

## **Aplicativo para el Análisis de Consumo Energético de los trenes de primera generación del Metro de Medellín**

*Mario F. CIFUENTES*

*Universidad Pontificia Bolivariana; Cir.1 #70-01, B11, Medellín, Colombia.  
mariofernando.cifuentes@alfa.upb.edu.co*

Resumen: En este documento se muestra la información más relevante sobre un estudio realizado al perfil aerodinámico de los trenes del Metro de Medellín, asociado al consumo de energía eléctrica y los factores de los cuales dicho consumo depende. Inicialmente se presenta la información teórica relacionada al tema, luego se muestra la fuerza de arrastre como un ítem principal asociado a la variación del consumo debido al diseño de una carena que mejora el perfil aerodinámico del tren, para finalmente presentar un aplicativo en Excel®; los resultados obtenidos muestran un ahorro energético para el tren de primera generación con el acople de la carena mencionada. *Copyright © 2012 UPB KOSMOS*

Abstract: This document shows the most relevant information from a study of the aerodynamic profile of the Medellín Metro trains, associated with the consumption of electricity and which factors such consumption depends. Initially theoretical information about this topic is presented, then shows the drag force as a main item associated with the change in consumption due to the design of a careening that improving the aerodynamic profile of the train, and finally submit the application in Excel®, the results shows energy savings for the first generation train with the coupling of the careen.

Keywords: Aerodynamic, Excel® Aplicative, Carenado, Electric Power, Energy Consumption, Drag Force, Passenger Train.

## 1. INTRODUCCIÓN

El uso de energía eléctrica para el transporte masivo, se ha posicionado como una alternativa limpia de emisiones; sin embargo, por los costos económicos que esta actividad implica, se hace necesario buscar formas de minimizar su consumo, sin comprometer la operación.

En relación al tema se han desarrollado diferentes proyectos que aportan en cierta medida a la búsqueda de diferentes soluciones, tanto en la ciudad como a nivel global:

En España (Durán, 2010) presentó un estudio sobre la transformación de la energía cinética del frenado de los trenes de tracción en energía potencial, reduciendo costos de operación y fomentando el aprovechamiento de la energía. En Medellín - Colombia, se desarrolló un aplicativo en Matlab® que permite simular el sistema de tracción eléctrica de múltiples vehículos, especificando diferentes condiciones de operación como topografía de la ruta y características del vehículo. (Morato, 2011)

Con el presente trabajo se pretende desarrollar un aplicativo en Excel®, que permita calcular diferentes variables de interés asociadas al consumo energético de los trenes, para evaluar desde el punto de vista energético el cambio de la carena del metro; usando dichos resultados en situaciones futuras para la toma de decisiones y posteriores estudios económicos.

La información teórica se presenta como primer capítulo, debido a que es necesario conocer los conceptos básicos y la información, para facilitar la comprensión y contextualización del lector, así como el correcto desarrollo del trabajo, en temas como eficiencia energética, modelo de cálculo usado, fuerza de tracción, acción de frenado, fuerzas opuestas al movimiento, máquina de C.D tipo serie, entre otros.

La fuerza de frenado representa el factor más importante referente al enfoque que presenta el estudio, ya que es esta fuerza la que influye sobre la variación del consumo en función del perfil aerodinámico, representando una pieza clave para el estudio del efecto de la carena instalada, por tal motivo, se presenta el segundo capítulo como una profundización en este tema específico.

Finalmente y con la definición de las variables a analizar, se desarrolla el aplicativo que permite el análisis sobre la variación del consumo, en comparación con diferentes periodos de datos tomados por medio de las herramientas del tren y sensores instalados, con base a la información obtenida se presentan resultados y se concluye.

## 2. BASES TEÓRICAS EN EL CONSUMO ENERGÉTICO EN LOS SISTEMAS DE TRACCIÓN

La eficiencia energética es un nuevo parámetro a considerar en el transporte eléctrico con demanda masiva, debido a los costos que esto implica; por esta razón se debe apostar a la investigación científica y al desarrollo de proyectos relacionados al tema.

Referente a la eficiencia energética, existen una serie de características que influyen, reflejándose en el costo de operación, estas son:

- Aerodinámica del tren o metro.
- Peso del tren en vacío y con pasajeros.
- Eficiencia en el sistema de tracción.
- Eficiencia del motor.
- Perdidas en la transmisión.
- Eficiencia del chopper.
- Uso del frenado.

### 2.1. Modelo de Cálculo

Con base a dichas variables, se plantea el modelo de cálculo a seguir, este describe el comportamiento del vehículo, según la

segunda ley de Newton (1), analizando las fuerzas que actúan sobre él a partir de la Figura 1.

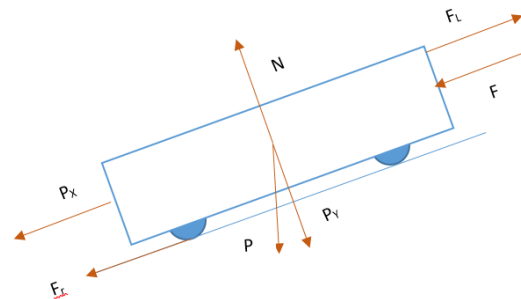


Figura 1. Diagrama de cuerpo Libre de un vehículo sometido a fuerzas opositoras

$$a = \frac{\sum_{i=0}^n F_i}{m} \quad (1)$$

donde,  $n$  es el número de fuerzas presentes sobre el tren,  $m$  es la masa del tren y  $a$  es la aceleración del tren.

## 2.2. Fuerzas Opositoras al Movimiento

Son aquellas que se oponen al movimiento del vehículo, varían constantemente ya que son proporcionales a la velocidad y las pendientes del trazado (Morato, 2011). Estas se definen a partir de la Figura 1, son las siguientes:

$F_L$ : Fuerza debida a la resistencia del aire.

$F_R$ : Fuerza debida a la rodadura.

$P$ : Peso del vehículo.

$P_x$ : Componente del peso en el eje horizontal.

$P_y$ : Componente del peso en el eje vertical.

## 2.3. Resistencia a la rodadura

Es una de las fuerzas opositoras, actúa a nivel de la superficie entre la rueda y el terreno o la vía (Morato, 2011), como se muestra en la ecuación (2). Dicha fuerza es causada por histéresis en los materiales y se produce cuando la rueda gira sobre la superficie en línea recta (Ehsani and Emadi, 2010)

$$F_r = Mgf_r \cos(\alpha) \quad (2)$$

donde  $M$  es la masa del tren con pasajeros en  $kg$ ,  $g$  es la gravedad en  $m/s^2$ ,  $f_r$  es el coeficiente de resistencia a la rodadura y  $\alpha$  es el ángulo de inclinación en radianes.

## 2.4. Resistencia Aerodinámica

Fuerza opositora que se genera debido a la interacción del vehículo con el aire, esta se presenta cuando el vehículo se mueve a una determinada velocidad, donde la presión y la fricción son las componentes principales que generan dicha resistencia.

En la ecuación (3) se define la resistencia aerodinámica.

$$F_w = \frac{1}{2} \rho A_f C_D V^2 \quad (3)$$

donde  $\rho$  representa la densidad del aire en  $kg/m^3$ ,  $A_f$  el área frontal del tren en  $m^2$ ,  $C_D$  el coeficiente de arrastre aerodinámico y  $V$  la velocidad en  $m/s$ .

## 2.5. Resistencia de gradiente

Posee componentes tanto en el eje  $x$  como en el eje  $y$ ; su valor depende de la masa y el ángulo de inclinación del plano en el que

se mueve el tren. En la ecuación (4) se observa la componente en  $x$  debido al peso y al ángulo de inclinación que se encuentran en el vehículo.

$$F_g = Mg \sin(\alpha) \quad (4)$$

donde  $M$  es la masa del tren con pasajeros en  $Kg$ ,  $g$  es la gravedad en  $m/s^2$  y  $\alpha$  es el ángulo de inclinación en radianes.

Es de gran importancia incluir esta resistencia a las demás fuerzas opositoras del vehículo, ya que es la componente de mayor magnitud. Para la componente en  $y$ , se describe la misma ecuación pero con la diferencia que se utilizaría la función *coseno*.

### 3. INFLUENCIA DE LA FUERZA DE ARRASTRE AERODINÁMICA EN EL CONSUMO ENERGÉTICO

Para el estudio aerodinámico es necesario tener en cuenta el perfil de los trenes de primera generación y la modificación que surge con la instalación de la carena diseñada, tal como se muestra en la Figura 2.



(a) Carena no aerodinámica.

(b) Carena aerodinámica.

Figura 2. Trenes MAN de primera generación.  
Tomada de (Metro de Medellín, 2012)

Los trenes de segunda generación, adquiridos recientemente, por el metro de Medellín no requieren del acople de una nueva carena, debido a que estos presentan un perfil aerodinámico adecuado para el transporte masivo urbano.

En la Figura 3 se observa la imagen de la carena correspondiente a los trenes de segunda generación.



Figura 3. Trenes MAN de segunda generación.  
Tomada de (Metro de Medellín, 2012)

### 3.1. Fuerza de arrastre aerodinámica

Es una fuerza de oposición, que se presenta cuando un objeto se mueve a una determinada velocidad dentro de un fluido (para este caso aire), este fenómeno se presenta en la superficie del objeto y tiene como efecto atrasar el movimiento del aire, creando también una reacción de oposición que retrasa el movimiento del objeto.

Por medio del presente proyecto se ha analizado la trascendencia de la modificación del carenaje de los coches motores del metro de Medellín con el fin de disminuir el consumo energético del tren, teniendo como base un estudio realizado por la UPB, que consiste en presentar las fuerzas aerodinámicas existentes opuestas al movimiento del tren, buscando la reducción de dichas fuerzas.

Obteniendo resultados que indican que a mayor velocidad, mayor es la magnitud de la fuerza de arrastre aerodinámico, debido a que dicha magnitud crece proporcionalmente al cuadrado de la velocidad como se expone en la ecuación (3).

La carena aerodinámica diseñada por los grupos de investigación de la facultad de ingeniería Mecánica y aeronáutica de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) de Medellín, mostrada en la Figura 2b, se ideó con el fin de reducir los consumos energéticos del tren, por medio de la reducción de las fuerzas de arrastre aerodinámicas.

A partir de dicho diseño se ha generado un estudio computacional de un modelo a escala, para hallar la distribución de fuerzas presentes, arrojando los resultados mostrados en la Tabla 1. (Tabares, Giraldo, Nieto & Gómez 2012)

Tabla 1. Distribución de fuerzas

Clasificación de Fuerzas	Consumo (%)
Frontal	71.9
Trasera	15.9
Inferior	9.6
Superior	1.1
Lateral	0.9
Intervag	0.6

#### 4. PRESENTACIÓN DEL APLICATIVO Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Para la obtención de resultados fue necesaria la implementación de distintos sensores sobre la unidad U37A, ubicados como se muestra en la Figura 4. Lo anterior es determinante a la hora de evaluar las condiciones del consumo, ya que varía según las siguientes condiciones:

- Unidad U37A mando norte y al sur.
- Unidad U37A no configurada como coche motor sin mando en otras palabras la unidad U37 se desplaza en dirección de la unidad U37B.
- Unidad U37A acoplada con otra unidad.

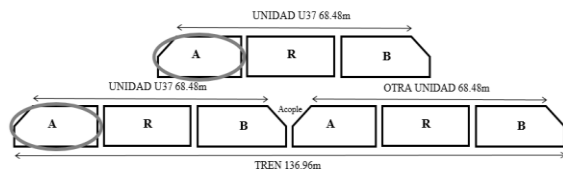


Figura 4. Representación de una unidad y su acople

En la Figura 5 se observa el panel de control correspondiente al aplicativo diseñado en Microsoft Excel, donde se ejecuta lo básico del programa: cargar datos, eliminar datos, guardar datos y ver el historial de datos guardados.



Figura 5. Panel de Control de aplicativo diseñado

La modificación del carenaje fue hecho en la unidad U37A, se realizó a partir del 15 de octubre del 2012. Por lo tanto se decide comparar los meses de mayo y junio vs octubre y noviembre, para analizar y cuantificar el porcentaje de reducción.

#### 4.1. Metodología

En la Figura 6 se muestra la metodología para evaluar el efecto que produce desde el punto de vista energético, el cambio de la carena del Metro, desarrollada por la UPB.

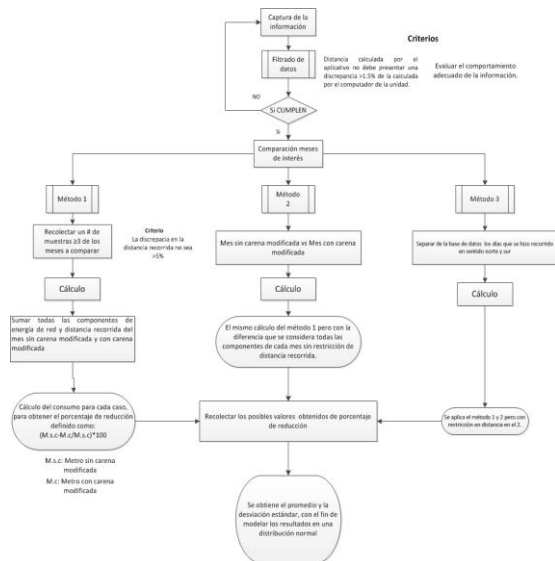


Figura 6. Flujograma para la metodología

#### 4.2. Resultados

Para la obtención de los resultados se ha realizado un proceso de filtrado de los datos obtenidos según la Figura 6, con la base de datos obtenida se planteó comparar los meses en que la unidad U37 utilizó carenaje aerodinámico contra los meses en que no lo usó. La comparación de estos meses fue ejecutada de acuerdo a los tres métodos propuestos en el flujograma, en la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos en Microsoft Excel.

Tabla 2. Resultados obtenidos

Rango de Reducción (%)	Distribución Normal (%)
0.580	3.9050
1.100	11.2521
1.330	16.5877
1.900	35.5973
2.210	48.3170
2.500	60.4012
2.600	64.4027
2.600	64.4027
2.980	77.9391
3.300	86.6011
3.650	93.0159



Los datos registrados en la Tabla 2, presentan un promedio de 2.2500 % y una desviación de 0.9479 %.

A los porcentajes de reducción arrojados por el aplicativo, se le realizó un análisis estadístico, con el fin de analizar cuál es el rango de reducción más probable, en la Figura 7 se presenta la gráfica con los resultados de dicho análisis.

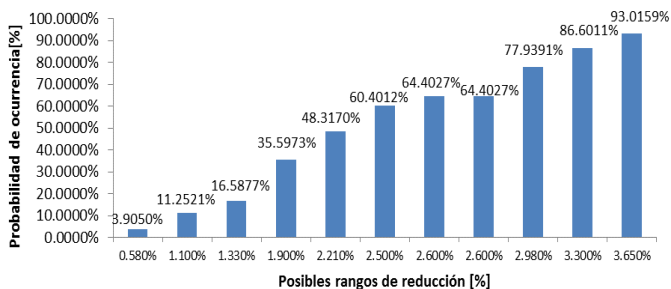


Figura 7. Flujograma para la metodología

En la Figura 7 se obtiene la probabilidad de ocurrencia de cada valor de reducción, donde los valores menos posibles son del 0 % al 0.58 %, ya que su probabilidad de ocurrencia es del 3.9 %, el valor intermedio esta entre 1.9 % y 2.21 % con una probabilidad de ocurrencia del 60.4 %.

Además del consumo energético de las unidades analizadas, también se caracterizaron las pérdidas halladas en el circuito de tracción, en la Figura 8 se presentan los resultados obtenidos para el mes de Noviembre del año 2012.

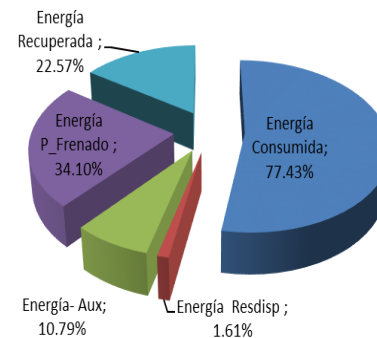


Figura 8. Distribución energética mes de Noviembre

En la Figura 8 se puede observar la energía que fue consumida por la unidad en un principio y el porcentaje de recuperación de dicha energía consumida, por ende al restar estas dos energías se obtiene el total de energía consumida en realidad. Por último se muestran las pérdidas, que son representadas por la energía previa de frenado (E\_P\_Frenado) y la energía en la resistencia de

disipación (E\_Reddisp), además se muestra la energía recuperada y la energía consumida.

## 5. CONCLUSIONES

Se desarrolló un aplicativo en Visual Basic que se ejecuta en Microsoft Excel, este recoge la información, la procesa y sintetiza por medio de macros para determinar distintas variables de interés relacionadas con el consumo energético de los trenes de primera generación del Metro de Medellín, permitiendo cuantificar el porcentaje de ahorro de energía eléctrica consumida debido a la instalación de un carenado en el área frontal de las unidades U37 y U38, dicho carenado fue propuesto por las facultades de ingeniería Mecánica e Ingeniería Aeronáutica y evaluado por la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Pontificia Bolivariana sede Medellín.

La metodología propuesta en el presente trabajo permitió obtener un porcentaje de reducción de energía eléctrica bajo diferentes condiciones operativas, además el análisis estadístico allí planteado fue un medio para establecer la probabilidad de ocurrencia de cada porcentaje de reducción, por lo tanto se obtiene una idea de cuál es el rango más probable de reducción.

El Software diseñado permite conocer los consumos energéticos de los trenes de primera generación del Metro Medellín, constituyéndolo como una herramienta efectiva para la

determinación y cuantificación de las pérdidas, que para este caso se dan al comparar las características aerodinámicas de una unidad sin carenado aerodinámico frente a otra unidad con carenado aerodinámico.

Los resultados obtenidos, pueden ser mejorados por medio de la instalación de un carenado en el área trasera del vehículo, ya que la fuerza de arrastre aerodinámico la clasifica como la segunda área más crítica de este, con un consumo del 15.9 % del total de energía consumida.

Las pérdidas por disipación de energía eléctrica obtenidas presentaron un porcentaje de 1.61 %, lo que representa un gasto innecesario de energía eléctrica que puede ser potencialmente aprovechada en otras funciones y no ser desperdiciada en las resistencias de disipación.

## AGRADECIMIENTO

La estructura de este trabajo de grado se debe en gran parte a los conocimientos suministrados por el PhD Andrés Emiro Díez Restrepo, director del proyecto y pionero del transporte eléctrico en la Universidad Pontificia Bolivariana, sede Medellín Colombia (UPB).

Un agradecimiento especial a la empresa de transporte masivo del valle de aburra limitada (Metro de Medellín Ltda), por permitirme disponer de la información necesaria, para el desarrollo de este proyecto, de igual forma al ingeniero Luis Eduardo Castrillón, quien fue el representante de la empresa en todo momento con sus conocimientos brindados y acompañamiento constante, de gran importancia para la culminación de este trabajo.

#### REFERENCIAS

- Durán, D.L (2010) *"Estudio del aprovechamiento de la energía regenerada por los trenes"* Madrid, España
- Morato O. M. Y. (2011) *"Aplicativo para el dimensionamiento de un sistema de tracción eléctrica,"* UPB, Medellín.
- Ehsani M. G. Y. and Emadi A. (2010) *"Modern Electric, Hybrid Electric and fuel cell vehicles"* (2do Ed.), USA: Taylor and Francis Group.
- Metro de Medellín (2012). *"Empresa de transporte masivo para el valle de aburra LTDA"*. Medellín, Colombia
- Tabares, A., Giraldo M., Nieto C. y Gómez N. (2012) *"Incremento de la eficiencia energética y el confort del usuario en el metro de Medellín mediante simulación computacional de fluidos"* UPB, Medellín.

#### AUTOR



*Mario Fernando CIFUENTES PARDO.*  
Estudiante de último año de la facultad de ingeniería de la Universidad Pontificia Bolivariana, próximo a graduarse de los programas de ingeniería eléctrica y electrónica, culminó sus estudios secundarios

en el Colegio Tolimense de la ciudad de Ibagué, durante sus estudios universitarios realizó cursos de extensión académica en programación de controladores lógicos programables en la UPB, manejo de Excel básico y avanzado en la Universidad nacional de Colombia en los meses de julio y agosto del 2012, además fue participe del grupo de investigación GAUNAL de matemáticas avanzadas para el control de sistemas dinámicos de la universidad Nacional de Colombia (2011-01), sede Medellín.