V Conferencia Internacional en Desarrollo Energético Sostenible (CIDES 2025)

Título

**“Conversión de un motor de línea de combustión interna a motor eléctrico”**

*Title*

***“Conversion of line motor with internal combustion engine to electric motor”***

**Ing. Francisco Monagas Sánchez1 MSc. Reinaldo M. Martínez Martínez2**

1- Francisco Monagas Sánchez. FIMI, Dpto. Mecánica, Cuba. frmsanchez@uclv.cu

2- Reinaldo M. Martínez Martínez, FIMI, CEETA, Cuba. rmtinez@uclv.edu.cu

**Resumen**

En este trabajo se determinan los métodos y expresiones adecuadas para el cálculo de las fuerzas de resistencias y potencia necesaria de un motor eléctrico para sustituir en un motor de línea con motor de combustión interna. Se realizó un análisis de la bibliografía más actualizada a nivel mundial. Se estudió la dinámica y cinemática ferroviaria, tracción y adherencia, mínimo consumo energético en líneas, resistencia normal al avance de trenes de mercancía, sistemas de frenado aplicados, experiencia en vehículos ligeros de ferrocarriles, diseño de componentes de vehículos ferroviarios para control y mantenimiento de vías y datos del motor de combustión interna utilizado actualmente.

Los trabajos seleccionados y textos escogidos abarcan un amplio espectro de conocimientos y experiencias que permiten determinar los parámetros adecuados de los componentes a utilizar durante el proceso de conversión del motor de línea con tracción a partir de combustión interna a eléctrico.

Aparecen tablas con elementos prácticos obtenidos en la experiencia diaria que servirán definitivamente en la comparación de los resultados obtenidos.

Todo lo estudiado permitirá el cálculo y determinación de los componentes eléctricos del tren motriz y el sistema de frenado.

***Abstract***

*This paper determines the appropriate methods and expressions for calculating the resistance forces and power required for an electric motor to replace a line motor with an internal combustion engine. A review of the most up-to-date literature worldwide was conducted. The papers studied included railway dynamics and kinematics, traction and adhesion, minimum energy consumption on lines, normal resistance to the advance of freight trains, applied braking systems, experience with light rail vehicles, design of railway vehicle components for track control and maintenance, and data on the internal combustion engine currently in use. The selected papers and texts cover a broad spectrum of knowledge and experience that allow for determining the appropriate component parameters to be used during the conversion process of a line motor with traction from internal combustion to electric. Tables include practical elements obtained from daily experience that will ultimately be useful in comparing the results obtained. Everything studied will allow for the calculation and determination of the electrical components of the drivetrain and the braking system.*

**Palabras Clave:** motor de línea, conversión a motor eléctrico, dinámica ferroviaria, cinemática ferroviaria.

***Keywords:*** *line motor, conversion to electric motor, railway dynamics, railway kinematics.*

**1. Introducción**

Los vehículos eléctricos son máquinas que se alimentan principalmente con electricidad en lugar de combustible líquido. Están diseñados para reducir las emisiones y mejorar la eficiencia energética del transporte.

Los vehículos eléctricos ofrecen varios beneficios: ahorro de combustible, menores costos de mantenimiento y reducción de emisiones. Para evaluar los vehículos eléctricos, es importante observar las consideraciones siguientes:

* Rango de batería: la mayoría puede recorrer más de 100 millas por carga, el rango exacto dependía del modelo y las condiciones de la conducción.
* Infraestructura de carga: están creándose cada vez más estaciones públicas de carga, pero hay áreas con menor cobertura.
* Costo inicial: estos vehículos suelen ser más caros que sus contrapartes convencionales, aunque los incentivos pueden ayudar a compensar a diferencia. (Monteagudo-Rodriguez, 2024)

Estos aspectos son generales para todos los vehículos eléctricos.

En este trabajo se va a analizar la dinámica longitudinal del tren, es decir, el movimiento del tren en la dirección de la vía y las fuerzas (aceleradoras o retardadoras que inciden sobre ese movimiento). La dinámica longitudinal del tren es un campo de estudio básico para la explotación ferroviaria, puesto que en ella se basan aspectos tan relevantes como el cálculo de los tiempos de viaje, de los consumos de energía del tren, determinación de las cargas máximas, etc.

Fuerzas que actúan sobre el tren y sistema de coordenadas Sobre un tren pueden actuar en un momento determinado muchas y muy diferentes fuerzas longitudinales: unas son independientes de la acción del propio tren (fuerza de gravedad, efecto del aire); mientras que otras son producidas por una acción en el tren (como las fuerzas de tracción y de frenado). Estas fuerzas provocan una aceleración sobre la masa del tren que hace que éste se mueva y avance sobre la vía. El tren se apoya sobre las ruedas y éstas sobre la vía, por lo que referiremos las fuerzas a un sistema de coordenadas relativo a la vía; en concreto, a un eje longitudinal (L) coincidente con el eje de ésta; a un eje transversal (H), perpendicular al anterior y normal a la vía; y un eje vertical (V) perpendicular al plano que forman los carriles en su superficie superior. Consideramos como sentido positivo del eje longitudinal L el que coincide con el sentido de la marcha del tren, y del eje vertical V, hacia abajo, que coincide con el sentido de la fuerza de gravedad que actúa sobre el tren.

La dinámica longitudinal se refiere a las componentes de las fuerzas sobre el eje L longitudinal de la vía. Las componentes de las fuerzas sobre los otros dos ejes (H y V) se estudian en el dominio de la infraestructura, ya que condicionan la resistencia de ésta; o al analizar la estabilidad del vehículo. Rampas y pendientes. - En los tramos en los que la vía no es horizontal, es decir, donde tiene una inclinación, ésta se considera de signo positivo y se denomina “rampa” cuando la vía aumenta su altitud en el sentido de la marcha del tren. Por el contrario, se considera negativa y se denomina “pendiente” cuando la vía disminuye su altitud al recorrerla en el sentido de la marcha del tren. Las inclinaciones en la dinámica ferroviaria suelen medirse en tanto por mil (“milésimas”). (Alberto Álvarez-García, 2021)

El **objetivo** de este trabajo es:

La determinación con un estudio bibliográfico actualizado de los métodos de cálculo y expresiones adecuadas para determinar las fuerzas de resistencias y potencia necesaria de un motor eléctrico para sustituir en un motor de línea el actual motor de combustión interna

**2. Desarrollo**

**2.1. Cálculo y expresiones adecuadas de las fuerzas de resistencias y potencia necesaria**

Para la determinación de los métodos de cálculo y expresiones adecuadas de las fuerzas de resistencias y potencia necesaria de un motor eléctrico para sustituir en un motor de línea el actual motor de combustión interna, se realizó un análisis de la bibliografía actualizada a nivel mundial.

El resultado de los materiales seleccionados se expone a continuación:

**2.1.1 "Dinámica de Trenes de Alta Velocidad. Cinemática ferroviaria”** (Alberto Álvarez-García, 2021)

Enfatiza modelos de resistencia al avance basados en la ecuación de Davis.

La Resistencia Total Rt se expresa por la ecuación

Rt= (A + Bv + Cv2) (1)

Donde A es la Resistencia por rodadura A=W.$ φ$; (2)

$$φ es coeficiene rodadura y W es el peso del tren,$$

Bv es la resistencia mecánica

 Bv=0,65 × [M+ 13× 𝑁𝑒] ; (3)

 𝑀 es la masa del tren y Ne es el número de ejes

 Cv es la resistencia aerodinámica Cv= $\frac{1}{2}$ 𝐶𝑥 × 𝑆× 𝛿 × 𝑉2;

donde Cx es un coeficiente debido a la forma del tren, S es el área frontal, 𝛿 es la densidad del aire y V la velocidad del tren

Considera además fuerzas adicionales como resistencia en curvas $Rac$

$Rac=M\frac{600b}{R}$ ; (4)

b es el ancho de la vía, R es el radio de la curva.

Ofrece referencias para trenes de diferentes naturalezas como locomotora, tren de mercancías, etc. Se brinda además un análisis de adherencia adecuado.

Oros aspectos a destacar en este material

Modelos empíricos ajustados para trenes lentos y pesados

Enfatiza sobre la resistencia por rodadura y la fricción interna

Complejidad:

 Muy sencillo, ideal para aplicaciones de baja velocidad (<80 km/h).

**2.1.2 "Tracción y Adherencia**" ( (Luigi dell’Olio, 2023)

Utiliza expresiones empíricas relacionadas con la adherencia que son aplicables por diferentes institutos, resaltando que el esfuerzo máximo de tracción que puede ejercer la unidad motriz ,en nuestro caso el motor de línea) debe ser:

*Eadh =Padh ⋅ ϕv* ; (5)

donde Padh es el peso sobre los ejes motrices y ϕv es el coeficiente de adherencia que depende del coeficiente estático de fricción ϕo entre rueda y rail y la velocidad V,

ϕv =ϕo$(\frac{1}{1+0,01 V})$

Presenta gráficos muy importantes sobre las relaciones del esfuerzo de tracción y la adherencia vinculados a la velocidad.

Tiene un desarrollo de expresiones para calcular la resistencia al avance cercanas a los trabajos a analizados.

Otros aspectos para destacar:

Enfoque en límites de adherencia

Fórmulas para potencia mínima

Complejidad

 - Especializado en evitar deslizamiento, no en resistencia al avance.

**2.1.3 “Cálculo óptimo de frecuencias y capacidad con mínimo consumo energético en líneas de transporte público por ferrocarril**” (Ramos-Mate, 2016)

Expone un enfoque principalmente energético.

La resistencia mecánica a la rodadura es calculada por

$Rm=1000ϕ(M+0,07Qar)$ (6)

Donde M representa la masa del tren, Qar la carga en pasajeros del tren y ϕ es el coeficiente de resistencia mecánica a la rodadura.

La Resistencia por efecto de la fricción se expone como

*Rf=0,65M+13Ne (7)*

donde M es la masa del tren y Ne es el número de ejes

La resistencia debido a las curvas se expresa por

$Rc=\frac{800(M+0,07 Qar)}{R}$ (8)

Donde M es la masa del tren, Qar es el peso de los pasajeros y R el radio de la curva

La resistencia a la pendiente, al aire debido a la velocidad y a la aceleración se calculan de manera aproximada al material descrito en el epígrafe 2.1.1.

El cálculo de potencia se obtiene como Potencia = FV integrando todas las resistencias, donde F es la suma de las resistencias al avance (N) V es la velocidad (m/s). Se considera además la energía necesaria para aceleraciones y la recuperación de energía en frenados regenerativos, un aspecto moderno que destaca por su relevancia en la eficiencia energética**.**

El trabajo maneja la dinámica de trenes con un equilibrio notable entre detalle y practicidad, aunque se opta por un modelo de masa puntual, tratando al tren como un único cuerpo. Esto simplifica cálculos y es adecuado para optimización a nivel de red, aunque sacrifica detalles como vibraciones o fuerzas entre vagones.

**2.1.4 “Estudio de la resistencia normal al avance de trenes de mercancía”** (Taranilla-Santos, 2019)

La resistencia total al avance R se expresa en este material como

R = RC + Ri + Rg + RN (9)

Donde Rc es la resistencia en curvas que depende del coeficiente de resistencia en curvas que se define como

$R\_{C}=\frac{500b}{R}$

Donde b es el ancho de la vía y R es el radio de la curva.

Posteriormente la resistencia se determina como Rc=M g rC donde M es la masa del tren g la aceleración de la gravedad.

La resistencia a la pendiente Rg se calcula de forma similar al material del epígrafe 2.1.1

La resistencia a la aceleración Ri es calculada por la expresión Ri= Mg ri donde ri es el coeficiente de resistencia a la aceleración y se determina por

$r\_{i}$=$\left(\frac{a}{g}\right)(1+\frac{Mrot}{M}$)

Donde *a* es la aceleración prevista y g la aceleración de la gravedad (9.8 m/s2), Mrot es la suma de masas en rotación, ruedas y otras en giro de considerables masas; M es la masa total del tren.

RN es la resistencia al avance que se calcula por la expresión de Davis vista en el material del epígrafe 2.1.1.

Ese trabajo expone recomendaciones de expresiones según el tipo de tren (locomotoras, vagones de mercancías, vagones de pasajeros y otros.

**2.1.5 "Handbook of Dynamic Railway Vehicle**" (Iwnicki, 2006)

El texto proporciona una amplia información de expresiones de cálculo para determinar las resistencias al avance, todas ellas empíricas.

Dentro de las más sencillas encontramos:

R avance= Ka [2.943+ 89.2/ma + 0.0306V + 1.741 kad. V2 / (ma. n)] (10)

Donde Ka es un factor que depende del tipo de rodamiento empleado, kad es un coeficiente dependiendo de la forma del tren o vagón, ma es la masa soportada por cada eje, n es el número de ejes y V es la velocidad.

Además, considera la resistencia en curvas como

RC=$\frac{6116}{R}$

donde R es el radio de la curva.

Toma en cuenta un grupo considerable de efectos que son difíciles de tener determinados en la práctica, aunque ellos son menos influentes.

Oros elementos que considera:

Modelo integral con ecuaciones diferenciales para fuerzas:

Resistencia aerodinámica

Resistencia en curvas

Efectos de suspensión y distribución de masas.

 Es el más completo, incluye dinámica no lineal y efectos transitorios

.

**2.1.6 Ejemplo de motor de combustión interna utilizado en un motor de línea** (Altair-Co., 2013)

A continuación, en la Tabla 1 se dan los datos de un motor de combustión interna utilizado en los motores de línea en Cuba

**Tabla 1**. Datos del motor de combustión interna marca URAL utilizado en motores de línea en Cuba (Altair-Co., 2013)

|  |  |
| --- | --- |
| Motor | Boxer 4 tiempos |
| Distribución | OHV 2 válvulas por cilindro |
| Refrigeración | Aire |
| Diámetro x carrera | 78 x 78 mm |
| Ratio de compresión | 8,6:1 |
| Cilindrada | 749 cc |
| Potencia a 5600 RPM | 40 cv |
| Par máximo a 4600 RPM | 5,25 kgm |
| Alimentación | 2 carbuadores Keihin L 22 AA de 32 mm |

Estos datos pueden servir de referencia cuando estén determinados los parámetros del motor eléctrico que lo sustituirá.

**2.2 Análisis de los sistemas de frenado aplicados a vehículos ferroviarios.**

Dentro de un grupo de materiales bibliográficos estudiados se seleccionaron los que a continuación se exponen, destacando en cada uno de ellos los aspectos más relevantes relacionados con el frenado en ferrocarriles y que permitan tomarlo en consideración en la decisión sobre el freno del motor de línea.

**2.2.1 Railway Technology Today 7. Braking System (Izumi Hasegawa y Seigo Uchida)** (Uchida & Hasegawa, 1999)**.**

Expresa la Teoría general de frenado ferroviario: neumático, eléctrico y magnético.

La energía cinética del tren es

EK =$\frac{1}{2}$ Mtotal. $V^{2}$ (11)

Mtotal es la masa total a frenar y V la velocidad;

la fuerza de frenado como

Ffrenado =$ \frac{Ek}{d}$ (12)

donde d es la distancia de frenado

La fuerza de frenado debe superar la energía cinética acumulada, considerando coeficientes de fricción y pendientes.

No aborda directamente vehículos ligeros: speeders railroad o motor de línea. No parece recomendable como guía para el cálculo de sistema de frenado del motor de línea.

**2.2.2 Railroad Speeder Fairmont (Modelo S2 serie G)** (Railroad Speeder Fairmont, 1939)

Esta compañía tiene una experiencia de muchos años (1919) dedicándose a los vehículos ligeros para ferrocarriles.

El material analizado es un manual práctico para vehículos de mantenimiento ferroviario ligeros.

El aspecto más relevante:

**Frenos mecánicos de zapata accionados por palanca o pedal.**

La fuerza normal N para el freno de Zapata se calcula empíricamente por la expresión:

$N=\frac{Mtotal g senθ}{μ}$ (13)

Donde μ es el coeficiente de fricción entre zapata y rueda y θ es el ángulo de pendiente de la vía.

En este material aparecen múltiples datos de uso aplicados como coeficientes de fricción.

**2.2.3 Fairmont Manual práctico del modelo M9 – G** (Fairmont, 1946)

Este modelo que estamos analizando de Fairmont, es similar al que será convertido a eléctrico pues su peso tractor es de 400 Kg y el remolque de 2000 Kg y presenta frenos de zapata en ambas ruedas, además nos proporciona datos sobre la fuerza de frenado a diferentes distancia de frenado lo cual servirá de referencia en nuestros cálculos.

Expresa la fuerza de frenado $Ffrenado$ como:

$Ffrenado=Mtotal. (a+g.senθ)$ (14)

Donde a es la desaceleración, g es la aceleración de la gravedad y θ el ángulo de inclinación de la vía. La desaceleración a será basada en la distancia de frenado.

**2.2.4 “Diseño de componentes de vehículos ferroviarios para control y mantenimiento de vías”. Víctor Manuel García Molina.** (Molina, 2012)

Este material proporciona elementos importantes como los materiales utilizados en las zapatas y además expone una expresión para el radio de las ruedas mínimo $Dmin$ de manera que no se bloqueen

$Dmin=\frac{2 Ffrenado r}{τ\_{material}}$ (15)

Donde ***r*** es el radio de contacto y $τ\_{material}$es la resistencia del material al aplastamiento.

El trabajo también acomete diferentes tipos de frenos.

**2.2.5. “Estudio análisis de un freno ferroviario”, Francisco José Miranda Pedrazuela.** (Miranda-Pedrazuela, 2015)

Ofrece una perspectiva térmica además de los cálculos de fuerza de distancia de frenado, estableciendo temperaturas máximas para las zapatas. El incremento de temperatura $∆T:$

$∆T=\frac{Ek}{m\_{zapata}. c}$ (16)

Donde Ek es la energía cinética del motor de línea, mzapata es la masa de la zapata y C el coeficiente de transferencia del material de la zapata.

Se dan criterios acerca de la temperatura a alcanzar por los frenazos continuos.

**2.2.6 “Condiciones de frenado sobre trenes de mercancía de gran capacidad de carga”, Manuel Lendínez Hurtado.** (Lendínez-Hurtado, 2020)**.**

Uno de los elementos más importantes que aporta este trabajo es la recomendación de factor de seguridad en la fuerza de frenado, estableciendo que la fuerza de diseño $Fdiseño$ es

$Fdiseño=Ffrenado. 1,5$ (17)

**2.2.7 “An investigation on braking system used in railway vehicles”. Musagá Gunay.** (Gunay, 2020)

Es un documento que aborda el tema de frenado desde el pun$t$o de vista de la energía, estableciendo el principio de trabajo y energía de manera adecuada considerando el trabajo negativo de las fuerzas de frenado donde el espacio recorrido durante el frenado juega un papel determinante en la teoría planteada de forma detallada.

Considera que desde una posición más alta que la de parada (pendiente a favor del tren), la energía cinética y potencial del tren se convierte en trabajo de la fuerza de frenado $Ffrenado$ y el trabajo de las resistencias al avance $Ravance$:

$\frac{1}{2}m.V^{2}$+ $\frac{1}{2}Iω^{2}$+ $+mgh=(Ffrenado+ Ravance).S $ (18)

Donde ***m*** es la masa del tren, ***I*** es el momento de inercia de las ruedas y otras partes rotatorias considerables, ***S*** es la distancia recorrida durante el frenado, V e la velocidad lineal del vehículo, ω es la velocidad angular de las ruedas y h es la diferencia de altura debido a la pendiente.

Vincula la fórmula de Davis de resistencia al avance con los elementos considerados en el frenado.

Explica con profundidad los tipos de mecanismos de frenados pasando por los de vacío, de presión de aire hasta los mecanismos por palancas con varios accionamientos sobre los ejes o ruedas.

**Conclusiones**

Los trabajos seleccionados y textos escogidos abarcan un amplio espectro de conocimientos y experiencias que nos permitirán determinar los parámetros adecuados de los componentes a utilizar durante el proceso de conversión del motor de línea con tracción a partir de combustión interna a eléctrico.

La selección de artículos y trabajos exponen las diferentes expresiones de cálculo y datos específicos desde diferentes puntos de vistas, unos desde la energía y su balance (energía cinética y potencial junto al trabajo de las fuerzas retardatrices) y otros desde el punto de visa de las desaceleraciones que provocan las fuerzas de frenado y las resistencias al avance.

Aparecen en los diferentes trabajos, tablas con elementos prácticos obtenidos en la experiencia diaria que nos servirán definitivamente en la comparación de los resultados obtenidos.

Se han mostrado los elementos fundamentales de cada trabajo, pero realmente el contenido es muy abarcador en cada caso, quedando en mano de los autores el seleccionar adecuadamente las expresiones idóneas en cada caso, así como las referencias con mejores aplicaciones.

Se considera que existen las condiciones para acometer el próximo paso que será el cálculo y determinación de los componentes eléctricos del tren motriz y el sistema de frenado para trenes.

**Referencias bibliográficas**

Alberto Álvarez-García, I. G.-F., 2021. *"Dinámica de los trenes de aldta velocidad. Cinemática ferroviaria".* 15 edición ed. Madrid.

Altair-Co., 2013. *Modelos motos Ural.* [En línea]
Available at: https://www.erriorio-ural.com
[Último acceso: 22 junio 2023].

Fairmont, 1946. *Fairmont Manual práctico del modelo M9 – G*.

Gunay, M., 2020. *An investigation on braking system used en railway vehicles*.

Iwnicki, S., 2006. *Handbook of Dynamic Railway Vehicle*.

Lendínez-Hurtado, M., 2020. *Condiciones de frenado sobre trenes de mercancía de gran capacidad de carga*.

Luigi dell’Olio, B. A. O. J. L.-L. M. B., 2023. *Tracción y Adherencia*.

Miranda-Pedrazuela, F. J., 2015. *Estudio análisis de un freno ferroviario*.

Molina, V.-M. G., 2012. *Diseño de ccomponentes de vehículos ferroviarios para control y manteanimiento de vías.*

Monteagudo-Rodriguez, D., 2024. *Trabajo de Diploma "Vehículos automotores eléctricos" Tutor: Martínez, R.,* Santa Clara, Cuba: UCLV.

Railroad Speeder Fairmont, 1939. *Modelo S2 serie G*.

Ramos-Mate, M., 2016. *Cálculo óptimo de frecuencias y capacidad con mínimo consumo energético en líneas de transporte público por ferrocarril*.

Taranilla-Santos, J., 2019. *Estuddio de la resistencia normal al avancae de tdrenes de mercancía*.

Uchida, S. & Hasegawa, I., 1999. *Railway Technology Today 7. Braking System.*