000 t ;
- La ley de Ni+Co para tres variantes: 1,16; 1,13 y 1,1.
- La eficiencia asumida en todas las variantes es de 60%.

Lo anterior genera quince variantes posibles de demanda en tráfico de cargas del ferrocarril. Los resultados de los cálculos de las quince variantes generadas por los escenarios escogidos, se muestran en la tabla 12. Basados en los cálculos graficamos el comportamiento Trabajo Diario Bruto, $TDB = f(Pdf; Lni)$, en la figura 10.

Figura 10. Dependencia del trabajo bruto anual (TBA) del plan diario para ley de níquel (Lni) de 1,16; 1,13 y 1,1.



		Valores iniciales variantes 1 -5					Valores Iniciales variantes 6 - 10					Valores Iniciales variantes 11 - 15				
Paf	tm	12000	13500	15000	16500	18000	12000	13500	15000	16500	18000	12000	13500	15000	16500	18000
Dta	Días	365,25	365,25	365,25	365,25	365,25	365,25	365,25	365,25	365,25	365,25	365,25	365,25	365,25	365,25	365,25
Kat	—	0,975	0,975	0,975	0,975	0,975	0,975	0,975	0,975	0,975	0,975	0,975	0,975	0,975	0,975	0,975
npd	par	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Smt	Km	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Ptv	tm	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Pbv	tm	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
Pc	tm	15	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
PL	tm	115	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112
Lni	—	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,0105	0,0105	0,0105	0,0105	0,0105	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
EGP	—	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
KAT	—	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
		Cálculos para Lni = 1,16					Cálculos para Lni = 1,13					Cálculos para Lni = 1,1				
Dea =	Días	356	356	356	356	356	356	356	356	356	356	356	356	356	356	356
Pdf =	kN[tm]	340 (34)	380 (38)	420 (42)	460 (46)	510 (51)	340 (34)	380 (38)	420 (42)	460 (46)	510 (51)	340 (34)	380 (38)	420 (42)	460 (46)	510 (51)
Pdm =	tm	5848	6579	7310	8041	8772	6185	6958	7731	8504	9278	6310	7099	7888	8677	9466
RTM =	—	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,01	0,01	0,54	0,54	0,54	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53
nvf =	Uno	19	22	24	27	29	21	23	26	28	31	21	24	26	29	32
PTv =	tm	715	788	861	934	1007	749	826	903	980	1058	761	840	919	998	1077
PTc =	tm	1690	1884	2079	2274	2469	1779	1986	2192	2398	2604	1813	2023	2233	2444	2654
TBDp=	M t km b	0,43	0,48	0,53	0,58	0,63	0,46	0,51	0,56	0,61	0,66	0,46	0,52	0,57	0,62	0,67
TBDa=	M t km b	0,18	0,19	0,20	0,21	0,23	0,18	0,20	0,21	0,22	0,23	0,19	0,20	0,21	0,22	0,24
TBD =	M t km b	0,61	0,67	0,73	0,79	0,85	0,64	0,70	0,77	0,83	0,89	0,65	0,71	0,78	0,84	0,91
TBA=	M t km b	217,71	239,27	260,67	281,93	303,07	227,67	250,38	272,93	295,33	317,61	231,36	254,51	277,49	300,32	323,01
DTBD=	Mtkmb/km	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03
DTBA=	Mtkmb/km	7,26	7,98	8,69	9,40	10,10	7,59	8,35	9,10	9,84	10,59	7,71	8,48	9,25	10,01	10,77

Tabla 12. Cálculo del tráfico demandado a ferrocarril por las deferentes variantes del plan.

Donde: Paf – Es el plan anual de la fábrica; Dta- Días total del año (prevé los bisiestos); Kat- Coeficiente anual de de trabajo; Ntd- Número de trenes diarios; Smt- Recorrido medio de la transportación; Ptv- Peso de tara del vagón; Pvb- Peso bruto del vagón; Pc- Peso del caboose; PL- Peso de la locomotora; Lni- Ley de níquel, porcentual; EGP- Eficiencia general del proceso; KAT- Coeficiente de aseguramiento de la transportación; Dea- Días efectivos del año; Pdf- Producción diaria de la fábrica; Pdm-Procesamiento diario de mineral; RTM- Rendimiento de la transportación de mineral; nvf- número de vagones a fábrica; Ptv- Peso del tren vacío; Ptc- Peso del tren cargado; TBDp- Tráfico Bruto Diario principal; TBDa- Tráfico Bruto Diario secundario; TBD (TBA)- Tráfico Bruto Diario (Anual); DTBD - Densidad de Tráfico Bruto Diario; DTBA - Densidad de Tráfico Bruto Anual.

2.2 Evaluación de los parámetros y variables de la vía férrea.

Partiendo de la tabla 12 establecemos los valores de las variables de entrada que nos permitirán establecer las salidas, o sea el comportamiento del ferrocarril para los diferentes escenarios productivos. El valor del trabajo bruto anual (TBA), permite establecer la potencia de los rieles, dígame su peso métrico. Hallado este hallamos el trabajo bruto diario (TBD) y sumando los resultados de la elaboración de los datos de desgaste de los rieles para diferentes puntos de la vía férrea, determinaremos la expectativa de su vida útil.

El valor del trabajo bruto diario (TBD) calculado nos sirve de base para los cálculos de tracción del material rodante, ya que de él y la cantidad de pares de trenes diarios se deriva el peso del tren y este junto a la pendiente de cálculo y los tipos de rieles definen la potencia necesaria de la locomotora, que calcularemos más adelante, en la parte referente a material rodante.

Comprobación del peso métrico de los carriles.

Calcular el peso métrico de los carriles permite comprobar su correcta selección, para las diferentes variantes del tráfico demandado por plan, para que los mismos garanticen la vida útil proyectada. Para esto, como ya hemos dicho emplearemos el Criterio planteado por el Prof. Dr.Sc. G.M. Shajuniants, que es el más usado en todo el mundo, y se expresa:

$$P_{mc} = a \cdot (1 + T^{0.25}) \cdot (1 + 0.012 \cdot V)^{2/3} \cdot q_e^{2/3} \text{ en [kg/m]} \quad (14)$$

donde P_{mc} – Es el peso métrico del carril, en [kg/m];

V – velocidad promedio anual en el tramo, en [km/h];

a – Es el coeficiente del tipo de equipo; $a = 1,2$ para los vagones y $a = 1,13$ para las locomotoras.

q_e – Es la carga por eje en [tm/eje], del equipo más desfavorecido en el tren, o sea del equipo que más carga por eje y más mal distribuida las transmite a la vía férrea.

T – Es la densidad de tráfico anual de carga en 10^6 t*km brutas/km-año.

Partiendo de los escenarios del plan de producción de la tabla 12, realizaremos los cálculos del peso métrico de los carriles con el criterio Shajuniants para cuatro variantes de las variables carga por eje, tipo de equipo, velocidad y densidad de tráfico.

1. Asumiendo como equipo más desfavorecido un vagón sobrecargado y mal cargado, con carga por eje $q_e = 21$ tm/eje. Evaluaremos el peso métrico del carril para las velocidades de 2,78; 5,56;....13, 9 m/s (10, 20... 50 km/h) y densidad de tráfico anual de 20; 40; 60;...200 M N*m-b/m-año, o sea (2; 4; 6;.....20 * 10^6 tm*km-b/km-año).

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

2. Una locomotora con carga por eje de $q_e = 21$ tm/eje. Evaluaremos el peso métrico del carril para las velocidades de 2,78; 5,56;...13, 9 m/s (10, 20... 50 km/h) y densidad de tráfico anual de 20; 40; 60;...200 M N*mb/m-año, o sea (2; 4; 6;.....20 * 10^6 tm*km-b/km-año).
3. Asumiendo como equipo más desfavorecido el vagón, con una carga promedio por eje $q_e = 25$ tm/eje. Evaluaremos el peso métrico del carril para las velocidades de 2,78; 5,56;...13, 9 m/s (10, 20... 50 km/h) y densidad de tráfico anual de 20; 40; 60;...200 M N*m-b/m-año, o sea (2; 4; 6;.....20 * 10^6 tm*km-b/km-año).
4. Una locomotora con carga por eje de $q_e = 25$ tm/eje. Evaluaremos el peso métrico del carril para las velocidades de 2,78; 5,56;...13, 9 m/s (10, 20... 50 km/h) y densidad de tráfico anual de 20; 40; 60;...100 M N*m-b/m-año, y densidad de tráfico anual 20; 40; 60;...200 M N*m-b/m-año, o sea (2; 4; 6;.....20 * 10^6 tm*km-b/km-año).

Por el volumen y lo engorroso de los cálculos empleamos el programa computacional MATLAB para realizarlos y graficarlos. Los resultados se ven en las figuras 11 a la 13.

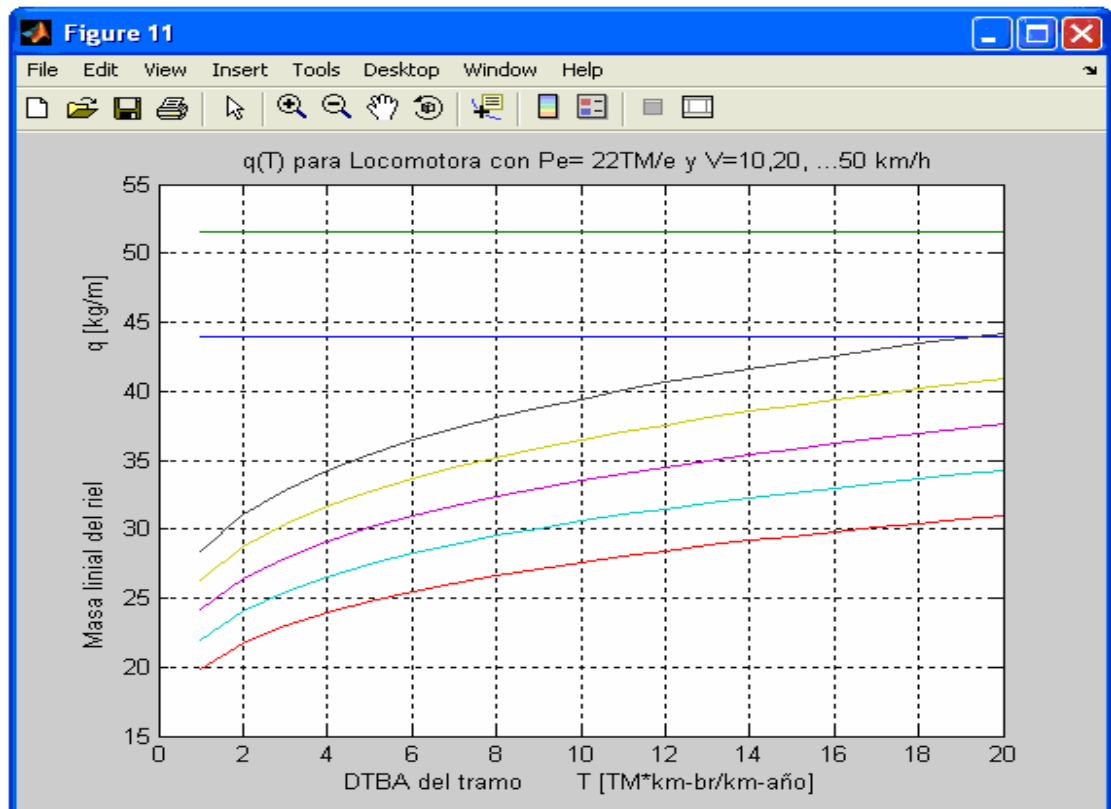


Figura 11. Dependencia de la masa lineal del riel de la densidad de tráfico bruto anual (Pmc—DTBA), $V= 10; 20; 30; 40$ y 50 km/h, carga por eje de 22 t/eje en la locomotora.

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

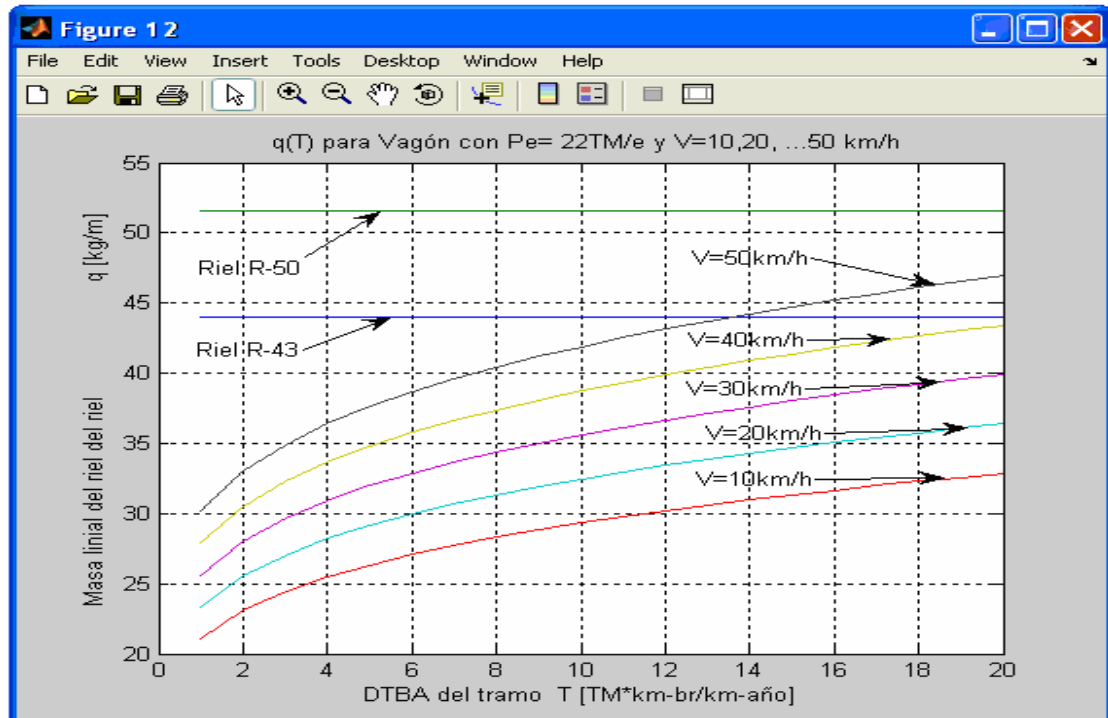


Figura 12. Dependencia de la masa lineal del riel de la DTBA, para velocidades de 2,78; 5,56; 8,33; 11,11 y 13,89 m/s y carga de 22 t / eje en el vagón.

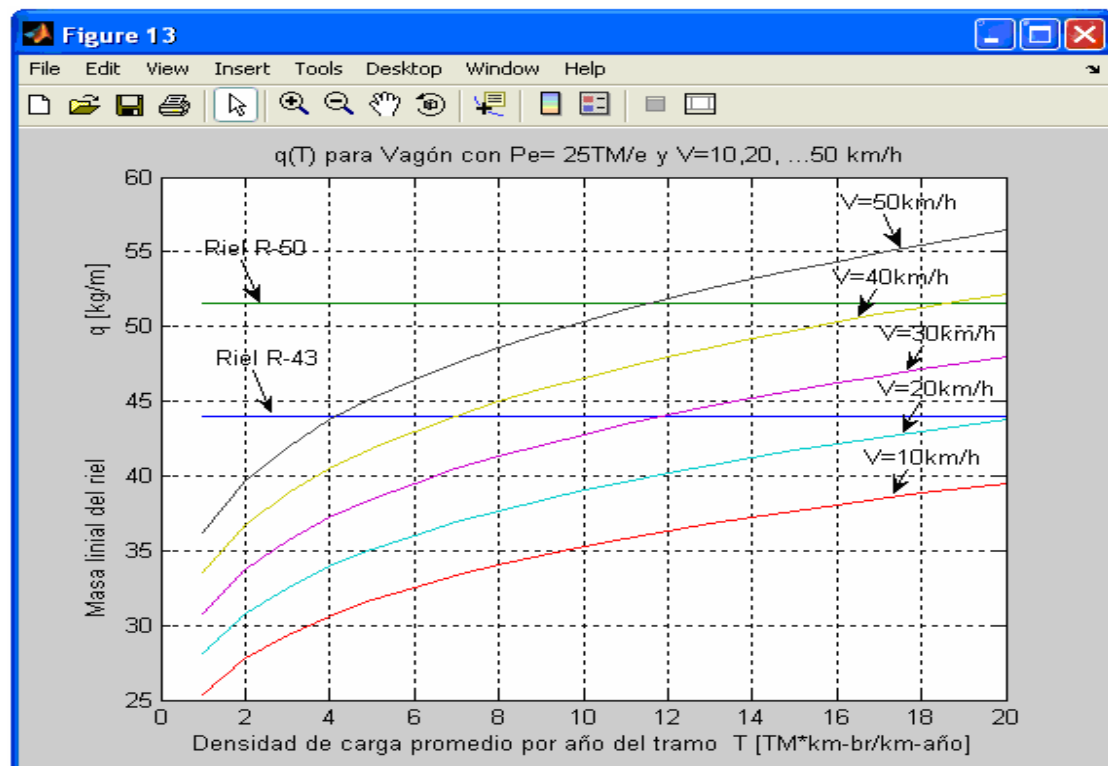


Fig.13. Dependencia de la masa lineal de los rieles vs. DTBA, para 25 t / eje en el vagón y velocidades de 2,78; 5,56; 8,33; 11,11 y 13,89 m/s.

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.**Comprobación de la vida útil del carril.**

Según AMELÍN, S.V., 2004[1] la vida útil del riel T_{vu} , puede ser calculada por la fórmula:

$$T_{vun} = T_{oBN}/TBA; \text{ en [Años]} \quad (15)$$

$$T_{vuc} = S_0/(\beta_m * TBA); \text{ en [Años]} \quad (16)$$

donde, T_{vun} – Es el tiempo de vida útil del carril normado en [años], para vías permanentes de categoría I será siempre igual ó superior a 15, según lo establece la NRMT 157:85.

T_{vuc} – Es el tiempo de vida útil real del carril, cálculo en [años], debe ser superior a 10, (según op. sit.).

T_{oBN} – Es el Tonelaje Bruto Normativo de desecho por tipo de riel utilizado, según establecen los estándares de deferentes países (ver valores en la Tabla 5), en [Mt]. En Cuba (según op. cit.) es 300 Mtb.

TBA – Es el Tráfico Bruto Anual, en [Mtb/año].

Los desgastes equivalentes en función del radio de la curva y los tipos de rieles nos arrojan las siguientes funciones:

$$\beta_{e\ 43} = 0,0983 * x^2 - 2,0161 * x + 11,16 \quad (17)$$

$$\beta_{e\ 50} = 0,0794 * x^2 - 1,6113 * x + 8,7506 \quad (18)$$

$$\beta_{e\ 65} = 0,0663 * x^2 - 1,3552 * x + 7,4554 \quad (18a)$$

Los valores de dependencia del desgaste específico & tipo de los rieles vs. Radio de la curva, se recogen en la tabla 13 y están graficados en la figura 14.

Tabla 13. Dependencia de β_m del tipo de riel & $R[m]$.

$R[m]$	Valores de $\beta_m [mm^2]$		
	R43	R50	R65
100	9,62	7,61	6,40
200	7,54	5,86	5,10
300	5,89	4,42	3,87
400	4,35	3,26	2,86
500	3,17	2,45	2,08
600	2,47	1,81	1,62
700	1,79	1,34	1,17
800	1,42	1,01	0,93
900	1,29	0,97	0,85
1000	1,22	0,91	0,8
1100	1,14	0,86	0,75
1200	1,11	0,83	0,73
Rectas	1,09	0,81	0,71

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

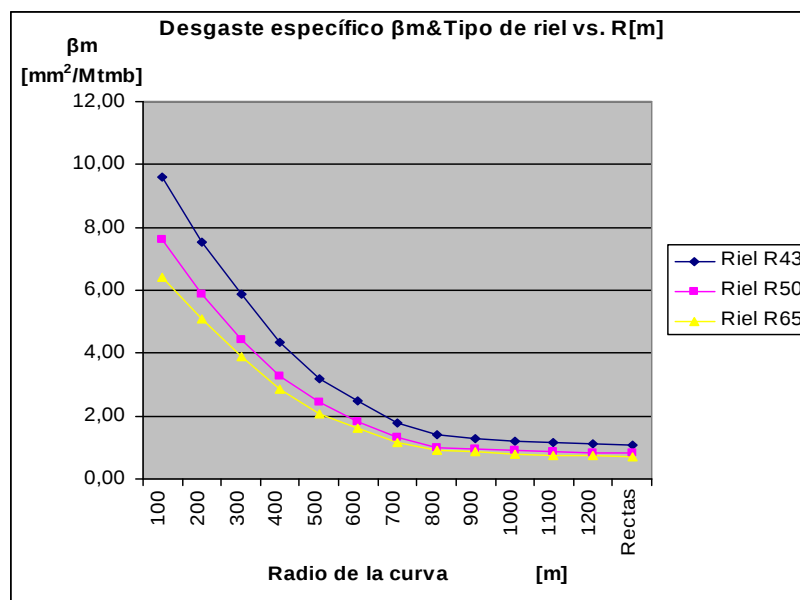


Figura 14. Dependencia del desgaste específico del tipo de riel vs. Radio de la curva.

Con los datos del TBA real de la vía del Ramal Pinares para diferentes variantes de Plan de producción, obtenidos de la tabla 11, el valor normativo de ToBN, obtenido de la Tabla 5, los valores del desgaste equivalente S y el desgaste específico β calculamos el tiempo de vida útil normativo T_{vun} y el tiempo de vida útil real calculado T_{vuc} .

La evaluación del tiempo de vida útil normativo y real promedio de los rieles en los puntos característicos del ramal Pinares, variante R43 y R50 lo podemos ver en la tabla 14.

Tabla 14. Desgaste equivalente y específico para 10 M TBA (Mega toneladas bruto anual) para rieles R43 y R50.

Nº	Desde	Hasta	I	R(m)	%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	β_{m43}	β_{m50}
1	3515	3706	I	280	-2,5	0	312	384	390	410	412	432	473	523	670							9,33	7,0
2	3706	3892	0	0	-2,5	0	105	213	330	372	380	384	387	390	401	418	443	470	500	550	622	5,18	3,89
3	3892	4237	D	290	(2,5;-4,6)	0	300	380	400	403	408	425	460	509	648							8,64	6,3
4	4,237	4417	0	0	(-9,4; -2,4)	0	105	213	330	372	380	384	387	390	401	418	443	476	512	555	640	5,33	4,0
5	4417	4640	I	285	(-2,4)	0	305	385	406	412	416	425	480	512	645							8,60	6,45
6	4640	4810	0	0	0(Puente)	0	110	220	335	379	383	388	391	400	414	423	451	481	532	639		5,68	4,26
7	5,045	5223	I	831	(5,7; 1,1)	0	180	275	350	380	382	390	400	405	431	481	541	630				6,46	4,84
8	5333	5617	I	386	(1,1; -5,5)	0	275	367	388	403	406	415	446	491	560	640						7,76	5,82
9	9145	9310	0	0	0	0	76	145	230	304	350	365	376	380	384	387	394	401	407	430	466	3,88	2,91
10	14953	15138	D	244	(1,7; 0; 2,3)	0	320	394	402	406	412	430	470	520	655							8,73	6,55
11	15429	15551	D	236	(2,3; -6,5)	0	325	396	405	407	414	433	472	521	667							8,89	6,67
12	18736	19199	D	290	(2,0; -2,0)	0	300	380	400	403	408	425	460	509	634							0,84	6,34
13	19419	19785	D	900	(-4,8; 6,5; 0)	0	220	335	379	383	388	391	400	414	423	451	481	532	618			5,89	4,41
14	21140	21520	I	290	(0; 1,0)	0	300	380	400	406	412	440	482	530	631							8,41	6,31
15	23530	23757	D	291	(8,0; 1,0)	0	300	380	400	403	408	425	455	512	641							8,55	6,41
16	25065	25342	I	338	(7,6; 0; -3,2)	0	275	367	388	402	406	415	446	486	540	630						7,64	5,83
17	26991	27292	I	290	(2,4; -2,7; -2,3)	0	295	380	397	404	409	425	460	509	637							7,72	6,1
18	27515	27679	I	274	(2,9; 2,3)	0	308	382	396	407	410	430	469	513	660							8,80	7,3
19	29340	29663	0	0	(4,3; 2,2; 0)	0	105	213	330	372	380	384	387	390	401	418	443	466	491	540	605	5,05	3,78

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

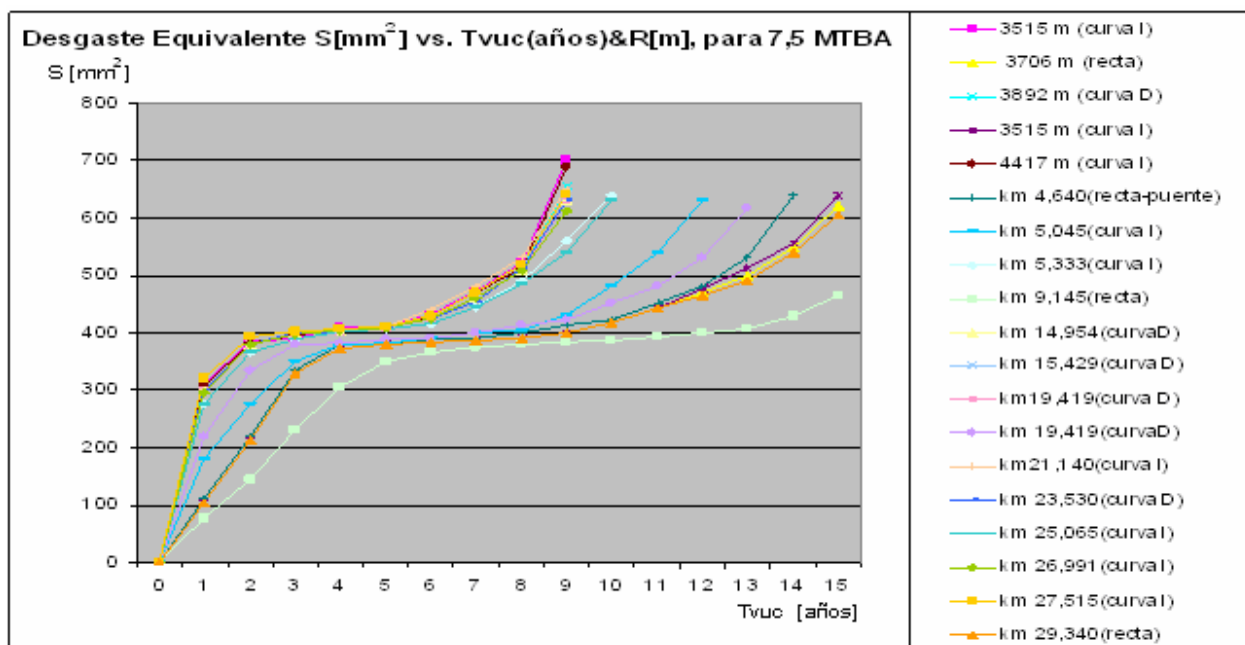


Figura 15. Desgaste equivalente vs. R[m] para 750 GNBA. (Giga Newton bruto anual).

Comprobación del coeficiente de utilidad de los rieles R43, R50 y R65.

Sustituyendo en la fórmula (1) los valores de W y P_z, obtenidos de la tabla 4

$$U = 217 / 44,65 \rightarrow U = 4,877 \text{ cm}^3\text{m/kg}; \text{ para R43.} \quad (19)$$

$$U = 286 / 51,63 \rightarrow U = 5,54 \text{ cm}^3\text{m/kg}; \text{ para R50.} \quad (20)$$

$$U = 436 / 64,40 \rightarrow U = 6,75 \text{ cm}^3\text{m/kg}; \text{ para R65.} \quad (21)$$

Como puede verse con el aumento del peso métrico del carril aumenta el coeficiente de utilidad del mismo.

2.3. Análisis de los resultados de la evaluación de los rieles.

Las figuras 11 a la 13 muestran la dependencia del peso métrico de los rieles, partiendo de las premisas enunciadas en el p.2.3.1, incisos 1 al 4, corridos en MATLAB. La línea horizontal azul demarca la masa métrica del carril R-43; la verde la masa métrica del riel R50 (P50). Las curvas representan: La color rojo: Dependencia del peso métrico del riel de la densidad de carga, para la velocidad de 2.77m/s, con carga por eje de 250 kN/e; La color cian, para velocidad de 5.54 m/s; La malva, para velocidad de 8,33m/s; La amarilla, para velocidad de 11.08 m/s; La negra, para velocidad de 13.89 m/s (50km/h). De los resultados, podemos interpretar:

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

1. Los vagones inciden más en la vía que las locomotoras;
2. Los rieles R43 no soportan velocidades superiores a 8,33 m/s, para los planes superiores a 32 t/día de Ni+Co, como los actuales.
3. La vida útil de los rieles R43 en curvas, apenas rebasa los siete años. O sea no cumplen lo que exige la norma NRMT 157:85 hasta el desecho.
4. Por las dos razones anteriores los rieles R43 deben ser sacados de la vía principal.
5. Para una vía principal con rieles R-50, respecto a las condiciones actuales, puede aumentarse la velocidad media crucero en 3,37 veces, o sea hasta 16,67 m/s; la carga por eje en 1,18 veces y el tráfico en 1,78 veces, o sea hasta 1.85 GNBA.
6. Los rieles de 12,5 m utilizados en la vía principal de Nicaro aumentan al doble la cantidad de empalmes por kilómetros, respecto a los rieles estandarizados de 25 m, aumentando también la resistencia al movimiento del material rodante.
7. Los valores de desgaste equivalente y específico guardan relación inversa con el radio de la curva y el peso métrico del carril (ver funciones en la página).

2.4. La locomotora diesel eléctrica.

La locomotora diesel-eléctrica es comparable con cualquier planta ó instalación tecnológica, con dualidad de funciones: Es la red que suministra la energía eléctrica (posee el grupo diesel-generator) y es también el consumidor (posee equipos electromecánicos consumidores; motores eléctricos y reductores), o en ella ocurren los procesos de generación, transmisión, transformación y su consumo. (Kuzmich, V.D., et.al., 2002[52]).

La locomotora diesel-eléctrica puede definirse como la instalación, donde la energía mecánica de giro del volante del motor diesel pone en movimiento un generador de corriente continua, o un alternador, el cual la transforma en energía eléctrica, que seguidamente es transformada en energía mecánica nuevamente en los motores de tracción y adecuada a parámetros deseados, con la transmisión eléctrica y los reductores, para la realización de trabajos de arrastre de trenes. (PANOV, N.I., et.al., 2004[90]).

Ventajas de la locomotora diesel eléctrica.

Aunque las locomotoras eléctricas puras aventajan en eficiencia a las diesel-eléctricas, el empleo de las últimas tiene varias ventajas, (Fufriansk, 2002[31]; Schanoes, 2003[110]):

1. Poseen buena autonomía, que oscila entre 1000 y 2000 km.

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

2. Es mucho menos costosa su explotación, cuando trabajan en líneas con densidad de circulación inferior a los 32 pares de trenes diarios (DMITRIEIEV, V.A., 2000[19]).
3. Su explotación sólo se supedita a la existencia de una vía férrea que soporte su carga por eje y sus características de inscripción, etc. (op. cit.)

La transmisión de la locomotora.

Las locomotoras diesel eléctricas, como todo tipo de locomotoras cuentan con una transmisión; **transmisión**. (Del lat. *transmissio*, -*ōnis*). f. que significa el que transmite o sea la acción y efecto de transmitir[23]. En Mecánica: Conjunto de mecanismos que comunican y/o transforman el movimiento de un cuerpo a otro, alterando generalmente su velocidad, su sentido o su forma. Es el conjunto de sistemas eléctricos, hidráulicos o mecánicos utilizados en los vehículos aviones, automóviles, barcos y trenes para enviar y transformar la energía desde la fuente primaria a los elementos motrices. La transmisión lleva implícito todo el proceso de generación y transformación de la energía desde la fuente primaria, en las locomotoras diesel- eléctricas, el motor diesel, hasta el ó los consumidores, los pares de ruedas. (op. cit.).

El motor diesel no posee par propio inicial de arranque como los motores eléctricos, además con un suministro constante de combustible en los cilindros $q_c = \text{Cte}$, él entrega una potencia efectiva directamente proporcional a las revoluciones del cigüeñal, ver figura 16, o sea,

$$N_e = (V_c * Z_c * n_D * p_e) / 30 \text{ } \acute{\imath}; \text{ en [kW]} \quad (22)$$

(Fuente: SKUIEV, V.B., 1982[118]; SIMSOM, A.E., 1990[116])

Donde: V_c – volumen de trabajo del cilindro [m^3];

Z_c – Cantidad de cilindros;

n_D – Revoluciones del diesel [rpm.];

p_e – Presión media efectiva en el cilindro [MPa];

30 – Factor de conversión de unidades;

$\acute{\imath}$ – Tactos del motor: $\acute{\imath} = 2$, para motores de 2 tiempos, $\acute{\imath} = 4$, para los de 4 tiempos;

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

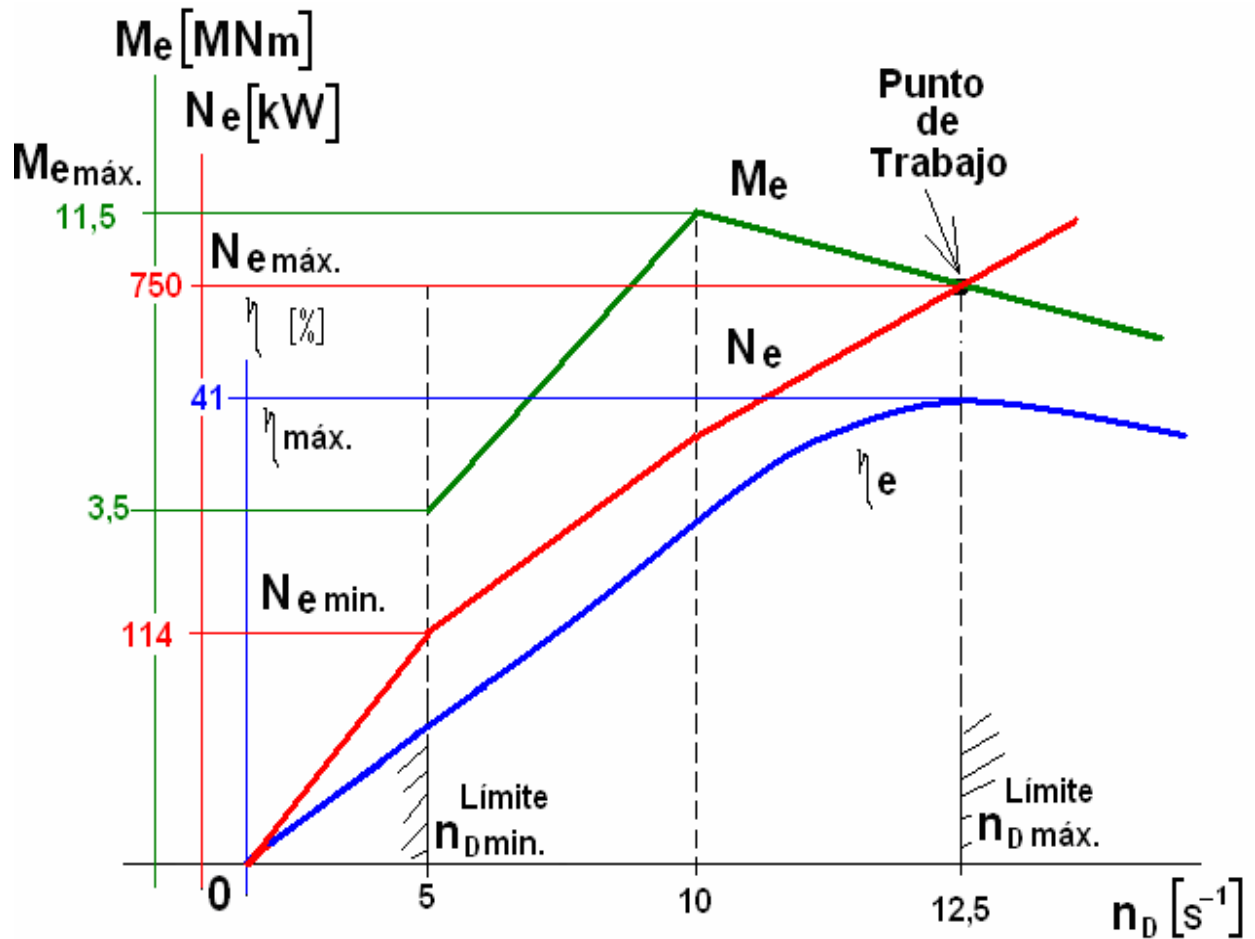


Fig.16. Características de velocidad del diesel, $[\eta; Ne; Me] = F(n_D)$ para $q_c = Cte$.

(Fuente SIMSOM, A.E., 1990[116])

Si mantenemos $n_D = n_{Dnom.} = n_{Dmáx.} = Cte$; tendremos $Ne = Cte$.

Pero como: $Ne = N_G + N_A$; (23)

Donde: N_G – Potencia del Generador;

N_A – Potencia utilizada en por consumidores auxiliares;

y como $N_G \gg N_A$, esta última es despreciable;

Entonces: $Ne = N_G = Cte$; o sea, $N_G = V \cdot I = Cte$. (24)

Por otra parte: $N_T = Ne \cdot \beta_a \cdot \eta_{tr}$; (25)

Donde: N_T – Potencia tangencial aplicada en la pisada de las ruedas;

β_a – Factor que prevé la potencia consumida en cargas auxiliares;

η_{tr} – Es la eficiencia de la transmisión;

Por tanto: $N_T = Cte$.

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Pero, como: $N_T = F_T \cdot S / t = F_T \cdot V;$ (26)

Entonces: $N_T = F_T \cdot V = \text{Cte.};$ (27)

De donde obtenemos la característica de las locomotoras diesel-eléctricas de la figura 17.

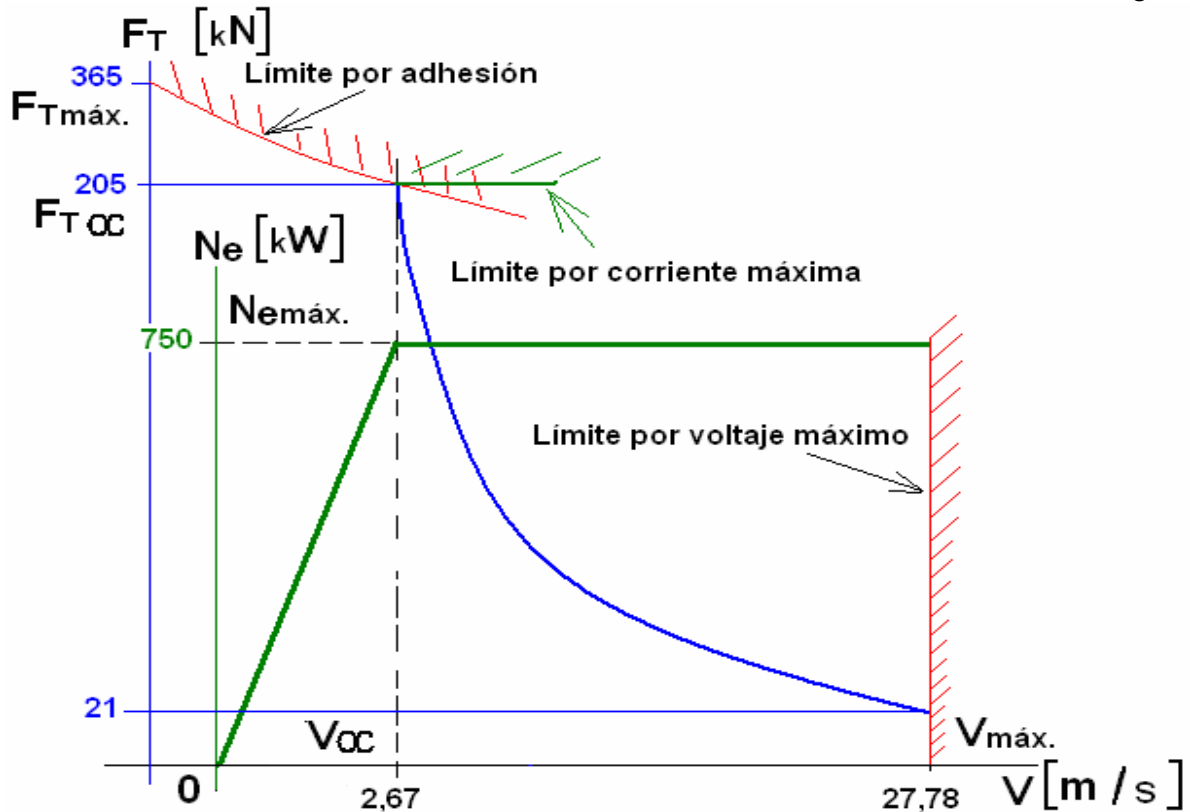


Fig. №17. Característica exterior de la locomotora, del diesel y sus limitantes.

(Fuente: SKUIEV, V.B., 1982[118])

Para mantener cargado el diesel en el punto de máxima eficiencia del grupo diesel-generator, en todo el rango de velocidades e independientemente de las condiciones externas, entre este grupo y los pares de ruedas debe existir un sistema capaz de mantener constante la potencia en el régimen de revoluciones nominales, este sistema es denominado transmisión. O sea, la transmisión hace variar la fuerza de tracción de la locomotora, inversamente proporcional a su velocidad, para lo cual regula la tensión del generador principal, inversamente proporcional a la corriente de carga. En el desarrollo de esta parte del trabajo se realizan los cálculos de la transmisión de la locomotora 91009.

Funciones de la transmisión.

1. Desacoplar la carga de la fuente primaria de energía en el momento del arranque de esta última. Ya que el motor diesel no posee torque inicial de arranque y su capacidad de sobrecarga es muy baja;

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

2. Adecuar el trabajo conjunto del diesel y el generador en dependencia de la demanda las condiciones externas de manejo del tren;
3. Permitir reversibilidad del movimiento de la locomotora, pues los motores diésel generalmente no lo son.
4. Utilización de toda la potencia del motor diesel en mayor rango de velocidad posible.
5. Adecuar los gálambos de las máquinas eléctricas y el diesel a los de la locomotora, en rangos económicamente asequibles.

En las locomotoras diesel eléctricas la transmisión cumple de forma casi ideal su objetivo fundamental: Hacer que la potencia de la fuente primaria (motor diesel) permanezca constante independientemente de los cambios en la carga, o sea que su característica de tracción sea una hipérbola, lo cual viene dado de la relación:

$$N_e = Cte = N_{Nom}, \quad (28)$$

para $n_d = n_{Nom}$;

$$\text{pero, } N_T = N_e * \beta_a * \eta_{trans}. \quad (29)$$

donde $\beta_a = 1 - N_a / N_e$, es el coeficiente de cargas auxiliares;

$\eta_{trans.}$ es la eficiencia de la transmisión;

O sea, para

$N_e = Cte$, entonces $N_T = Cte$.

$$\text{Pero, } N_T = A_T / t = F_T * S / t = Cte. \quad (30)$$

$$\text{Por lo que tendremos: } N_T = F_T * V = Cte. \quad (31)$$

Como el producto de dos variables es una constante, estamos en presencia de una hipérbola, que es la característica de tracción ideal de las locomotoras.

En la medida en que la característica tractiva de la locomotora diesel eléctrica se acerque más en su forma a una hipérbola, se definirá el grado de perfección de su transmisión.

2.5 Confección del modelo del tren y la locomotora.

Los parámetros más determinantes en la eficiencia de la locomotora, una vez seccionados su peso y el del tren, basados en las necesidades de transportación y condiciones que la vía férrea impone, son la fuerza de tracción y la potencia de la locomotora. Para determinar la misma modelamos el movimiento del tren.

Esta tarea formo parte del trabajo realizado en la modernización de la locomotora 91009, que nos permitió calcular sus características. El análisis de su comportamiento se realizó

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

para el régimen tractivo más desfavorable, en el tramo de cálculo, expuesto en la figura 6 de la Pág. 17, para definir el peso del tren, la potencia y sus características más relevantes, para el tren cargado en 11‰ con gradiente positivo. Al evaluar el régimen más desfavorable podemos simplificar los trabajos, excluyendo el frenado, marcha libre y compuesta.

El tren moderno de nuestros días es un sistema mecánico complejo, cuyo movimiento es originado por procesos termodinámicos, químicos y eléctricos, con las particularidades de un complicadísimo sistema de gobierno y características de las fuerzas controlables y no controlables que sobre él actúan. Vea figuras 18, 19 y 21, los modelos del tren: físico general, simplificado y de cuerpo libre respectivamente.



Figura 18. El modelo físico del tren.

En los trenes con menos de ciento cincuenta ejes y largo inferior a 500 m, para los análisis de cálculos de tracción puede asumirse el modelo simplificado del tren (Astaj, 2000 [3]; Dieiev, 2002[16 y 18]). En nuestro caso, los trenes nunca pasan de ciento cuarenta ejes y su longitud máxima los cuatrocientos cincuenta metros, estos trenes se forman con vagones y carga tipo, por lo que este modelo es suficientemente factible de aplicación.

Simplifiquemos el modelo un poco, asumiendo toda la masa de los vagones de la formación concentrada en un solo vagón, por lo que representaremos la formación por un solo vagón con una masa equivalente a la suma de la masa de toda la formación (ver figura 19). Es válido en el ferrocarril de Nicaro, pues se transporta con vagones y cargas tipo (similares).



Figura 19. Modelo físico simplificado del tren.

Para la modelación del movimiento del tren durante la tracción es necesario tener en cuenta que sobre él actúan no solamente los enlaces internos, considerados los enganches, sino también los externos, los rieles. Si se quisiera describir el movimiento del tren aplicando las leyes de la mecánica clásica, se necesitarían más de trescientas ED., por lo cual se hace necesario recurrir a la modelación, para ello asumiremos las siguientes consideraciones y postulados:

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Consideraciones y simplificaciones.

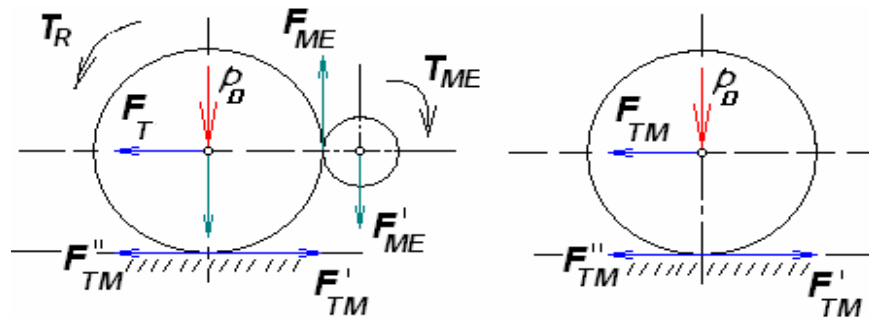
1. El tren posee un solo nivel de libertad y Sobre él actúa solamente un enlace externo, los rieles.
2. Todos los puntos del tren realizan el mismo recorrido con la misma velocidad, con movimiento de traslación controlado a consecuencia de tres fuerzas: Fuerza de tracción, fuerza de frenado y fuerza de resistencia, o sea en presencia de un sistema invariable, sus dimensiones y geometría no varían al moverse.

Postulados.

1. Si el tren posee un nivel de libertad, para describir su estado es necesaria solamente una ED.
2. Si el tren se mueve con un solo nivel de libertad, solamente podrá hacerlo en una dirección, de aquí se desprende que solamente se hace necesario investigar solamente aquellas fuerzas que coinciden con la dirección de su movimiento, ya sea a favor u opuestas a él.
3. El movimiento del tren puede ser considerado como el movimiento de un punto material, que concentra toda su masa y situada en el centro de su longitud.
4. El trabajo de sus fuerzas internas puede ser despreciado.
5. Es válida la aplicación del principio de superposición de fuerzas.

De lo anterior podemos considerar el movimiento del tren, como consecuencia de la acción de la fuerza resultante de la suma algebraica de todas las fuerzas externas actuantes en la dirección del movimiento, aplicada en su centro de masa.

Como en nuestro modelo el tren posee solamente un grado de libertad, solamente es necesaria una ED. para la solución de la cual utilizaremos el teorema sobre la variación de energía cinética del sistema, que dice: **“La variación de la energía cinética del sistema, durante cierto desplazamiento del mismo, es igual a la suma de los trabajos de sus fuerzas actuantes en el mismo desplazamiento”**. Por lo que en nuestro modelo solo consideraremos las fuerzas externas, o sea, la de tracción, de resistencia y de frenado, en nuestro sistema invariable el trabajo de las fuerzas internas es nulo. La dependencia de la resistencia al movimiento del tren de la pendiente y el radio de la curva en que este se inscribe, en esta primera fase despreciamos estos valores, considerando el movimiento del tren en una vía recta con pendiente nula en régimen de tracción.

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.**Figura 20. Diagrama que ilustra el origen de la fuerza de tracción.**

Donde: p_0 – Es la carga ó peso sobre el eje.

T_{ME} – Es el torque del Motor Eléctrico.

F_{ME} – Es la Fuerza electromotriz realizada por el motor eléctrico.

T_R – Es el torque motriz de las ruedas tractivas de la locomotora.

F_T – Es la fuerza tangencial de tracción del tren, que no es más que la suma de todas las fuerzas tangenciales de los motores eléctricos

F_{TM} , sobre las ruedas motrices, o sea;

$$F_T = \sum F_{TMi}; \text{ en [N]} \quad (32)$$

La fuerza tangencial de tracción F_T , expresada en [N]: Es una fuerza externa controlada, que surge como resultado de la interacción de la rueda y el riel, está aplicada en la pisada de las ruedas tractivas de la locomotora, en sentido del movimiento del tren, figuras 20 y 21. Fuerza total de resistencia W_T , expresada en [N]: Es una fuerza externa no controlable, aplicada en la pisada de cada rueda del material rodante, de su interacción con el riel, en sentido contrario al movimiento del tren, posee dualidad de carácter, por un lado es perjudicial, porque conlleva a desgastes de la rueda y el riel y pérdidas mecánicas, pero por otra parte, sin ella el tren no se movería del lugar, se divide en dos grupos, las principales, originadas por el rozamiento en los rodamientos y la fricción de las ruedas y las adicionales, originadas por las fuerzas resistivas adicionales en las curvas W_R , por puesta en marcha del tren W_{pm} , por el viento en contra W_v , por la pendiente W_p , por la marcha en holgar ó libre W_{ml} . La fuerza de frenado B_T , expresada en [N]: Es una fuerza externa controlable, que se origina de la interacción de las ruedas frenantes del material rodante y el riel, la misma está aplicada en la pisada de las ruedas del material rodante, en sentido contrario al movimiento del tren.

De la manifestación de cada una de estas fuerzas dependerá el estado del tren.

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Si en el tren actúan solamente F_T y W_T (Régimen de tracción), de forma tal que $F_T > W_T$, el tren se mueve con aceleración positiva, si $F_T < W_T$ el tren está desacelerando, si $F_T = W_T$, el tren se mueve con MRU, ó está detenido.

Cuando en el tren actúan solamente B_T y W_T (régimen no tractivo, ó marcha libre), de tal forma que $B_T > (-W_T)$, el tren está desacelerando, en cambio si $B_T < (-W_T) < F_T$, el tren está acelerando, si $B_T = (-W_T)$, el tren se mueve con MU ó está detenido.

En base a lo anteriormente visto, podemos formular gráficamente el modelo (figura 21).

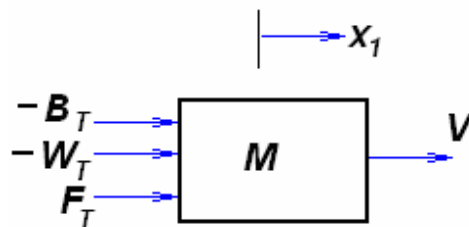


Figura 21 Modelo de cuerpo libre del tren.

$$F_T = F_{T1} + \dots + F_{Tn}; W_K = W_{K1} + \dots + W_{Kn}; B_T = B_{T1} + \dots + B_{Tn}, \text{ en [kN]} \quad (32)$$

Sustituyendo las fuerzas actuantes, por su resultante, según la ecuación (27), tendremos

$$F_R = F_T - W_K - B_T, \text{ en [kN]}; \quad (33)$$

$$\text{En tracción } B_T = 0; \rightarrow F_R = F_T - W_K; F_R = F(X, V); \text{ Ver figura 22.} \quad (34)$$

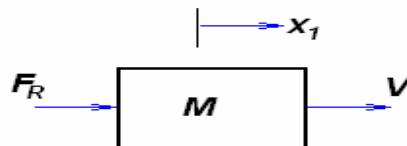


Figura 22. Modelo simplificado de cuerpo libre del tren.

El trabajo de estas fuerzas en el desplazamiento elemental ∂x será:

$$F_R * \partial x = F_T * \partial x - W_T * \partial x; \quad (35)$$

En virtud del teorema enunciado, igualamos (30) a la variación de la energía cinética ∂T ;

$$\partial T = (F_T - W_T) * \partial x; \quad (36)$$

En el movimiento no uniforme del tren actúan además las fuerzas de inercia, engendradas por las masas giratorias. Aplicando el Teorema de Keonig, según Dieiev, 2002[18]:

$$T = M*(V^2)/2 + J * (\omega^2)/2, \text{ en [J]}; \quad (37)$$

Donde; M es la masa de todo el tren, en [kg ó Mg].

J — es el momento polar de inercia de las masas giratorias del tren;

$$J = M_G * \rho^2, \text{ en [kg*m}^2\text{]}; \quad (38)$$

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

$M_G = \sum m_G$, es la suma de todas las masas de las partes giratorias del tren, en [kg ó Mg];

ρ es el radio de inercia, en [m]. Se asume $\rho = R_R$;

R_R es el radio de la rueda por el círculo de rodadura, en [m];.

Como: $\omega = V/R_R$ en [rad/s]; (39)

Tenemos: $T = M \cdot (V^2)/2 + M_G \cdot (R_R^2) \cdot (V^2) / (2 \cdot R_R^2)$;

$$T = (M + M_G) \cdot (V^2)/2 ;$$

Designando: $\gamma = M_G / M$

Entonces: $T = M(1 + \gamma) \cdot (V^2)/2$ (40)

Entonces: $\partial T = M(1 + \gamma) \cdot \partial (V^2)/2$ (41)

Sustituyendo ∂T en (31), tenemos:

$$M(1 + \gamma) \cdot \partial (V^2)/2 = (F_T - W_T) \cdot \partial x$$
 (42)

Pero: $\partial x / \partial t = V$, o sea; $\partial x = V \cdot \partial t$ y $\partial (V^2) = 2 \cdot V \cdot \partial V$;

Sustituyendo en (37): $M(1 + \gamma) \cdot 2 \cdot V \cdot \partial (V)/2 = (F_T - W_T) \cdot V \cdot \partial t$; (43)

y simplificando (38): $M(1 + \gamma) \cdot \partial (V) = (F_T - W_T) \cdot \partial t$; (44)

reagrupando (39): $\partial V / \partial t = (F_T - W_T) / M(1 + \gamma)$; (45)

Expresando en función del espacio x;

$$\ddot{x} = (F_T - W_T) / M(1 + \gamma);$$
 (46)

Según Dieiev, 2002[18], para los trenes con vagones de cuatro ejes $\gamma = 0.0583$ y

designando $\xi = 1/(1+\gamma)$, (47)

entonces $\xi = 0,945$ (48)

sustituyendo ξ en (43) $\ddot{x} = \xi \cdot (F_T - W_T)/M$ (49)

Asumiendo $(f_T - w_T) = (F_T - W_T)/M$, (50)

sustituyendo (45) en (44) $\ddot{x} = (f_T - w_T) / (1 + \gamma)$;

sustituyendo en (42) $\ddot{x} = \xi \cdot (f_T - w_T)$, en [m/s²]; (51)

Expresando lo obtenido en el sistema técnico (muy usado aún en Cuba),

tenemos que: $M = (P + Q) \cdot 1000/g$; (52)

donde, P— es el peso de la locomotora en [kgf]; Q—El de la formación; g= 9,81 m/s²—Es la aceleración de la gravedad, 127000 km/h²; 1000—Coeficiente de conversión de [kg] a [tm];

Sustituyendo en(44) $\ddot{x} = ((F_T - W_T) / (P + Q)) \cdot 127000/((1 + \gamma) \cdot 1000)$ (53)

asumiendo $\xi_1 = 127/(1 + \gamma) = 127/1,058$ y sustituyendo en (48),

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

tenemos:
$$\ddot{x} = \xi * (F_T - W_T) / (P+Q) \quad (54)$$

o sea
$$\ddot{x} = 120 * (F_T - W_T) / (P+Q), \text{ en km/h}^2 \quad (55)$$

El significado de ξ en el SIU: $\zeta = 1 / (1 + \gamma) = 1/1.0583 = 0.945 \text{ m}^* \text{ N/ kg*s}^2$, es la aceleración del tren en m/s^2 , cuando sobre cada kilogramo de su masa actúa una fuerza de 1 N, para el SIU. En el ST, es la aceleración del tren en km/h^2 , cuando sobre cada tonelada de su peso actúa una fuerza de 1 kgf.

La ecuación del movimiento del tren.

Las fórmulas (44) y (46) son las ecuaciones diferenciales total y específica del movimiento del tren.

Estas ecuaciones representan la dependencia entre la fuerza resultante, la masa y la aceleración, producto de la inercia de las masas giratorias del tren, en cada momento del movimiento de este, o sea representa el estado del tren, como sistema mecánico en cada intervalo de tiempo.

Las funciones (44) y (46), pueden reescribirse como sigue;

$$\ddot{x} = 0.945 * F_a / M; \quad (56)$$

$$\ddot{x} = 0.945 * f_a; \quad (57)$$

Donde; F_a y f_a , fuerzas aceleradoras ó aceleratrices total y específica del tren.

La fuerza de tracción no debe superar la fuerza de adhesión al riel, (op. cit), se establece:

$$F_T \leq \Psi * P, \text{ en [kN]}; \quad (58)$$

Ψ — Es el coeficiente de adhesión de la rueda al riel, KURISHEV [51], establece para las TEM2 en Nicaro $\Psi = 0.118 + 4 / (22 + V)$; (59)

En el proceso de puesta en marcha y hasta alcanzar la velocidad mínima continuada, la fuerza de tracción $F_T = 0.118 * P + (4 P / (22 + V))$ (60)

Por otro lado $W_T = W_L + W_Q + W_a = W_L + W_Q + W_{pm} + W_R + W_p$; (61)

donde W_T —Es la resistencia total al movimiento del tren, en [N]; W_L —Es la resistencia principal al movimiento de la locomotora, en [N]; W_Q — Es la resistencia principal al movimiento de la formación, [N]; W_a —Es la resistencia adicional al movimiento del tren, [N];

o lo sea, $W_T = M_L * w_L + M_Q * w_Q + M w_a = M_L * w_L + M_Q * w_Q + M(w_{pm} + w_R + w_p)$; (62)

w_L —Es la resistencia principal específica al movimiento de la locomotora, en N/kg;

w_Q —Resistencia principal específica al movimiento de la formación, en [N/kg]; w_{pm} , w_R y

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

wp son las resistencias específicas adicionales, originadas por la puesta en movimiento del tren, inscripción en una curva y por la pendiente, respectivamente.

Representando el modelo en variables de estado:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{V}_1 ; \quad (63)$$

$$\dot{\mathbf{V}}_1 = (\mathbf{F}_T - \mathbf{W}_T) / 1.06 * \mathbf{M} = \mathbf{F}_T / 1.06\mathbf{M} - \mathbf{M}(1.9 + 0.1 * \mathbf{V} + 0.003 * \mathbf{V}^2) / 1.06\mathbf{M} \quad (64)$$

$$\dot{\mathbf{V}}_1 = 0.94 \mathbf{F}_T / \mathbf{M} - 1.8 - 0.095 \dot{\mathbf{X}} - 0.003 \ddot{\mathbf{X}} \quad (65)$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{V}_1 \quad (66)$$

Aplicando TL.

$$s\mathbf{X}_1(s) = \mathbf{V}_1(s) \quad (67)$$

$$s\mathbf{V}_1(s) = 0.94 \mathbf{F}_T(s) / \mathbf{M} - 1.8 - 0.095 * s\mathbf{X}_1(s) - 0.003 s\mathbf{V}_1(s) \quad (68)$$

$$s\mathbf{V}_1(s) = 0.943 \mathbf{F}_T(s) / \mathbf{M} - 1.805 - 0.0953 * s\mathbf{X}_1(s) \quad (69)$$

El modelo físico y matemático de la locomotora.

El modelo físico simplificado de la transmisión de una locomotora, sobre el cual se realizó el programa en matlab y la simulación del mismo, se muestra en la figura 23.

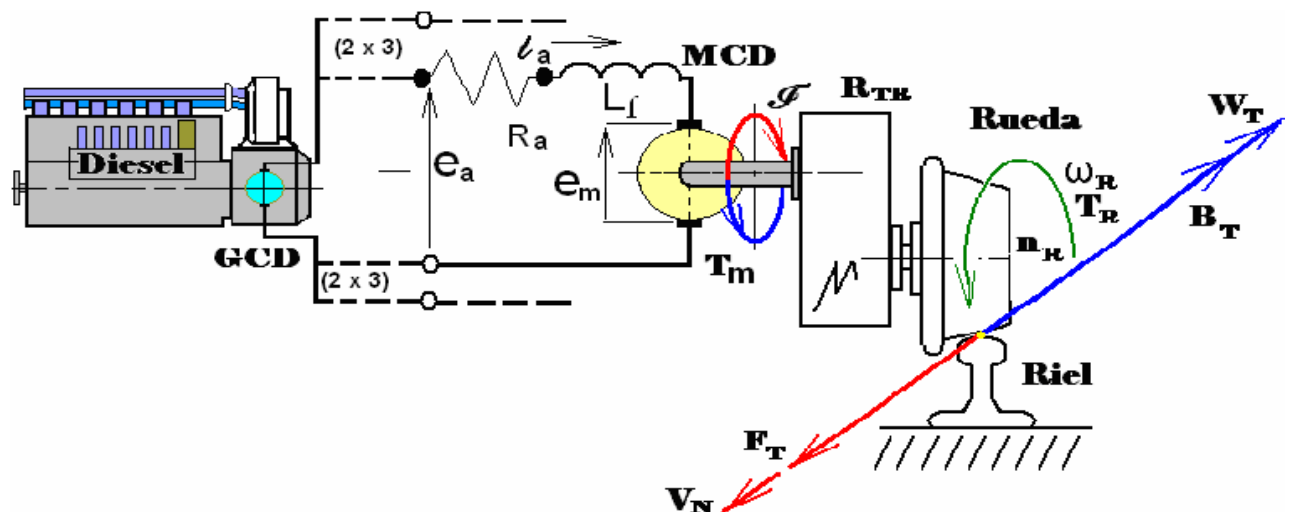


Figura 23. Modelo físico de la locomotora para el cálculo de la transmisión.

Donde: F_T — Es la fuerza de tracción tangencial en [N]; W_T — Resistencia total al movimiento del tren en [N]; B_T — Fuerza total de frenado del tren en [N]; J — Momento dinámico de inercia [$N \cdot m \cdot s^2$]; T_m — El torque del motor eléctrico [$N \cdot m$]; T_R — El torque de la total de resistencia al movimiento del tren [$N \cdot m$]; e_a — El voltaje de la armadura [V]; e_m — La contra-fuerza electromotriz [V]; R_a — La resistencia de la armadura [Ω]; L_f — La inductancia del campo [H]; n_R — Velocidad de rotación de la rueda [s^{-1}]; ω — Velocidad angular [rad/s]; V_N — Velocidad normada en [m/s]; GCD — EL generador de corriente directa; MCD — El motor de corriente directa; R_{TR} — Reductor tractivo. $\mu = n_R / n_M$.

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Los datos, obtenidos de los Pasaportes Técnicos de la locomotora TEM-2TK, motores de tracción EDT-118AT, Generador GP-300AT ([91, 92 y 93]) están recogidos en la Tabla 15.

Tabla 15. Datos del sistema de la transmisión de la locomotora 91009. [91; 92 y 93]

Consumo específico de combustible por el diesel: g_{ec}	kg/kw*h	0,225
Diámetro nominal(de cálculo) de la rueda de la loco : D_R	m	1,05(1.0)
Peso de servicio de la locomotora: P_L	MN	1
Peso promedio de la formación: Q_F	MN	17
Relación de transmisión: μ	–	68/15
Ajuste de Potencia del ADG: N_{DG}	kW	620
Potencia nominal del motor EDT-118AT: P_{NM}	kW	257 kW
Frecuencia nominal de giro del rotor del motor: n_N	s^{-1}	9,67(580 r/min.)
Resistencia de campos principales del motor: R_f	Ω	0,0187
Cantidad de polos principales del motor: p	–	4
Cantidad de (espiras; capas; dimensión de alambre): N_f	–	19; 2; 2x8x25
Resistencia de Armadura: R_a	Ω	0,0130
Cantidad de ramas paralelas en bobinas de armadura: a	–	4
Cantidad de espiras ó conductores en armadura: N_a	–	216
Diámetro del núcleo de la armadura: D_a	m	0,493
Largo del núcleo de la armadura: L_a	m	0,42
Tensión nominal alta (baja): U_a	V	650(435)
Corriente nominal alta(baja): I_a	A	435(650)
Cantidad (conexión P x S) de motores en la loco: Z_M	–	6(2x3)

Cálculo de las principales variables del modelo.

Con los datos de la tabla 14 calculamos:

$$1. K_e = N_a * p / (60 * a) \rightarrow \text{Constante de la contra FEM del motor; } K_e = 216 * 4 / (60 * 4);$$

$$K_e = 3.6 \text{ V / (r / s)} \quad (70)$$

$$2. K_T = N_a * p / (2\pi * a) \rightarrow \text{Constante de Torque del motor. } K_T = 216 * 4 / (2 * 3.14 * 4);$$

$$K_T = 34.38 \text{ V / (A * rad / s)} \quad (71)$$

$$3. K_{\omega n} = n_m / \omega_m \rightarrow \text{Coef. conversor } \omega_m [\text{rad / s}] \text{ a } n_m [\text{r/min}] \text{ del motor; } K_{\omega n} = 60 / (2 * \pi);$$

$$K_{\omega n} = 9.55 \text{ rad.}^{-1} \quad (72)$$

$$4. K_{\omega v} = V_L / \omega_m \rightarrow \text{Coef. de conversión } \omega_m [\text{rad./s}] \text{ del motor en } V_L \text{ de locomotora [m/s];}$$

$$K_{\omega v} = D_R / (2 * \mu) = 1.0 / (2 * 4.53) = K_{\omega v} = 0.11 \text{ m / rad} \quad (73)$$

5. Establecemos el sistema de ecuaciones que describen el modelo físico.

$$e_a - R_a * \dot{I}_a + L * d\dot{I}_a / dt - e_M = 0 ; \quad (74)$$

$$T_M - T_R = J d\omega / dt; \quad (75)$$

$$e_M = k_e * \omega_M \quad (76)$$

$$T_M = k_T * \dot{I}_a. \quad (77)$$

6. Calculamos el torque resistivo sobre el motor (Despreciando pérdidas mecánicas).

$$T_R = (P_L + Q_F) * D_R^2 / (4 * Z_m * g * 12.24) \omega = T_R = 135 \omega \quad (78)$$

7. Masas giratorias ó polares, del tren:

Los trenes que ruedan en Nicaro poseen formaciones de menos de 150 ejes.

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

El radio polar oscila de 0.82 hasta 0.84 m (asumimos 0.83m promedio), las locomotoras TEM-2TK poseen seis ejes, con radio polar entre 0.90 y 1.05 m (asumimos 1.0 m, promedio), los radios polares fueron asumidos del valor más característico del desgaste de las ruedas en Nicaro. Según Dieiev 2002[78] el factor de masa polar será: $\gamma = 0.0583$; tanto la masa polar ó giratoria de los trenes de Nicaro será:

$$m_{gT} = m_{gL} + m_{gF} = \gamma * m_T = \gamma * (m_L + m_F) \Rightarrow m_{gT} = 10\,494 \text{ kg.} \quad (79)$$

Pero, m_{gF} —Es la masa inercial giratoria ó polar de la formación.

$$m_{gF} = \gamma * m_T \Rightarrow m_{gF} = 9911 \text{ kg.} \quad (80)$$

$$\text{La masa inercial de la loco } m_{gL} = \gamma * m_L \Rightarrow m_{gL} = 583 \text{ kg.} \quad (81)$$

8. Momento de Inercia de las masas giratorias del tren, referido a cada motor de la locomotora.

$$J_M = J_T / (2 * Z_m * \mu); \quad (82)$$

$$\text{El momento de inercia del tren: } J_T = m_{gL} * \rho_L^2 + m_{gF} * \rho_F^2; \quad (83)$$

El radio polar de inercia $\rho = D_R / 2$, es la mitad del radio de las ruedas, de la locomotora y de la formación, respectivamente.

$$J_M = 34. \text{ N m / s}^2 \quad (84)$$

9. Simplificando el sistema de ecuaciones (74 a la 77):

$$e_a - R_a * \dot{I}_a - e_M = L * d\dot{I}_a / dt; \quad (85)$$

$$d\dot{I}_a / dt = 1/L * e_a - R_a / L * \dot{I}_a - 1/L * e_M; \text{ Sust. en (76)}$$

$$d\dot{I}_a / dt = 1/L * e_a - R_a / L * \dot{I}_a - 1/L * (k_e * \omega_M); \quad (86)$$

$$J d\omega / dt = T_M - T_R; \text{ Sus. en (77) y (78)}$$

$$J d\omega / dt = (k_T * \dot{I}_a) - 135 \omega$$

$$d\omega / dt = (k_T / J * \dot{I}_a) - 135 / J * \omega; \quad (87)$$

Nos queda el sistema:

$$d\dot{I}_a / dt = - R_a / L * \dot{I}_a - 1/L * (k_e * \omega_M) + 1/L * e_a; \quad (88)$$

$$d\omega / dt = (k_T / J * \dot{I}_a) - 135 / J * \omega; \quad (89)$$

Aplicando la TL. tendremos:

$$S I_a(S) = (- R_a / L) I_a(S) - (k_e / L) \omega_M(S) + (1/L) E_a(S); \quad (90)$$

$$S \omega(S) = (k_T / J) I_a(S) - (135 / J) \omega(S); \quad (91)$$

En la tabla 16 se ofrece la distribución de las variables para la simulación.

Tabla 16. Distribución de variables del motor y la transmisión.

Símbolo	Variables de entrada	Del motor	De la transmisión
ω	La velocidad angular	No	Si
$\Delta\omega$	La aceleración angular	No	Si
E_a	Tensión de alimentación	Si	No
T_R	Torque resistivo	Si	No
Símb.	Variables de salida:	Del motor	De la transmisión
E_a	Tensión de alimentación	No	Si
ω	Velocidad Angular	Si	No

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Representando el sistema en espacio de estado:

$$\begin{bmatrix} SI_a(s) \\ S\omega(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (-R_a/L) & -(k_e/L) \\ (k_T/J) & -(T_R/J) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a(s) \\ \omega(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (1/L) \\ 0 \end{bmatrix} [E_a(s)] \quad (92)$$

$$\omega_M = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a(s) \\ \omega(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \quad (93)$$

2.6 Evaluación de parámetros y variables del material rodante.

Seguidamente expondremos otros cálculos en los que se fundamentó el rediseño de la locomotora de procedencia norteamericana Alco S-410, (Anexo 21) No. 9 hasta el 1997 y 91009 desde el 2001; basados en los mismos a dicha locomotora se le cambió:

1. El diesel-generator;
2. Los motores de tracción;
3. Los reductores tractivos;
4. Los ejes;
5. Las cajas de grasa;
6. Modificación completa del circuito eléctrico.

Como hemos dicho, la característica externa ideal de una locomotora diesel – eléctrica debe aproximarse a la forma hiperbólica. Objetivo logrado en la locomotora rediseñada.

En el rediseño de la locomotora № 91009, tratamos de lograr características híbridas maniobra – universales, teniendo en cuenta las peculiaridades del trabajo en un ferrocarril de Montaña, alta densidad de carga, movimiento de trenes pesados en tramos cortos que no sobrepasan los 35 km, bajas velocidades, la velocidad media anual en el tramo es inferior a 7 m/s (25.2 km/h), trabajo continuo en relieve con pendiente de cálculo de 11‰.

Otra particularidad tenida en cuenta fue, que los cálculos giraron en torno a la factibilidad de utilización al máximo en ella, de agregados ya probados, establecidos, intercambiables y asequibles con los de los equipos existentes dentro del ámbito nacional, en la red ferroviaria cubana. Debido a que en este ferrocarril se hace necesario el movimiento de una alta densidad de carga bajo las condiciones ya mencionadas, en el mismo se requieren equipos tractivos que clasifican dentro del grupo de medianos y pesados de acuerdo a las cargas que transmiten a la vía, según lo establece la norma NRMT 18-74/1987[74].

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

De lo anterior se deduce que la atención a la vía férrea bajo estas condiciones, cobra vital importancia en la garantía de la seguridad del movimiento de los trenes de este ferrocarril, más aún, si sabemos que su infra y superestructuras en tramos de la misma no se corresponden con las exigencias que de ella demanda el material rodante y las cargas.

Los cálculos fueron realizados en programas en EXEL y MATLAB, también nos auxiliamos del empleo del programa ACAD para el trazado del perfil y selección del tramo de cálculo.

Veamos en SS, con ayuda de MATLAB la reacción de (ω) del motor de tracción ED-118AT de la locomotora a la perturbación escalón, como muestra la figura 24.

Corremos el programa y como vemos es un sistema estable:

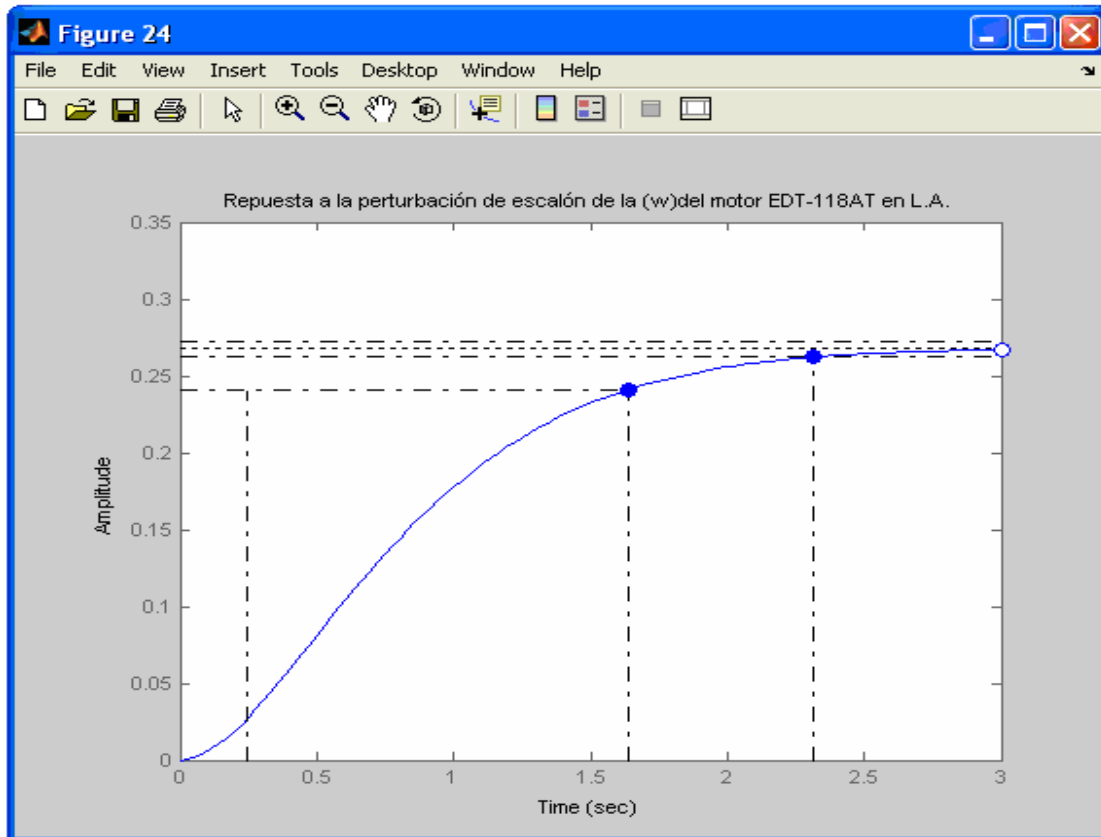


Figura 24. Estudio del motor ED-118AT, respuesta de la velocidad angular del motor al estímulo escalón.

1. Cálculo de la potencia libre del motor diesel.

$$N_d = N_{en} * \beta_{ca} , \text{ en [kW]} \quad (94)$$

Donde: P_{en} – Potencia efectiva nominal del motor diesel en kW.

$$\beta_{ca} \text{ – Coeficiente de cargas auxiliares. } \beta_{ca} = 0.85 - 0.92. \text{ La TEM-2TK, } \beta_{ca} = 0.88 \quad (95)$$

$$N_d = 666 \text{ kW.} \quad (96)$$

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

2. Potencia nominal del generador.

$$N_G = P_d * \eta_G, \text{ en [kW]} \quad (97)$$

Donde: η_g – Es la eficiencia del generador. $\eta_g = 0.94$ (Del P.T. GP-300AT, 1987) (98)

$$N_G = 626 \text{ kW.} \quad (99)$$

Con los datos obtenidos de P_g y η_g escogemos el tipo de Diesel-generator PDG - 1 M, de fabricación rusa, por las razones arriba expuestas de ínter cambiabilidad, disponibilidad, asequibilidad, etc.; el cual posee una potencia nominal de 757 kW, pero con el objetivo de aumentar su tiempo de explotación en un país tropical como el nuestro y mejorar su eficiencia de explotación, lo ajustamos a los siguientes parámetros, según recomendaciones del autor de este trabajo[28] y sugerencias de Fufriansk, 2004[31], Jomich 1997[46], Schanoes 2003[110] y Stepanov 2001[119].

a) Potencia de ajuste Nominal del generador: $N_{Gn} = 600 \text{ a } 670 \text{ kW};$ (100)

b) Revoluciones del generador a régimen nominal: $n_{Gn} = 12.5 \text{ s}^{-1}$ (750 rpm), (101)

c) Tensión máxima del generador a régimen nominal: $V_{Gm} = 770 \text{ V};$ (102)

d) Corriente máxima del generador, a régimen nominal: $I_{Gm} = 1210 \text{ A};$ (103)

3. Fuerza de tracción de la locomotora en la puesta en movimiento con tren.

$$F_{ta} = P_a * \Psi_a, \text{ en[kN]}; \quad (104)$$

Donde: P_a - Es el peso adherente de la locomotora ó el tren en el arranque o puesta en movimiento ó puesta en marcha.

Ψ_a - Es el coeficiente de adherencia de la rueda al riel

Entonces:
$$\Psi_a = 0.25 + \frac{8}{100 + 20v}; \quad (105)$$

En puesta en marcha $v = 0 \rightarrow \Psi_a = 0.33$ (106)

$$F_{ta} = 321 \text{ kN.} \quad (107)$$

4. Fuerza de tracción para el régimen continuo, ó ilimitado:

$$F_{t\alpha} = P_a * \varphi, \text{ en [kN]};$$

φ - Es el coeficiente de fuerza de tracción para el régimen continuo;

Según Rudaya, 2002[105] $\varphi = 0.186$ --Para un destino Universal pesado. (108)

$$F_{t\alpha} = 180 \text{ kN.} \quad (109)$$

5. Velocidad angular de la armadura de los motores de tracción para la velocidad máxima ó constructiva.

$$\omega_{MT \text{ máx.}} = 2 * \mu * V_{cL} / D_R, \text{ en [rad / s]}; \quad (110)$$

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Para las locomotoras universales, según Kamaiev, 2003[47].

$\mu = 4,53$ – Es la relación de transmisión, estandarizada del reductor tractivo,

$V_c = 26.94 \text{ m/s}$ (97 km/h) – Es la velocidad constructiva, según tarea técnica.

1.8 – Es el coeficiente de conversión de unidades.

$D_R = 1.02 \text{ m}$ – Es el diámetro estandarizado, de cálculo de la rueda.

$$\omega_{MT \text{ máx.}} = 239 \text{ rad. / s.} \quad (111)$$

6. Velocidad angular para la potencia nominal del diesel.

$$\omega_{MT \text{ nom.}} = K_V * \omega_{MT \text{ máx.}}, \text{ en [rad. / s]}; \quad (112)$$

Donde, K_V – Es el coeficiente de velocidad máxima;

$$K_V = \omega_{MT \text{ nom.}} / \omega_{MT \text{ máx.}} \quad (111)$$

K_V - Es el coeficiente de velocidad máxima a potencia nominal; Según Rudaya, 2002[107]:

$K_V = 0.6 - 0.9$, para las locomotoras universales.

Escogemos $K_V = 0.6$, para lograr fuerza de tracción superior a bajas velocidades. (112)

Sustituyendo en (111): $\omega_{MT \text{ nom.}} = K_V * \omega_{MT \text{ máx.}} \Rightarrow \omega_{MT \text{ nom.}} = 143 \text{ rad. / s.}$ (113)

7. Velocidad lineal máxima de la locomotora con potencia nominal del diesel.

$$V_{mNL} = K_V * V_c, \text{ en [m/s]} \Rightarrow V_{mNL} = 16 \text{ m / s.} \quad (114)$$

8. Eficiencia de la transmisión de la locomotora.

$$\eta_{tr} = \eta_g * \eta_m * \eta_r; \quad (115)$$

De los Pasaportes técnicos del Generador, Motor eléctrico y Reductor tractivo [91,92 y 93]

η_g - Es la eficiencia del generador de tracción. $\eta_g = 0.94$. (116)

η_m - Eficiencia de los motores de tracción. $\eta_m = 0.915$. (117)

η_r - Es la eficiencia del reductor tractivo. $\eta_r = 0.98$. (118)

Entonces: $\eta_{tr} = 0.84$. (119)

9. Velocidad mínima continuada de la locomotora (Régimen ilimitado de trabajo).

$$V_{\alpha} = \frac{1.026 * P_d * \eta_{tr}}{F_t} \Rightarrow V_{\alpha} = 3.2 \text{ m / s} \quad (120)$$

Parámetros fundamentales del generador principal.

1. Coeficiente de regulación de la tensión del generador.

$$K_{VG} = \frac{U_{gm}}{U_{g\alpha}} = \frac{U_{gm} * I_{gm}}{P_{g\alpha}}; \Rightarrow K_{VG} = 1.5 \quad (121)$$

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

2. Tensión del generador para el régimen continuo.

$$V_{G\alpha} = \frac{U_{Gm}}{K_{VG}} \quad [V] \quad (122)$$

$$U_{G\alpha} = 513 \text{ V} \quad (123)$$

3. Corriente del generador para el régimen continuo

$$I_{G\alpha} = \frac{P_{G\alpha}}{V_{G\alpha}} \quad [A] \quad (124)$$

$$I_{G\alpha} = 1208 \text{ A} \quad (125)$$

Parámetros fundamentales de los motores de tracción.

1. Velocidad angular máxima de rotación de la armadura de los motores de tracción.

$$\omega_{MT\text{ máx.}} = \frac{2 * \mu * V_{CL}}{D_R}; \quad [s^{-1}] \quad (126)$$

$$\omega_{MT\text{ máx.}} = 239 \text{ rad./s} \quad (127)$$

2. Velocidad angular máxima de la armadura de los motores con potencia nominal.

$$\omega_{MT\text{ máxNom}} = K_V * \omega_{MT\text{ máx.}}, \text{ en [rad./s]}; \quad (128)$$

Donde: K_V - Es el coeficiente de velocidad máxima a potencia nominal (op. cit.);

$K_V = 0.6 - 0.9$, para las demás locomotoras universales.

escogemos: $K_V = 0.6 \quad (129)$

$$\omega_{MT\text{ máxNom}} = 143 \text{ rad./s} \quad (130)$$

3. Velocidad angular de giro de la armadura para el régimen continuo.

$$\omega_{\alpha} = \frac{2 * \mu * V_{\alpha}}{D_R}; \quad [\text{rad./s}] \quad (131)$$

$$\omega_{\alpha} = 28 \text{ rad./s} \quad (132)$$

4. Velocidad angular de giro, máxima relativa, de la armadura.

$$\overline{\omega} = \frac{V_{mnl}}{V_{\alpha}}; \quad (133)$$

$$\overline{\omega} = 5.1 \quad (134)$$

5. Potencia necesaria en los motores de tracción.

$$N_M = \frac{P_g}{Z_m}; \quad [kW] \quad (135)$$

Donde: Z_m - Es la cantidad total de motores de tracción.

$$N_M = 155 \text{ kW} \quad (136)$$

6. Potencia efectiva empleada por los motores de tracción.

$$N_{Me} = P_M * \eta_m, \text{ en [kW]} \Rightarrow N_{Me} = 142 \text{ kW} \quad (137)$$

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

7. Torque del eje del motor en régimen continuo.

$$M_{\alpha} = \frac{P_{me}}{\omega_{\alpha}}; \quad [N.m] \quad (138)$$

$$M_{\alpha} = 5.071 \text{ kN} \cdot \text{m}. \quad (139)$$

Por los valores de P, M y ω , escogemos como motores de tracción los EDT- 118 AT.

8. Valor mínimo del coeficiente de excitación de los motores de tracción.

$$\beta_{\min} = \frac{\gamma * K_{vg}^2}{K_{vM} * K_{sat}}; \quad [\beta > 0.22] \quad (140)$$

Donde: γ - Es la relación entre el voltaje y la F.E.M. de los motores de tracción.

$$\gamma = \frac{U_m}{E_m}; \quad (141)$$

Según (op. cit.) y basados en la experiencia de la fábrica Electractmash,

$$\gamma = 1.05 \text{ a } 1.1; \quad (142)$$

E_m - Es la fuerza electromotriz del motor de tracción

$$E_M = K_e * U_M, \text{ en } [V]; \quad (143)$$

$$\text{Donde: } K_e - \text{Relación entre } U_M \text{ y su F.E.M; } K_e = E_M / U_M; K_e = 0.9 \text{ a } 0.95 \quad (144)$$

$$\text{Según RUDAYA, 2002[107], escogemos: } K_e = 0.93. \text{ para el EDT-118AT.} \quad (145)$$

$$U_M = U_{G\alpha} / m_s; \quad (146)$$

Donde: $m_s = 2$ - Es la cantidad de motores conectados en serie al generador, en cada rama paralela conectada al generador.

$$U_M = 257 \text{ V}. \quad (147)$$

$$E_M = 239 \text{ V} \quad (148)$$

$$\gamma = 1.08 \quad (149)$$

K_{vg} - coeficiente de regulación del generador, calculado en (121)

$$K_{vg} = 1.5$$

K_{vM} - Coeficiente de regulación velocidad (corriente) de los motores de tracción.

$$K_{vM} = \frac{\Omega_{Mm}}{\Omega_{M\alpha}} = \frac{\omega_{MT \text{ máxNom}}}{\omega_{\alpha}} \quad (150)$$

$$K_{vM} = 5.1 \quad (151)$$

K_{sat} - Coeficiente de saturación del entrehierro. $K_{sat} = 1.5 \text{ a } 1.9$.

$$\text{Del Pasaporte técnico[91] para motores EDT-118AT: } K_{sat} = 1.7 \quad (152)$$

$$\text{Entonces: } \beta_{\min} = \frac{1.08 \times 1.5^2}{5.1 \times 1.7};$$

$$\beta_{\min} = 0.25 \quad (153)$$

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Como $\beta < 0.5$, es necesario escoger un escalón (nivel) intermedio de atenuación de campo (excitación). Este valor se calcula por la fórmula propuesta por RUDAYA, K.I., 2002[107]:

$$\beta_m = \sqrt{\beta_{\min}} \quad (154)$$

$$\beta_m = 0.5$$

Del estándar (op.cit.) escogemos $\beta_m = 0.48$ (155)

9. De las recomendaciones de los talleres Elektrotiagmash para el valor mínimo de corriente

relativa del generador: $\bar{I}_{G\min} = 0.667$ del gráfico de la figura 25 se busca el valor de:

$$\bar{U}_{G\max} = 1.5 \quad (156)$$

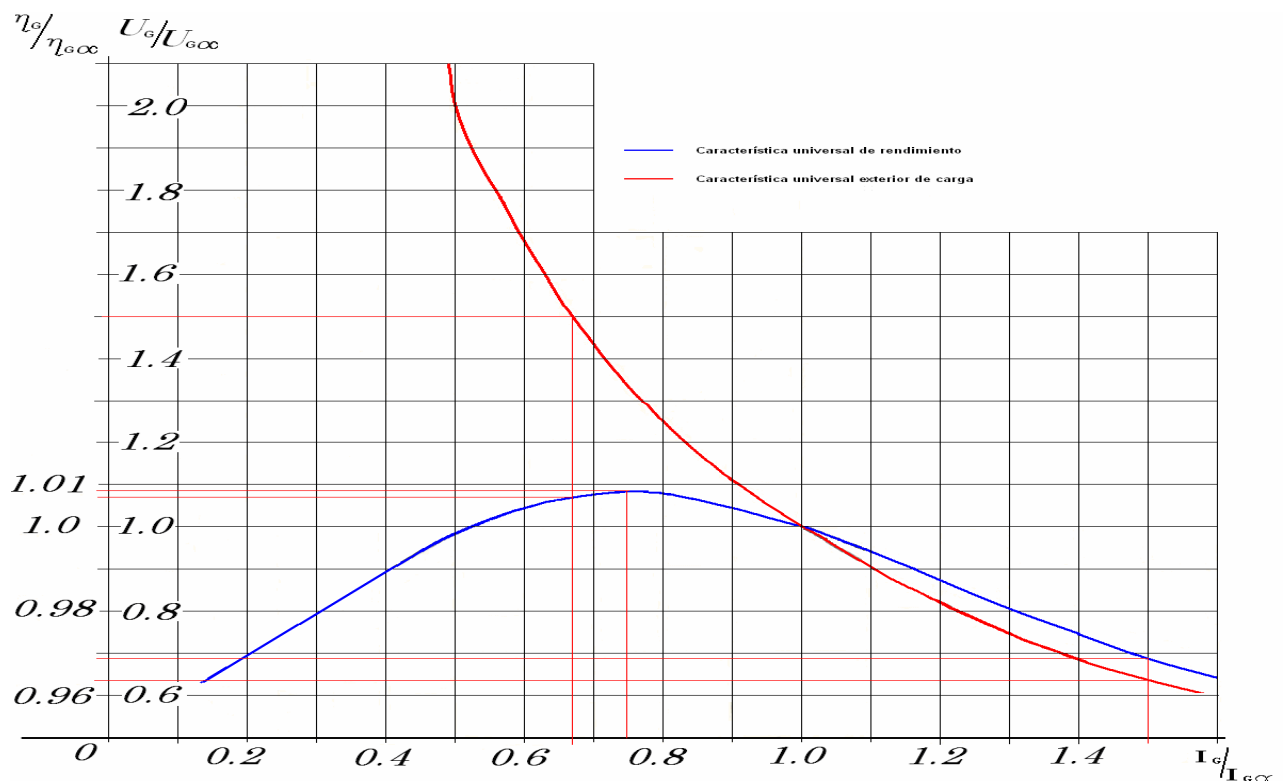


Figura 25. Características universales del generador GP-300T. (KAMAIEV, 2003[47])

10. Corriente del motor en régimen continuo.

$$I_{M\infty} = \frac{I_{G\infty}}{m_p}; \quad [A] \quad (157)$$

Donde: $I_{G\infty} = 1208$ A (de 125); $m_p = 2$ – es la cantidad de ramas paralelas conectadas al generador de grupos de motores en serie conectadas.

$$I_{M\infty} = 604 \text{ A} \quad (158)$$

11. Tensión del motor en régimen continuo.

$$U_{M\infty} = \frac{U_{G\infty}}{m_s}; \quad [V] \quad (159)$$

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Donde: $U_{G\infty} = 513 \text{ V}$ (de 123); $m_s = 2$ – Es la cantidad de motores, conectados en serie en cada rama paralela, conectada al generador.

$$U_{M\infty} = 257 \text{ V} \quad (160)$$

Construcción de la característica exterior de carga del generador de tracción.

1. Del gráfico $\bar{\eta} = f(\bar{I}_G)$ de la figura 23, calculamos los valores de voltajes relativos al

régimen ilimitado $\bar{U}_G = \bar{\eta}_G / \bar{I}_G$ que descargamos en la tabla 17. (161)

Tabla №17. Valores relativos de tensión, corriente y rendimiento del generador

$\bar{I}_G$	0,667	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
$\bar{\eta}$	1,003	1,005	1,007	1,005	1,0	0,99	0,982	0,975	0,973	0,967
$\bar{U}_G$	1,5	1,43	1,25	1,11	1,0	0,91	0,83	0,769	0,715	0,66

GP-300T. (Fuente: KAMAIEV, A.A., 2003[47])

2. Con los valores de $\bar{U}_G$ y $\bar{I}_G$, construimos el gráfico $\bar{U}_G = f(\bar{I}_G)$ figura 23, curva en rojo, que es la característica exterior universal de carga del generador GP-300AT.

3. Cálculo de los valores: 1. De Tensión: $U_G = \bar{U}_G * U_{G\infty} = \bar{U}_G * 513 [\text{V}]$; (162)

2. De Corriente: $I_G = \bar{I}_G * I_{G\infty}$; $I_G = \bar{I}_G * 1208 [\text{A}]$; (163)

3. De potencia: $N_G = U_G * I_G$, en [kW]; (164)

Los valores de $\bar{U}_G$, $\bar{I}_G$ y $\bar{\eta}$ de la tabla 17 y los valores calculados de U_G , I_G y N_G los descargamos en la tabla 18 y con ella construimos la característica exterior de carga del generador GP-300T $U_G = f(I_G)$ de la figura 26.

Tabla №18. Valores relativos: $\bar{I}_G$, $\bar{\eta}$, $\bar{U}_G$, y reales de I_G , U_G y P_G del generador GP-300AT.

$\bar{I}_G$	–	0.667	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
$\bar{\eta}$	–	1.0005	1.001	1.007	1.001	1.0	0.999	0.996	0.995	0.994	0.993
$\bar{U}_G$	–	1,5	1,43	1,25	1,11	1,0	0,91	0,83	0,769	0,715	0,66
I_G	A	805	846	968	1087	1208	1329	1450	1570	1691	1812
U_G	V	770	732.8	640.5	570.4	513	466,8	427,5	394,9	366,6	342.1
P_G	kW	620	620	620	620	620	620	620	620	619.92	619.90

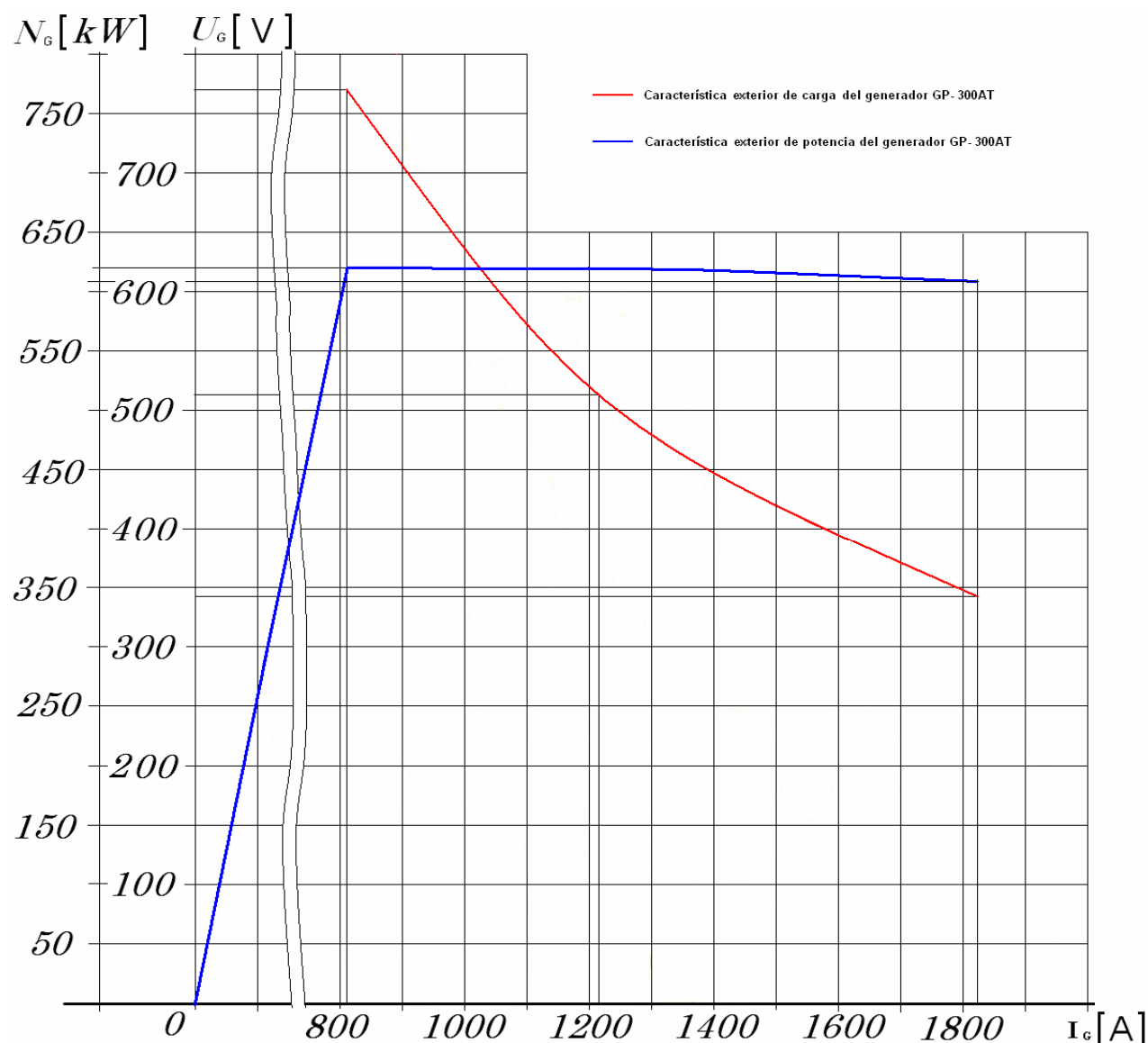
Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Figura 26. Característica exterior de carga y potencia del generador GP-300AT en la locomotora № 91009. (Fuente: KAMAIEV, A.A., 2003[47])

Construcción de la característica exterior tractiva de la locomotora.

1. Construcción de las características electromecánicas de los motores de tracción.

De las características universales de los motores ED-118AT, de la Figuras. 36 y 37 de los anexos 4 y 5, obtenemos los valores de $\bar{\omega}_M$, $\bar{M}_M$, $\bar{I}_M$ y $\bar{U}_M$, para $\beta_m = 1$, $\beta_m = 0.48$ y $\beta_m = 0.25$, los cuales recogemos en la tabla 19, que a continuación mostramos.

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Tabla 19. Valores de $\bar{U}_G$, $\bar{I}_G$, $\bar{\eta}$, $\bar{\omega}_M$, $\bar{M}_M$, U_G , I_G , I_M , ω_M , M_M , V_L , F_T y N_T .

β_m	$\bar{I}_G$	$\bar{U}_G$	$\bar{\omega}_M$	$\bar{M}_M$	I_G	U_G	I_M	ω_M	M_M	V_L	F_T	N_T
--	--	--	--	--	A	V	A	rad/s	kN * m	m/s	kN	kW
1	0.667	1,5	1,81	0,53	806	769,5	402,9	50,68	2,687	5,78	95,47	620
	0.7	1,43	1,75	0,68	846	733,6	422,8	49	3,448	5,59	122,49	620
	0.8	1,25	1,42	0,74	966	641,3	483,2	39,76	3,752	4,53	133,30	620
	0.9	1,11	1,06	0,9	1088	569,6	544,0	29,68	4,563	3,38	162,12	620
	1,0	1,0	1,0	1,0	1208	513,0	604,0	28	5,07	3,19	180,14	620
	1.1	0,91	0,83	1,18	1329	466,8	664,4	23,24	5,983	2,65	212,56	620
	1.2	0,834	0,75	1,30	1450	427,4	724,8	21	6,591	2,39	234,18	620
	1.3	0,769	0,58	1,46	1570	394,5	785,2	16,24	7,402	1,85	263,00	620
	1.4	0,715	0,52	1,52	1691	366,8	845,6	14,56	7,706	1,66	273,81	620
	1.5	0,667	0,42	1,83	1812	342,0	906	11,48	9,278	1,31	329,65	620
0.48	0.667	1,5	2,93	0,32	806	769,5	402,9	82,04	1,622	9,35	57,64	620
	0.7	1,43	2,75	0,35	846	733,6	422,8	77	1,775	8,78	63,05	620
	0.8	1,25	2,18	0,49	966	641,3	483,2	61,04	2,484	6,96	88,27	620
	0.9	1,11	1,81	0,55	1087	569,4	543,6	50,68	2,789	5,78	99,08	620
	1,0	1,0	1,58	0,57	1208	513,0	604	44,24	2,89	5,04	102,68	620
	1.1	0,91	1,31	0,75	1329	466,8	664,4	36,68	3,803	4,18	135,10	620
	1.2	0,834	1,17	0,86	1450	425,8	724,8	32,76	4,36	3,73	154,92	620
	1.3	0,769	1,00	0,98	1570	394,5	785,2	28	4,969	3,19	176,53	620
	1.4	0,715	0,92	1,10	1691	366,8	845,6	25,76	5,577	2,94	198,15	620
	1.5	0,66	0,78	1,20	1812	338,6	906	21,84	6,084	2,49	216,16	620
0.25	0.667	1,5	4,97	0,2	806	769,5	402,9	139,2	1,014	15,86	36,03	620
	0.7	1,43	4,70	0,22	846	733,6	422,8	131,6	1,115	15,00	39,63	620
	0.8	1,25	3,36	0,29	966	641,3	483,2	94,08	1,47	10,73	52,24	620
	0.9	1,11	2,83	0,35	1087	569,4	543,6	79,24	1,775	9,03	63,05	620
	1,0	1,0	2,25	0,42	1208	513,0	604	63	2,129	7,18	75,66	620
	1.1	0,91	1,93	0,53	1329	466,8	664,4	54,04	2,687	6,16	95,47	620
	1.2	0,834	1,64	0,57	1450	425,8	724,8	45,92	2,89	5,23	102,68	620
	1.3	0,769	1,39	0,69	1570	394,5	785,2	38,92	3,498	4,44	124,29	620
	1.4	0,715	1,30	0,78	1691	366,8	845,6	36,4	3,955	4,15	140,51	620
	1.5	0,66	1,063	0,94	1812	338,6	906	29,76	4,766	3,393	169,33	620

Seguidamente construimos los siguientes gráficos:

1. $\omega_M = f_1(\bar{\omega}_M) = 28 * \bar{\omega}_M$ [rad/s]
2. $M_M = f_2(\bar{M}_M) = 5.070 * \bar{M}_M$ [kN * m]
3. $I_M = f_3(\bar{I}_M) = 1208 * \bar{I}_M$ [A]
4. $U_M = f_4(\bar{U}_M) = 513 * \bar{U}_M$ [V]

Con esos valores calculamos entonces V_L y F_T

$$V_L = D_R * \omega_M / (2 * \mu) = 0.114 * \omega_M, \text{ en [m / s];} \quad (165)$$

$$F_T = Z_M * 2 * \mu * M_M / D_R = 35.53 * M_M, \text{ en [kN * m];} \quad (166)$$

Los valores calculados de V_L y F_T , los recogemos también en la tabla 18 arriba vista y con ellos construimos la característica exterior tractiva de la locomotora para:

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

$\beta_m = 1$, $\beta_{m1} = 0.48$ y $\beta_{m2} = 0.25$, en la que incluimos las siguientes limitantes:

$$1. \text{ Por adhesión: } F_{TA} = P_{LA} * \psi = 970 * (0.25 + 8 / (100 + 20 * V_L)), [\text{kN}]; \quad (167)$$

$$2. \text{ Por corriente máxima: } F_T(I_M \text{ máx}) \leq F_{TA}(I_{MA}), \text{ en [A]}; \quad (168)$$

$$3. \text{ Por corriente ilimitada: } F_{TA}(I_M) \leq F_{TA}(I_{M\infty}), \text{ en [A]}; \quad (169)$$

$$4. \text{ Por velocidad máxima: } F_{TA}(V_L) \leq F_{TA}(V_L \text{ máx.}), \text{ en [m/s]}; \quad (170)$$

Todos los cálculos anteriores fueron hechos en EXEL y en MATLAB. En las figuras 27 y 28 muestran los resultados de ambos programas.

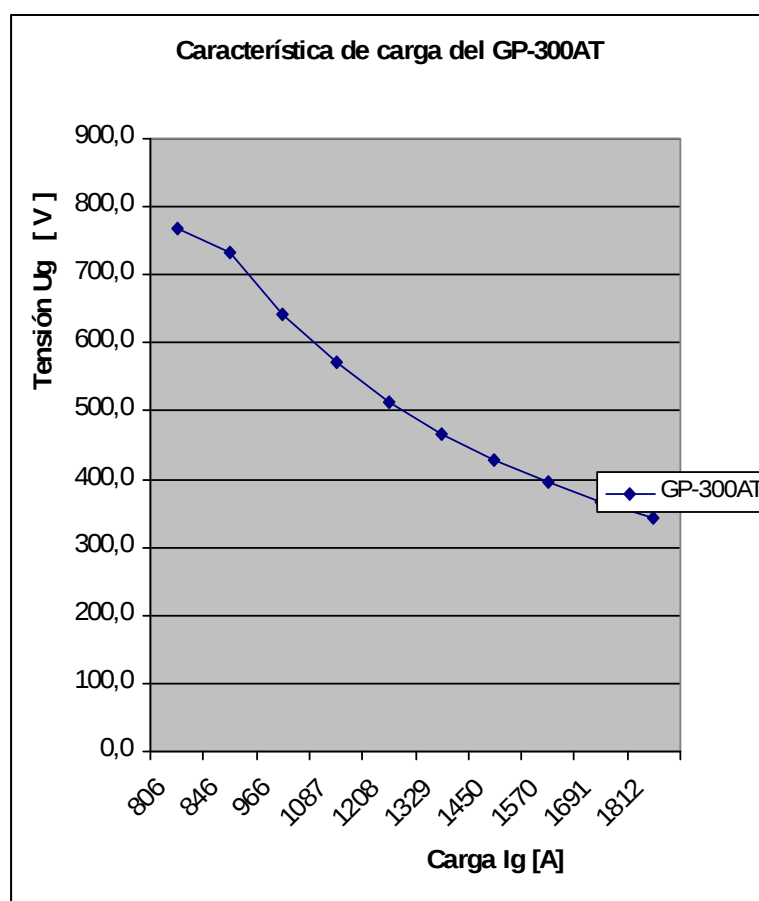


Figura 27. Característica exterior de carga del generador GP- 300AT, por el programa EXEL.

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

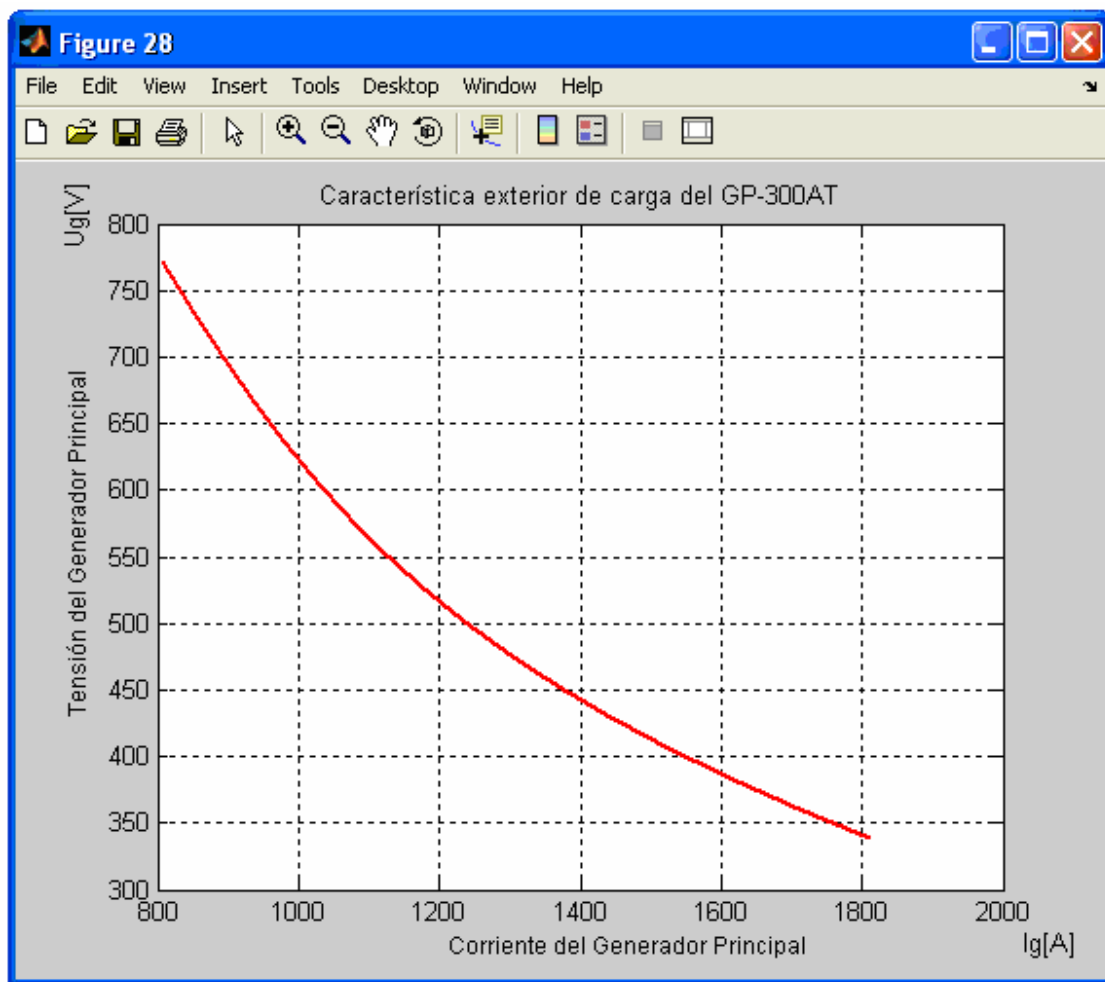


Figura 28. Característica exterior de carga del generador GP- 300AT.

2. Acomodo de las transiciones.

Partiendo de los cálculos de los escalones de atenuación de campo de los motores eléctricos (153) y (155) $\beta_{m1} = 0,48$ y $\beta_{m2} = 0,25$ y el coeficiente de regulación por corriente de los motores de tracción:

$$K_{IG} = I_{M\text{máx}} / I_{M\text{min.}} = K_{VM} = \varpi = 5.1 \text{ (calculado en 134)}$$

La fuerza de tracción de la locomotora es el resultado de la suma de las fuerzas originadas por el torque de los motores de tracción y es una función de la corriente de carga de los mismos, por lo que el diapasón de la misma depende de los límites de la fuerza de tracción de la locomotora, o sea conociendo los límites de la fuerza de tracción de la locomotora sabremos el diapasón de corriente de los motores de tracción y por consiguiente su coeficiente de regulación por corriente.

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Para resolver esto es más fácil empleando las características universales del motor, relativas al régimen ilimitado, pues las mismas son idénticas para todos los motores, o sea también para la locomotora:

$$F_T \text{ mín} = P_G * \eta_{Tr} / V_{\text{máx.}}, [\text{kN}]; \quad (171)$$

$$F_T \text{ mín} = 19.29 \text{ kN}. \quad (172)$$

Con los valores de la tabla №4, construimos las curvas:

$$I_{G1} = F(V_L)_{100\%}, \text{ en [A]}; \quad (173)$$

$$I_{G2} = F(V_L)_{48\%}, \text{ en [A]}; \quad (174)$$

$$I_{G3} = F(V_L)_{25\%}, \text{ en [A]}; \quad (175)$$

3. Cálculo de las derivaciones de campo.

En los puntos (153) y (155) fueron calculados los dos escalones ó niveles de atenuación, que son:

$$1^a. \beta_{m1} = 0,48 \quad (176)$$

$$2^a. \beta_{m2} = 0,25. \quad (177)$$

Como sabemos: $\beta = I_{exc}/I_a. \quad (178)$

O sea, $\beta = R_{sh}/(R_{exc} + R_{sh}) \quad (179)$

Para el esquema de conexión de los motores de la locomotora № 91009, tenemos:

$$R_{exc} = 2 * R_{excM} = 2 * 0.0105, \text{ en } [\Omega]; \quad (180)$$

$$R_{exc} = 0.021 \Omega.$$

Por tanto: $\beta = R_{sh}/(0.021 + R_{sh}) \quad (181)$

3.1 Resistencia shunt para la primera derivación (atenuación de campo)

Sustituyendo (181) en (176): $R_{sh1} = 0.0194 \Omega. \quad (182)$

3.2 Resistencia equivalente para la segunda derivación (atenuación de campo)

Sustituyendo (181) en (177): $R_{sh2e} = 0.007 \Omega. \quad (183)$

3.3 Resistencia shunt para la segunda derivación (atenuación de campo)

$$1/R_{sh2e} = 1/R_{sh1} + 1/R_{sh2}; \quad (184)$$

$$R_{sh2} = 0.011 \Omega. \quad (185)$$

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Las transiciones, se ubican de forma tal que nunca la corriente demandada al generador supere la corriente del régimen ilimitado de este, o sea: $I_G < I_{G\alpha}$, como se muestra en la figura 29. Las transiciones regresivas se ubican en valores 10% inferiores a las progresivas.

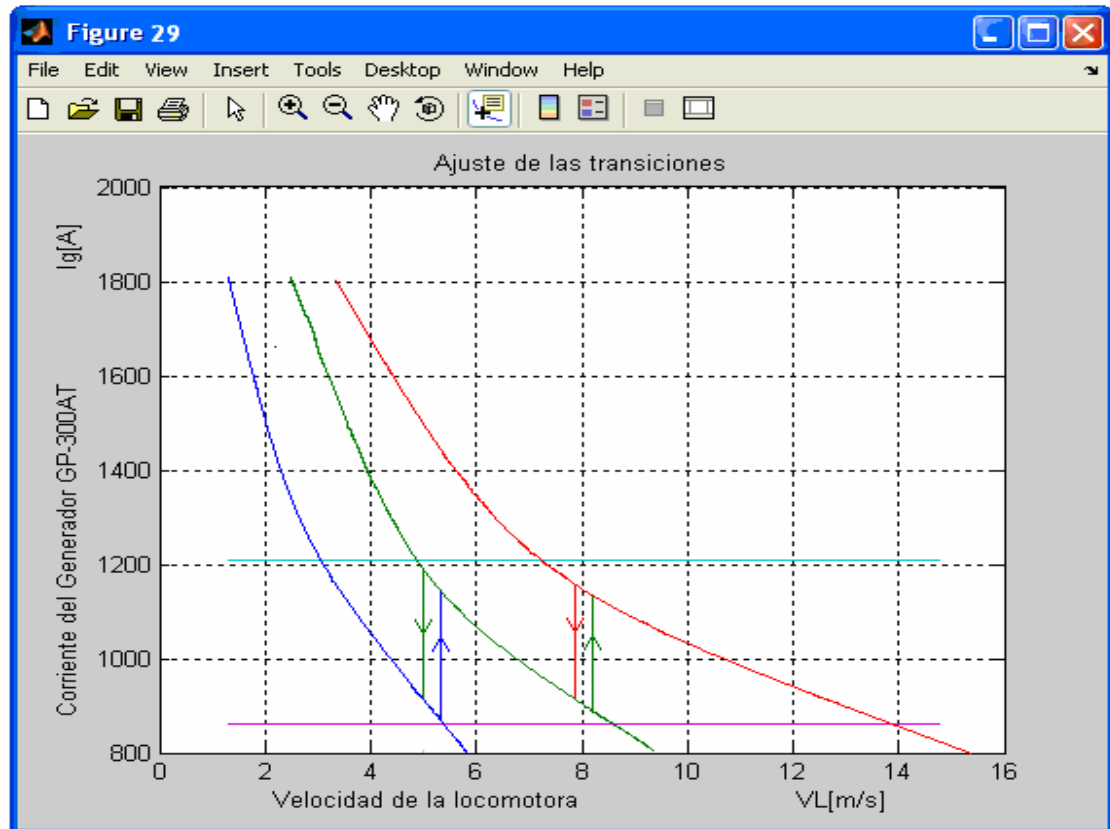


Figura 29. Ajuste de las transiciones de la locomotora.

- Campo completo; ↑ Primera transición progresiva, 5.55 m/s (20 km/h).
- 1ª Atenuación, $\beta = 0,48$; ↑ Segunda transición progresiva, 8.33 m/s (30 km/h).
- 2ª Atenuación $\beta = 0,48$; ↓ Primera transición regresiva, 7,5 m/s (27 km/h).
- ↓ Segunda transición regresiva, 5 m/s (18 km/h). — Límite inferior de carga (por tensión máxima del GP); — Límite superior de carga del generador principal.

2.7 Programa en MATLAB para el cálculo de tracción.

Con el programa realizado en MATLAB, efectuamos las siguientes evaluaciones:

1. El peso del tren Q en [kN] como función de la potencia efectiva Ne en [kW], para la pendiente de cálculo de 11 ‰, para una locomotora B_0-B_0 ;
2. El número de vagones cargados nVc en la formación vs. Ne en [kW], para la pendiente de cálculo de 11 ‰, para una locomotora B_0-B_0 ;
3. El peso del tren Q en [kN] como función de la potencia efectiva Ne en [kW], para pendientes 0:1:10, para una locomotora B_0-B_0 ;

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

4. El número de vagones cargados nVc en la formación vs. Ne en [kW], para pendientes 0:1:10, para una locomotora B_0-B_0 ;
5. El peso del tren Q en [kN] como función de la potencia efectiva Ne en [kW], para la pendiente de cálculo de 11 ‰, para una locomotora C_0-C_0 ;
6. El número de vagones cargados nVc en la formación vs. Ne en [kW], para la pendiente de cálculo de 11 ‰, para una locomotora C_0-C_0 ;
7. El peso del tren Q en [kN] como función de la potencia efectiva Ne en [kW], para pendientes 0:1:10, para una locomotora C_0-C_0 ;
8. El número de vagones cargados nVc en la formación vs. Ne en [kW], para pendientes 0:1:10, para una locomotora C_0-C_0 ;
9. Todas las anteriores (variantes 1 a la 8) calculadas para pesos adherentes de la locomotora de 980:5:1000 kN para tipo B_0-B_0 y 1095:5:1115 kN para la C_0-C_0 .

El análisis de la dispersión en el peso volumétrico de la carga, arrojó para el cálculo, que el peso bruto del vagón es de 828 kN en los meses de lluvia y 810 kN en seca, dando una media ponderada anual de 820 kN B/vagón, que es el valor tomado para los cálculos.

Los cálculos prevén las condiciones más difíciles de puesta en marcha:

1. Detención en la pendiente de cálculo 11 ‰ con curva de 290m y la carga nominal;
2. Puesta en marcha en la pendiente de cálculo de 11 ‰ con curva de 290m y la carga nominal en condiciones de adhesión mínima: Rieles húmedos y sucios;

Estas premisas de cálculo, excluyen fallas imputables a la tracción, en la transportación.

Como anteriormente planteamos durante la confección del modelo el estudio está realizado para trenes formados por vagones tipo volquetas con largo de 12.35 m, tara de 300 kN, de cuatro ejes, capacidad de carga de 500 kN y con la resistencia específica establecida por el Dr. KURISHEV, Alexander, 1976[51].

Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 30 y 31.

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

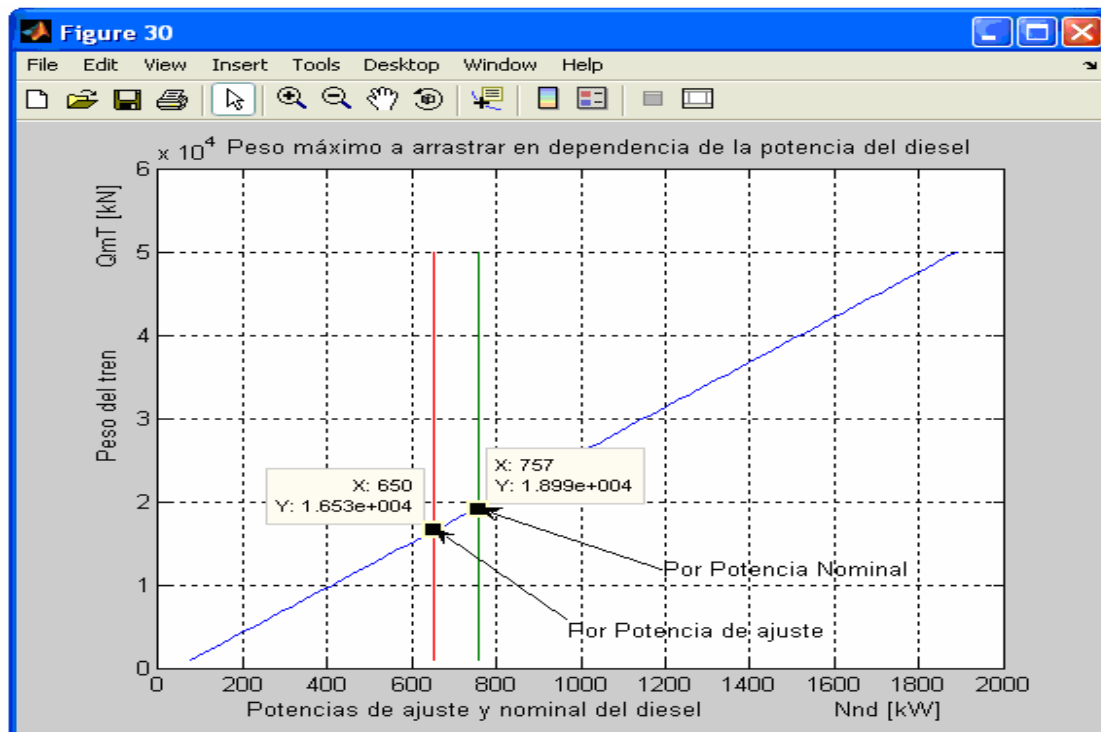


Figura 30. Peso del tren vs. potencia, para pendiente de 11‰.

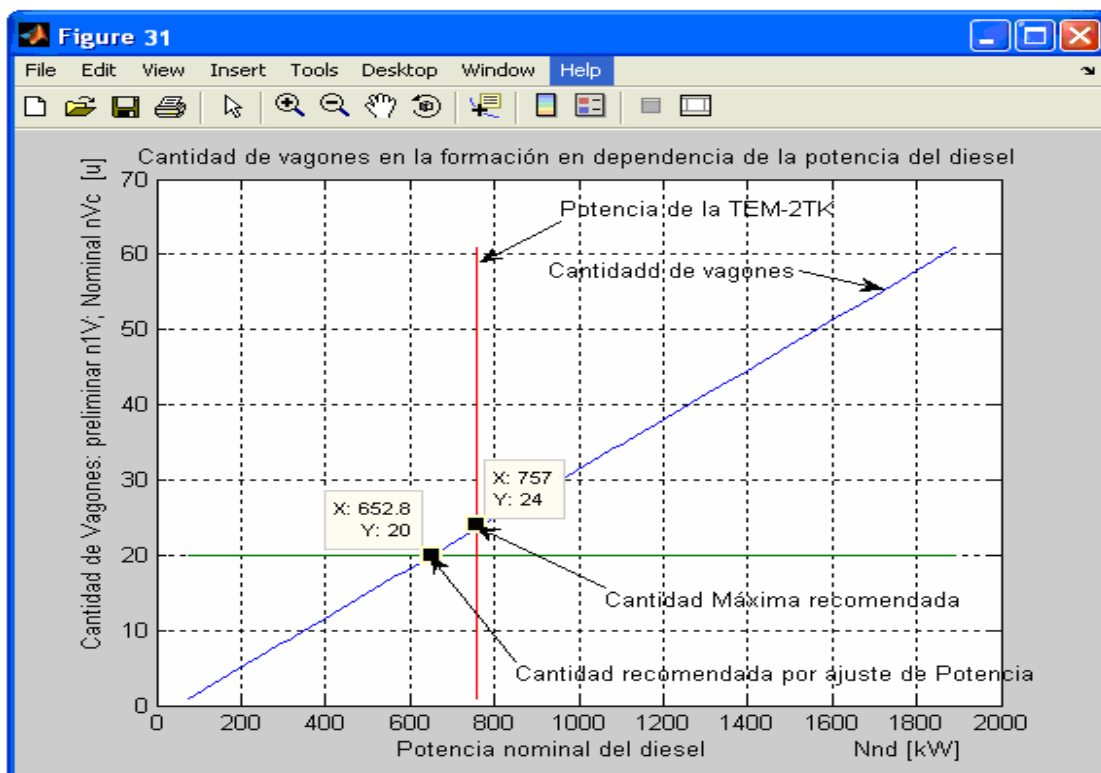


Figura 31. Cantidad de vagones en el tren vs. potencia para pendiente de 11‰ .

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.**2.8 Comparación de los resultados del ajuste simulado y el real.**

Los resultados obtenidos en la simulación expuestos en la figura 28 nos permiten obtener la tabla 20, que expresa la relación Ug vs. Ig en la zona de potencia nominal constante.

Tabla 20. Resultados de la simulación.

Parámetros	1	2	3	4	5
Tensión U'g[V]	701	596	521	464	417
Carga I'g [A]	900	1050	1200	1350	1500

Los resultados que se obtuvieron en las pruebas de banco de la locomotora 91009 en Camagüey, están recogidos en el expediente técnico del equipo y del cual seguidamente se ofrecen los datos del ajuste de potencia efectuado y recogido en la siguiente tabla 21.

Tabla 21. Resultados de los ajustes de la 91009, en Camagüey.

Parámetros	1	2	3	4	5
Tensión Ug[V]	689	590	516	458	412
Carga Ig [A]	900	1050	1200	1350	1500

(Fuente: Expediente técnico de la reparación 91009, 2003)

Los resultados del ajuste simulado y el real se muestran en el gráfico de la figura 32.

Las discrepancias entre realidad y simulación se ofrecen en la tabla 22.

Tabla 22. Discrepancias de los resultados, en %.

Tensión simulada I' g [A]	701	596	521	464	417
Tensión real Ig [A]	689	590	516	458	412
δ [%]	1,7	1,02	1,00	1,31	1,21

Analizando los márgenes de errores, podemos establecer que el error máximo no será superior $\Delta = 2 \cdot \Delta \delta_{\text{máx.}} = 2 \cdot (1,7 - 1,0) = 2,14 \% \ll 5\%$ (186)

De lo anterior se infiere la validez de los resultados.

Seguidamente en la figura 32 mostramos los resultados de los ajustes de los sistemas electro energéticos de las locomotoras, de forma simulada y el real del banco de pruebas, cuyos valores de ajuste son el resultado de la compilación con el criterio estadístico de Student, sobre 10 pruebas reostáticas realizadas a la locomotora 91009 en Camagüey, superando el tiempo equivalente entre R.C. (TERC) de 6,5 años para estas locomotoras.

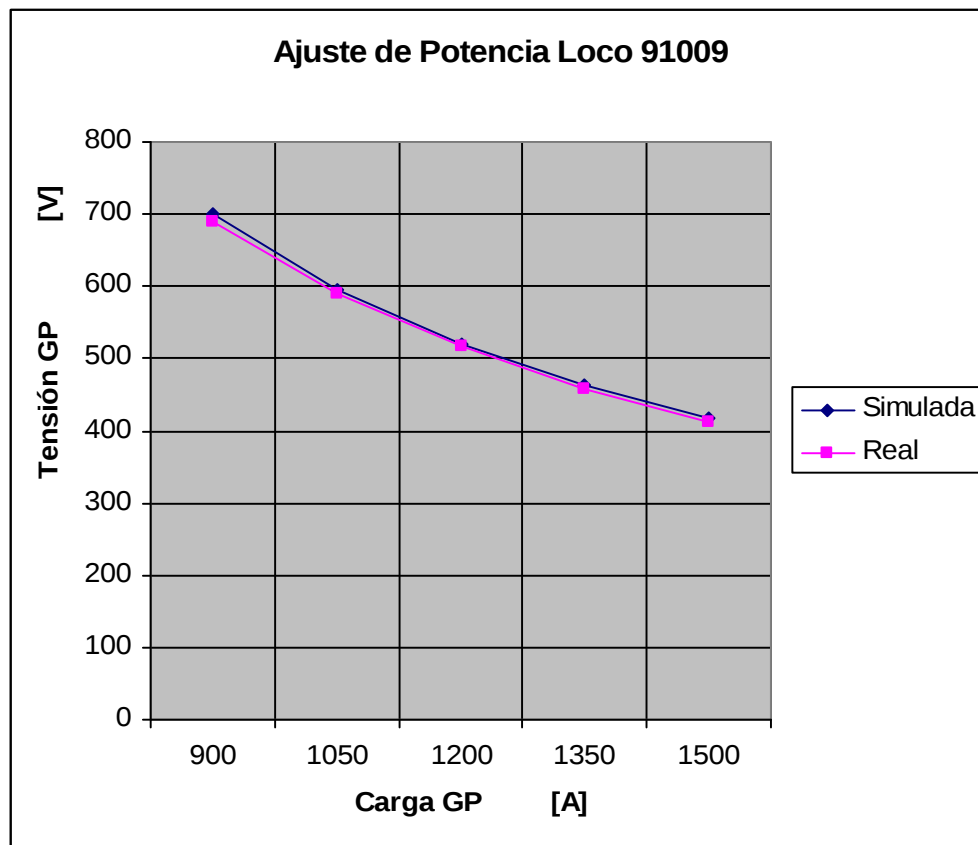
Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Figura 32. Comparación de los ajustes de potencia simulado y real para la 91009.

Los resultados obtenidos de la simulación se obtienen ligeramente superiores porque no se evalúa en su totalidad la reacción de la armadura ni las pérdidas en la histéresis del material de las máquinas eléctricas, que tienen lugar en el proceso real. (RUDAYA [107])

2.10 Cálculo y comparación de la productividad.

El aumento de la productividad viene dado por dos factores:

- La introducción de las locomotoras propuestas. Al tener éstas menos cantidad de ejes, ofrecen menos resistencia al movimiento y por ende, aparte de ser más productivas, son más eficientes. Además su mayor velocidad mínima continuada con los demás parámetros similares, implica mayor productividad.
- Al sustituir los rieles y reparar la vía, la velocidad media puede ser elevada, con el consiguiente aumento de la productividad.

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.**Aumento de la productividad por la introducción de la locomotora propuesta.**

La velocidad mínima continuada de las locomotoras TEM 2TK, actualmente explotadas en la RRL es de 2,5 m/s (9 km/h), que resulta en un 27% inferior a 3,19 m/s (11,5 km/h) de la locomotora propuesta. Para igualdad de condiciones comparativas, pues la 91009 fue reconstruida en base al grupo energético de la locomotora TEM 2TK, con semejanzas en: potencia, velocidad constructiva, y fuerza de tracción; la comparación de la productividad de las mismas se reduce a sus velocidades en régimen ilimitado, en los tramos en los que ella lo alcanza, que para el ferrocarril de Nicaro tiene lugar solamente en un trayecto de 9,1 km de los 58 del recorrido total en ambos sentidos.

De lo anterior tenemos, que el aumento de la productividad viene dado por(Kamaiev[47]):

$$\Delta Pr1 = (L_{RI}/L_T) * (V'_{RI}/V_{RI}) * 100 \quad (187)$$

Donde: ΔPr — Aumento de la productividad empleando la locomotora propuesta, en [%];

L_{RI} y L_T — Recorridos de las locomotoras en régimen ilimitado y el total, en [m];

V'_{RI} y V_{RI} — Velocidades del régimen ilimitado de las locomotoras propuesta y actualmente existentes, en [m/s];

Entonces: $\Delta Pr 1 = 8\%$. (188)

Aumento de la productividad por la inversión en rieles y reparación de la vía.

La inversión en los rieles con la reconstrucción de la vía férrea nos permite aumentar la velocidad comercial de los trenes desde 5,14 m/s (18,5 km/h) hasta 6,5 m/s (23,4 km/h), incluso hasta más. Esto implicaría un aumento de la productividad en un 26,6 %, en dependencia si las instalaciones concatenadas al ferrocarril (El transportador y el viradero) pueden asimilar dicho incremento productivo.

De lo anterior tenemos:

1. Tiempo de trabajo en los tramos no dominantes, con la velocidad comercial actual:

$$t1 = (L_T - L_{RI})/V_m; \text{ en [s]} \quad (189)$$

Donde : L_T — Recorrido total del tren (ida y vuelta) en régimen nominal no ilimitado, en [m];

$L_T = 58000$ m (58 km).

L_{RI} — Recorrido del tren (ida y vuelta) en régimen ilimitado, en [m];

$L_{RI} = 9100$ m (9,1 km)

Para $V_m = 5,14$ m/s; $t1 = (58000 - 9100)/5,14 = 9513$ s (2,64 h) (190)

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

2. Cantidad posible de Pares de trenes diarios para la velocidad actual.

$$n_{pt} = T_{td}/t_1, \text{ en [pt]} \quad (191)$$

Donde: T_{td} — Tiempo total promedio de trabajo actual diario, $T_{td} = 70200 \text{ s}$ (19,5 h) (192)

$$n_{pt} = 70200/9513 = 7 \text{ pt (pares de trenes)} \quad (193)$$

3. Tiempo de trabajo en los tramos no dominantes, para la velocidad comercial proyectada:

$$\text{Para } V_m = 6,5 \text{ m/s; } t_1' = (58000 - 9100)/6,5 = 7523 \text{ s (2,09 h)} \quad (194)$$

4. Cantidad posible de Pares de trenes diarios para la velocidad proyectada.

$$n_{pt}' = 70200/7523 = 9 \text{ pt} \quad (195)$$

5. Aumento de la productividad del trabajo de transportación por la inversión en rieles y reparación de la vía será:

$$\Delta Pr_2 = (n_{pt}' - n_{pt}) * 100/n_{pt} = 28\%$$

Cálculo del consumo de combustible.

Para la locomotora de seis ejes:

1. Tiempo de trabajo en régimen ilimitado a 2,5 m/s (9 km/h):

$$t_2 = L_{RI}/V_{RI}; \text{ en [s], ([h])} \quad (196)$$

$$t_2 = 3640 \text{ s ; (1,01 h).} \quad (197)$$

2. Tiempo de trabajo a velocidad de 5,14 m/s (18,5 km/h):

$$t_3 = (L_T - L_{RI})/V_m; \text{ en [s], ([h]);} \quad (198)$$

$$t_3 = 9513 \text{ s ; (2,64 h);} \quad (199)$$

3. Consumo de combustible para el tiempo t_1 .

Del Pasaporte técnico de la TEM 2TK [92] tenemos:

$$\text{Para } V = 2,5 \text{ m/s} \rightarrow F_T = 249 \text{ kN;} \quad (200)$$

$$V = 5,14 \text{ m/s} \rightarrow F_T = 120 \text{ kN;} \quad (201)$$

$$g_{eC} = 0,223 \text{ kg/kW}_e \cdot \text{h;} \quad (202)$$

$$\text{Pero: } N_T = \beta * F_T * V; \quad (203)$$

Donde : $\beta = 0,27$ — Es el coeficiente de utilización de la potencia tractiva para el perfil dado.

$$\text{Para } V=2,5 \text{ m/s} \rightarrow N_T = 0,27*248 * 2,5 = 167 \text{ kW}$$

Sustituyendo (192), (196) y 198) en (190) tenemos que el consumo de combustible para t_2 es:

$$G_{c1} = 0,223*167*3640/3600 = 37,88 \text{ kg (45,64 L)} \quad (204)$$

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

4. Consumo de combustible para el tiempo t_3 .

$$\text{Para } V=5,14 \text{ m/s} \rightarrow N_T = 0,27 \cdot 120 \cdot 5,14 = 166 \text{ kW} \quad (205)$$

$$\text{Por tanto: } G_{c2} = 0,223 \cdot 166 \cdot 9513,6 / 3600 = 97,83 \text{ kg (118 L)} \quad (206)$$

5. Consumo total de combustible por viaje, ida y regreso, de la locomotora de seis ejes:

$$G_{T6} = G_{c1} + G_{c2} = 37,88 + 97,83 = 135,71 \text{ kg (164 L)} \quad (207)$$

Para la locomotora de cuatro ejes:

6. Tiempo de trabajo en régimen ilimitado a 3,19 m/s (11,5 km/h):

$$t_4 = 9100 / 3,19 ; (9,1 / 11,5);$$

$$t_4 = 2852 \text{ s ; (0,79 h).} \quad (208)$$

7. Consumo de combustible para el tiempo t_4 .

Del Pasaporte técnico de la TEM 2TK [92] tenemos:

$$\text{Para } V = 3,19 \text{ m/s} \rightarrow F_T = 195 \text{ kN;} \quad (209)$$

$$N_T = 0,27 \cdot 195 \cdot 3,19 = 168 \text{ kW}$$

$$(203 \text{ y } 204 \text{ en } 198) \quad G_{c3} = 0,223 \cdot 168 \cdot 2852 / 3600 = 29,68 \text{ kg (36 L)} \quad (210)$$

8. Consumo de combustible total por viaje, ida y regreso, de la locomotora de cuatro ejes

$$G_{T4} = G_{c2} + G_{c3} = 29,68 + 97,83 = 127,51 \text{ kg (154 L)} \quad (211)$$

9. Ahorro total anual de combustible.

$$A_{aC} = Dea \cdot npd \cdot (G_{T6} - G_{T4}); \text{ en [kg/año] } ([L/año]) \quad (212)$$

Donde: Dea — Es la cantidad de días efectivos del año, Dea = 356 (Ver tabla 12).

npd — Es la cantidad de pares diarios de trenes, npd = 6 (Ver tabla 12).

$$\text{Entonces: } A_{TC} = 356 \cdot 6 \cdot (135,71 - 127,51) = 17515,2 \text{ kg/año (21103L/año)} \quad (213)$$

2.10 Cálculo y comparación de la eficiencia de las locomotoras.

Ya hemos señalado que en igualdad comparativa, las locomotoras de cuatro ejes son más eficientes que las de seis por ofrecer menos resistencia al movimiento, por esta razón para el análisis de la misma unidad de tiempo la potencia específica de las primeras es 20% superior, o sea con el mismo peso del tren transportan 20% más de su propio peso. También vimos que de los 58 km de recorrido total, 9,1 km se realizan con las respectivas velocidades mínimas continuadas, el resto se realiza a velocidad comercial promedio, que actualmente es de 5,14 m/s (18,5 km/h).

La eficiencia de explotación de la locomotora diesel eléctrica viene dada por la expresión:

$$\text{Según Kamaiev[47]} \quad \eta_L = 3600 N_T / (B_h \cdot Q_{iC}); \quad (214)$$

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Donde: η_L — Es la eficiencia de la locomotora, que es una expresión adimensional.

N_T — Es la Potencia tangencial (útil de explotación) de la locomotora, en [kW];

De la fórmula (25): $N_T = F_T * V_L$;

N_D — Es la potencia de ajuste del diesel

G_{hC} — Es el consumo horario de combustible, en [kg/h];

$$G_{hC} = G_C * 3600 / t_C; \quad (215)$$

Donde: g_{eC} — Es el consumo específico del motor diesel en régimen dado, en [kg/ (kW_e*h)];

$g_{eC} = 0,225$ kg/ (kW_e*h), ver tabla 15, página 65.

t_C — Es el tiempo de trabajo para un régimen y consumo dado, en [s];

Q_{iC} — Es el poder calórico inferior calculado, del combustible, en [kJ/kg];

1. Cálculo del consumo horario actual de la locomotora, por la fórmula 208 es:

$$G_{hC} = G_T * (t_2 + t_3) / 3600 = 135,71 * 3600 / (3640 + 9513) = 37,14 \text{ kg/h.} \quad (216)$$

2. Eficiencia de explotación en las condiciones actuales:

$$\eta_L = 3600 * 167,5 / 37,14 * 45000 = 0,359 \quad (217)$$

3. Cálculo del consumo horario proyectado:

$$G_{hC}' = G_T * (t_3 + t_4) / 3600 = 127,51 * 3600 / (9513 + 2852) = 37,12 \text{ kg/h.} \quad (218)$$

4. Eficiencia de explotación proyectada:

$$\eta_L' = 3600 * 168 / 37,12 * 45000 = 0,362 \quad (219)$$

5. Aumento de la eficiencia proyectada sobre la actual.

$$\Delta \eta_L = (\eta_L' - \eta_L) * 100 / \eta_L = 0,84 \% \quad (220)$$

2.11 Comparación de las características de las locomotoras, propuesta y las actuales.

En la tabla 23 ofrecemos la comparación entre la locomotora remodelada, la locomotora base y las existentes, en el anexo 11 se presenta esta tabla ampliada.

Tabla 23. Comparación de las principales características de las locomotoras.

Nº	Características a comparar	Nº 91009	Nº9	TEM-2TK
1.	Destino de la locomotora	Universal	Maniobra	Maniobra
2.	Potencia nominal del diesel	757 kW	735 kW	757 kW
3.	Fórmula axial	$2_0 - 2_0$	$2_0 - 2_0$	$3_0 - 3_0$
4.	Velocidad min. continua: m/s (km/h)	3.19 (11.5)	3 (10.7)	2.64 (9.5)
5.	Rango nominal de velocidad: m/s (km/h)	2.78 -15 (11-57)	3.3 -13 (11-49)	2.6-13.8(11-50)
6.	Peso de servicio: kN (tf)	980 (98)	900(90)	1120(112)
7.	Fuerza de tracción continua: kN (tf)	180	165	190
8.	Carga axial: kN (tf)	245 (24.5)	225	186
9.	Relación de transmisión del par	4.53	4.86	4.53
10.	Principales gálibos (m)	13,5 x 4,35 x 3,1	13,5 x 4,35 x 3,1	17 x 4,4 x 3,1
11.	Consumo horario: G_{hC} (kg/h)	37,12	38,1	37,14

Capítulo I I. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL TREN. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

2.12 Análisis de los resultados de la evaluación de las locomotoras.

Todos nuestros análisis de los resultados están referidos a los datos la tabla 12.

1. El análisis de la figura 9 nos dice que los planes de producción que deben ser objeto de nuestro estudio oscilan entre 32 y 40 tm diarias de Ni+Co., para las tres variantes de LNi.
2. Los resultados representados en las figuras 11 a la 13, demuestran que para planes superiores a las 34 tm diarias de Ni+Co los rieles R-43 no rinden su vida útil para el tráfico demandado por los planes al ferrocarril.
3. El análisis del trazado de la vía férrea y los resultados recogidos en la figura 14, corroboran que en los tramos con curvas, cuyo radio es de 290m y menos, son los lugares que más cambios de rieles imponen.
4. La tabla 12 y las figuras 30 y 31, nos dicen que para planes de producción hasta 42 tm/d de Ni+Co, el tráfico demandado no supera 24 vagones por trenes y seis pares de trenes/d, por lo que las locomotoras TEM-2TK pueden asumir ese tráfico. Si se aumentara el plan de producción sobre estos valores, el incremento de la transportación debe buscarse con el aumento de la cantidad de pares de trenes/d y no con el aumento de vagones en la formación, pues 24 vagones/trenes es el tope para la TEM2 en el tramo de 11‰.
5. Las figuras 30 y 31 muestran que en ajuste de potencia de la TEM-2TK a 650 kW, se recomienda formar trenes cuyo peso sea entre 16500 y 19000 kN. Si se quisiera arrastrar trenes con pesos superiores, se tendría que considerar la adquisición de equipos más potentes, cuya potencia puede ser hallada por la línea azul, en dependencia del peso del tren a arrastrar. Por ejemplo, para arrastrar trenes de 40000 kN se necesitarían locomotoras de 1500 kW. También nos indican que la cantidad de vagones recomendada en la formación por ajuste de potencia de la locomotora TEM-2TK para el tramo de cálculo de 11‰ es entre 20 y 24 vagones por tren, sin sobrepasar esta última.
6. Para el trazado existente en el ferrocarril en el relieve montañoso estudiado, (trazado muy sinuoso y fuerte), los trenes formados en base a los cálculos, tienen longitudes que oscilarían entre 275 y 325 m, lo cual adicionalmente, facilita su observación y conducción que desde la óptica de seguridad ferroviaria, también es conveniente.
7. De la figura 26 se deduce que la potencia de la locomotora con peso adherente en servicio de 1120 kN, con potencia del diesel ajustada a 650 kW, ampliamente satisface la demanda de tráfico para un plan diario hasta 42 tm de Ni+Co.

Capítulo I I. CÁLCULOS, SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

8. En la figura 29 se expone el reglaje del sistema eléctrico de estas locomotoras, de forma racional para prolongar la vida útil de sus máquinas eléctricas, las transiciones deben ser ajustadas para 5,55 m/s la primera derivación progresiva y 8,33 m/s la segunda, para evitar trabajo intermitente (zapateo) las regresivas se ajustan 10% por debajo de estos valores, o sea, respectivamente 5 y 7,5 m/s respectivamente.

9. La figura 32: análisis de la característica de la locomotora, nos dice que en la zona de bajas velocidades, la línea azul, se trabaja en el límite de adhesión de la rueda al riel, esta zona es sumo interés, para los cálculos de la carga nominal de los trenes.

La zona verde: Zona de utilización plena de la potencia del diesel. Está directamente relacionada con la productividad del ferrocarril, su eficiencia y grado de utilización. La característica exterior se corresponde para el ajuste a 650 kW.

Como puede observarse figura 32, la fuerza máxima que puede desarrollar la locomotora TEM-2TK rediseñada, con peso adherente de 1120 kN en la puesta en marcha en la pendiente de cálculo del tramo estudiado es de 310 kN.

El régimen ilimitado de esta locomotora fue diseñado a 3,2 m/s, lo que aumenta la su productividad respecto a la TEM-2TK original que es de 2,63 m/s.

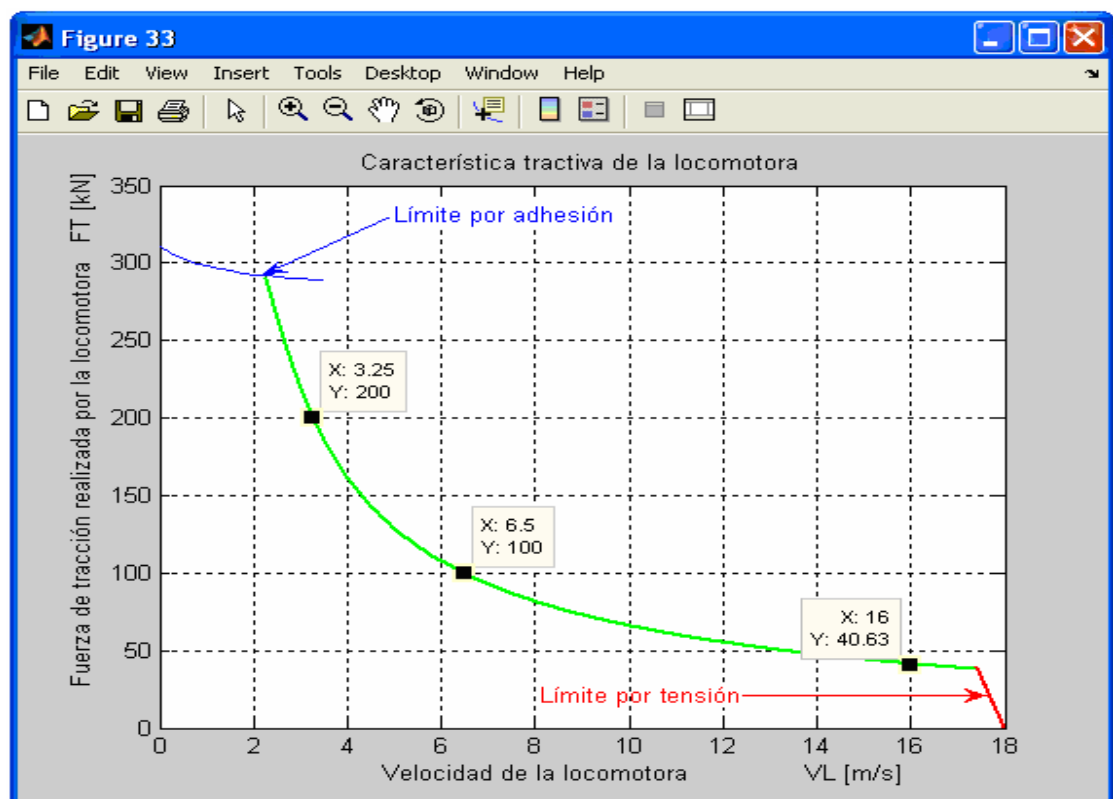


Figura 33. Característica tractiva de la locomotora propuesta.

Capítulo I I. CÁLCULOS, SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

2.16 Conclusiones parciales del Capítulo I I.

1. El relieve, el trazado y la categoría del ferrocarril de Nicaro demandan una densidad de traviesas no inferior a 1680 traviesas/km en rectas y de 1760 traviesas/km en curvas, acorde con la NRMT 2149/2001[82];
2. El riel R-43 para planes de producción superiores a 32 tm diarias de Ni+Co y velocidades superiores a 5,5 m/s, no cumple la vida útil normada, alcanzando desgaste de desecho en el entorno de 7,8 años. Por eso debe ser eliminado de la vía principal.
3. El riel más recomendado para la vía principal es el R-50.
3. El radio más característico del trazado del ferrocarril de Nicaro es 290 m, lo que origina desgaste adicional de ruedas y rieles, por ser muy inferior a lo establecido por la norma.
4. Los lugares que con más frecuencia demandan cambio de rieles, son los ubicados en curvas con radios inferiores a 300m y con pendientes.
5. Las locomotoras TEM-2TK, pueden garantizar el tráfico de transportación demandado por el plan hasta 42 t diarias de Ni+Co.
6. La cantidad necesaria de locomotoras demandadas con el nuevo escenario productivo es de 4 y la máxima es de 5 unidades.
7. El incremento del plan por encima de las 42 tm. diarias de Ni+Co, manteniendo la misma formación de trenes, demanda un aumento de la cantidad de pares de trenes diarios.
8. Si se quiere mantener la misma cantidad de pares de trenes actual, para planes mayores a 42 tm/d de Ni+Co, el aumento de la transportación deberá asumirse incrementando el número de vagones en la formación, para lo cual se necesitan locomotoras más potente.
9. Las locomotoras de cuatro ejes, en igualdad comparativa (Peso y Potencia) son más baratas que las de seis ejes en alrededor de un 10% y poseen mejor dinámica de marcha, por lo que son recomendadas en perfiles menos fuertes y muy sinuosos.
10. Las locomotoras de seis ejes poseen ventajas sobre las de cuatro, pues para una misma carga por eje, poseen mayor peso adherente y por ende, mayor fuerza de tracción y menor velocidad mínima continuada, por lo que su uso es recomendado en perfiles montañosos fuertes, pero necesariamente menos sinuosos, con radios superiores a 400 m.

Capítulo I I I. ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN

- 3.1 Introducción.
- 3.2 Ahorro de costos en inversión.
- 3.3 Ahorro de costos de mantenimiento.
- 3.4 Ahorro de costos en mano de obra.
- 3.5 Ahorro de costos por las averías.
- 3.6 Ahorro por reducción de las afectaciones.
- 3.7 Evaluación de las tres variantes de inversión.
- 3.8 Evaluación de los beneficios medioambientales
- 3.9 Evaluación del efecto económico general.
- 3.10 Conclusiones parciales del Capítulo III.

3.1. Introducción.

En este capítulo se estudia la factibilidad de la investigación con la evaluación económica y medioambiental de los resultados esperados, en cuanto al dimensionamiento correcto de los rieles y las locomotoras del ferrocarril de la RRL. Se hace una evaluación del VAN y el TIR de la inversión de renovación de los rieles R43 por R50 y compra de dos locomotoras. Se utilizó para ello la metodología propuesta por el Dr RODRÍGUEZ DOMÍNGUEZ, Jesús Israel, 2007[102]. Se asumen como ingresos, los ahorros esperados de la implementación de las recomendaciones. En este Capítulo también hacemos la evaluación del efecto medioambiental, aplicando la metodología del Dr Carlos Izaguirre Bonilla.

3.2 Ahorro en costos de inversión.

1. Locomotoras: La compra a precio CIF Habana, de una locomotora universal de 4 ejes (FIGUERAS, *Cuaderno de notas*. 1984-2008[27]), en el mercado internacional tiene costo un específico (referido a la potencia) de $CA1 = \$1500.00 \text{ CUC/kW}$; (221)

Una locomotora de seis ejes en igualdad de condiciones (igual potencia y peso) es 10% más cara que una similar de cuatro ejes. (op. cit. y también ver ofertas anexos 16 y 17).

Partiendo de esto, la inversión en una locomotora con $N = 800 \text{ kW}$ tendrá un valor de:

$$PA = CA1 * N = 880 * 1500 = 1\,320\,000.00 \text{ CUC.} \quad (222)$$

$$1. \text{ Locomotora } B_0 \text{—} B_0: \text{ Precio de inversión } PA1 = PA = 1\,320\,000.00 \text{ CUC.} \quad (223)$$

$$2. \text{ Locomotora } C_0 \text{—} C_0: \text{ Precio de inv. } PA2 = PA1 + 0.1 * PA1 = 1\,452\,000.00 \text{ CUC.} \quad (224)$$

$$\text{Para una vida útil de la locomotora de } VU1 = 20 \text{ años, tendremos,} \quad (225)$$

$$\text{Ahorro en inversión relativo a la vida útil de la locomotoras } A1 = (PA2 - PA1) / VU1 \quad (226)$$

$$A1 = 6\,600.00 \text{ CUC.} \quad (227)$$

Lo anterior significa que al comprar una locomotora de 800 kW de cuatro ejes en lugar de una con seis, estamos ahorrando el equivalente a \$ 6 600.00 CUC/u-año de su vida útil en cada unidad comprada. Para 2 locomotoras, equivale a un ahorro $A2 = \$ 13\,200.00$ (228)

Capítulo I I I. ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN

2. Relacionados con las vías férreas: La sustitución de 15 km (rieles R-43 y R-50 de 12,5 m) por rieles R-50 de 25 m longitud, nos da el siguiente ahorro:

El costo específico de 1 tm de rieles R-50 de 12,5m es $CA3 = \$1144.00 \text{ CUC/ tm}$ (229)

y de rieles de 25m $CA4 = \$1110.00 \text{ CUC/ tm}$ (230)

(Fuente: Oferta № 89-04-086/304, figura 44 en Anexo 14); en 1 km de vía hay 100 tm de rieles R-50, entonces el precio CIF Habana de 15 km de vía será:

1. Rieles R-50 de 12,5 m:

$$PA3 = CA3 * 100 * 15 = 1144.00 * 100 * 15 = 1\,716\,000.00 \text{ CUC.} \quad (231)$$

2. Rieles R-50 de 25 m:

$$PA4 = CA4 * 100 * 15 = 1110.00 * 100 * 15 = 1\,665\,000.00 \text{ CUC.} \quad (232)$$

Ahorro de costos por inversión en rieles

$$A3 = PA3 - PA4 = \$51\,000.00 \text{ USD.} \quad (233)$$

Ahorro en costos por inversiones de rieles relativo a cada año de la vida útil de la vía.

$$A4 = (PA3 - PA4) / VU2 = 51\,000.00 / 15 = \$3\,400.00 \quad (234)$$

3.3 Ahorro en costos de mantenimiento. (Fuente: FIGUERAS [27] y anexos 19 y 20)

La locomotora de cuatro ejes respecto a la de seis nos proporciona ahorros de costos en mantenimiento, porque disminuye en 30% los descarrilamientos, posee 33% menos motores y pares de ruedas, con el correspondiente ahorro de mano de obra y materiales de mantenimiento, 42% en la rectificación y desecho de zunchos de ruedas, 30% en zapatas de freno, 35% en el desgaste global y equivalente de los rieles, y en mano de obra, pues se simplifica en 33% el volumen de los mantenimientos (la parte eléctrica y de herrajes) el volumen de trabajo.

Ahorro de costos en compra de zunchos de ruedas.

➤ Ahorra zunchos de ruedas, por dos razones:

1. Normalmente emplea un 33 % menos de zunchos que una similar de seis ejes.

2. En la explotación desgastan los zunchos un 42% menos que las similares de seis ejes.

De lo anterior podemos afirmar, sin dejar margen a error, que la locomotora de cuatro ejes consume un 35% menos de zunchos, de ahí proviene el ahorro por su compra.

Precio de adquisición CIF Habana, del zuncho: $PA5 = \$848.50 \text{ CUC/u.}$ (235)

Una locomotora de seis ejes como promedio en Nicaro posee consumo específico de zunchos de $CEZ = 12/18,3 \text{ u/mes} = 0.656 \text{ u/mes} = 7,87 \text{ u/año} = 8 \text{ u/año}$ (236)

Capítulo I I I. ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN

La demanda equivalente para dos locomotoras será: $N3 = 16 \text{ u.}$ (237)

Ahorro en compra de zunchos $AC5 = PA5 * N5 * 35\% = 848,5 * 16 * 0,35;$ (238)

$AC5 = \$ 4 480. 00 \text{ CUC/año.}$ (239)

Ahorro de costos en rectificación del perfil de zunchos de ruedas.

Las locomotoras de cuatro ejes desgastan un 42% menos la pestañas de los zunchos que las locomotoras de seis ejes, por eso en esa misma proporción disminuyen los costos por la rectificación de los zunchos, a la vez que se alarga el tiempo entre rectificadas.

El precio de rectificación de zunchos $PA6 = \$ 13,72 \text{ CUC/u}$ (240)

y $PA5 = \$274.40 \text{ CUP}$ (241)

(Fuente: Factura Wo 1-10, ver Figura 33, anexo 18).

La demanda anual como ya vimos en (202) $N3 = N6 = N7 = 16 \text{ u.}$

Ahorro de costos en rectificación MLC: $AC6 = PA6 * N6 * 42\% = 13,72 * 16 * 0,42;$ (242)

$AC6 = \$ 92,20 \text{ CUC/año.}$ (243)

Ahorro de costos en rectificación MN: $AC7 = PA7 * N7 * 42\% = 274,40 * 18 * 0,42;$ (244)

$AC7 = 1 843,97 \text{ CUP/año.}$ (245)

Ahorro de costos en compra de zapatas.

La locomotora de cuatro ejes disminuye en 30% el consumo de zapatas de freno. Para el costo por zapata, con código № 104 63030004530000 31(Fuente: FIGUERAS [27]), de:

$PA8 = \$ 18,50 \text{ CUC/u}$ (246)

Y $PA9 = \$5.00 \text{ CUP/u}$ (247)

Consumo anual $N8 = 900 \text{ Uds.}$ (Fuente: FIGUERAS MÉNDEZ, Joaquín. [27]) (248)

Para un parque efectivo promedio de $NE = 5 \text{ locomotoras, (op. cit.)}$ (249)

La disminución anual de zapatas por la introducción de dos locomotoras $B_0 \text{—} B_0$:

$N9 = 2 * N8 / NE * 0.30 = 2 * 900 / 5 * 0,3 = 216 \text{ u/año}$ (250)

Ahorro en costos de zapatas MLC: $AC8 = PA8 * N9 = 18,50 * 108;$ (251)

$AC6 = \$ 1 998.00 \text{ CUC/año.}$ (252)

Ahorro de costos en rectificación en MN: $AC9 = PA9 * N9 * 42\% = 5,00 * 108;$ (253)

$AC9 = \$ 540, 00 \text{ CUP/año.}$ (254)

Ahorro de costos en compra de rieles.

La locomotora de cuatro ejes se descarrila 35% menos que la de seis, que unido a su menor incidencia sobre la vía, disminuye en 6% el consumo de rieles:

Capítulo I I I. ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN

Ahorro en rieles por desgaste y averías $N_{10} = 20$ u/año, (255)

Precio a un 50% de su vida útil $P_u = 355.00$ CUC/u (256)

Ahorro en rieles $AC_{10} = P_u * N_{10} * 0.06 = 355 * 20 * 0.06$; (257)

$AC_8 = \$426.00$ CUC/año. (258)

Ahorro de costos en traviesas.

La locomotora de cuatro ejes, como se descarrila 35% menos que la locomotora de seis ejes, la introducción de dos en un parque de 5, reportará 8% de ahorro de traviesas.

Partiendo de los datos de la tabla 33, (Ver anexo 18), tenemos que el promedio ponderado de descarrilamientos anual es $N_{11} = 367$ descarrilamientos/ año. (259)

El tiempo de afectación a la transportación promedio ponderado anual es de,

$H_{at} = 831$ h. (260)

El índice de rotura de traviesas en descarrilamientos es de,

$I_{rt11} = 0.32$ u/avería. (261)

El precio equivalente: Precio medio ponderado, entre todas las traviesas instaladas en un año de hormigón, metálicas y madera, (ver Factura, Anexo 13) es,

$PA_{11} = 35.00$ CUC. (262)

Cantidad de traviesas ahorradas con la introducción de 2 locomotoras de cuatro ejes:

$N_{12} = I_{rt11} * N_{11} * 0.305 * 0.08 = 2,86$ traviesas/año. (263)

Ahorro anual $AC_{11} = N_{12} * PA_9 = 2,86 * 35.00$; (264)

$AC_{11} = \$100.10$ CUC/año (265)

3.4 Ahorro en mano de obra.

➤ La manutención de una locomotora de cuatro ejes representa disminución en un 10 % en mano de obra en mantenimiento eléctrico, herrajes y trucks, que sobre la base de un salario medio en MN de $S_{12} = \$320.00$ CUP/mes (266)

➤ Salario medio en MLC de $S_{13} = \$6.00$ CUC/mes, que significan, (267)

Ahorro de salarios en divisas:

$AC_{12} = 530.00$ CUC/año. (268)

Ahorro de salarios en moneda nacional:

$AC_{13} = \$23\,700.00$ CUP/año. (269)

Capítulo I I I. ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN

Ahorro de costos en averías.

El empleo de dos locomotoras de cuatro ejes en lugar de dos de seis, representará una disminución en un 35% los descarrilamientos por locomotoras, sobre la base de $N_{10} = 367$ descarrilamientos anuales, con $H_{at} = 831$ horas de afectación a la transportación de mineral, cada descarrilamiento gasta un volumen de trabajo medio $V_{tm} = 4,84$ hombres-h, (270)

con salario medio en moneda nacional de $S_{14} = \$1.82$ CUP/h (271)

y $S_{15} = \$0,034$ CUC/h, (272)

ocurre el deterioro de $N_{16} = 0.08$ rieles, (273)

$N_{17} = 0,32$ traviesas. (274)

(Tomado del promedio ponderado vs. plan entre los años 1995 – 2005, ver Tabla 33, en el Anexo 18). Esto significa:

Horas total descarrilamientos ahorradas (según tabla 11), $A_t = H_{at} * 0.305 * 0,35$ (275)

$A_t = 820 * 0.305 * 0.35 = 86,4$ h/año, que implican un ahorro en mano de obra de (276)

Ahorro de divisas en mano de obra por disminución de las afectaciones

$AC_{14} = \$140.00$ CUC/ año; (277)

Ahorro de moneda nacional en mano de obra por disminución de las afectaciones.

$AC_{15} = \$1\,872.00$ CUP. (278)

Ahorro en rieles de $AC_{16} = A_t * N_{16} * PA_{11} = 86,4 * 0,08 * 350$; (279)

$AC_{16} = \$2\,450.00$ CUC/año. (280)

Ahorro en traviesas de $AC_{17} = A_t * N_{17} * PA_{11} = 86,4 * 0,32 * 350$; (281)

$AC_{17} = \$9\,676,80$ CUP/año. (282)

3.6 Ahorro por reducción de la afectación a la transportación.

Al disminuir los descarrilamientos imputables a locomotoras en 30%, esto significa disminuir en 10% las afectaciones a la transportación, lo que se traduce en un aumento de la cantidad de mineral puesto en fábrica para un mismo período de tiempo con dichas afectaciones. El monto en dinero de esa diferencia es el ahorro aportado por la eliminación de esas afectaciones.

Como base de cálculo se tomó un plan de transportación de mineral diario equivalente a:

$N_{vh} = 5$ vagones/h, (283)

o sea $N_{vd} = 120$ vagones/día, (284)

Para $LN_i = 1.05$ con coeficiente histórico promedio ponderado de la transportación igual a,

Capítulo I I I. ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN

$$K_t = 4.5 \text{ vagones de mineral/tm de Ni+Co.} \quad (285)$$

El precio fue escogido del sitio WEB del MINBAS, promedio histórico para los últimos cinco años, $PA_{18} = \$ 9\,600.00 \text{ CUC/TM}$, (Ver figura 49 anexo 21, pág. 129), (286)

esto quiere decir que el precio calculado del vagón de mineral es

$$PA_{19} = \$ 2\,133.00 \text{ CUC.} \quad (287)$$

De las tablas 11 del Capítulo II y la 26 del anexo 17, tenemos que las afectaciones entre vía y locomotoras alcanzan el 71.6% y equivalen a un tiempo de afectación anual de

$$Hat_2 = Hat * 0,716 = 593 \text{ h/año.} \quad (288)$$

Para un plan de producción con una demanda de $N_{vh} = 5 \text{ vagones/h}$, en el tiempo de afectación anual equivalen a:

$$N_{va} = N_{vh} * Hat_2 = 5 * 593 = 2\,965 \text{ vagones, que a su vez representan un,} \quad (289)$$

$$\text{Ahorro por disminución afectaciones: } AC_{18} = N_{va} * PA_{19} * 0.10 = 2\,965 * 2\,133 * 0.10 \quad (290)$$

$$AC_{18} = \$ 632\,434,50 \text{ CUC/año.} \quad (291)$$

El resumen de los cálculos realizados está recogido en la tabla 23.

Tabla 23. Desglose del cálculo económico.

Nº	Conceptos de ahorro	CUC	CUP
1	En la inversión en 2 locomotoras $A_1 =$	\$ 13 200.00	
2	En la inversión en 15 km de rieles $A_2 =$	\$ 3 400.00	
3	Ahorro total inicial de inversión $A =$	\$ 16 600.00	
4	Costos de Mantenimiento $ACM =$	\$ 19 222.00	\$ 2 384.00
5	Costos de averías y afectaciones $ACA =$	\$ 632 434.00	
6	Mano de obra general $MO =$	\$ 670.00	\$ 25 572.00
	Ahorro total $At_1 =$	\$ 665 526.00	\$170 454.00
	Ahorro total $At_2 =$	\$ 655 726.00	\$170 454.00
	Ahorro total $At_3 =$	\$ 668 926.00	\$170 454.00

3.7 Evaluación de las variantes de inversión.

Evaluaremos tres variantes de inversión:

1. Inversión en el reemplazo de dos locomotoras Co—Co por dos locomotoras Bo—Bo.
2. Inversión en el reemplazo de 15 km de vías.
3. Ambas inversiones a la vez.
4. Para los cálculos se toman en cuenta los valores en divisas y no los totales.

Como podemos ver en la tabla 23, el ahorro total si descontamos los desembolsos en rieles y locomotoras, para la variante 3 el $At_3 = \$ 668\,926$ por ahorros, que está muy por encima del flujo anual proyectado en la tabla 24, lo que deja posibilidad para otras inversiones.

Capítulo 3. VALORACIÓN TÉCNICO ECONÓMICA.

Tabla 24. Flujos de caja, VAN y TIR para las variantes de inversión.

Nº	A M\$	FLUJOS NETOS DE CAJA POR AÑO Q[k\$]															VAN k\$	TIR %
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
1	2,63	500	500	500	500	500	400	400	400	400	400	300	300	300	300	300	1440,92	14,66
2	1,67	400	400	400	400	400	175	175	175	175	175	150	150	150	150	150	918,62	16,40
3	4,30	950	950	950	950	950	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	3001,68	17,08
S1	2,63	-2158	-1713	-1293	-897	-524	-242	24	275	512	735	893	1042	1183	1316	1441	—	—
S2	1,67	-1293	-937	-601	-284	15	138	255	364	468	566	645	719	790	856	919	—	—
S3	4,30	-3404	-2558	-1761	-1008	-298	125	524	900	1255	1590	1906	2205	2486	2751	3002	—	—

1. Inversión solamente en dos locomotoras.
2. Inversión solamente en 15 km de vía.
3. Inversión en locomotoras y 15 km de vías a la vez.

Premisas:

1. Se toma una tasa de interés de mercado de 6%.
2. El tiempo de vida útil actual sin las inversiones $TVU_A = 9,5$ años. (258)
3. El tiempo de vida útil de las inversiones $TVU_i = 15$ años. (259)
4. Todos los intereses se incorporan a partir del momento 1 hasta su cancelación.

Cálculo del VAN y el TIR.

Estos cálculos por lo largo y trabajoso de las fórmulas lo hacemos en una hoja de EXEL, por las fórmulas siguientes:

Calculo del VAN y el TIR para cada variante.

$$VAN = -A + \sum Q_j / (1 + k)^j; \forall j \in n = 1, 2, \dots, TVU_i. \quad (260)$$

$$TIR = r \equiv VAN = 0; A = \sum Q_j / (1 + r)^j, \quad (261)$$

Los resultados de los cálculos están descargados en la tabla 24.

Cálculo del tiempo de recuperación del capital invertido.

Se calcula por la fórmula.

$$TRC_i = UASN_i + SUAN_i / UtAS_i; \text{ (Según, Rodríguez Mesa, 2002[103])} \quad (262)$$

Donde, TRC_i —Es el tiempo de recuperación del capital de la i- Inversión, en [k\$];

$UASN_i$ —Es el último año con saldo negativo de la Inversión -i, en [años];

$SUAN_i$ —Último saldo negativo de la inversión- i, en [k\$]; $UtAS_i$ —Utilidades del año siguiente de inversión-i.

Capítulo I I I. ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN

De la tabla 24 obtenemos los datos de la tabla 25 para cada una de las inversiones.

Tabla 25. Datos para calcular TRC para cada variante.

Inv	UASN	SAUN	UtAS	TRC	TRC _i /TVU _i
1	6	242	24	6,10	40,67%
2	4	284	15	4,18	27,87%
3	5	298	125	5,2	34,66%

Basados en los resultados del TIR y VAN la variante tres es la más recomendada para invertir al tener mayor TIR y VAN, aunque desde el punto de vista del TRC y TRCR la dos sea la mejor. (Según recomendaciones de RODRÍGUEZ, 2002[102 y 103]).

3.8 Evaluación de los beneficios medioambientales.

Dos situaciones favorables se obtienen de la explotación de locomotoras de cuatro ejes, relacionadas con el medio ambiente.

1. Al tener 33% menos ejes que las de seis, en esa misma proporción contaminarán menos de limallas las vías férreas y el medio ambiente. Si las locomotoras compradas además están equipadas de freno electrodinámico, el consumo tanto en zapatas de locomotoras como en zapatas de vagones y la contaminación por limallas en la vía disminuyen un 60 %. Las zapatas de locomotoras, según plano SKFC-337, nuevas tienen un peso de,

$$P_{zn} = 9 \text{ kg}, \quad (263)$$

al desecharse pesan, 2,9 kg, lo que implica que en la vía se vierte un peso equivalente de

$$P_{zlim} = 6,1 \text{ kg/zapata, en forma de limalla} \quad (264)$$

Para un consumo anual de $N_8 = 900$ u/año (Ver dato 214) la introducción de dos locomotoras de dos ejes trae una disminución del 33 % del consumo, que en un parque de, $NE = 5$ locomotoras (dato 215), equivale a un ahorro en zapatas (dato 216) $N_9 = 216$ u/año, lo que implica un ahorro en vertimiento de limallas al medio ambiente equivalente a,

$$Avl = N_9 * P_{zlim} = 1,32 \text{ tm de limallas. (No se tuvo en cuenta las de las ruedas)}$$

2. Al descarrilarse menos en un 35% que las de seis ejes, se invade menos al medio, pues en el 5% de los descarrilamientos se necesitan movimientos de tierra y en casi la totalidad de ellos ocurren vertimientos de mineral al suelo, que nunca es recuperado en su totalidad. El promedio de vertimiento de mineral anual es de 150 tm, o sea tres vagones de mineral. El movimiento de tierra y otras alteraciones que se provocan al medio ambiente está en el orden de los 1200 m³.

Capítulo I I I. ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN

3.9 Cálculo del efecto económico general.

El efecto económico de cada una de las variantes viene dado en la tabla 26.

Tabla 26. Resumen del cálculo del efecto económico general de las tres variantes.

Nº	Conceptos de ahorro	USD	CUP	Total	VAN	TIR	TRCR
1	En la inversión en 2 locomotoras	\$ 13 200.00		\$ 13 200.00	k\$	%	%
2	En la inversión en 15 km de rieles	\$ 3 400.00		\$ 3 400.00	—	—	—
3	Ahorro total inicial de inversión	\$ 16 600.00		\$ 16 600.00	—	—	—
4	Costos de Mantenimiento	\$ 19 222.00	\$ 2 384.00	\$ 21 606.00	—	—	—
5	Costos de averías y afectaciones	\$ 632 434.00		\$ 632 434.00	—	—	—
6	Mano de obra general	\$ 670.00	\$ 25 572.00	\$ 26 242.00	—	—	—
	Ahorro total At1 =	\$ 665 526.00	\$170 454.00	\$ 835 980.00	1322,00	13	40,67%
	Ahorro total At2 =	\$ 655 726.00	\$170 454.00	\$ 826 180.00	903,00	13,5	33,3%
	Ahorro total At3 =	\$ 668 926.00	\$170 454.00	\$ 839 380.00	2292,00	13,5	36,0%

3.10 Conclusiones parciales del capítulo III.

1. Las tres variantes son aplicables, pues tienen VAN positivo y TIR superior a +12%, según recomendaciones ONUDI (Fuente: [Economía\MetodologíadeEstudio\Factibilidad.htm](#)).
2. La variante de mejores resultados es la tres por poseer mayores TIR y VAN, aunque la segunda posee menores TRC_i y TRC_iR. (RODRÍGUEZ, 2002 Y 2007[102 y103]).
3. El tiempo de recuperación del capital relacionado (TRC_iR) de todas las variantes es inferior al 45% de la vida útil exigido, o sea, todas son aplicables. (op. cit.).
4. Las tres variantes dan resultados medioambientales positivos, pero el de mayor efecto es el de la tercera.

CONCLUSIONES

1. Las características de los rieles y locomotoras más recomendables para Nicaro están recogidas la tabla 4, para el riel R-50 y anexo 9 para la locomotora.
2. La potencia de la locomotora en función del plan de producción es directamente proporcional a este y posee carácter lineal. Su valor recomendado es 700 a 760 kW.
3. El peso métrico de los carriles como función de la velocidad, carga por eje y tráfico bruto anual posee carácter exponencial. Su valor más recomendable para Nicaro es 50 kg/m.
4. Por la evaluación ambiental se precisó una disminución de la carga contaminante al M.A. en 1,2 tm/año de acero y 21 237 M³/año de tierra y otros.
5. Con la aplicación del trabajo se mejora la productividad en 8% y la eficiencia en 0,84%, que representa un ahorro de combustible de 17 515,2 kg/año.
6. El efecto técnico económico avalado en este estudio arroja \$ 668 926,00 CUC/año y \$170 454.00 CUP)/año, por concepto de combustible dejado de consumir, gastos de mantenimiento y en pérdidas.

RECOMENDACIONES

1. Dar continuidad a este trabajo en los siguientes campos:
 - Mejora del aprovechamiento de la potencia de las locomotoras.
 - Control y mejora del desgaste de las ruedas del material rodante
2. Las características más recomendables de las locomotoras y los rieles de Nicaro se ofrecen en el Anexo 9.
3. Llevar el mismo al MINAZ y otras empresas ferroviarias de la red nacional.
4. Emplear este trabajo como material de estudio para motivar a los nuevos profesionales hacia la rama ferroviaria.

BIBLIOGRAFÍAS Y OTRAS FUENTES CONSULTADAS.

1. AIZINBUD, S. Y. *Explotación de locomotoras*. Moscú: Editorial Transporte, 2000. 148p. (ruso)
2. AMELÍN, S.V y ANDREIEV, G.E. *Construcción y reparación de vías férreas. Realidades y tendencias*. Moscú: Editorial Transporte, 2004. 260 p. (ruso).
3. ASTAJ, P.N. *Reglas para los cálculos de tracción*. Moscú: Editorial Transporte, 2000. 256 p. (ruso).
4. *Balances Económicos Dpto. Ferrocarril de Nicaro. 2000 al 2005*.
5. BALLARD, R. I. *Diseño de estructuras de bajo mantenimiento para las vías férreas de Cuba*. CEDIT. MITRANS. La Habana, 2001. 180p. (español).
6. BECKMANN, McGuire, et al. *Economía del transporte*. Madrid: Editorial Aguilar S.A. 1989. 274 p. (español).
7. BEJERANO, Raúl Orestes. (Compendio). *Mantenimiento y reparación de vías férreas*. La Habana: Editorial Pueblo y educación, 1998. 122 p. Cuba.
8. BLOJIN, E.P. *Dinámica del tren*. Moscú: Editorial Transporte, 2002, 223 p. (ruso).
9. BOLDOV, N.A. *Material rodante termoeléctrico*. Moscú: Tr-te., 1998. 360 p. (ruso).
10. BORZOV, P.I., et al. *Material rodante y principios de la teoría de tracción de trenes*. Moscú: Editorial Transporte, 2000. 352 p. YDK 629.4. 31802-139. (ruso).
11. CASILLAS, A.L., et al. *Manual de cálculos de taller*. La Habana, Ediciones revolucionarias, 1991. 646 p.
12. CASTROMÍN, A.M. *Optimización de la conducción de trenes*. Moscú: Editorial Transporte, 2001. 236 p. (ruso).
13. CHIYENKO, I. M. *Manual de la técnica de conversión de potencia*. Kiev: Editorial Técnica, 1998. 458 p. (ruso).
14. COELLO VELÁZQUEZ, Alfredo. *Cuaderno personal y conferencias de la asignatura "Metodología de la Investigación"*. Moa: ISMM, 2007. Cuba.
15. DENISOVA, Tatiana Vacilievna. *Reparación del equipamiento eléctrico de las locomotoras*. Moscú: Editorial Transporte, 1980. 295 p. (ruso).
16. DIEIEV, V.V. *Cuaderno personal de la asignatura "Teoría de tracción de trenes"*. Moscú: MIIT. 1983. (ruso).
17. DIEIEV, V.V. *Instrucciones metodológicas para trabajos de tracción de trenes*. Moscú: MIIT, 2000. 64 p. (ruso).

18. DIEIEV, V.V., et al. *Material rodante y tracción de trenes*. Moscú: Editorial Transporte, 2002. 368 p. YDK 629.42.31802-119. (ruso).
19. DMITRIEIEV, V. A. *Efectividad de electrificación de vías férreas y el uso de la tracción diesel*. Moscú: Editorial Transporte, 2000. 371p.(ruso)
20. DOBRINSKII, Vladimir Alexandrovich. *Cómo está construida y trabaja la locomotora*. Moscú: Editorial Transporte, 2000. 367 p. (ruso).
21. DUNCAN, Susana. *Tecnologías de punta en seguridad ferroviaria.[Memorias del X Congreso Latinoamericano de Ferrocarriles(CD)]*. Habana 2000. 41 p. (inglés)
22. "Elementos semiconductores de potencia en los circuitos eléctricos de las locomotoras". Trabajos científicos del MIIT. Moscú: MIIT 2003. 106 p. YDK.625.282-843.6-83:621.3.013.8. (ruso).
23. Enciclopedia Encarta, 2006, 2007 y 2008. (español)
24. "ETT" Revistas № 1 al 12 del 2000, 6 del 2002, 9 del 2004. Moscú. En ruso.
25. EVDOKIMOV, F.E. *Fundamentos teóricos electrotecnia*. Moscú: Editorial Energía, 1999. 560 p. (ruso).
26. *Ferrocarriles Chinos, CNR 2005*. Disponible en: <http://www.cnrgc.com>. En Inglés.
27. FIGUERAS MÉNDEZ, Joaquín. *Cuaderno de notas personales*. Mayarí, 1984-2008.
28. FIGUERAS MÉNDEZ, Joaquín. *Modernización integral de locomotoras TEM2TK*. Premio Relevante Provincial. Holguín, 1992.
29. FILIPPOV, M.M. et al. *Ferrocarriles. Curso. General*. Moscú: Editorial Transporte, 2003. 256 p. (ruso)
30. FRANCISCO MARTÍNEZ, Manuel. *Elaboración de las bases del sistema de mantenimiento de la línea central Habana – Santiago de Cuba*. Tesis Doctoral. Moscú 1990. (ruso)
31. FUFRIANSK, N.A. SHEVSHUK, A.B. y MSc. BEVZENKO, A.N. *Desarrollo de la tracción con locomotoras*. Moscú: Editorial Transporte, 2002, 304 p. (ruso).
32. GAKKEL, Ekaterina Yakovlevna, et al. *Proyección de sistemas automáticos de control y protección de locomotoras*. Moscú, Transporte 2001. 127 p. (ruso).
33. GAKKEL, Ekaterina Yakovlevna y Dr.Sc. RUDAYA, Ksieñia Ivanovna. *Máquinas eléctricas y avituallamiento eléctrico de las locomotoras*. Moscú: Editorial Transporte, 2004. 256 p. (ruso).
34. GARCÍA RENTÉ, Manuel. *Cuaderno personal y Conferencias Científicas: "Mecánica compleja, Física trialéctica"*. Moa .ISMM, 2007. Cuba.

35. GOLOBATII, Alexander Terentievich, et al. *Electro material rodante, explotación, confiabilidad y reparación*. Moscú: Editorial Transporte, 2003. 352 p. (ruso).
36. GUIBERT HURTADO, Julio. *Tracción de trenes*. Cuba. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1987. 160 p.
37. GRAY, Alexandr; WALLACE, G.A. *Fundamentos teóricos y aplicaciones prácticas de Electrotecnia*. España.Barcelona 1988.720 p.
38. HERNÁNDEZ, Amalio. *Transportes, realidades y tendencias*. Editorial Ciencias Sociales. La Habana 2000.
39. *Innovations for rail way. ABB Daimler Benz*. Buenos Aires: Ediciones Ferroviarias, 2005. 8 p. Disponible en: <http://www.adtrnz.com>. (inglés).
40. INOTZENTSEV, V.G. *Desarrollo de las principales recomendaciones para el diagnóstico técnico de locomotoras*. Trabajo científico № 253 del VNIIT. Moscú: Editorial VNIIT, 1981. 65 p. (ruso).
41. "IRJ" Revistas № 3, 6 y 9 del 2002, №1 al 12 del 2004. Londres. (inglés).
42. IRÍA Matsumoto. *Especificaciones y dibujos de la NABCo*. Japón. Kobe, NABCo, LTD. 1999. 103p. (inglés).
43. ISAAKIAN, Oganés Nikolaievich. GURSKII. Pavel Antonovich. *Cálculos de tracción*. Moscú: Editorial MPC 1959. 360 p. (ruso)
44. IVANOV, A.V. *Máquinas eléctricas*. Moscú: Editorial Energía, 2001. 560 p. Rusia.
45. JAZEN, M.M. *Energética de locomotoras*. Moscú: Editorial Transporte, 2002. 207 p.
46. JOMICH, S. G., et al. *Diagnóstico y regulación de locomotoras*. Moscú Editorial Transporte, 1997. 222 p. (ruso).
47. KAMÁIEV, Alexander Alexeievich et al. *Construcción, cálculo y diseño de locomotoras*. Moscú: Editorial Mashinostroenie, 2003. 351 p. (ruso).
48. KANTOR, I. I ; PAUL, V.P. *Principios del diseño y construcción de vías férreas*. Moscú: Editorial Transporte, 2003. 237p. (ruso).
49. KOLIESHNIK I.K. et al. *Transmisiones de locomotoras en corriente alterno-continua*. Moscú: Editorial Transporte, 2002. 152 p. Ruso).
50. KOPILOV, Igor Petrovich. *Proyección y cálculo de máquinas eléctricas*. Moscú: Editorial Transporte, 2000. 496p. (ruso).
51. KURISHEV, A., et al. *"Análisis y fundamentación de la rehabilitación ferroviaria de la RRL" CP.01-00M-0016*. Moa, CPUNI, 1976. (ruso)

52. KUZMICH, Vadim Dmitrievich; VORODULIN, Yosiv Peisajovich; et al. *Locomotoras*. Moscú: Editorial Transporte, 2002. 317 p. (ruso).
53. LAMALLE, U. y LEGEIN, F. *La Locomotora*. Antidio Loret (trad.) Tercera Edición. Barcelona: Editorial Gustavo Gilí, 1993, 352 p.
54. LEGRÁ LOBAINA, Arístides A.; SILVA DIÉGUEZ, Oris R. *La Investigación Científica: Conceptos y Reflexiones*. Moa: ISMM, 2008. 415 p. Cuba.
55. LEMA, G.M. *Reconstrucción y Pruebas de locomotoras GM*. Buenos Aires. Editorial Ferroviaria, 2004. 60 p. Argentina. Consultar a: eltomec@interserver.com.ar.
56. LEVITTSKII, A.L., et al. *Técnicas de seguridad para la explotación del material rodante*. Moscú: Editorial Transporte, 2002. 96 p. (ruso).
57. LICITSIN, Evguenii Vacilievich. *Cuaderno personal de la asignatura "Circuitos eléctricos de locomotoras"*. Moscú: MIIT, 1982. (ruso).
58. MACHÍN PURÓN, Livia. *Vías Ferroviarias*. La Habana: Editorial Ciencias Sociales, 1995. 288 p. (español).
59. MACHÍN PURÓN, Livia. *Proyección de Vías Férreas*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1984. 236 p. (Español).
60. *Manual para la explotación de la locomotora diesel eléctrica TEM-2TK. Reglas de la fábrica productora*. Moscú: Editorial Vnieshtorgoizdat, 1998. 312 p. (Ruso).
61. MALOZIOMOV, Nikolai Alexandrovich, et al. *Organización y Planificación de Empresas Ferroviarias*. Tercera Edición. Moscú: Editorial Transporte, 2003. (ruso).
62. MARRERO RAMIREZ, Secundino. *Compilación de conferencias de la asignatura "Modelación y simulación"*. Moa: ISMM, 2007. Cuba.
63. MARX, Carlos. *El Capital, 3 t*. La Habana: Editorial: Ciencias Sociales, 1986.
64. *Material Rodante*. Dirección General ECT. Juan M. Castellat (ed.). MES. Ciudad Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1990. 372 p.
65. MAZOLA COLLAZO, Nelson. *Manual del Sistema Internacional de Unidades*. La Habana: Editorial Pueblo y educación, 1991. 274p.
66. MEDEL, Vladimir Borisovich, et al. *Material Rodante del ferrocarril eléctrico*. Tercera edición. Moscú: Editorial Transporte, 1998, 233 p. (Ruso).
67. MEDEL, Vladimir Borisovich, et al. *Material rodante de las vías electrificadas*. Cuarta edición. Moscú: Editorial Transporte, 2004. 282 p. (Ruso).
68. *Memorias del X Congreso Latinoamericano de Ferrocarriles (CD)*. Habana 2000.
69. MICROSOFT CORPORATION. Microsoft Encarta 2007 prof. Versión. USA 2007

70. MINGOT, Tomás de Galiana, et al. *Pequeño Larouse de Ciencia y Técnica*. La Habana: Editorial Científico Técnica, 1992. 1056 p. (Español).
71. MIT. Association of American Railroads (AAR). Operation and maintenance Department. Electrical Divisions. *Standards and recommended practice*. Massachussets: Secretaría MIT. Séptima Edición, 1998. 256 p. (Inglés).
72. MIT. Association of American Railroads (AAR). Mechanical Divisions. *Wheel Practice. AAR M-107, sections A to D*. Massachussets: Secretaría MIT. Décima edición, 2006. 702 p. (inglés).
73. MIT. Association of Railroads Engineering and Manteinance (AREMA). Civil Division, C-18. *Disign of Rail way*. Décima edición, 2006. 657 p. (inglés).
74. MITRANS. Transporte Ferroviario. *Material Roddante. Clasificación de acuerdo a las cargas trasmitidas a la vía*. NRMT18-74/1987. Disponible: <http://www.mitrans.com.cu>
75. MITRANS. Transporte Ferroviario. *Tipos de superestructuras de la vía férrea. Parámetros principales*. NRMT 157:1985. Disponible en: <http://www.mitrans.com.cu>
76. MITRANS. Railway Transport. *Transporte Ferroviario. Términos y definiciones*. NRMT 178:1985. Disponible en: <http://www.mitrans.com.cu> En español.
77. MITRANS. Material Rodante. *Reglas para la explotación, mantenimiento y reparación de máquinas eléctricas*. NRMT 29:2000. Disponible en: <http://www.mitrans.com.cu>. En español.
78. MITRANS. Material Rodante. *Reglas para las pruebas de banco, de tracción y control*. NRMT 34:2001. Disponible en: <http://www.mitrans.com.cu>. Cuba.
79. MITRANS. Transporte Ferroviario. *Vías Férreas. Diseño geométrico del perfil*. NRMT 37:2001. Disponible en: <http://www.mitrans.com.cu> En español.
80. MITRANS. Transporte Ferroviario. Material Rodante. *Requisitos de Circulación*. NRMT 63:2003. Disponible en: <http://www.mitrans.com.cu>. En Español
81. MITRANS. Transporte Ferroviario. *Vías Férreas. Diseño geométrico de la planta*. NRMT 79:2003. Disponible en: <http://www.mitrans.com.cu> En español.
82. MITRANS. Transporte Ferroviario. *Vías Férreas. "Clasificación de Vías Férreas"*. NRMT 249:2003. Disponible en: <http://www.mitrans.com.cu>. En Español
83. MITRANS. *"Reglamento de Operaciones de los Ferrocarriles de Cuba"*. DTF: La Habana, 2003.
84. MOISEIEV, G.A. *Potencia en sección y problemas de confiabilidad de las locomotoras*. Moscú: Editorial Transporte, 2001. 112 p. (ruso).

85. *Motores D50, Instrucciones de explotación. V/O.* Moscú: Editorial Mashinoeksport, 1986. 246 p. (ruso).
86. NACHEZ, Antonio. *Fuentes conmutadas.* [A-5-36-1 del CD Electrónica de Potencia] Argentina. Rosario: FCEIA 2007. (inglés)
87. NOTIK, Z. J., et al. *Circuitos eléctricos de las locomotoras TEM-1, TEM-2, 2TE-116 y 2TE-10B.* Moscú: Editorial Transporte, 2003, 310 p. (ruso).
88. NOVIKOV, Alexey Petrovich. *Fundamento de la teoría de conducción de trenes.* Moscú: Editorial Transporte, 2004. 164 p. (ruso).
89. OSIPOV, S.I., et al. *Principios de la tracción por locomotoras.* Moscú: Editorial Transporte, 2000. 440 p. YDK.629.424. (ruso).
90. PANOV, Nikolai Ivánovich, et al. *Locomotoras. Construcción, teoría y cálculo.* Moscú: Editorial Mashinostroenie, 2004. 544 p. (ruso).
91. *Pasaporte técnico del Generador GP-300AT.* Partida № 45/5012000-00004. (ruso).
92. *Pasaporte técnico de la Locomotora TEM2 TK.* Partida № 05/6009600-112. (ruso).
93. *Pasaporte técnico del motor EDT-118AT.* Partida № 05/6018800-11806. (ruso).
94. PEÑA GUILARTE, Oscar W. *Conferencias de la asignatura "Mediciones electromecánicas".* Moa: ISMM, 2007. Cuba.
95. PEEVA MITEVA, Nadia. *Plano de desarrollo de la vía principal Nicaro Piedra Gorda.* Memoria descriptiva. EMPROY VC 2002.
96. POIDA, A.A. y KOKOSHINSKII, I.G. *Equipamiento mecánico de locomotoras y su reparación.* Moscú: Editorial Transporte, 2001. 416 p. (ruso).
97. REDEFE. *Recomendaciones de diseño, Secciones 1 a la 10;* Disponible en: http://www.secta/cont.cl/metodology/transport/redefe/section_1-10.htm. (inglés)
98. *"Reguladores de tensión".* [CD Electrónica de potencia]. España. Oviedo. Universidad de Oviedo ISBN.: 84-607-1933-2. (inglés).
99. *Resolución Económica del V Congreso del Partido Comunista de Cuba.* Ediciones Ciencias Políticas. La Habana. 1997.
100. *Resumen de las pruebas de entrega de la locomotora TEM2TK-02.* Partida de producción № 05-055/01700-17000-10-XII-1984. (ruso)
101. RIVERO AMADOR, Soleidy y GONZÁLEZ OTAÑO, Gibsia. *"Bases Teóricas de la Gestión del Conocimiento en las Organizaciones".* Disponible en [URL:http://www.monografias.com](http://www.monografias.com). Cuba 2004.

102. RODRÍGUEZ DOMÍNGUEZ, Jesús Israel. *Cuaderno personal y conferencias de la asignatura "Economía empresarial y DIP"*. Moa: ISMM, 2007. Cuba.
103. RODRÍGUEZ MESA, Gonzalo. Economía y desarrollo, №2, Vol. 131, 2002. *Los criterios de decisión para la evaluación de las inversiones*. U de La Habana.
104. ROJAS PURÓN, Luís Delfín. *Accionamiento Eléctrico Asíncrono para transporte Eficiente de pulpa Laterítica*. Tesis Doctoral. Moa: ISMM, 2005.
105. ROJAS PURÓN, Luís Delfín. *Conferencias de la asignatura "Electrónica de potencia"*. Moa: ISMM, 2007. Cuba.
106. ROMERO RUEDA, Ignacio. *Conferencias de la asignatura "Máquinas Eléctricas"*. Moa: ISMM, 2007. Cuba.
107. RUDAYA, Ksieñia Ivanovna y GAKKEL, Ekaterina Yakovlevna. *Proyección, diseño y cálculo de la transmisión eléctrica de las locomotoras*. Moscú: Editorial Transporte, 2002. 152 p. YDK.625.282.843.6-83-001.2. (ruso).
108. SANCHEZ URIA, Ángel. *Problemas del reforzamiento y reconstrucción de los ferrocarriles cubanos*. Tesis Doctoral. Moscú 1987. (ruso)
109. SASHKO, N.A. *Cuaderno personal de la asignatura "Sistemas de regulación automática"*. Moscú: MIIT 1983. (ruso)
110. SCHANOES, D.M. *Upright, in line, and on the ground*. USA. New York, MNR, 2003. p. 5 - 22. Disponible en <http://www.mnr.org>. (inglés).
111. SHAJUNIANTS, G.M. *La vía férrea*. III Edición. Moscú: Editorial Transporte, 2000. 283 p. (ruso)
112. SHELEST, P.A., et al. *Reglas de los cálculos de tracción de las locomotoras del transporte industrial*. Moscú: Editorial Transporte, 2000. 174 p. YDK 625.28. (ruso).
113. SHERVASHOV, G.S. *Medidas de seguridad en el mantenimiento y reparación de locomotoras*. Moscú: Editorial Transporte, 2001. 120 p. (ruso).
114. SHEVSSHUK A.B. *Diagnóstico y explotación de locomotoras*. Kiev: Editorial Transporte, 2000, 112 p. Ucrania. (ruso)
115. SHODOVSKI, Varis Varísovich. *Proyección de inversores con determinadas características dinámicas*. Trabajos Científicos del Instituto Bielorruso del transporte. Gomel: GIIT 2001. pág. 90-102. YDK.621.424.1-83: 621.314.57. Bielorusia. (ruso)
116. SIMSOM, A. E., et al. *Motores de combustión interna. Motores diesel para locomotoras*. Moscú: Editorial Transporte, 1990. 384 p. (ruso).
117. Statistics UIC. Disponible en: <http://WWW.Statistics/UIC/Synthesis2005>

118. SIZIN, G N, et al. *Fuentes Potentes de Alimentación con semiconductores de potencia*. Moscú: Editorial Radio y Comunicaciones, 2002. 388 p. (ruso).
119. SKUIEV, Valerii Borisivich. *Cuaderno personal de la asignatura "Construcción y dinámica de locomotoras"*. Moscú: MIIT 1982. (ruso).
120. STEPANOV, Alexander Dmitrovich. *Transmisión de potencia de locomotoras*. Tercera Edición. Moscú: Editorial Mashinostroenie, 2001. 472 p. (ruso).
121. TORRES TAMAYO, Enrique. *Conferencias de la asignatura "Técnicas modernas en la conversión y conservación energética"*. Moa: ISMM, 2007. Cuba.
122. TIMOVSKII L.G. *Ferrocarril de canteras*. Moscú: Ygleizdat, 1989. 359 p. (ruso).
123. TOLSHIN, V.L. *Procesos transitorios en los motores diesel*. Leningrado: Transporte, 1999. 343 p. (ruso).
124. TRETIAKOV, Alekxandr Petrovich., et al. *Material Rodante y Servicios tractivos del ferrocarril*. Moscú: Editorial Transporte, 1990. 352 p. (ruso).
125. TRETO CÁRDENAS, Orestes y NAVARRETE PÉREZ, Enrique. *"Conferencias sobre Métodos de Trabajo Científico"*. Versión digital, Cuba 1996.
126. URRRA BRAVO, Juan. *Racionalización de la cantidad de traviesas por kilómetros en las líneas del ferrocarril público cubano*. Ponencia al XX Congreso Panamericano de Ferrocarriles. La Habana 2000. 32p
127. VERJOGLAD, V.E., et al. *Manual del equipamiento eléctrico de las locomotoras*. Moscú Transporte 1991. 287 págs. Págs. 4 a la 87. (ruso).
128. VILELA, J del C; BOCOURT, Cirilo. *Organización, Planificación y economía del servicio de locomotoras*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1990. 234 p.
129. VILKIEVICH, V.B., et al. *Manual de explotación de la locomotora TE-116*. Moscú: Editorial Transporte, 2000. 354 p. (ruso).
130. VILLARROEL CASTRO, José M., et al. *Alternative Fuels in Cuban Transportation*. La Habana: Ediciones CIDIT, 2003. 46p. (español)
131. VIRUBOV, Dmitri Nikolaievich. *Motores de combustión interna. Teoría de motores a pistón y combinados*. Moscú: Editorial Mashinostroenie, 2000. 372 p. (ruso).
132. VORODULIN, Iosif Pávlovich. *Principios y teorías del cálculo y diseño de locomotoras*. Moscú: Editorial Mashinostroenie, 1999. 264 p. (ruso).
133. VSNII. *Compilación de trabajos científicos № 637*. GUIZATULIN, E.G. *"Evaluación del dimensionamiento ferroviario vs. fiabilidad y costos"*. Moscú: Editorial Transporte, 2001. Pág. № 31. (ruso)

134. WIKIPEDIA FOUNDATION.INC. Wikipedia, la enciclopedia libre. Disponible en <http://es.wikipedia.org>. [Consulta: Octubre – Diciembre 2007; Enero – Marzo 2008]
135. YAKOLEV. V. F. *La vía Férrea*. CICT. Universidad de La Habana, 1974. (ruso)
136. ZALIT, N.N. *Manual de locomotoras del transporte industrial*. Moscú: Editorial Transporte, 2000. 366 p. (ruso).
137. ZANETI, Oscar y GARCÍA HERNÁNDEZ, Alejandro. *Caminos para el Azúcar*. La Habana: Editorial Ciencias Sociales, 1987, 419 p. Cuba.
138. ZARAJOVICH, Alexander Efímovich. *Fundamentos de electrónica para los ferroviarios*. Moscú: Editorial Transporte, 1992. 240 p. (ruso).

ANEXOS.

Anexo 1.

1. Características físico mecánicas del mineral laterítico transportado:

- Peso volumétrico..... 1,36 t/m³
- Humedad 36 %
- Ángulo de reposo 60°
- Ángulo del talud 40°
- Granulometría: > 30 a 100 mm ... 0,6%
 > 10 a 30 mm 8%
 < 10 mm el resto.

Tabla 27. Distribución de las vías férreas y locomotoras por el mundo hasta el año 2003.

Parte del Mundo	Longitud de vías férreas (km)		Parque de Locomotoras (Uds)		
	Total	Electrificadas	De Vapor	Diesel	Eléctricas
Europa	404 000	122 630	2 100	19 000	11 450
Asia	197 000	13 450	11 180	6 750	3 000
África	73 800	6 820	3 120	3 600	1 870
América Latina	124 000	3 040	1 900	5 900	140
Norte América	374 300	3 140	10	31 650	220
Australia y Oceanía	47 900	970	90	2 500	90

(Fuente: Encarta 2007, FUFRIANSK, 2002[31])

Tabla 28 Comprobación del peso específico longitudinal del carril necesario en el ramal Nicaro Pinares, por diferentes criterios.

Datos					Criterios de selección del peso específico del carril. [kg/m]	
					Prof.Shulga	Prof.Shajunians
№	a	T	V	Pe	$q = 31.046 \cdot T^{0.203}$	$q = a(1+T^{0.25}) \cdot (1+0.012 \cdot V)^{2/3} \cdot Pe^{2/3}$
	–	10^6 TM	km/h	TM/eje		
1	1.2	1.0	< 50	26	31,0	28,8
2	1.13	1.0	< 50	24,5	31,0	26,1
3	1.2	2.5	60	29	37,4	36,7
4	1.13	2.5	60	29	37,4	34,6

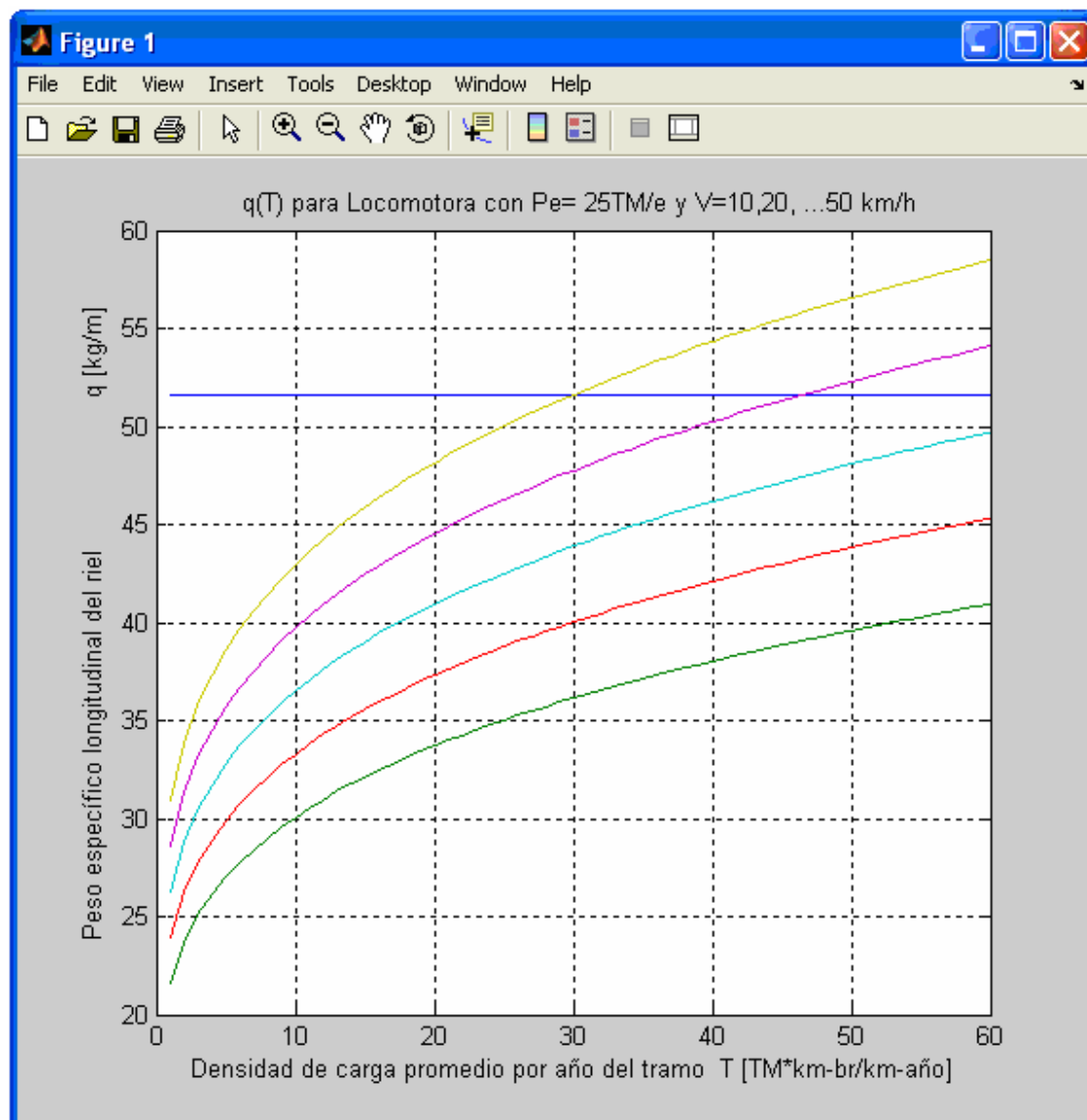
ANEXOS.**Anexo 2.**

Figura 34. Dependencia peso unitario del carril vs. tráfico de cargas, para una carga por eje de 250 kN y velocidades de 2.77, 5.54, 8.33, 11.08 y 13.89 m/s. de la locomotora.

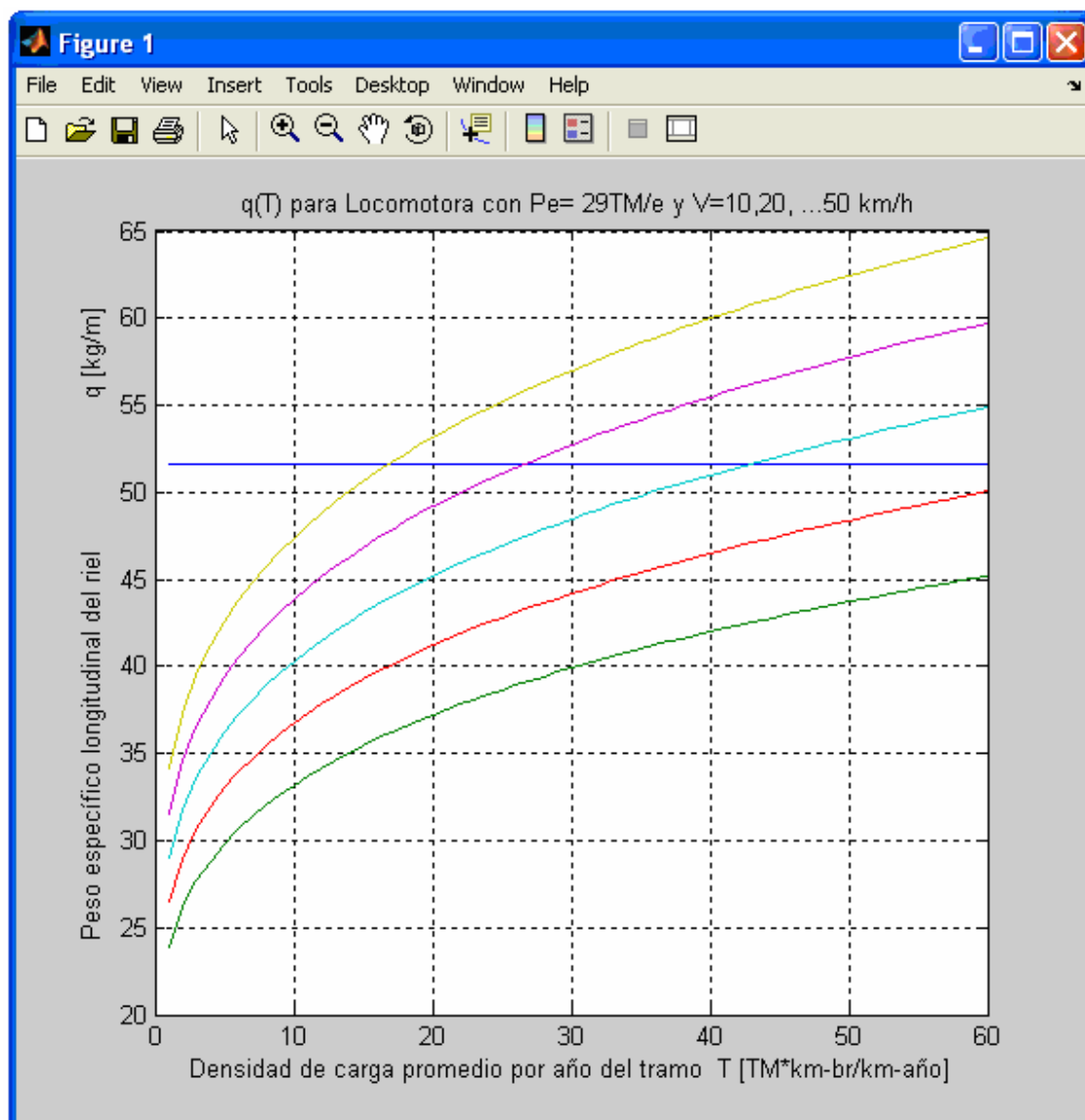
ANEXOS.**Anexo 3.**

Figura 35. Dependencia del peso unitario del carril, del tráfico de cargas, con carga por eje de 290 kN, para las velocidades de 2.77, 5.54, 8.33, 11.08 y 13.89 m/s. de la locomotora.

ANEXOS.

Anexo 4.

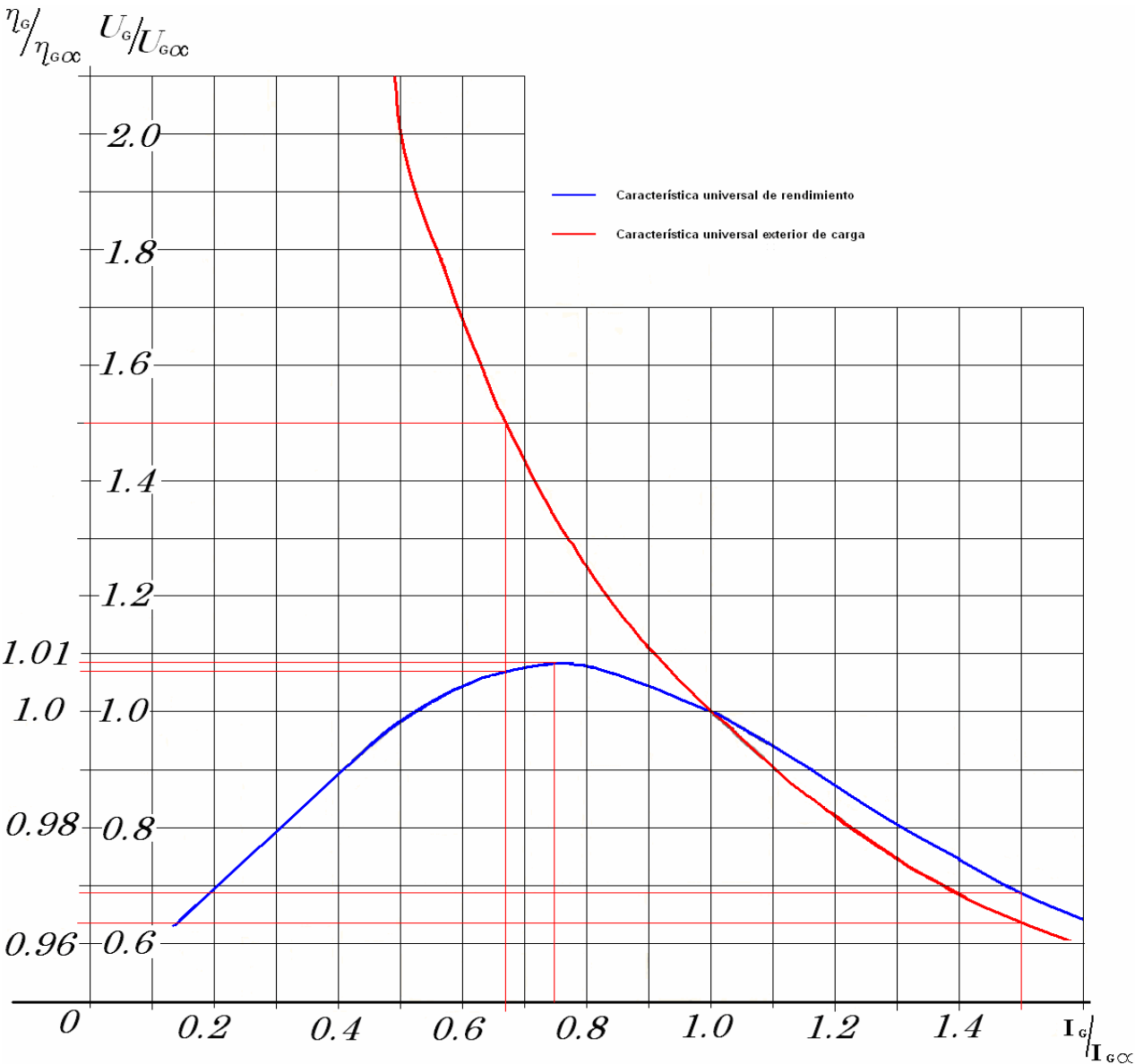
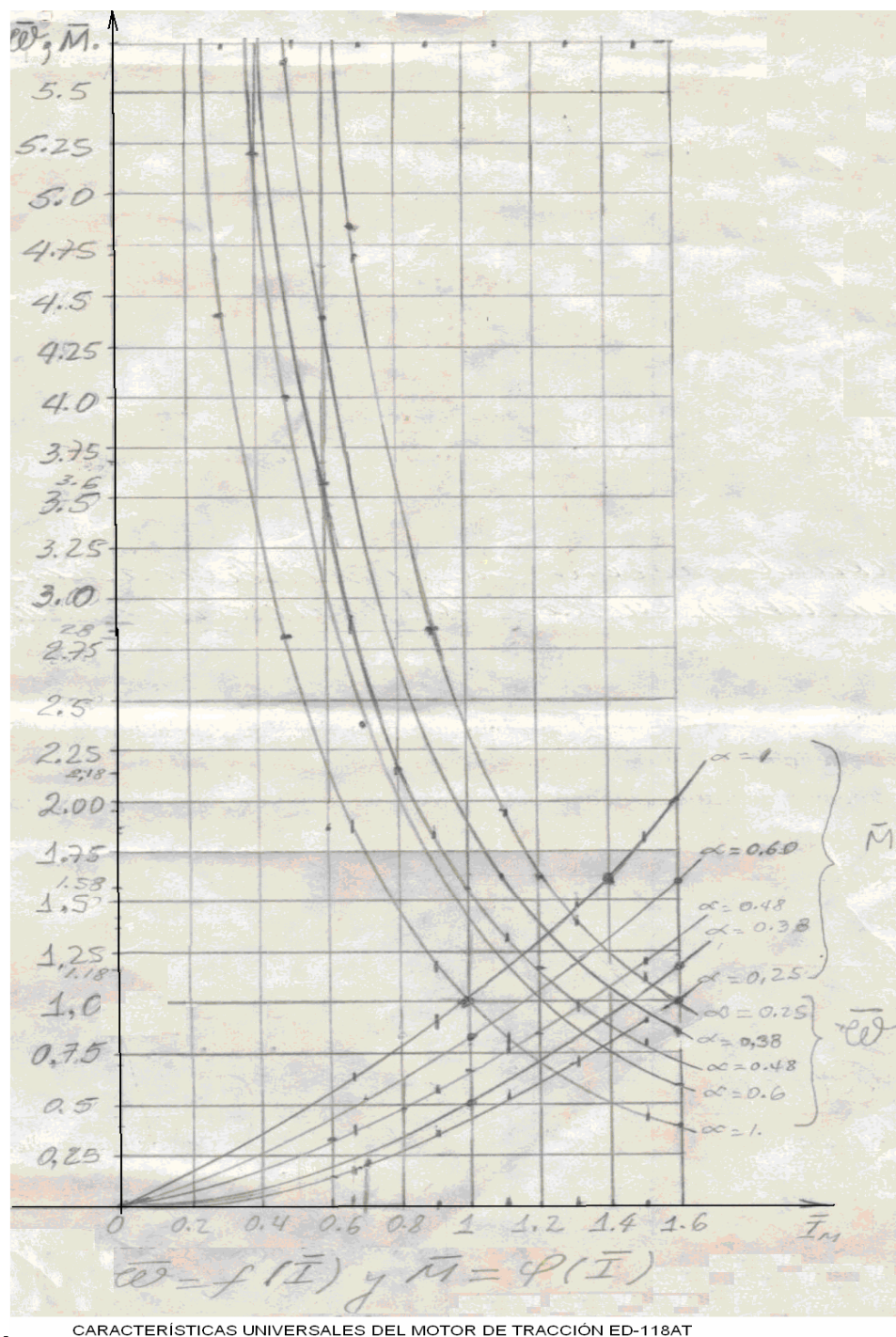
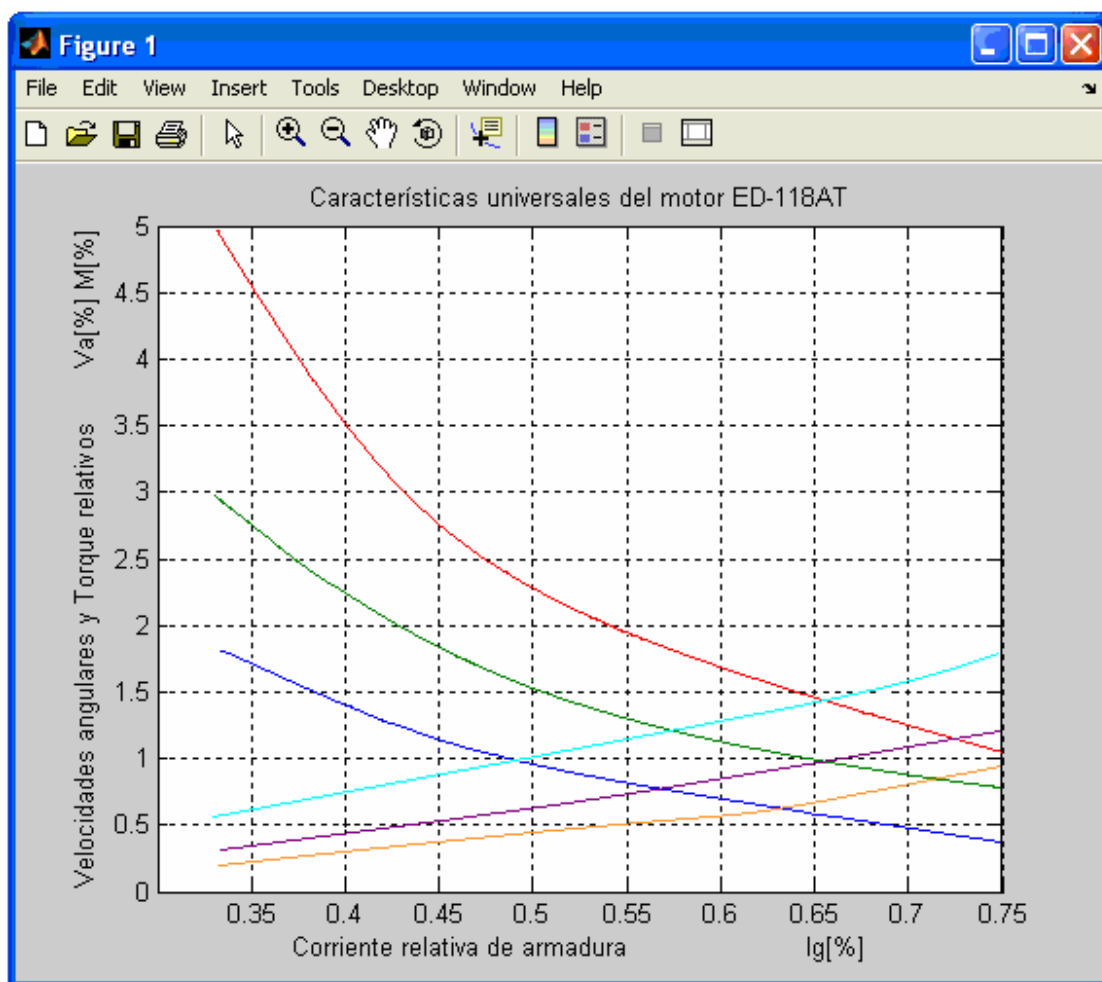


Figura 36. Características universales del generador GP-300T.

Tabla 29. Valores relativos de corriente y rendimiento del generador GP-300T.

I_g	0,667	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
η	1,003	1,005	1,007	1,005	1,0	0,99	0,982	0,975	0,973	0,967
U_g	1,5	1,43	1,25	1,11	1,0	0,91	0,83	0,769	0,715	0,66

ANEXOS.**Anexo 5.****Figura 37. Características universales del motor ED-118AT.**

ANEXOS.**Anexo 6.****Figura 38. Características universales del motor ED-118AT.**

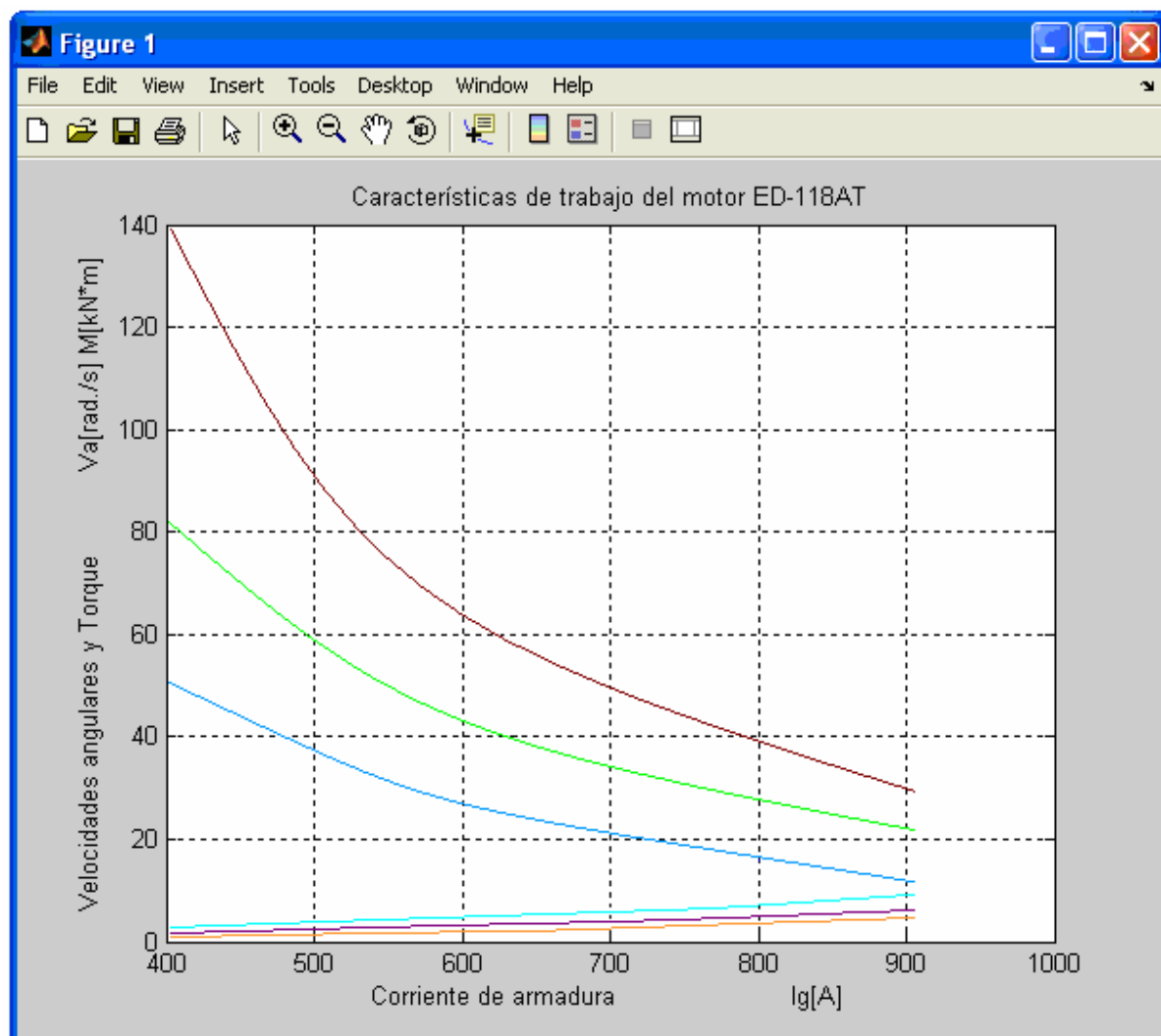
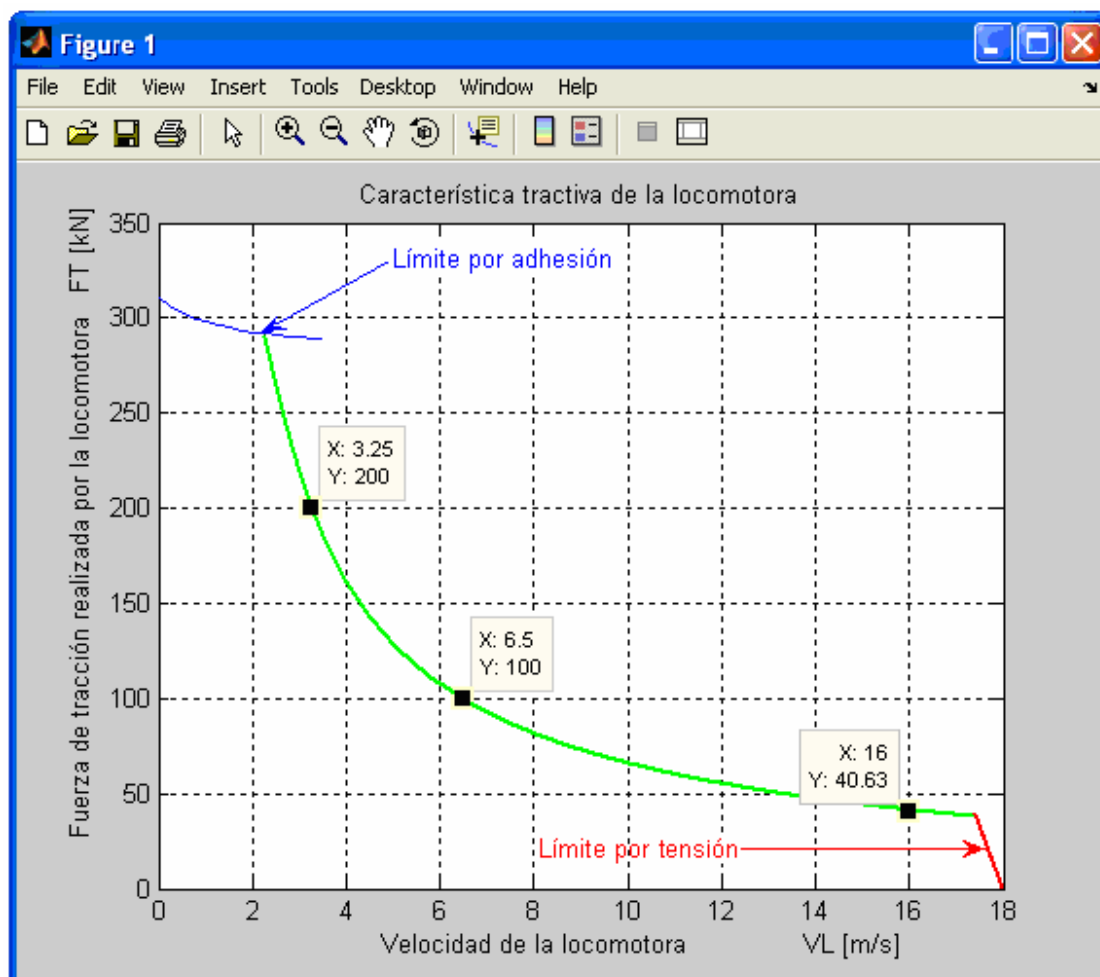
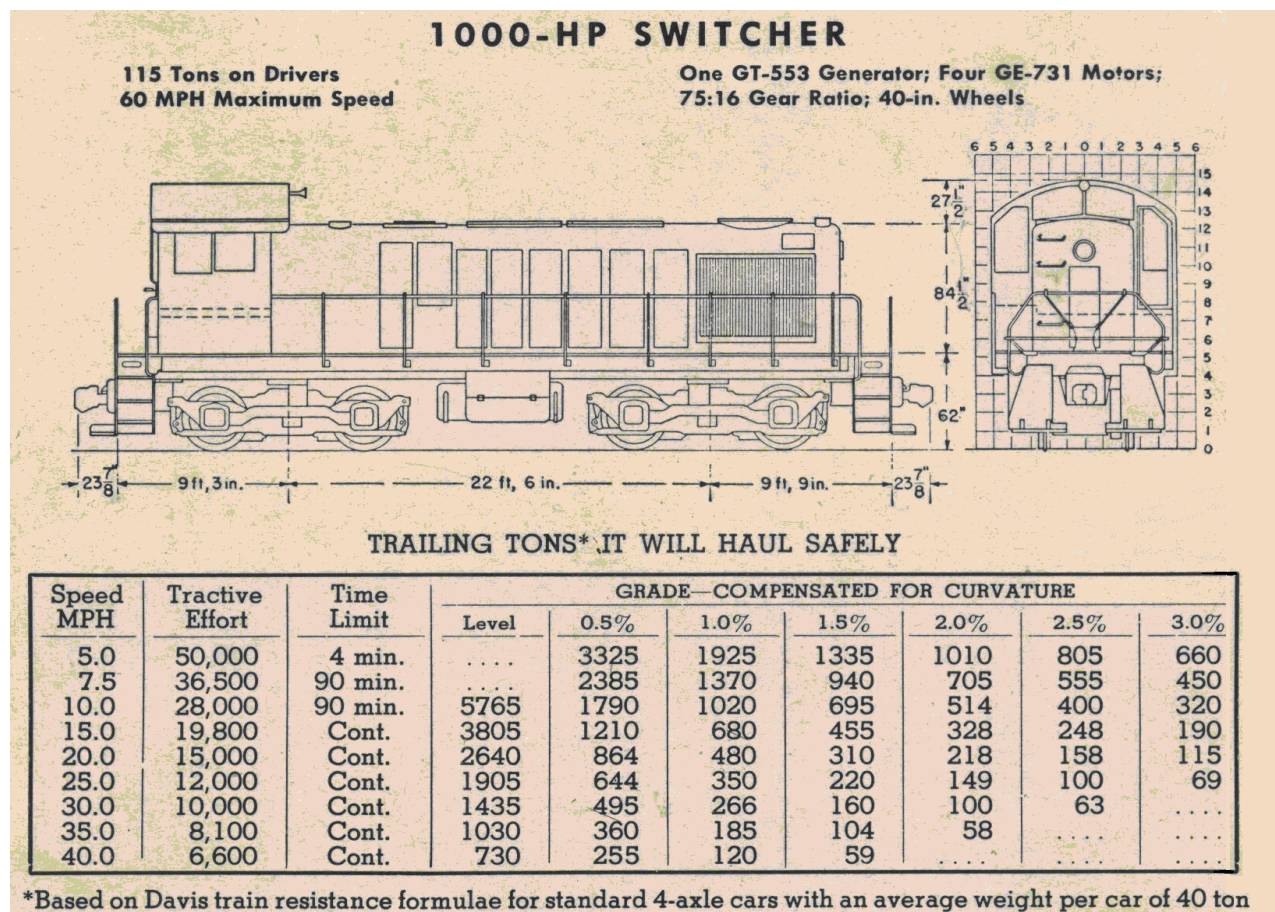
ANEXOS.**Anexo 7.**

Figura 39. Características de trabajo del motor ED-118AT en la locomotora №91009

ANEXOS.**Anexo 8.****Figura 40. Característica exterior tractiva y de adhesión de la locomotora № 91009.**

ANEXOS.**Anexo 9.****Tabla 30. Características principales de la locomotora № 91009 y los vagones.**

№	Características técnicas fundamentales	Locomotora № 91009	Vagones
3.1.	Destino de la locomotora	Trabajos Universales	Carga
3.2.	Potencia nominal del diesel	757 kW	
3.3.	Fórmula axial	$2_0 - 2_0$ ó $B_0 - B_0$	2--2
3.4.	Tipo de transmisión	Eléctrica en CD	
3.5.	Velocidad constructiva, m/s (km/h)	27 (97)	100
3.6.	Velocidad mínima continua, m/s (km/h)	3.2 (11)	
3.6.	Rango de velocidades con potencia nominal, m/s(km/h)	2.78 – 15 (11 – 57)	
3.7.	Peso de servicio y adherente, kN (tf)	980 a 1000 (98 a 100)	80
3.8.	Fuerza de tracción en el arranque, kN(tf), $\psi = 0.32$	316.3 (31. 63)	
3.9.	Fuerza de tracción ilimitada, kN(tf), $\psi = 0.32$	180 (18)	
3.10	Carga axial, kN (tf)	245 (24.5)	245 (24.5)
3.11	Volumen de carga (m ³)		37
3.12	Relación de transmisión del par tractivo	4.53	
3.13	Eficiencia de la transmisión, %	84	
4	Principales reservas: kg (m ³)		
4.1	a) De agua del sistema caliente	1000 (1000)	
4.2	b) De agua del sistema frío	300 (300)	
4.3	c) De combustible diesel	2580 (3000)	
4.4	d) De aceite del motor	430 (500)	
4.5	e) De arena	1000 (0.58)	
5	Gálíbos fundamentales: mm		
5.1	a) Largo total	14 000	14 000
5.2	b) Altura total	4 600	3670
5.3	c) Ancho total	3 100	3100
6	Boggie		
6.1	a) Tipo de boggie	ALCO AAR 2-2	Barber AAR 2-2
6.2	b) Batalla de los boggie, mm	2240	2000
6.3	c) Diámetro de las ruedas, mm	1020	
6.4	d) Perfil de la planta de pisada	GOST 83-5154 ó AAR M-107	
6.5	e) Trocha ó ancho de la vía m	1435	
6.6	f) Tipos de caja de grasa mm (")	165,2 x 254 (6 ^{1/2} " x 10")	5 ^{1/2} " x 10"
7	Enganches		
7.1	a) Tipo	AAR E-60	
7.2	b) Altura, mm	876 – 20 (34,5 " – 7/8 ")	
8	Chasis y carrocería		
8.1	a) Tipo	Capota y centropín	Con centropín
8.2	b) Base ó batalla, mm	6750	8000

ANEXOS.**Anexo 10.****Figura 41. Dimensiones y características tractivas de la locomotora 91009.****Tabla 31. Características tractivas originales locomotora № 91009 en el SI.**

Velocidad	F. Tracc.	T. Lim.	Pendiente – Peso del tren(TM.)						
			Nivel	5 ‰	10‰	15‰	20‰	25‰	30‰
2.22	226.79	4	-----	1511	875	607	459	366	300
3.33	165.56	90	-----	1084	623	427	320	252	205
4.44	127.00	90	2882	813	465	316	234	182	145
6.66	898.11	Continuo	1730	550	310	207	149	113	86
8.88	680.4	Continuo	1200	393	218	141	99	72	52
11.11	544.31	Continuo	855	293	159	100	68	46	311
13.33	453.59	Continuo	652	225	121	73	46	29	-----
15.55	367.41	Continuo	468	164	84	47	26	-----	-----
17.77	299.37	Continuo	331	116	55	27	-----	-----	-----

ANEXOS.**Anexo 11.****Tabla 32. Comparación de las características de la locomotora № 91009 con su original №9 y una TEM -2TK.**

№	Tópicos a comparar	№ 91009	№9	TEM-2TK
1.	Destino de la locomotora	Universal	Maniobra	Maniobra
2.	Potencia nominal del diesel	757 kW	735 kW	757 kW
3.	Fórmula axial	$2_0 - 2_0$	$2_0 - 2_0$	$3_0 - 3_0$
4.	Tipo de transmisión	Eléctrica CD	Eléctrica CD	Eléctrica CD
5.	Velocidad constructiva: m/s (km/h)	27 (97)	27 (97)	27 (97)
6.	Velocidad min. continua: m/s (km/h)	3.2 (11.5)	3 (10.7)	2.64 (9.5)
7.	Rango nominal de velocidad: m/s (km/h)	2.78 -15 (11-57)	3.3 -13 (11-49)	2.6-13.8(11-50)
8.	Peso de servicio: kN (tf)	980 (98)	900(90)	1120(112)
9.	Fuerza de tracción en arranque: kN (tf)	315	269	347
10.	Fuerza de tracción continua: kN (tf)	180	165	190
11.	Carga axial: kN (tf)	245 (24.5)	225	186
12.	Relación de transmisión del par	4.53	4.86	4.53
13.	Principales reservas: kg.(m ³)			
	a) De agua del sistema caliente	1000 (1.0)	1000 (1.0)	1000 (1.0)
	b) De agua del sistema frío	300 (0.3)	300 (0.3)	300 (0.3)
	c) De combustible diesel	2580 (3.0)	2580 (3.0)	5676 (6.6)
	d) De aceite del motor	430 (0.5)	430 (0.5)	430 (0.5)
	e) De arena	1000(0.58)	1000(0.58)	1000(0.58)
14.	Gálíbos fundamentales: mm			
	a) Largo total de la Locomotora	13 500	13 500	17 000
	b) Altura total de la Locomotora	4 350	4 350	4 600
	c) Ancho total de la locomotora	3 100	3 100	3 100
15.	Boggie tipo	AAR 2-2	AAR 2-2	VNIIT-3PC
16.	Batalla			
	b) De la locomotora	8 890	8 890	12 800
	c) De los boggies: mm	2 240	2 240	4 200
	d) De los centros de giro	6 750	6 750	8 600
	e) Diámetro de las ruedas: mm	1 020	1 020	1 050
	f) Perfil de la planta de pisada	GOST 83-5154 ó AAR M-107	AAR M-107	GOST 83-5154
	g) Trocha ó ancho de la vía: mm	1435	1435	1435
	h) Tipos de caja de grasa, mm (")	139.8 x 254 Y 5.5" x 10"	5.5" x 10"	139.8 x 254
16.	Enganches			
	a) Tipo	AAR E-60	AAR E-60	SA-3-E-60
	b) Altura, mm (")	876 - 20 (34,5 " - 7/8 ")	876 - 20 (34,5 " - 7/8 ")	876 - 20 (34,5 " - 7/8 ")
17.	Chasis y carrocería			
	a) Tipo	Capota con centropín	Capota con centropín	Capota con centropín
	b) Base rígida ó batalla de giro: mm	6 750	6 750	8 600

ANEXOS.**Anexo 12.**

Тепловоз ТЭМ7А предназначен для тяжелой маневрово-вывозной и горочной работы. Широко используется на сортировочных станциях и при вывозке груза из карьеров. Может работать по системе двух единиц.

Дизель – 12ЧН26/26 (11-2Д49) четырехтактный двенадцатицилиндровый с V-образным расположением цилиндров, с газотурбинным наддувом и охлаждением наддувочного воздуха. Частота вращения – 1000 об./мин.

Электропередача переменного-постоянного тока. Состоит из синхронного тягового генератора, выпрямительной установки, восьми тяговых электродвигателей постоянного тока, возбуждателя и комплекта электрической аппаратуры.

Ходовая часть обеспечивает наиболее полное использование сцепной массы, хорошие динамические качества и вписывание в кривые малого радиуса. Каждая четырехосная тележка состоит из двухосных тележек, соединенных между собой промежуточной рамой. Рессорное подвешивание двухступенчатое. Тормозная система оборудована пневматическим автоматическим прямым тормозом с двухсторонним нажатием колодок; для получения высокой надежности тормозного оборудования применена система осушки воздуха. Компрессор двухступенчатый с приводом от электродвигателя. Ручной тормоз механический. Для возможности работы с саморазгружающимися вагонами тепловоз поставляется с одним компрессором.

Кузов машинного отделения имеет двухстворчатые двери, люки и съемные элементы крыши, обеспечивающие свободный доступ к агрегатам при обслуживании, ремонте и демонтаже.

Кабина машиниста разработана с учетом действующих санитарно-гигиенических требований. Приборы для контроля параметров силовой установки и вспомогательных агрегатов, оборудование для управления и безопасного ведения поезда удобно расположены. На тепловозе предусмотрена система бдительности. Управление тепловозом может осуществляться одним машинистом с любой стороны кабины; место машиниста указывается сигнализатором. Система авторежима поддерживает заданную скорость движения поезда.

Дополнительные опции: кондиционер, компьютерная система управления, электродинамический тормоз, модернизированные обшивка кабины и пульты управления.

Основные характеристики:	
	ТЭМ7А
Формула осевая	Bo+Bo – Bo+Bo
Мощность по дизелю, кВт (л.с.)	1500 (2040)
Масса тепловоза, т	180
Ширина колеи, мм	1520; 1435
Габарит по ГОСТ 9238-83	1-Т
Расчетная сила тяги, кН (т.с)	
- при трогании с места и $\psi=0,33$	582 (59,4)
- расчетного режима	300 (3,6)
Скорость, м/с (км/ч)	
- конструкционная	27,7 (100)
- расчетного режима	4,0 (14,4)
Min. радиус проходимых кривых, м	80
Диаметр колеса по кругу катания, мм	1050
Габаритные размеры тепловоза, мм:	
-длина по осям автосцепок	21500
-ширина максимальная	3280
-высота от уровня головок рельсов	5290

Figura 42. Oferta de la locomotora TEM-7

ANEXOS.**Anexo 13.**

LOGERAIL PROFORMA FACTURA
800126/ 2

Nuestra Referencia : 505/S60126/ 2 del 04/02/2003
Vuestra Referencia : MAIL del 30/11/2002

Responsable : SOPHIE COURRET 01.69.11.93.43

509 EMPRESA IMPORTADORA Y ABASTECEDORA DEL NIQUEL
CARRETERA MOA-SAGUA KM 1 1/2
MOA - HOLGUIN
CUBA

LISSES el 5/2/2003

LES ROGAMOS ENCONTRAR NUESTRA MEJOR OFERTA PARA :

TRAVIESAS

Item	N/Ref	V/Ref	DESCRIPCION	Plazo mes	Unidad	Ctad	Precio EUROS	Total EUROS
1	46161-P		TRAVIESAS 0.24 X 0.24 X 1.8 M	2	pieza	2500	58,80	147000,00
2	46162-Q		TRAVIESAS 0.24 X 0.24 X 3M	2	pieza	2200	106,40	234080,00
3	46163-R		TRAVIESAS 0.24 X 0.24 X 3.50 M	2	pieza	380	138,60	52668,00
4	46164-S		TRAVIESAS 0.24 X 0.24 X 4M	2	pieza	380	161,00	61180,00
5	46165-T		TRAVIESAS 0.24 X 0.24 X 5M	2	pieza	380	212,80	80864,00
MATERIAL EUROS		FOB						
575 792,00		8 636,88						TOTAL en EUROS
								584 428,88

Transporte : VIA MARITIMA

Validez : 30/04/2004

Pago : CARTA DE CREDITO IRREVOCABLE Y CONFIRMADA A LA VISTA

Observaciones : TRAVIESAS DE ROBLE, CUATRO ANGULOS VIVOS,
TOLERANCIA DE FLASHES Y DE ALBURA CUALIDAD NORMA UIC 863.0
CREOSOTADOS SEGUN EL PROCEDIMIENTO RUPING EL PORCENTAJE DE
HUMEDAD SERA DE +/- 45 A 50 % LO QUE CORRESPONDE A UN
SECAMIENTO DE VARIOS MESES

Provenencia : FRANCE y Origen : E.E.C.

EL DIRECTOR
Compagnie Internationale de Maintenance
Société Anonyme au Capital de 100 000 000 F
R.C.S. Evreux 574 000 000
5, Rue de la Gare
18240 LISSES
L. 01.69.11.93.43

Figura 43. Oferta comercial de traviesas de madera dura.

ANEXOS.**Anexo 14.**

**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
ЭНЕРГОМАШЭКСПОРТ** 

Россия, 129010, Москва, Протопоповский пер., 25А, телефон 288 84 56, телекс 411965, факс 288 79 90

89-04-086/ 304
6 марта 1998 года

О поставке оборудования для
ремонта железнодорожного пути

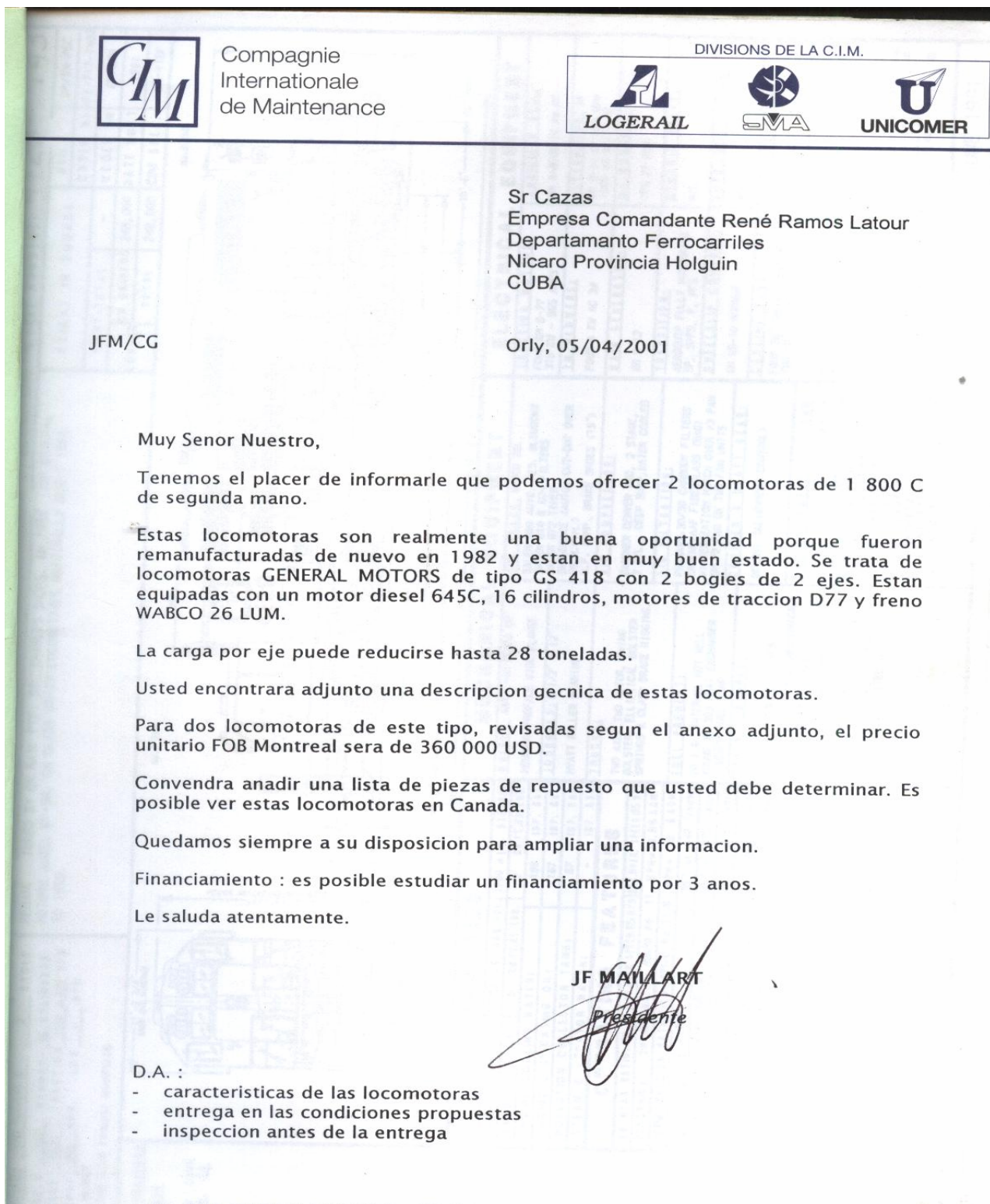
Уважаемые сеньоры,

В дополнение к нашим письмам № 89-04-086/285 и 89-04-086/303 от 6 марта 1998 года настоящим предлагаем Вам к поставке на Кубу рельсы с накладками и комплектом крепежных деталей для рельсов типа Р50 в следующем ассортименте :

1. Рельс Р-50 длиной 12,5м	- 3000 штук по цене 715,00 долларов США за один рельс
2. Рельс Р-50 длиной 25,0м	- 1800 штук по цене 1417,00 долларов США за один рельс
3. Накладка для рельс Р50 (вес 18,7 кг)	- 16000 штук или 304 тонны по цене 35,00 долларов США за одну накладку
4. Болт путевой М24х150 (вес 0,59 кг)	- 25000 штук или 14,8 тонн по цене 0,95 долларов США за один болт
5. Гайка М24 ГОСТ 11632-76 (вес 0,16 кг)	- 25000 штук или 4,0 тонны по цене 0,28 долларов США за одну гайку
6. Шайба пружинная МПТУ 4459-84 (вес 0,07 кг)	- 25000 штук или 1,75 тонны по цене 0,18 долларов США за одну шайбу пружинную

Поставка накладок, болтов, гаек и шайб пружинных будет производиться в отдельной упаковке по весу $\pm$ 0,5 %.

Figura 44. Oferta comercial de rieles R-50 de 12,5 y 50 my otros.

ANEXOS.**Anexo15.****Figura 45. Oferta comercial de Locomotora de segunda mano de 1800 Hp, B₀—B₀.**

ANEXOS.**Anexo 16****Figura 46. Oferta comercial de Locomotora nueva de 1800 Hp, C₀—C₀.**

ANEXOS.**Anexo 17**

REPORTE DE TRABAJO
UTI DE MAQUINADO PARA UTI LOCOMOTORA
LOCOMOTORA # 91003 RENE RAMOS LATOUR.

COBRO POR CONCEPTO DE:

- MAQUINADO DE 6 PARES DE RUEDAS
\$1646.40
- FABRICACIÓN DE 24 MEDIA LUNA
\$365.04
- FABRICACIÓN DE 24 PTO APOYO
\$243.36

IMPORTE A PAGAR MN \$2254.80.

REPORTE DE TRABAJO
UTI DE MAQUINADO
LOCOMOTORA # 91003 RENE RAMOS LATOUR.

- MAQUINADO DE 6 PARES DE RUEDAS.
\$82.30
- FABRICACIÓN DE 24 MEDIA LUNA
\$109.51
- FABRICACIÓN DE 24 PTO APOYO.
\$73.01

IMPORTE A PAGAR EN USD \$264.82.
Hecho por Bty. No: 1-10.

Figura 47. Factura de la rectificación de ruedas de locomotoras en Camagüey.

ANEXOS.**Anexo 18.****Tabla 33. Control de los descarrilamientos promedio ponderado 1995 – 2005.****TABLA DE CONTROL DE DESCRRILOS POR PUNTOS KILOMÉTRICOS / Promedio (1995 – 2005)**

KM	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	Total I	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Total II	Total
PT. NIC.	9	8	7	4	7	12	47	5	4	1	9	4	4	27	74
4,00		1	1			4	6	2		1	1		1	5	10
5,00		1			3		4							0	4
6,00	2		3	1	2	2	10				1	4		5	15
7,00	3			2			5						1	1	6
8,00							0							0	0
9,00					1		1		1	1				2	3
10,00					1		1						1	1	2
11,00						3	3		2					2	5
12,00							0							0	0
13,00							0							0	0
14,00							0					1	1	2	2
15,00	2	4	4	3	4	5	22	2	3	3		1	3	12	34
16,00	9	5	5	11	1	5	36	2	4	1		3	8	18	54
17,00	1	1		1	3	2	8		1	1	1		1	4	12
18,00			1	1	5		7					4	3	7	14
19,00	1	3	5	4			13		1	3	1			5	18
20,00				2	1	1	4	2	1					3	7
21,00	1	3	3		3	1	11	1	6	4	2			13	24
22,00					2	3	5	1	1		1	1		4	9
23,00		1				1	2		2	2				4	6
24,00	2		1	1	1	1	6	2	1			1	1	5	11
25,00	4	2	2	4	2		14	1				1	2	4	18
26,00		1	2	1	1	1	6		1					1	7
27,00	1	5	5	2		1	14	5	2	1				8	22
28,00							0	1				1		2	2
29,00	2		1			1	4	1						1	5
P - 4	2						2							0	2
TOTAL	39	35	40	37	37	43	231	25	30	18	16	21	26	136	367
	Meses						Total	Meses						Total	
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Semest	Jul	Agó	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Semest	Año
Días Lab.	31	28	31	30	31	30	181	31	31	30	31	30	31	184	365
C. Desc.	39	35	40	37	37	43	231	25	30	18	16	21	26	136	367
H / Desc	94,1	75,4	70,3	75,1	67,2	90,3	473,10	51,4	66,5	61,5	59,3	52,2	66,1	358,1	831,2
H /Rep.V.	23,2	42,1	72,3	23,0	52,1	40,3	253,55	24,1	47,3	23,6	37,2	13,2	36,5	182,56	436,1
H. Total.	117	118	143	98,1	119	131	726,55	75,5	114	85,4	96,5	65,4	103	541,06	1267,6
Desc/Día	1,26	1,25	1,29	1,23	1,19	1,43	1,276	0,8	1,0	0,6	0,5	0,7	0,8	0,739	1,01
H / Día	3,78	4,20	4,60	3,27	3,85	4,37	4,014	2,44	3,7	2,8	3,1	2,2	3,3	2,941	2,28

ANEXOS.**Anexo 19.**

Planta de Níquel "Cmdte Rene Ramos Latour"					Costo del Mes		Indice Acum.		Costo Acumulado	
Costo del Níquel por Partidas										
Area: 6							Sep/2003			
Ferrocarriil										
Partidas del Costo	Precio		Indices		Costo del Mes		Indice Acum.		Costo Acumulado	
	Plan	Real	Plan	Real	Plan	Real	Plan	Real	Plan	Real
Combustible Diesel Directo Tec	344.97	385.08	0.614	1.046	26933.36	32763.51	0.614	0.983	223663.99	313645.33
Combustible Diesel Directo par	344.97		80.000		701.91	0.00	80.048		6387.51	0.00
Combustible Diesel Tarjeta Mag	471.80	471.81	40.000		480.01	239.60	40.025		4368.00	1322.74
Gasolina Motor	540.00	473.94	30.000	9.000	358.91	94.50	30.000	11.465	3266.06	993.50
Grasas y Lubricantes	880.54	1665.38			1685.72	1999.04			16214.34	26333.97
Electricidad del SEN	80.10	95.63	0.710		1706.13	0.00	0.710		15525.95	0.00
Materiales de operación					0.00	390.40			0.00	1330.35
Materiales de Mantenimiento					11292.69	18306.53			506522.46	269285.61
Otros Materiales					271.05	7.27			2439.45	5600.03
Servicios Productivos en Divis					6587.20	-45481.58			89432.40	91049.89
Comisión de Servicios en Divis					0.00	545.20			0.00	4524.85
Otros Gastos en Divisas					0.00	14657.35			0.00	30519.45
Fondo de Salario					56162.75	40930.76			504886.16	374022.82
Otros Gastos de Fuerza de Trab					21903.47	15175.01			196905.60	139731.65
Depreciación para la reposici					22931.27	3591.27			206381.43	50504.39
Servicios Productivos en Moned					4970.42	1410.43			74667.36	216204.68
Comisión de Servicios en Moned					22.60	1498.90			195.65	10304.15
Otros Gastos en Moneda Naciona					0.00	61569.86			0.00	79748.17
GASTOS DIRECTO					156007.49	147698.05			1850856.36	1615121.52
COSTO DIRECTO					1.04	1.54			1.49	1.64
GASTOS INDIRECTO					0.00	0.00			0.00	0.00
COSTO TOTAL					1.04	1.54			1.49	1.64

INDICADORES TECNICOS PRODUCTIVOS

VALOR

1. Producción o Volumen

2. Eficiencia o Calidad

3. Rendimiento Eq. Fundamental

4. Indices o Norma Insumos Fund

5. Costo de Operación Unitario

Mineral Transportado Total	Plan del Mes. 149960.0000	Real del Mes. 95900.0000	Plan Acum. 1245320.0000	Real Acum. 987900.0000
----------------------------	------------------------------	-----------------------------	----------------------------	---------------------------

Figura 48. Partidas de costos del Dpto. Ferrocarril Septiembre 2003.

ANEXOS.

Anexo 20.

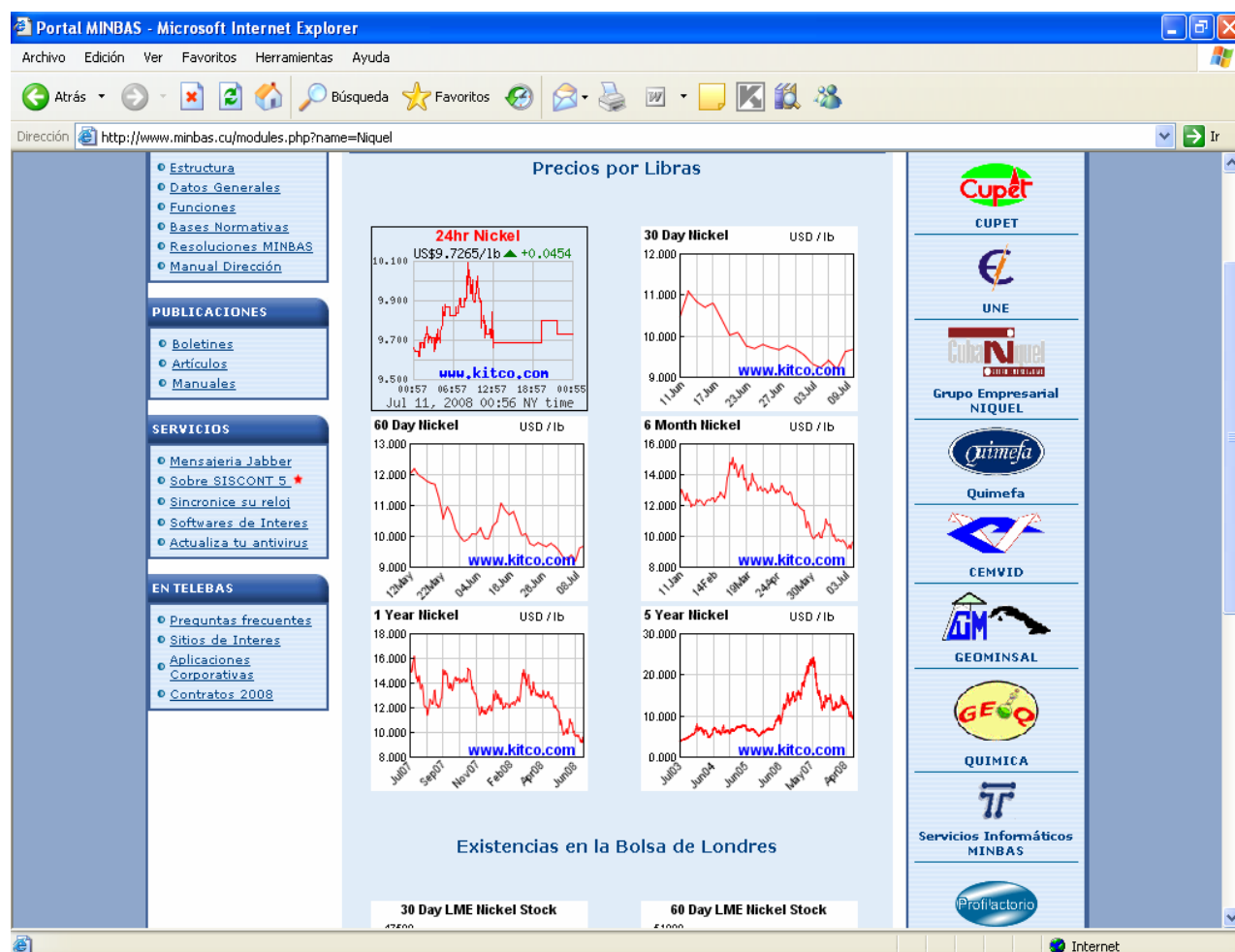


Figura 49. Comportamiento del precio del níquel. Para los últimos 5 años tomamos un precio de \$ 9 600.00 USD/TM, como base para los cálculos

ANEXOS.**Anexo 21.**

RESUMEN FICHA DE COSTO LOCOMOTORA 91009

	Mon. Nacional	USD
Salario 91009	123837.98000	
Materiales		227327.09077
Laboratorio Químico	226.00000	52.00000
Laboratorio Metrología	506.73000	8.20000
Recargo comercial 10 %		22738.72908
Factura parcial 91009	24967.48000	49438.68000
Total de gastos en la 91009	148825.46000	299504.49985
Resumen de gastos 91009	123837.98000	250126.01985

Detalle	Importe
Mano de Obra	123837.98000
Descanso Retribuido 9.09%	11256.87238
Sub Total	135094.85238
Seguridad Social 12 %	16211.36229
Impuesto sobre salario 5%	6754.74262
Sub Total	158060.97729
Gasto Materiales	227327.09077
Sub Total	385388.06806
Gastos Indirectos 26%	100200.89769
Sub Total	485588.96575
Subtotal menos Materiales	258261.87498
Laboratorio Químico	226.00000
Laboratorio Metrología	506.73000
Sub total de gastos	256994.60498
Rentabilidad 10 %	25899.46050
Total general	284894.06548

Total Moneda Nacional	\$284,894.06548
Total en USD	\$250,126.01985



Figura 50. Factura de la reconstrucción de la locomotora № 91009.

ANEXOS.

Anexo 22.



Figura 51. Vista de la locomotora № 91009 antes y tres años después de su rediseño.