

APLICATIVO PARA EL ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE LOS TRENES
DE PRIMERA GENERACIÓN DEL METRO DE MEDELLÍN

MARIO FERNANDO CIFUENTES PARDO

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA-ELECTRÓNICA
INGENIERÍA ELECTRÓNICA
MEDELLÍN

2013

APLICATIVO PARA EL ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE LOS TRENES
DE PRIMERA GENERACIÓN DEL METRO DE MEDELLÍN

MARIO FERNANDO CIFUENTES PARDO

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA-ELECTRÓNICA
INGENIERÍA ELECTRÓNICA
MEDELLÍN

2013

APLICATIVO PARA EL ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE LOS TRENES
DE PRIMERA GENERACIÓN DEL METRO DE MEDELLÍN

MARIO FERNANDO CIFUENTES PARDO

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Eléctrico Y Electrónico

Director

ANDRÉS EMIRO DÍEZ RESTREPO

PhD

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA-ELECTRÓNICA

INGENIERÍA ELECTRÓNICA

MEDELLÍN

2013

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma
Nombre
Presidente del jurado

Firma
Nombre
Presidente del jurado

Firma
Nombre
Presidente del jurado

Medellín, 2013

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABLAS	VIII
AGRADECIMIENTOS	XI
GLOSARIO	1
OBJETIVO GENERAL	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
RESUMEN	2
INTRODUCCIÓN	4
ORIGEN DE LA IDEA.....	5
ESTADO DEL ARTE.....	5
CAPÍTULO 1. BASES TEÓRICAS EN EL CONSUMO ENERGÉTICO EN LOS SISTEMAS DE TRACCIÓN.....	7
1.1 MARCO TEÓRICO.....	7
1.1.1 <i>IMPORTANCIA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA.....</i>	<i>7</i>
1.1.2 <i>MODELO DE CÁLCULO.....</i>	<i>8</i>
1.1.2.1 FUERZA DE TRACCIÓN.....	10
1.1.2.2 FUERZAS Opositoras AL MOVIMIENTO.....	11
1.1.2.3 ECUACIONES DE MOVIMIENTO DE TRANSLACIÓN	12
1.1.2.4 RESISTENCIA DE RODADURA:.....	12
1.1.2.5 RESISTENCIA AERODINÁMICA:	14
1.1.2.6 RESISTENCIA DE GRADIENTE (PESO)	16
1.1.2.7 CÁLCULO DEL CONSUMO ENERGÉTICO	17
1.1.2.8 ECUACIONES DE MOVIMIENTO ROTATORIO.....	19
1.1.3 <i>Uso del Frenado.....</i>	<i>23</i>
1.1.3.1 FRENADO DISIPATIVO (DINÁMICO, REOSTÁTICO)	24
1.1.3.2 FRENADO REGENERATIVO	24
1.1.3.3 FRENADO MIXTO.....	25
1.1.4 <i>Máquina de C.D tipo serie Metro de Medellín.....</i>	<i>26</i>
1.1.4.1 MODO MOTOR.....	29
1.1.4.2 MODO GENERADOR	30

CAPÍTULO 2. INFLUENCIA DE LAS FUERZAS DE ARRASTRE AERODINÁMICAS EN EL CONSUMO ENERGÉTICO. 38

2.1	CONCEPTOS BÁSICOS	40
2.1.1	<i>Comportamiento del aire en el movimiento de un sólido</i>	40
2.1.2	<i>Relación de Bernoulli</i>	40
2.1.3	<i>Velocidad del flujo libre de aire</i>	41
2.1.4	<i>Punto de estancamiento</i>	41
2.1.5	<i>Coficiente de presión</i>	42
2.1.6	<i>Líneas de flujo</i>	42
2.1.7	<i>Capa Límite</i>	43
2.1.8	<i>Fuerza de arrastre aerodinámico</i>	44
2.2	IMPORTANCIA DE LA GEOMETRÍA	45
2.3	ESTUDIO COMPUTACIONAL DE LAS FUERZAS DE ARRASTRE AERODINÁMICAS QUE SE EJERCEN SOBRE LAS CARENAS IMPLICADAS EN EL PROYECTO.	49
CAPÍTULO 3.	PRESENTACIÓN DEL APLICATIVO Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	54
3.1	METODOLOGÍA PARA EVALUAR EL EFECTO QUE PRODUCE DESDE EL PUNTO DE VISTA ENERGÉTICO, EL CAMBIO DE LA CARENA DEL METRO, DESARROLLADA POR LA UPB.	60
3.1.1	<i>Diagrama de flujo</i>	60
3.1.2	<i>Comportamiento de datos calculados</i>	63
3.1.2.1	Mes de octubre y noviembre	63
3.1.2.2	Mes de mayo y junio.....	66
3.1.3	<i>Análisis estadístico</i>	70
3.1.3.1	Primer caso	70
3.1.3.2	Segundo caso	73
3.1.3.3	Tercer caso comparación unidades U37 VS U38.....	74
3.1.3.4	Caso 4	77
3.2	RANGO DE REDUCCIÓN GENERAL	79
3.3	CARACTERIZACIÓN DE PÉRDIDAS	82
3.3.1	<i>Distribución energética</i>	83
3.4	ESTRATEGIA PARA LA REDUCCIÓN	86
CONCLUSIONES		87
REFERENCIAS		90
ANEXO 1 (MANUAL DE USUARIO)		91

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE. [1] [4].....	9
FIGURA 2. ESFUERZO DE TRACCIÓN Y FUERZAS OPOSITORAS. [1]	10
FIGURA 3. DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE PARA MOVIMIENTO DE TRASLACIÓN. [6].....	12
FIGURA 4. DEFORMACIONES Y FUERZAS EN SUPERFICIE SUAVE. [1] [5]	13
FIGURA 5. GRÁFICO DE POTENCIA EN EL TIEMPO	18
FIGURA 6. DIAGRAMA PARA ANÁLISIS DE MOVIMIENTO ROTATORIO. [6]	19
FIGURA 7. DEFINICIÓN DE MOMENTO DE UNA FUERZA CON RESPECTO A UN PUNTO. [8].....	20
FIGURA 8. CIRCUITO EQUIVALENTE MÁQUINA DE C.D CON DEVANADO SERIE. [6]	26
FIGURA 9. CIRCUITO EQUIVALENTE EN MODO GENERADOR. [6].....	30
FIGURA 10. CARACTERÍSTICA PAR-VELOCIDAD DE UN MOTOR DC SERIE. [10].....	32
FIGURA 11. CIRCUITO DE CONTROL PARA FRENADO DISIPATIVO [11]	33
FIGURA 12. TRENES DE PRIMERA GENERACIÓN (TRENES MAN)	39
FIGURA 13. 2 ^{DA} GENERACIÓN DE TRENES ADQUIRIDA POR EL METRO DE MEDELLÍN (TRENES CAF)	39
FIGURA 14. PUNTOS DE PRESIÓN Y VELOCIDAD SOBRE UN VEHÍCULO. [2]	40
FIGURA 15. LÍNEAS DE FLUJO SOBRE UN TRÁILER. [2]	43
FIGURA 16. PERFIL DE VELOCIDAD DE LA CAPA LÍMITE. [2].....	43
FIGURA 17. MODELO A ESCALA DEL METRO DE MEDELLÍN. [2]	45
FIGURA 18. VECTORES DE PRESIÓN TOTAL SECCIÓN TRASERA TREN (80KM/H). [2]	47
FIGURA 19. VECTORES DE PRESIÓN ESTÁTICA, SECCIÓN FRONTAL DEL TREN (80KM/H). [2]	48
FIGURA 20. MODIFICACIÓN PROPUESTA CARA FRONTAL Y TRASERA. [2].....	48
FIGURA 21. SUMATORIA DE FUERZAS SOBRE LAS DISTINTAS CARENAS. [14]	51
FIGURA 22. DISTRIBUCIÓN DE FUERZAS. [14].....	51
FIGURA 23. RECORRIDO LÍNEA A METRO DE MEDELLÍN.....	53
FIGURA 24. ESTRUCTURA DE LA UNIDAD ANALIZAR. [2].....	54
FIGURA 25. SOFTWARE WR300-APS. [15].....	55
FIGURA 26. PANEL DE CONTROL DE APLICATIVO DISEÑADO.....	57
FIGURA 27. INFORMACIÓN SIN FILTRAR DE ENERGÍA CONSUMIDA EN OCTUBRE VS DISTANCIA RECORRIDA.....	64
FIGURA 28. INFORMACIÓN SIN FILTRAR DE ENERGÍA CONSUMIDA EN NOVIEMBRE VS DISTANCIA RECORRIDA.	64
FIGURA 29. INFORMACIÓN FILTRADA DE ENERGÍA CONSUMIDA EN OCTUBRE VS DISTANCIA RECORRIDA.	65
FIGURA 30. INFORMACIÓN FILTRADA DE ENERGÍA CONSUMIDA EN NOVIEMBRE VS DISTANCIA RECORRIDA.	66
FIGURA 31. INFORMACIÓN SIN FILTRAR DE ENERGÍA CONSUMIDA EN MAYO VS DISTANCIA RECORRIDA.	67
FIGURA 32. INFORMACIÓN SIN FILTRAR DE ENERGÍA CONSUMIDA EN JUNIO VS DISTANCIA RECORRIDA.....	67
FIGURA 33. INFORMACIÓN FILTRADA DE ENERGÍA CONSUMIDA EN MAYO VS DISTANCIA RECORRIDA.....	69

FIGURA 34. INFORMACIÓN FILTRADA DE ENERGÍA CONSUMIDA EN JUNIO VS DISTANCIA RECORRIDA.	69
FIGURA 35. INFORMACIÓN SIN FILTRAR UNIDAD U38 MES DE NOVIEMBRE	76
FIGURA 36. DISTRIBUCIÓN NORMAL	81
FIGURA 37. DISTRIBUCIÓN NORMAL DE RANGO CREADO	81
FIGURA 38. DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA MES MAYO.....	83
FIGURA 39. DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA JUNIO	84
FIGURA 40. DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA OCTUBRE	85
FIGURA 41. DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA NOVIEMBRE	86

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. VARIABLES MEDIDAS EN LA UNIDAD U37A DEL METRO DE MEDELLÍN.	3
TABLA 2. COEFICIENTES DE RESISTENCIA A LA RODADURA. [1] [5]	14
TABLA 3. COEFICIENTES DE RESISTENCIA AERODINÁMICA PARA DIFERENTES VEHÍCULOS. [1] [5]	15
TABLA 4. IMPACTO EN LA DEMANDA DE ENERGÍA MEDIANTE LA VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA AERODINÁMICA. [2] [13]	44
TABLA 5. RESULTADOS DE FUERZA DE ARRASTRE SOBRE MODELO DIGITAL. [2]	46
TABLA 6. RESULTADOS CON LA MODIFICACIÓN DE LA CARENAS. [2].....	49
TABLA 7. CONSTANTES UTILIZADAS PARA CÁLCULO DE LOS COSTOS. [14].....	49
TABLA 8. SIMULACIÓN DE FUERZAS. [14]	50
TABLA 9. PRUEBAS REALIZADAS EN LA NOCHE EL 30/12/12. [14]	52
TABLA 10. ANÁLISIS REALIZADO DE PRUEBAS REALIZADAS EN LA NOCHE EL 30/12/12. [14]	53
TABLA 11. FACTORES DE ESCALA UTILIZADOS EN EL APLICATIVO. [15].....	56
TABLA 12. DETALLES DE OPERACIÓN UNIDAD U37. [15]	57
TABLA 13. CONSUMO OBTENIDO DE LOS DÍAS ANALIZADOS.....	58
TABLA 14. KILOMETRAJE DEL COMPUTADOR DE LA UNIDAD U37. [15].....	61
TABLA 15. DATOS CORRESPONDIENTES AL MES DE OCTUBRE (CARENA MODIFICADA)	62
TABLA 16. DATOS ESCOGIDOS CON UN PORCENTAJE DE ERROR DE 0.966%	63
TABLA 17. INFORMACIÓN OCTUBRE Y NOVIEMBRE FILTRADA.	65
TABLA 18. INFORMACIÓN FILTRADA DE MAYO Y JUNIO.	68
TABLA 19. MAYO VS OCTUBRE Y NOVIEMBRE MÉTODO 1.....	70
TABLA 20. JUNIO VS OCTUBRE Y NOVIEMBRE MÉTODO 1.....	71
TABLA 21. MAYO Y JUNIO VS OCTUBRE Y NOVIEMBRE MÉTODO 1	72
TABLA 22. MAYO Y JUNIO VS OCTUBRE Y NOVIEMBRE MÉTODO 2.	72

TABLA 23. U37A SENTIDO SUR Y NORTE EN OCTUBRE Y NOVIEMBRE	73
TABLA 24. PORCENTAJES DE REDUCCIÓN CASO 2 POR MÉTODO 2	74
TABLA 25. DETALLE DE OPERACIÓN U38. [15].....	75
TABLA 26. KILOMETRAJE CALCULADO POR EL COMPUTADOR DE LA UNIDAD U38. [15].....	75
TABLA 27. DATOS SELECCIONADOS U38 Y U37	76
TABLA 28. UNIDAD U37 vs U38.....	77
TABLA 29. U37A SENTIDO SUR NORTE.	78
TABLA 30. U38A SENTIDO NORTE Y SUR	78
TABLA 31. RESULTADOS CASO 4 POR MÉTODO 3.....	78
TABLA 32. RANGO GENERAL DE PORCENTAJE DE REDUCCIÓN	80
TABLA 33. PÉRDIDAS DE ENERGÍA DE CARENA SIN MODIFICAR	82
TABLA 34. CONSUMO MES DE MAYO	83
TABLA 35. CONSUMO MES DE JUNIO.....	84
TABLA 36. CONSUMO MES DE OCTUBRE	84
TABLA 37. CONSUMO MES DE NOVIEMBRE	85

DEDICATORIA

A dios, a mis padres, a mi novia y a mi hijo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de grado, representa el esfuerzo de muchas personas, que con el tiempo me han demostrado su apoyo incondicional: mis padres, junto Andrea Tabares, quienes constantemente me han motivado a culminar mis estudios, con una gran formación intelectual y moral.

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 Aburrá Ltda (Metro de Medellín), 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.

GLOSARIO

Aplicativo: Programa de computadora que asiste a los usuarios en el desarrollo de una con el tarea específica, según el diseño y objetivo del mismo.

Catenaria: Línea aérea de contacto de suspensión longitudinal, a través de la cual los pantógrafos de los vehículos eléctricos captan la corriente de tracción. [1]

Carenado: revestimiento realizado con fibra de vidrio, fibra de carbono, plástico u otro material que se adapta o lleva un vehículo con fines principalmente aerodinámicos, aunque también se con fines estético. Para este proyecto la palabra carenado significa el revestimiento realizado en la parte frontal de los trenes de primera generación del Metro de Medellín.

Algoritmo: Rutina Lógica de instrucciones, pasos y reglas que ayuda a que un usuario o receptor las ejecute para el alcance de una tarea específica.

Factor de eficiencia: Relación entre una variable de entrada y una de salida. Da una medida de lo que se obtiene a partir de lo que se invierte. [1]

Sistema internacional M.K.S: Sistema de unidades que expresa las medidas de longitud, masa y tiempo utilizando como unidades fundamentales metro, kilogramo y segundo.

Par De Arranque: Fuerza de tracción que ejercen los motores de un vehículo para acelerarlo.

Aerodinámica: Ciencia que estudia el movimiento del aire y las fuerzas sobre un cuerpo que se mueve en medio del aire. [2]

C.D O D.C: siglas de Corriente Directa O Direct Current.

Arrastre: Fricción que existe entre un objeto sólido y un fluido (líquido o gas) a través del cual este primero transita. Para un sólido que se mueve por un fluido o gas, el arrastre es la suma de todas las fuerzas aerodinámicas o hidrodinámicas en la dirección del fluido externo, por tanto actúa opuestamente al movimiento del objeto. [2]

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un aplicativo en Microsoft Excel, con el fin de determinar distintas variables de interés asociadas al consumo energético de los trenes de primera generación del Metro de Medellín, permitiendo plantear estrategias para su reducción.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar un aplicativo en Microsoft Excel, el cual permita analizar desde el punto de vista energético, los datos suministrados por los sensores de tensión y corriente instalados en las distintas localidades del tren.
- Caracterizar las pérdidas del sistema de tracción del Metro de Medellín, bajo diferentes circunstancias operativas.
- Diseñar una metodología para evaluar el efecto que produce desde el punto de vista energético, la instalación de un carenado aerodinámico diseñado por la UPB, ubicado en la parte frontal de los trenes de primera generación del Metro de Medellín.

RESUMEN

En el presente trabajo se muestran las bases teóricas respecto al consumo energético del metro de Medellín y procedimientos usados para realizar un aplicativo en Microsoft Excel, con el fin de evaluar el consumo eléctrico de las unidades U37A y U38A del Metro de Medellín. Este estudio es de gran importancia ya que permite dar una idea tanto cualitativa como cuantitativa, del consumo energético en base a la aerodinámica del tren y demás fuerzas opositoras existentes.

Para obtener este consumo energético, fue necesario implementar varios sensores de tensión y corriente en las diferentes localidades del tren, con el fin de obtener las distintas variables de interés, para el análisis energético del tren. En la Tabla 1 se muestran las variables medidas.

Tabla 1. Variables Medidas en la unidad U37A del metro de Medellín.

CH	Signal name	Input	Range	Filter	Span
CH1	I Auxiliares	DC	500mV	10Hz	500
CH2	U de Red MP X12	DC	10V	10Hz	10
CH3	I de Red MP X14	DC	10V	10Hz	7.5
CH4	U Res. Disipativa	DC	5V	10Hz	5
CH5	I Res. Disipativa	DC	20V	10Hz	15
CH6	U Res. Previa Freno	DC	5V	10Hz	5
CH7	I Res. Previa Freno	DC	20V	10Hz	15
CH8	Velocidad MP X2	DC	10V	10Hz	10
CH9	I Motor 1 MP X6	DC	10V	10Hz	5
CH10	I Motor 2 MP X8	DC	10V	10Hz	10
CH11	Freno Emergencia X116 (32)	DC	200V	10Hz	100
CH12	Cabina Ocupada X113 (7)	DC	200V	10Hz	200
CH13	Freno Neumatico X116 (58)	DC	200V	10Hz	100
CH14	Potenciometro MP X9	DC	10V	10Hz	10

Con las variables descritas en la Tabla 1, se puede calcular variables determinantes, para el cálculo del consumo energético. Algunas de estas variables son:

- a) Potencia en la red.
- b) Potencia en la resistencia de disipación.
- c) Distancia recorrida.
- d) Consumo promedio (kWh/km).
- e) Porcentaje de energía de disipación.

INTRODUCCIÓN

El uso de energía eléctrica para el transporte masivo se ha posicionado actualmente en la ciudad de Medellín como una alternativa viable y preferida para su implementación, que al mismo tiempo incluye altos costos de operación, por lo tanto se hace necesario el desarrollo de proyectos que permitan reducir dichos costos.

El presente trabajo consiste en un estudio energético, para determinar un posible ahorro en el consumo de energía eléctrica por medio de características aerodinámicas en los trenes de primera generación.

Inicialmente se presentan las bases teóricas del proyecto, que definen cada uno de los conceptos necesarios para la comprensión del mismo, así como trabajos previos relacionados y cada uno de los temas relacionados con factores que tienen influencia sobre el consumo energético en los trenes de transporte masivo.

Posteriormente y como tema central del trabajo, se presenta el análisis de la información obtenida, relacionada con el impacto producido por el carenado instalado en la parte frontal de las unidades U37A y U38A, sobre el potencial de ahorro en el consumo de energía eléctrica en operación comercial.

Por último, se presenta un aplicativo en Excel para realizar el análisis de los datos obtenidos a partir de sensores y herramientas del tren y del sistema de transporte, a partir de dichos resultados se conoce el porcentaje de ahorro y las diferencias entre la posibilidad inicial y la nueva modificación en la parte frontal del tren, usándolos como referencia para la toma de decisiones y posteriores estudios económicos.

ORIGEN DE LA IDEA

Actualmente, el ahorro en costos ocupa un lugar primordial en la industria y el comercio, es así como surge el interés de la empresa de transporte masivo del valle de Aburrá limitada, por mejorar sus condiciones de operación, más específicamente el interés por reducir el consumo de energía eléctrica, minimizando las pérdidas de la misma, de manera que para inferir en la toma de decisiones, argumentadas bajo un criterio acertado, se hace necesario un análisis previo de ciertas condiciones necesarias para el alcance del objetivo, planteando así la presente propuesta de un aplicativo en Excel, que cumpla con los requerimientos de dicha compañía.

ESTADO DEL ARTE

Actualmente son mucho los avances que ha tenido el transporte eléctrico, esto se ha dado gracias a que esta forma de moverse se ha caracterizado por ser segura, rápida, eficiente, poco impacto a nivel ambiental y económica a largo plazo.

Los avances en este tipo de transporte se han dado gracias a que diferentes universidades del mundo, han aportado para las empresas de transporte masivo diferentes ideas, las cuales han ayudado a la evolución y por ende a la optimización de este transporte.

Un caso a nivel mundial es el aporte de la investigación realizada por Diego López Durán en Madrid España en junio del 2010 quien hizo una investigación sobre el aprovechamiento de la energía regenerada por los trenes, ya que los trenes de tracción eléctrica son capaces de comportarse como generadores durante el proceso de frenado, transformando parte de la energía cinética en potencial. [3]

Este estudio resulta de gran importancia ya que la energía regenerada puede ser aprovechada en los servicios del sistema de transporte masivo, por lo tanto se obtendría un sistema más cómodo para el usuario y un mejor servicio prestado sin altos costos de operación.

En Colombia no son muchos los estudios realizados a comparación de otros países, ya que en Colombia el transporte masivo basado en energía eléctrica esta implementado en una sola

ciudad: Medellín, a pesar de que hace un par de años se han venido realizando estudios por las distintas universidades de Colombia como la Universidad Pontificia Bolivariana, la universidad Nacional de Colombia, la Universidad de Antioquia, entre otras, para la implementación de transporte eléctrico en la capital de Colombiana (Bogotá).

Por último una tesis que ha tenido mucha discusión por posibles aportes para proyectos futuros es la de Oscar Mauricio Yepes Morato, estudiante graduado de ingeniería electrónica de la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín Colombia. Este estudiante realizo un aplicativo en Matlab que permite tener una perspectiva del dimensionamiento de un sistema de tracción eléctrica.

Este aplicativo se basa en una interfaz gráfica hecha en Matlab que permite simular un sistema de tracción eléctrica de múltiples vehículos, en una ruta que puede definir el usuario. El aplicativo calcula y presenta las variables de mayor interés para el diseño de un sistema de tracción eléctrico, a partir del número y características de los vehículos, la topografía de la ruta, los datos operativos y las características del sistema de alimentación. [1]

CAPÍTULO 1. BASES TEÓRICAS EN EL CONSUMO ENERGÉTICO EN LOS SISTEMAS DE TRACCIÓN

1.1 MARCO TEÓRICO

1.1.1 IMPORTANCIA DE LA EFICIENCIA ENERGETICA

Hoy en día los diferentes tipos de sistemas de transporte masivo como son los taxis, buses, trenes, barcos y aviones, se han convertido en un aporte fundamental para el desarrollo de una ciudad, ya que estos medios de transporte son los que permiten potencializar en gran parte el desarrollo económico en las ciudades. Por ejemplo en el caso de los aviones y barcos, no solo se dedican al transporte de pasajeros, sino que también han sido de vital importancia para el transporte de mercancía, lo cual permite el desarrollo del comercio. Sin embargo estos tipos de transporte mencionados anteriormente presenta grandes debilidades que con el transcurrir del tiempo serán las que determinen la viabilidad de estos tipos de transporte, ya que son grandes productores de dióxido de carbono, contaminación auditiva y además posee como insumo para su funcionamiento un recurso no renovable (petróleo), es por esto que los transportes de tipo eléctrico serán en un futuro no muy lejano los que determinen la movilidad de las grandes ciudades, ya que estos no presentan tantas debilidades sin embargo la generación de energía eléctrica (recurso renovable), presenta un cierto porcentaje que no es muy grande de emisión de gases perjudiciales para el medio ambiente. Por tal motivo es de gran importancia el estudio de eficiencia energética, de cómo lograr transportar las mismas masas con un menor consumo, logrando así disminuir la emisión de gases y reducir los costos de operación, variable que es de gran importancia para las empresas de hoy en día.

Por lo anterior es de gran importancia la contribución de la investigación científica de este tipo transporte, ya que con el transcurso del tiempo se ha demostrado que el transporte masivo basado en energía eléctrica suele ser muy eficiente y seguro, como es el caso de los trenes eléctricos.

En otras palabras un aspecto de gran relevancia y que ayudaría a que este medio de transporte sea más atractivo de implementar para las ciudades es el costo de operación, variable que está ligada a la eficiencia energética del tren que al mismo tiempo depende de múltiples factores, como:

- 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.

Para entender como las variables anteriormente mencionadas afectan el consumo energético del tren procederemos a definir un modelo de cálculo que define permite conocer el comportamiento estático como dinámico del tren.

1.1.2 MODELO DE CÁLCULO

Este modelo describe el comportamiento de un vehículo, analizando las fuerzas que actúan sobre él, con base en las leyes de Newton, dichas leyes definirán las fuerzas propias del tren, como es la fuerza de tracción, la fuerza del frenado y las fuerzas opositoras al movimiento del tren; cuando la sumatoria de todas estas fuerzas da como resultado un valor nulo, quiere decir que el tren se está moviendo a velocidad constante o por defecto se encuentra en equilibrio estático en una estación.

Por otro lado cuando la sumatoria de fuerzas sobre el vehículo es positiva, quiere decir que el vehículo está aumentando su velocidad a medida que se desplaza, el otro caso sería cuando la sumatoria de fuerzas sea negativa, esto quiere decir que el vehículo está disminuyendo su velocidad, ya sea por la fuerza del frenado o por inercia propia del vehículo.

Este fenómeno se explica con la segunda ley de Newton, definida en la ecuación (1-1)

$$a = \frac{\sum_{i=0}^n F_i}{m}$$

Dónde:

n: Es el número de fuerzas presentes sobre el tren

m: Masa del tren

a: Aceleración del tren

En la Figura 1 se muestra el diagrama de cuerpo libre de un vehículo con el fin de explicar las fuerzas que actúan sobre él.

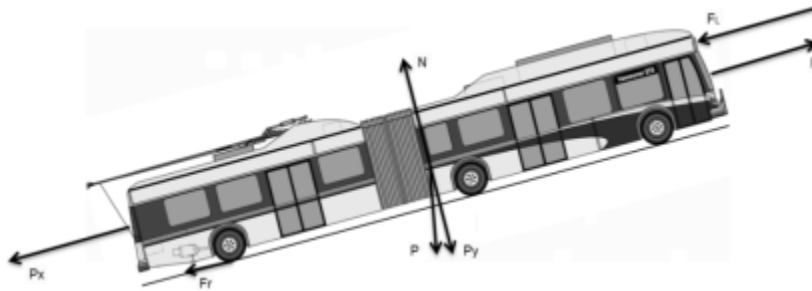


Figura 1. Diagrama de cuerpo libre. [1] [4]

Dónde:

F: Es la fuerza a aplicar al vehículo (fuerza tracción).

Fuerzas opositoras al movimiento

- **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.

1.1.2.1 FUERZA DE TRACCIÓN

Esta fuerza es proporcionada por los motores del vehículo, para vencer las fuerzas opositoras a su movimiento, este se origina por la existencia de tensión y corriente en el motor del vehículo, suministrada por la catenaria a la que se encuentra conectado el vehículo. Esta energía circula por los devanados del rotor, generando así un campo electromagnético que interactúa con el campo magnético impuesto por un imán permanente, este caso se presenta cuando el motor es de imán permanente. Cuando el motor no es de imán permanente, el campo magnético interactúa con el campo electromagnético de la armadura, que se origina debido a la excitación proporcionada al devanado de la armadura.

Cuando los polos de estos dos campos coinciden, se produce un rechazo entre ellos, dado por la ley de atracción y repulsión de cargas (ley de Coulomb), este fenómeno genera un torque magnético o par de fuerza que provoca que el rotor rompa la inercia y comience a girar sobre su eje en el mismo sentido de las manecillas del reloj o en sentido contrario, debido a que el sentido de giro varía según como se encuentre conectado el circuito de motor con la alimentación.

Esta fuerza de tracción se transmite a través de las ruedas y su magnitud puede ser modificada por los sistemas de control, que se encuentran en la cabina del conductor.

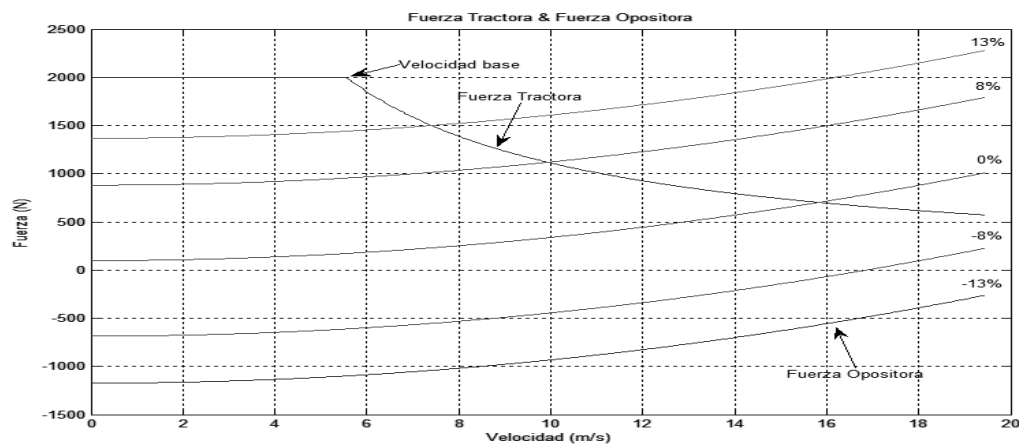


Figura 2. Esfuerzo de tracción y fuerzas opositoras. [1]

De la Figura 2 se puede observar que a menor velocidad la fuerza tractora es significativa, a medida que la velocidad aumenta la fuerza tractora decrece de forma hiperbólica hasta la fuerza mínima.

Este fenómeno se da porque a baja velocidad, la demanda de aceleración es mayor para vencer la inercia a la que está sometida el vehículo, con el aumento de la velocidad la necesidad de torque es menor, debido a que la capacidad adherencia disminuye con la velocidad[1] [5]

La ecuación (1-2) define la fuerza tractora, ya que en ocasiones esta no viene definida en la hoja de datos del vehículo.

$$F_{tracora} = \frac{T \times i_g}{r} \quad (1-2)$$

Dónde:

- **T:** Par máximo de arranque.
- **I_g:** Relación de los engranajes.
- **r:** Radio de las ruedas.

1.1.2.2 FUERZAS Opositoras al Movimiento

En la Figura 3 se puede observar un esquema con un diagrama de cuerpo libre del metro de Medellín sobre una pendiente donde m representa la masa del metro y ϵ es el ángulo de inclinación del metro respecto a la horizontal, **para este informe este ángulo se representará por la letra alfa(α).**

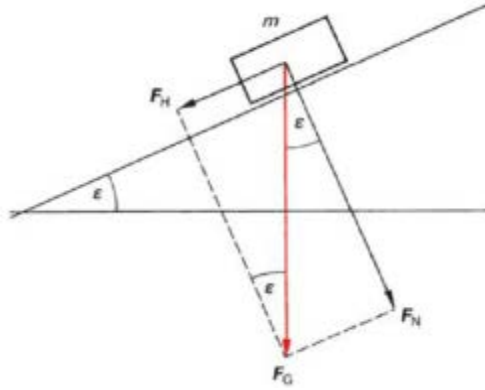


Figura 3. Diagrama de cuerpo libre para movimiento de traslación. [6]

1.1.2.3 ECUACIONES DE MOVIMIENTO DE TRANSLACIÓN

En las siguientes ecuaciones se definen las fuerzas opositoras al movimiento del tren, estas fuerzas varían constantemente debido a que es proporcional a la velocidad y las pendientes del trazado, parámetro que cambian a lo largo del recorrido.

1.1.2.4 RESISTENCIA DE RODADURA:

Es la fuerza que se opone al movimiento del vehículo, actuando a nivel de la superficie entre la rueda y el terreno o la vía [1]; causada principalmente por histéresis en los materiales y se produce cuando la rueda gira sobre la superficie en línea recta. [5]

Cuando no hay movimiento, la presión que existe entre la rueda y el área de contacto, produce una fuerza de reacción por ley de Newton, la cual se dispersa uniformemente, con una resultante que se alinea con la presión.

Cuando hay movimiento, la distribución de esta fuerza de reacción no es uniforme ni constante, generando una mayor presión en el área de contacto de la rueda; en este caso se produce una carga normal que actúa en el centro de la rueda, en ese instante se crea un momento que se opone al movimiento de rodadura de las superficies. [5], dichas fuerzas crean una deformación del suelo (vía) generando así la resistencia a la rodadura. [1]

En la Figura 4 se puede observar la distribución de fuerzas y la deformación para un suelo suave.

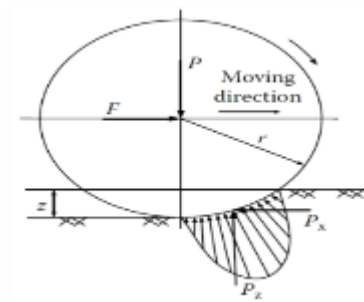


Figura 4. Deformaciones y fuerzas en superficie suave. [1] [5]

Nota: Mientras mayor sea la dureza de los materiales, menor será la deformación y por consiguiente menor la resistencia.

En la ecuación (1-3) se define la resistencia a la rodadura.

$$F_r = Mgf_r \cos(\alpha) \quad (1-3)$$

Dónde:

- **M:** masa del tren con pasajeros en kg
- **g:** gravedad en m/s^2 .
- **f_r:** coeficiente de resistencia a la rodadura
- **α:** ángulo de inclinación en radianes.

En la Tabla 2 se suministran algunos datos típicos de resistencia de rodadura.

Tabla 2. Coeficientes de resistencia a la rodadura. [1] [5]

Conditions	Rolling Resistance Coefficient
Car tires on a concrete or asphalt road	0.013
Car tires on a rolled gravel road	0.02
Tar macadam road	0.025
Unpaved road	0.05
Field	0.1-0.35
Truck tire on a concrete or asphalt road	0.006-0.01
Wheel on iron rail	0.001-0.002

1.1.2.5 RESISTENCIA AERODINÁMICA:



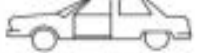




La resistencia aerodinámica, es la fuerza opositora que se genera debido a la interacción del vehículo con el aire, esta se presenta cuando el vehículo se mueve a una determinada velocidad, donde la presión y la fricción son las componentes principales que generan esta resistencia.

La resistencia por presión, es conocida como resistencia de forma, se produce por las fuerzas que se ejercen sobre la superficie frontal del tren cuando este se encuentra en movimiento, donde por lo general son fuerzas normales a la superficie del tren, por lo que es de gran importancia la forma que tiene el tren, ya que con el movimiento el tren empuja el aire y por ley de Newton se genera una reacción en sentido contrario, la cual tiene mayor magnitud a mayor área. Caso contrario sucede en la parte trasera del tren, ya que se crea un espacio vacío que no es llenado inmediatamente por el aire, formando una zona de baja presión la cual hala el tren hacia atrás. [5]

La resistencia por fricción es generada por el contacto de la superficie lateral del tren con el aire, esta fuerza está constituida por esfuerzos tangenciales, que se producen cuando el vehículo está en movimiento, ya que el aire cerca a la superficie lateral se mueve a una velocidad distinta al aire que se encuentra más lejano de la superficie lateral del tren y que permanece casi inmóvil, esta diferencia de velocidades hace que se produzca un choque entre las moléculas de aire; dicho fenómeno da la existencia de la resistencia de fricción, la cual hace parte de la resistencia al avance del vehículo.

En la Tabla 3 se pueden observar diferentes coeficientes de resistencia aerodinámica, para distintas áreas frontales de distintos vehículos.

Tabla 3. Coeficientes de resistencia aerodinámica para diferentes vehículos. [1] [5]

Vehicle type	Coefficient of aerodynamic resistance
 Open convertible	0.5...0.7
 Van body	0.5...0.7
 Ponton body	0.4...0.55
 Wedged-shaped body; headlamps and bumpers are integrated into the body, covered underbody, optimized cooling air flow	0.3...0.4
 Headlamp and all wheels in body, covered underbody	0.2...0.25
 K-shaped (small breakaway section)	0.23
 Optimum streamlined design	0.15...0.20
Trucks, road trains	0.8...1.5
Buses	0.6...0.7
Streamlined buses	0.3...0.4
Motorcycles	0.6...0.7

En la ecuación (1-4) se define la resistencia aerodinámica

$$F_w = \frac{1}{2} \rho A_f C_D V^2 \quad (1-4)$$

Dónde:

- ρ : densidad del aire en kg/m^3 .
- A_f : área frontal del tren en m^2 .
- C_D : coeficiente de arrastre aerodinámico.
- V : velocidad en m/s .

1.1.2.6 RESISTENCIA DE GRADIENTE (PESO)

Esta resistencia es totalmente independiente de la velocidad, tipos de ruedas, formas del vehículo y algunos coeficientes de gravedad, este tipo de resistencia posee componentes tanto en el eje x como en el eje y ; donde su valor depende de la masa y el ángulo de inclinación del plano en el que se mueve el tren.

En la ecuación (1-5) se puede observar la componente en x debido al peso y al ángulo de inclinación que se encuentra el vehículo, para la componente en y se describe la misma ecuación pero con la diferencia que se utilizaría la función *coseno* para especificar que se está trabajando en el eje y (ver Figura 3).

$$F_g = Mg \sin(\alpha) \quad (1-5)$$

Dónde:

- **M**: masa del tren con pasajeros en kg
- **g**: gravedad en m/s^2 .
- **α** : ángulo de inclinación en radianes.

Es de gran importancia sumar esta resistencia a las demás fuerzas opositoras del vehículo, ya que esta es la componente de mayor magnitud, la cual depende del ángulo de inclinación en que se encuentra el vehículo.

Si el ángulo de inclinación del vehículo es positivo, se aumentará la magnitud de la fuerza opositora y por lo tanto se tiende a desacelerar el vehículo; si el ángulo es negativo ocurre lo contrario.

1.1.2.7 CÁLCULO DEL CONSUMO ENERGÉTICO

Con la ecuación (1-6) se puede determinar la potencia consumida por el tren, en este punto se comprueba que el peso del tren junto con la aerodinámica, y demás fuerzas opositoras, juegan un papel fundamental, ya que si estas fuerzas son muy grandes el factor de la fuerza total (F_T) aumentará notoriamente, debido a que esta fuerza equivalente es igual a la sumatoria de todas las fuerzas definidas anteriormente las cuales influyen en el comportamiento del tren.

Potencia (W)

$$Potencia = \frac{(F_T * V)}{3.6} \quad (1-6)$$

Dónde:

F_T : fuerza total en Newton.

V : velocidad en km/h.

Con la ecuación (1-6) se puede determinar cuanta potencia se consume por resistencia aerodinámica, rodadura y gradiente (peso). Para esto se deben combinar las ecuaciones (1-3), (1-4) y (1-5) con la ecuación (1-6) para obtener las siguientes ecuaciones:

$$G.E.R = Mgf_r \cos(\alpha) \left[\frac{V}{3.6} \right] \left[\frac{t}{3600} \right] \quad (1-7)$$

$$G.E.A = \frac{1}{2} \rho A_f C_D \left[\frac{\left(\frac{V}{3.6} \right)^3}{1000} \right] \left[\frac{t}{3600} \right] \quad (1-8)$$

$$G.E.G = Mg \sin(\alpha) \left[\frac{V}{3.6} \right] \left[\frac{t}{3600} \right] \quad (1-9)$$

Dónde:

- **G.E.R**= Gasto Energético debido a la resistencia de rodadura.
- **G.E.A**= Gasto Energético debido a la resistencia aerodinámica.
- **G.E.G**= Gasto Energético debido a la resistencia al gradiente o peso.

De las ecuaciones (1-7), (1-8) y (1-9) se encuentra un factor $\left[\frac{t}{3600}\right]$ que es determinante en este caso, debido a que el consumo se expresa en términos de energía que es equivalente a la integral de la potencia; entonces se explica el por qué la variable “t”, es la variable que representa el tiempo y que se encuentra dividida por una constante que representa los segundos transcurridos en una hora, todo es con el fin de expresar el consumo en kWh.

Ejemplo:

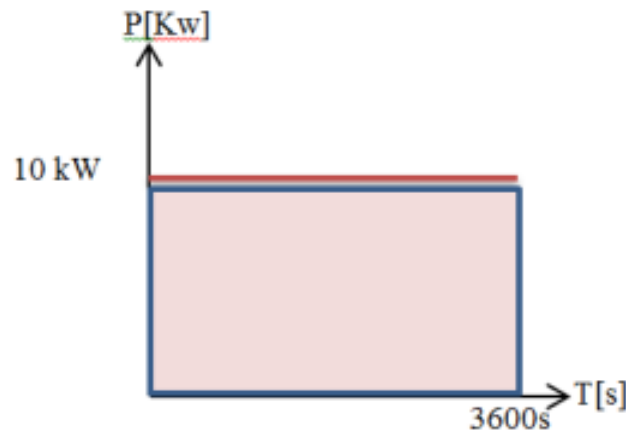


Figura 5. Gráfico de Potencia en el tiempo

De la Figura 5 se puede observar que la potencia es de 10kW, partiendo de la definición de la integral definida como el área bajo la curva, la integral de la potencia representada en la Figura 5, es igual a $10 \text{ kW} \cdot 3600 \text{ s} = 36.000 \text{ kJ}$.

De la Figura 5 se puede concluir que la energía total es igual a 36.000kJ, dicho valor debe ser expresado en unidades de kW/h, esta conversión se realiza para representar las ecuaciones anteriormente escritas en el sistema M.K.S, entonces para representar el consumo de energía

por hora hay que dividir por los segundos equivalentes que son 3600 segundos, obteniendo un valor final de a 10kW/h.

Nota: Las anteriores ecuaciones fueron tomadas de la tesis **Asistencia a proyectos de investigación sobre tracción eléctrica** de **Luisa Fernanda Buitrago Castaño**. [7].

1.1.2.8 ECUACIONES DE MOVIMIENTO ROTATORIO

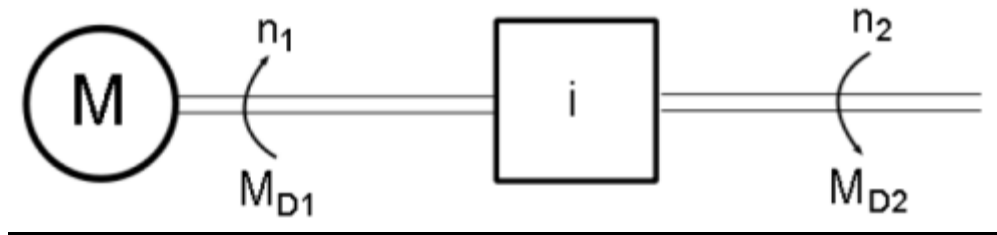


Figura 6. Diagrama para análisis de movimiento rotatorio. [6]

De la Figura 6 podemos observar que en el lado izquierdo el motor está representado por la letra **M**, donde **n_1** y **M_{D1}** representan el número de revoluciones del motor y el torque del eje del motor respectivamente, en el lado derecho se observan las mismas variables pero respecto a la rueda del tren, cabe decir que para este caso la letra **i** representa los engranajes que hay entre el motor y la rueda del tren.

Ecuaciones:

En la ecuación (1-10) se expresa matemáticamente el torque obtenido en la rueda del tren o mejor conocido como el momento de fuerza respecto a un punto, donde este punto se ubica como el cero a partir donde se toma la distancia y donde sus unidades en el S.I están expresadas en Nm.

$$M_{D2} = F_{mot} R_{rueda} \quad (1-10) \text{ (Equivalente a fuerza)}$$

Dónde:

M_{D2} : Momento de fuerza respecto a D_2 [N.m]

F_{mot} : Fuerza producida por el motor [N]

R_{rueda} : Radio de la rueda [m]

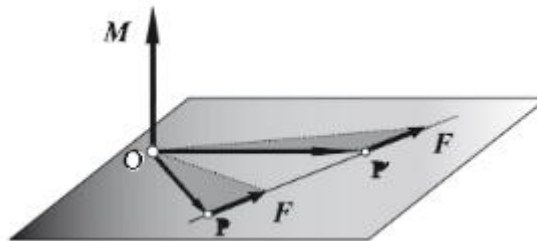


Figura 7. Definición de momento de una fuerza con respecto a un punto. [8]

De la Figura 7 se puede observar el momento de fuerza F al punto P respecto a un punto O , entonces el momento de fuerza o torque respecto a punto O y aplicado en P es el siguiente:

$$M_O = \overrightarrow{OP} \times F = r \times F \quad (1-11)$$

Inercia:

La inercia es la propiedad que tienen los cuerpos de permanecer en un estado de reposo o movimiento, mientras no se aplique sobre ellos alguna fuerza, o la resistencia que opone la materia al modificar su estado de reposo o movimiento. Como consecuencia, un cuerpo conserva

su estado de reposo o movimiento rectilíneo uniforme si no hay una fuerza actuando sobre él.
[9]

En la ecuación (1-12) y (1-13) se definen las ecuaciones de inercia correspondientes al sistema del metro, basados en el modelo de la Figura 6.

Equivalente a la masa:

$$J_2 = m R^2_{rueda} \quad (1-12)$$

$$J_{2,mot} = \frac{1}{8} J_2 \quad (1-13)$$

Relación torque:

$$M_{D1} = \frac{1}{i} M_{D2} \quad (1-14)$$

Relación velocidad:

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\eta_1}{\eta_2} = i \quad (1-15)$$

Relación potencia:

$$P = M_{D1} \omega_1 = M_{D2} \omega_2 \quad (1-16)$$

Relación inercia:

$$J_{1,mot} = \frac{1}{i^2} J_{2,mot} \quad (1-17)$$

Ecuación básica:

$$M_{mot}(\omega) - M_{carga}(\omega) = J_{1,mot} \dot{\omega}_1 \quad (1-18)$$

Con velocidad constante la expresión anterior quedaría:

$$M_{mot}(\omega) = M_{carga}(\omega) \quad (1-19)$$

Dónde:

J_{1,2}: Momento de inercia de la rueda en el punto 1 y 2 [kg.m²]

i: Relación de velocidad [adimensional]

W_{1,2}: velocidad angular en 1 y 2 [rad/s]

ẅ₁: aceleración angular [rad/s²]

m: masa de la rueda [kg]

M_{D1,2}: Momento de fuerza respecto a D_{1 y2} [N.m]

M_{carga}: Momento respecto a la carga [N.m]

P: Potencia transmitida por el motor [W]

R_{rueda}: Radio de la rueda [m]

Nota: Las anteriores ecuaciones fueron tomadas del trabajo de investigación (Simulación del sistema de tracción del metro de Medellín), dirigido por el PhD Andrés Emiro Díez Restrepo de la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín. [6]

1.1.3 Uso del Frenado

En este literal se explica de forma general y matemáticamente los distintos tipos de frenado usados actualmente por el metro de Medellín; la importancia de cada uno de ellos y el impacto positivo y negativo sobre el consumo energético del sistema de tracción eléctrica.

Los trenes de tracción eléctrica son capaces de comportarse como generadores durante el proceso de frenado, transformando parte de la energía cinética que poseen en energía eléctrica. [3]

Esta energía recuperada podría ser empleada en el metro de Medellín en distintas variables que son de necesidad hoy en día en esta ciudad, como son los sistemas de monitoreo para la seguridad de los usuarios del sistema metro, en sistemas de iluminación en las afueras de las estaciones y otras variables que pueda necesitar la empresa. Si esta energía recuperada no es necesaria para los distintos servicios auxiliares propuestos, puede ser devuelta a la red pública con el fin de disminuir costos de operación y optimizar las ganancias por parte de la empresa metro, por lo tanto sugiere investigar las alternativas mencionadas.

Se debe tener en cuenta que el método empleado para realizar la acción de frenado, se clasifica en dos grupos fundamentales que son:

- Freno eléctrico.
- Freno mecánico o neumático.

El tipo de frenado a trabajar es el freno eléctrico, este tipo de freno es producto de la acción reversible de los motores, cuando estos funcionan como motores durante su tracción, absorben la energía eléctrica de la línea o catenaria y por lo tanto se produce un par de arranque y cuando este se comporta como generador absorbe la energía mecánica producida por el tren y la convierte en energía eléctrica.

Existen tres posibilidades de freno eléctrico, en función del consumidor de la energía eléctrica:

1.1.3.1 FRENADO DISIPATIVO (DINÁMICO, REOSTÁTICO)

En este tipo de frenado la energía eléctrica se convierte en energía calorífica (**calor**), esto se da cuando esta energía eléctrica fluye a través de los bancos de resistencias o reóstatos propios del vehículo eléctrico, esto quiere decir que toda la energía cinética que poseía el tren antes del frenado ha sido desperdiciada, lo cual reduce la eficiencia energética del sistema, ya que esta energía que se perdió podría haber sido utilizada en los servicios auxiliares del tren o el abastecimiento de otros trenes. Se puede dar el caso que el calor generado por los resistores pueda ser aprovechado como parte del sistema de calefacción del tren, aplicable en las partes frías, aunque por lo general, este calor es disipado al exterior, traduciéndose como un gasto energético.

En el caso de tracción eléctrica es deseable que este tipo de freno pueda funcionar sin tensión en catenaria.

1.1.3.2 FRENADO REGENERATIVO

Definición:

Este tipo de frenado se caracteriza por su función de “conversión”, la cual se basa en transformar la energía mecánica que posee el tren antes de detenerse, en energía eléctrica.

Para que este frenado se pueda cumplir, el motor de tracción del tren debe ser capaz de actuar tanto como motor y generador, en el primer caso su función es absorber la energía eléctrica suministrada por la catenaria, donde están conectados los pantógrafos o semipantógrafos del tren, produciendo un par de arranque para vencer la fricción que se ejerce sobre el tren y por lo tanto provocar un desplazamiento en este. En el segundo caso, produce energía en sus terminales a partir del par aplicado a los ejes de las ruedas, lo que a su vez consigue el efecto de frenado.

Un aspecto a tener en cuenta en el frenado regenerativo, es que no siempre se aprovecha la energía recuperada al 100%, pues dicha energía queda limitada por la capacidad de absorción

que tenga el sistema de tracción eléctrica; por ejemplo puede producirse un efecto no regenerativo, cuando un vehículo se encuentra conectado a la red suministradora de energía eléctrica no consume dicha energía recuperada porque sus baterías se encuentran cargadas en ese momento. También esta energía puede ser desperdiciada cuando los condensadores que se encuentran ubicados a lo largo del sistema de tracción estén cargados; en este caso el exceso de energía eléctrica tiene que ser eliminado, con el fin de evitar sobrecargas en el sistema de tracción eléctrica, por esta razón actualmente se cuenta con sistemas de disipación que absorben los excesos de energía eléctrica para dichas situaciones.

Cuando el tren se encuentra en una de éstas situaciones, el sistema electrónico de control se encarga de realizar el conexionado eléctrico necesario para que el motor eléctrico de tracción pase a actuar como generador:

Que la fuerza resultante de la pendiente equivalente negativa supere al vector total de resistencia al avance y el tren haya superado su velocidad objetivo.

Que el tren necesite frenar porque se aproxima a una estación o a un punto del trazado con velocidad limitada.

1.1.3.3 FRENADO MIXTO

Este tipo de frenado es una combinación de los dos tipos de frenado mencionados anteriormente. El desarrollo de este freno se ha dado gracias a que la electrónica de potencia que ha facilitado el uso de este sistema de manera yuxtapuesta y automática en función de las necesidades.

En los anteriores ítems se suministró una breve explicación de los tres tipos de frenado eléctrico, sin embargo se profundizará sobre los dos más importantes hoy en día: el frenado reostático y regenerativo.

1.1.4 Máquina de C.D tipo serie Metro de Medellín

A continuación en la Figura 8 se puede observar el circuito equivalente de una máquina de C.D con devanado tipo serie en el estator; este tipo de máquina corresponde a la usada en los trenes de primera generación del Metro de Medellín.

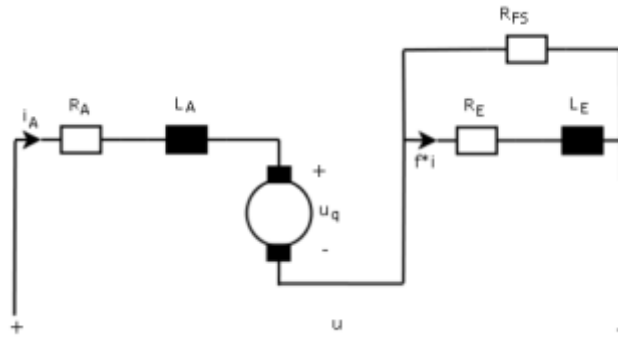


Figura 8. Circuito equivalente máquina de C.D con devanado serie. [6]

Dónde:

- **R_a**: resistencia de la armadura.
- **L_a**: inductancia de la armadura.
- **R_e**: resistencia del campo.
- **L_e**: inductancia del campo.
- **R_{fS}**: resistencia del debilitamiento del campo.

La resistencia de debilitamiento, es utilizada para limitar la corriente que circula por el devanado del estator, todo esto con el fin de reducir el par (torque), para ciertas situaciones.

Entonces para calcular la tensión en el campo (estator), es importante multiplicar la que circula por la armadura de la máquina (i_A) por el factor de debilitamiento (k_{fS}), esto con el fin de obtener una buena precisión de la corriente de campo (i_E).

Para el metro de Medellín se maneja los siguientes valores para el factor de debilitamiento:

- $k_{FS} = 0.9$

Ó

- $k_{FS} = 0.35$

Entonces la corriente en el campo quedaría definida por la ecuación (1-20)

$$i_E = k_{FS} * i_A = k_{FS} * i \quad (1-20)$$

De la Figura 8 podemos determinar el voltaje en los bornes del circuito equivalente aplicando las leyes Kirchhoff, esto se muestra en la siguiente ecuación:

Voltaje en bornes

$$u_T = u_A + u_E \quad (1-21)$$

Donde U_A y U_E se define como:

$$U_A = U_q + R_A * i_A + L_A * \frac{di_A}{dt} \quad (1-22)$$

$$U_E = R_E * k_{FS} * i + L_E * k_{FS} * \frac{di}{dt} \quad (1-23)$$

En la ecuación (1-24) se define el torque o par inducido por un motor de C.D serie, en este tipo de motor su velocidad disminuye con un aumento en el flujo el cual aumenta a medida que se aumente la carga en el motor, el resultado de este fenómeno es una caída drástica en la característica de par-velocidad de un motor serie.

$$T_{ind} = k_{FS} \phi i_A \quad (1-24)$$

El flujo en este tipo máquina se caracteriza por ser directamente proporcional a la corriente del inducido (al menos hasta que el metal se sature) entonces, el flujo para una máquina serie se define en la ecuación (1-25):

$$\phi = c i_A \quad (1-25)$$

Donde c es una constante de proporcionalidad, esta depende del número de vueltas en el devanado del estator, rotor y la reluctancia en el estator, básicamente se trata de una resistencia magnética.

Entonces reemplazando la ecuación (1-25) en la ecuación (1-26) el par inducido queda definido como:

$$M_D = c * k_{FS} * i^2 \quad (1-26)$$

El voltaje en el inducido está definido como:

$$U_q = c * \omega * k_{FS} * \quad (1-27)$$

Dónde:

ω : Velocidad angular [rad/s]

1.1.4.1 MODO MOTOR

En este modo la máquina de C.D tiene la característica de funcionar en modo tracción, lo cual quiere decir que transformara la energía eléctrica en energía mecánica.

En las siguientes ecuaciones se explica matemáticamente el funcionamiento de una máquina de C.D en modo motor.

Aplicando una simple ecuación de maya sobre el circuito equivalente de la Figura 9 se obtiene la siguiente ecuación:

$$U = c * \omega * k_{FS} * i + b * \omega + (R_A + k_{FS} * R_E) * i + (L_A + k_{FS} * L_E) * \frac{di}{dt} \quad (1-28)$$

Donde el factor $b * \omega$ es equivalente al voltaje remanente de la máquina de C.D, este voltaje se debe a la acción de hacer girar el inducido, lo cual produce un voltaje de pequeña magnitud, sin embargo hay que considerarlo para obtener un comportamiento preciso con las ecuaciones mostradas.

En estado estable la corriente que circula por toda la máquina es constante, debido a que las ondas de tensión y corriente en máquina de C.D, no presenta cambios de magnitud y polaridad, por lo tanto el la ecuación (1-28) queda reducida a la siguiente ecuación, cuando el siguiente término es igual a cero ($di/dt = 0$):

$$U = [c * \omega * k_{FS} + R_A + k_{FS} * R_E] * I + b * \omega \quad (1-29)$$

Despejando la corriente de la ecuación (1-29) y remplazándola en la ecuación (1-26), se encuentra la relación entre torque y velocidad expuesta en la ecuación (1-30)

Relación entre torque y velocidad:

$$M_D = \frac{c \cdot k_{FS} \cdot (U - b \cdot \omega)^2}{[c \cdot \omega \cdot k_{FS} + (R_A + k_{FS} \cdot R_E)]^2} \quad (1-30)$$

1.1.4.2 MODO GENERADOR

Este modo es aplicable, cuando la máquina utiliza sus diferentes modos de frenado (recuperativo y disipativo), el circuito equivalente que se muestra en la Figura 9 corresponde al modo generador de la máquina serie de C.D.

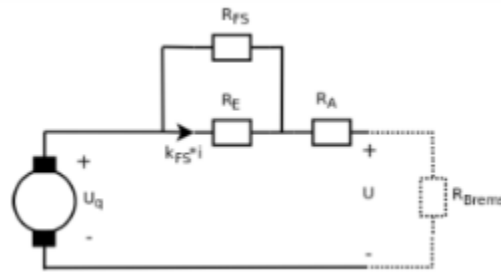


Figura 9. Circuito equivalente en modo generador. [6]

Este circuito equivalente mostrado en la Figura 9 posee una ligera modificación respecto al mostrado en la Figura 8 y es que en este se desprecian las inductancias, ya que como se dijo anteriormente en estado estable para una máquina de C.D las ondas de tensión y corriente no presenta cambios en su magnitud y polaridad, la otra modificación es la adición de la resistencia de frenado R_{Brems} , la cual es de gran importancia ya que me permite ejecutar correctamente los dos tipos de frenado por ejemplo en el frenado disipativo cuando el motor se desconecta de la línea, la máquina entra a funcionar como generador ya que tiene el campo conectado y está girando por inercia, esta energía de exceso puede descargarse por la resistencia de frenado permitiendo que toda su energía se transforme rápidamente en calor y en consecuencia se acelere el proceso de frenado.

A continuación se muestra desde un análisis matemático el frenado tipo disipativo.

Frenado disipativo

Voltaje en el inducido:

$$U_q = c * k_{FS} * I * \omega + b * \omega \quad (1-31)$$

Por ley de Kirchhoff tenemos que el voltaje en el inducido también se puede definir como:

$$U_q = (R_A + k_{FS} * R_E + R_{Brems}) * I \quad (1-32)$$

Se procede a igualar las anteriores dos ecuaciones con el fin de obtener la corriente en términos de la velocidad.

$$c * k_{FS} * I * \omega + b * \omega = (R_A + k_{FS} * R_E + R_{Brems}) * I$$

$$b * \omega = (R_A + k_{FS} * R_E + R_{Brems} - c * k_{FS} * \omega) * I$$

Entonces la Corriente en función de la velocidad quedará definida de la siguiente manera:

$$I = \frac{b * \omega}{R_A + k_{FS} * R_E + R_{Brems} - c * k_{FS} * \omega} \quad (1-33)$$

Al remplazar la corriente en la ecuación (1-26), se encuentra la relación entre torque y velocidad, cuando la máquina de C.D actúa en modo de frenado disipativo.

$$M_D = c * k_{FS} * \left(\frac{b * \omega}{R_A + k_{FS} * R_E + R_{Brems} - c * k_{FS} * \omega} \right)^2 \quad (1-34)$$

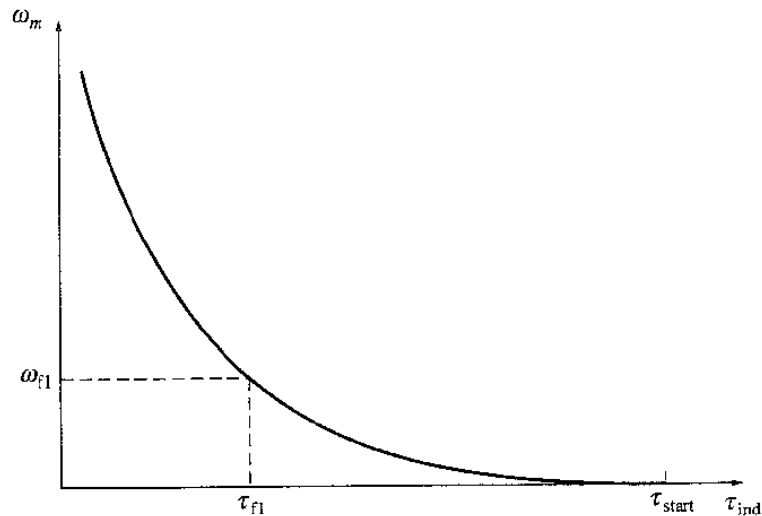


Figura 10. Característica par-velocidad de un motor dc serie. [10]

De la Figura 10 se puede concluir que cuando se tiene un valor de torque indeterminado, se obtiene el máximo valor de revoluciones que puede alcanzar la máquina de D.C propuesta en este capítulo, es por esto que de la ecuación anterior se obtiene la velocidad crítica haciendo el denominador igual a cero.

$$(R_A + k_{FS} * R_E + R_{Brems}) - c * k_{FS} * \omega = 0$$

Partiendo de la definición de frecuencia angular se obtiene el máximo valor del número de vueltas alcanzadas por unidad de tiempo despejando a f .

$$\omega = 2 * \pi * f$$

Donde para este caso se tiene que $f = n$.

$$(R_A + k_{FS} * R_E + R_{Brems}) - c * k_{FS} * 2 * \pi * \eta = 0$$

$$\eta_{krit} = \frac{R_A + k_{FS} * R_E + R_{Brems}}{2 * \pi * c * k_{FS}} \quad (1-35)$$

En la Figura 11 se muestra el circuito de control para el frenado disipativo de una máquina de C.D.

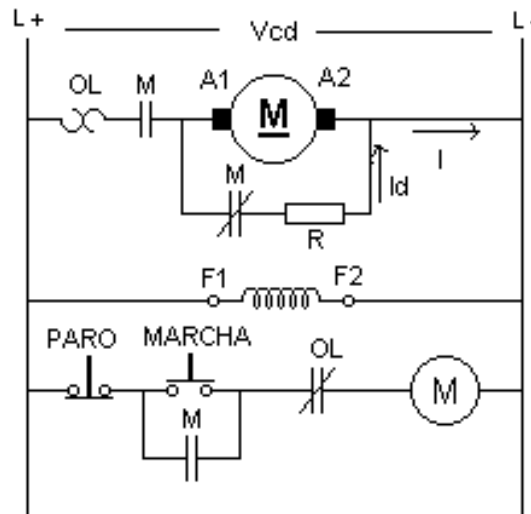


Figura 11. Circuito de control para frenado disipativo [11]

En este circuito de control la dinámica consiste en lograr que el motor trabaje como generador una vez este se desconecte de la línea. Para que el frenado funcione de forma adecuada es de vital importancia que el devanado del campo, permanezca energizado.

En la Figura 11 se puede observar que el circuito de control emplea un contactor de línea M este posee sus dos contactos principales configurados como 1NO + 1NC (normalmente abierto, normalmente cerrado). El contacto cerrado se conecta a través de la resistencia R colocado en paralelo con la armadura del motor de esta manera, cuando el motor se desconecta de la línea, la máquina entra a funcionar como generador ya que tiene el campo conectado y este se encuentra girando por la inercia misma que el motor posee, es ahí donde la resistencia de frenado

juega un papel de vital importancia, ya que esta es la encargada de transformar este exceso de energía eléctrica a energía calórica.

Para el cálculo de esta resistencia se aplica la siguiente ecuación, con el fin de determinar el valor de la fuerza contra electromotriz del motor al momento de la desconexión:

$$V = V_{CD} - I \times R_a \quad (1-36)$$

Dónde:

I: Corriente que circula por el motor antes de desconectarlo.

R_a: Resistencia de la armadura en Ω [ohmios].

V_{CD}: Tensión aplicada.

Después de hallar el valor de V, se debe definir cuanta corriente puede circular por dicha resistencia, para esto se utiliza típicamente un rango de (1.5 a 3) la corriente nominal de la placa del motor. Este valor es de gran importancia para determinar el valor de resistencia que puede soportar dicha corriente.

$$I_d = 3I_n = \frac{V=V_{CD}-I \times R_a}{R+R_a} \quad (1-37)$$

Con el valor de R despejado de la ecuación anterior, debe verificarse que el tiempo de frenado sea satisfactorio para los propósitos del usuario. Puesto que la corriente I_d solo circula por la R durante un periodo de tiempo de frenado sea satisfactorio para los propósitos del usuario. [11]

Finalmente, la expresión para la I_d podrá tener algunas restricciones de diseño si el motor incorpora un variador de velocidad y al momento de desconectarlo está girando a baja velocidad. [11]

Frenado regenerativo

Como se mencionó anteriormente en el literal 1.1.3.2 el frenado regenerativo consiste en devolver energía eléctrica al sistema de tracción, recuperada debido a que el motor es llevado al reposo, con el fin de ejercer un torque negativo sobre él, aplicado por la carga, con el fin de que la máquina serie que posee el tren actúe como generador y devuelva energía al sistema de tracción.

Este tipo de frenado consiste en una modificación del frenado disipativo, ya que en el regenerativo se requiere que la tensión inducida sea mayor que la tensión de la fuente. Esto significa que la rotación debe ser mayor que la normal, condición que es posible alcanzar solamente si la carga es de un carácter persecutorio, como en un ferrocarril en marcha cuesta abajo, un ascensor que está descendiendo o un automóvil cuesta abajo. Fuera del exceso de velocidad, se puede generar si se aumenta la intensidad de excitación lo suficiente como para superar la tensión de la fuente. [12]

Voltaje en el inducido:

En este tipo de frenado se puede observar que no se utiliza la resistencia de frenado, ya que la intención, es devolver la mayor parte de la energía eléctrica recuperada al sistema de tracción sin ninguna limitación.

$$U_q = c * k_{FS} * I * \omega + b * \omega \quad (1-38)$$

Por ley de Kirchhoff tenemos que el voltaje en el inducido también se puede definir como:

$$U_q = (R_A + k_{FS} * R_E) * I + U \quad (1-39)$$

Dónde:

U: Tensión suministrada por la fuente.

Se procede a igualar las anteriores dos ecuaciones con el fin de obtener la corriente en términos de la velocidad.

$$c * k_{FS} * I * \omega + b * \omega = (R_A + k_{FS} * R_E) * I + U$$

$$[c * k_{FS} * \omega - (R_A + k_{FS} * R_E)] * I = U - b * \omega$$

Entonces la Corriente en función de la velocidad quedara definida de la siguiente manera:

$$I = \frac{U - b * \omega}{c * k_{FS} * \omega - (R_A + k_{FS} * R_E)} \quad (1-40)$$

Al remplazar la corriente en la ecuación (1.26), se encuentra la relación entre torque y velocidad, cuando la máquina de C.D actúa en modo de frenado regenerativo.

$$M_D = c * k_{FS} * \left[\frac{U - b * \omega}{c * k_{FS} * \omega - (R_A + k_{FS} * R_E)} \right]^2 \quad (1-41)$$

Velocidad crítica (denominador=0):

$$c * k_{FS} * \omega - (R_A + k_{FS} * R_E) = 0$$

$$c * k_{FS} * 2 * \pi * \eta - (R_A + k_{FS} * R_E) = 0$$

La velocidad crítica es fundamental en el control de frenado, pues de alcanzarse se tendrían torques muy elevados peligrosos para la operación del tren.

- Número de revoluciones críticas por minuto (η_{krit}):

$$\eta_{krit} = \frac{R_A + k_{FS} * R_E}{2 * \pi * c * k_{FS}} \quad (1-42)$$

CAPÍTULO 2. INFLUENCIA DE LAS FUERZAS DE ARRASTRE AERODINÁMICAS EN EL CONSUMO ENERGÉTICO.

En este capítulo se presentan las bases teóricas que sustentan la viabilidad del proyecto realizado por el metro de Medellín, sobre la reducción de las pérdidas en el sistema de tracción eléctrica con base a la aerodinámica de la carena de un tren.

En la Figura 12 (a) se puede observar la carena no aerodinámica actualmente utilizada por el metro de Medellín, esta carena corresponde a la primera generación de los trenes adquiridos por dicha empresa. En la Figura 12 (b) se observa la carena aerodinámica ideada por los grupos de investigación de la facultad de ingeniería Mecánica y aeronáutica de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) de Medellín, con el fin de reducir los consumos energético del tren, por medio de la reducción de las fuerzas de arrastre aerodinámicas que se presenta en este, principalmente la que se da en la parte frontal del tren.

De ser posible una reducción importante en el sistema de tracción eléctrica de la unidad U37 tren de primera generación, se lograría ahorrar los costos operativos, instalando el carenaje aerodinámico a los demás trenes de primera generación, lo cual es de vital importancia en una empresa pública, ya que los excedentes podrían revertirse para mejorar la movilidad.

En la Figura 13 se puede observar la segunda generación de trenes adquiridos por el metro de Medellín, según lo anterior se puede observar la evolución que han tenido los trenes de Medellín con el paso del tiempo por medio de cambios referentes a proyectos de ingeniería que deben caracterizarse por su:

- ✓ Rendimiento
- ✓ Eficiencia

- ✓ Costos
- ✓ Seguridad



(a) Carena no aerodinámica.



(b) Carena aerodinámica.

Figura 12. Trenes de Primera Generación (trenes MAN)

(a) Carena no aerodinámica. (b) Carena aerodinámica.



Figura 13. 2^{da} generación de trenes adquirida por el metro de Medellín (Trenes CAF)

2.1 CONCEPTOS BÁSICOS

2.1.1 Comportamiento del aire en el movimiento de un sólido

Cuando un sólido es puesto en movimiento para este caso particular un vehículo, aparecen una serie de fuerzas, ya que estas se originan por la fricción que se presenta por el movimiento de este sólido a través de un fluido (líquido o gas), en este caso aire, donde el arrastre es la suma de todas las fuerzas aerodinámicas o hidrodinámicas que se presenta en dirección del fluido externo. Esto quiere decir que la fuerza de arrastre aerodinámica, actúa en sentido contrario al que se mueve el sólido.

2.1.2 Relación de Bernoulli

A continuación se explicara con la relación de Bernoulli, los efectos que tienen estas fuerzas sobre un vehículo.

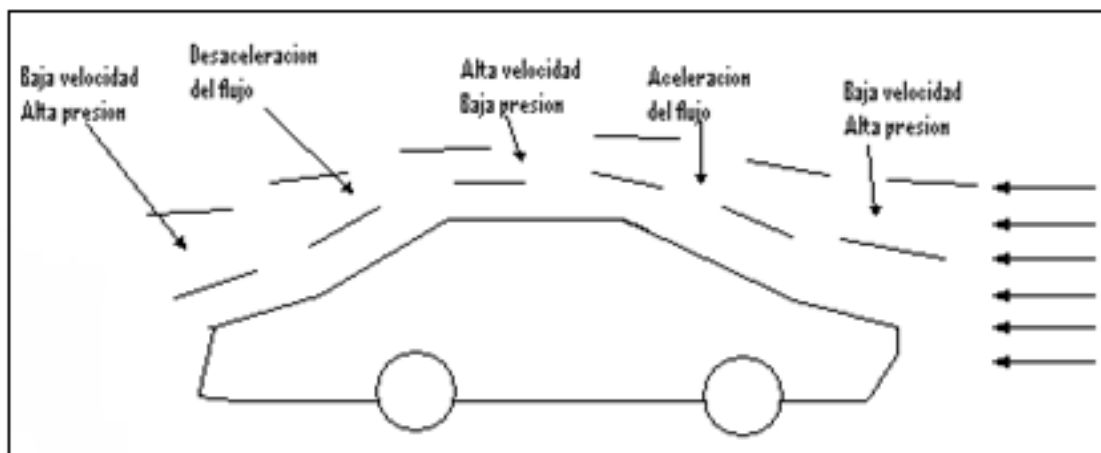


Figura 14. Puntos de Presión y velocidad sobre un vehículo. [2]

De la Figura 14 se puede observar que cuando el flujo de aire pasa de una zona de alta presión a una de baja presión se experimenta una fuerza en dirección del flujo de aire, esta se debe a las diferencias de presiones que existe en la parte frontal del vehículo. Por otro lado se observa un fenómeno inverso en la parte trasera del vehículo, ya que el flujo de aire experimenta una

interfaz de una zona de baja presión a una de alta presión, provocando una desaceleración en el vehículo.

En la siguiente ecuación se presenta la relación de Bernoulli en términos de la velocidad, presión y densidad del fluido, dicha ecuación se presenta en estos términos con el fin de estudiar los fenómenos aerodinámicos.

$$P + \frac{1}{2}\rho V^2 = C \quad (2-1)$$

Dónde:

P: Presión del fluido.

ρ : Densidad del fluido.

V: Velocidad del fluido.

La ecuación (2-1) está compuesta por la presión estática y dinámica, donde la presión estática esta expresada por el primer término (**P**), esta presión representan físicamente la presión del fluido, para este caso aire en cualquier punto de la superficie del vehículo. La presión dinámica se expresa por el segundo término ($\frac{1}{2}\rho V^2$), donde esta representa físicamente la energía cinética de un volumen determinado de aire.

2.1.3 Velocidad del flujo libre de aire

Es la velocidad relativa que se da entre la superficie de un objeto y el aire, cuando es ubicado en un túnel de viento. [2]

2.1.4 Punto de estancamiento

Es cualquier punto del flujo de aire en donde el valor de la velocidad es cero (mínimos valores de velocidad posible y punto donde la presión es máxima).

2.1.5 Coeficiente de presión

Es un número adimensional que describe la presión relativa a través de un campo de flujo.

A continuación se presenta la ecuación donde se define el coeficiente de presión:

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2} \quad (2-2)$$

Dónde:

P: Presión estática local.

P_∞: Presión estática en el flujo libre.

V_∞: Velocidad del flujo libre.

C_p=0 indica que la presión es la misma que la del flujo libre.

C_p=1 indica que la presión es del punto de estancamiento.

2.1.6 Líneas de flujo

Son líneas imaginarias que representan por donde transita un determinado fluido, en la Figura 15 las líneas de flujo alrededor del tráiler, representan los cambios instantáneos que se dan en la dirección del flujo de aire y muestran la trayectoria que podrían seguir las partículas de aire sobre el objeto.

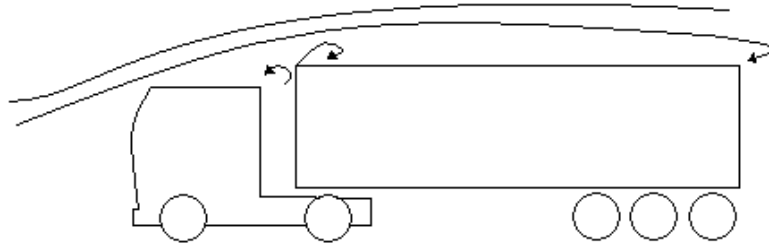


Figura 15. Líneas de flujo sobre un tráiler. [2]

2.1.7 Capa Límite

La capa límite es aquella zona en la que la velocidad del flujo respecto al sólido que rodea, posee una variación de velocidad desde cero hasta el 99% de la velocidad del flujo libre o no perturbado. A continuación en la Figura 16 se muestra como la velocidad relativa de flujo se incrementa rápidamente a medida de que aumenta la distancia desde la superficie.

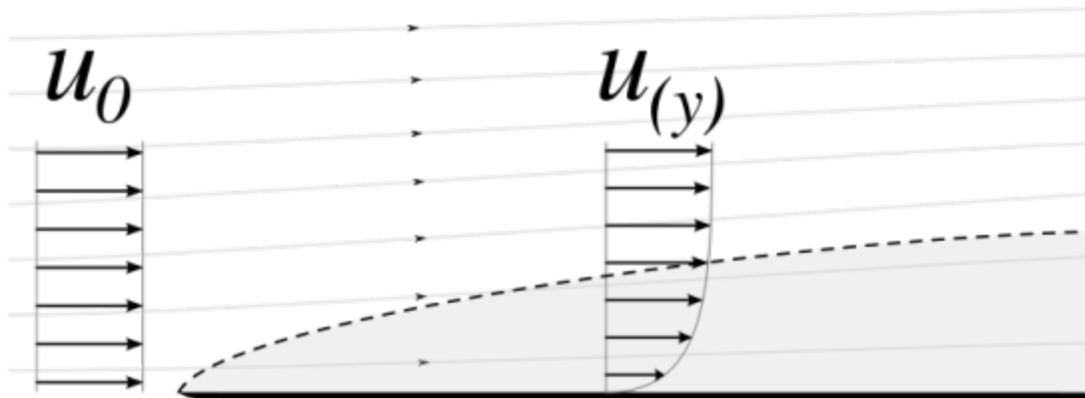


Figura 16. Perfil de velocidad de la capa límite. [2]

De la Figura 16 se puede observar un ejemplo de capa límite laminar. Un flujo laminar horizontal es frenado al pasar sobre una superficie sólida (línea gruesa). El perfil de velocidad (u) del fluido dentro de la capa límite (área sombreada) depende de la distancia a la superficie (y). Debido al rozamiento, la velocidad del fluido en contacto con la placa es nula. Fuera de la capa límite, el fluido se desplaza prácticamente la misma velocidad que en las condiciones iniciales (u_0).

2.1.8 Fuerza de arrastre aerodinámico

Como se comentó en el literal 1.2.1 se presenta un fenómeno de fricción cuando un objeto se mueve a una determinada velocidad dentro de un fluido en este caso aire, este fenómeno se presenta en la superficie del objeto y tiene como efecto retardar el movimiento del aire, pero este crea una reacción opuesta que retarda también el movimiento del objeto.

En la Tabla 4 se muestra la influencia de la variación de la resistencia aerodinámica sobre el consumo energético.

Tabla 4. Impacto en la demanda de energía mediante la variación de la resistencia aerodinámica. [2] [13]

Cp	Traction energy [MWh]	Regenerated energy [MWh]	Total[MWh]	Difference [MWh]	Difference [%]
130%	5022.072	1775.664	3246.408	327.9	10.1
100%	4102.104	1783.584	2918.52	0.0	0.0
70%	4379.76	1793.88	2585.88	-332.6	-12.9

Los anteriores datos tratan sobre la demanda de energía eléctrica de un tren de baja velocidad, con una longitud aproximadamente de 70 metros y un C_D de 1.1

Como se puede apreciar el aumento de un 30 % del coeficiente arrastre aerodinámico impacta significativamente el consumo energético del tren, es por esto que es de gran importancia tener en cuenta la geometría del tren para no tener valores tan altos de C_D .

2.2 IMPORTANCIA DE LA GEOMETRÍA

En este trabajo, se analiza la importancia o trascendencia de la modificación del área frontal 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.

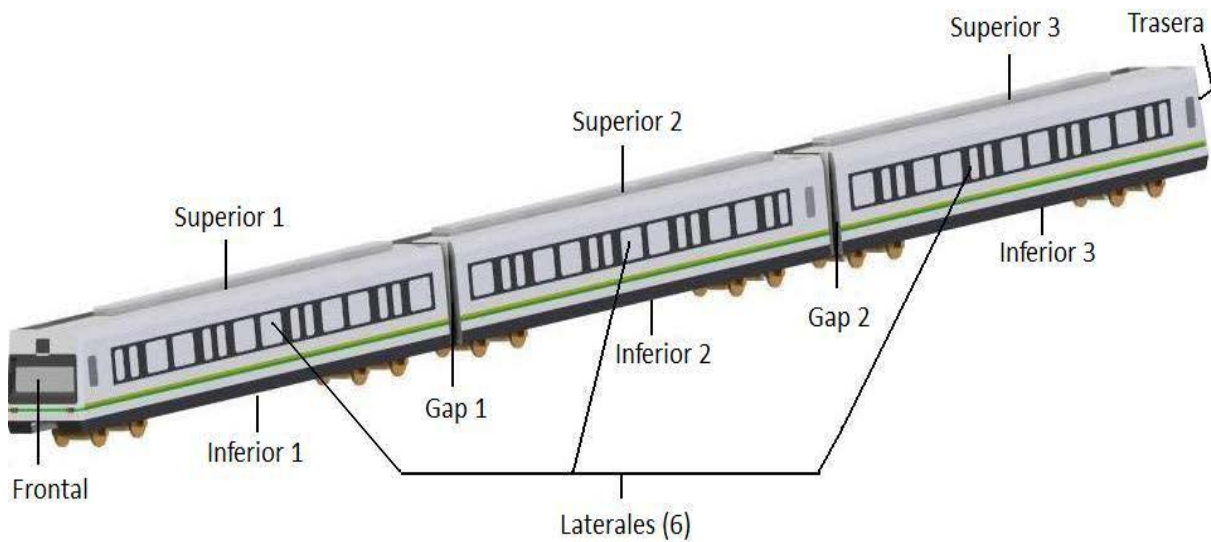


Figura 17. Modelo a escala del metro de Medellín. [2]

En este modelo se realizaron pruebas computacionales con el fin de establecer la magnitud de las distintas fuerzas de arrastre, que se ejercen sobre las 11 partes en las que fue dividido este modelo digital, en esta prueba las partes laterales se consideraron como una sola superficie, ya que estas son superficies no modificables y no presentan formas bruscas que influyan en la medida de la resistencia aerodinámica.

En la Tabla 5 se puede observar que a mayor velocidad mayor es la magnitud de la fuerza de arrastre aerodinámico, esto debido a que esta crece proporcionalmente al cuadrado de la velocidad como se expone en la ecuación (1-4) del capítulo 1.

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

Tabla 5. Resultados de fuerza de arrastre sobre modelo digital. [2]

Superficie		Velocidad [km/h]		
		20	50	80
Lateral	A R R A S T R E [N]	5,385 (3,44%)	22,933 (2,34%)	44,245 (1,90%)
Superior 1		3,393 (2,16%)	20,410 (2,08%)	47,880 (2,05%)
Superior 2		3,505 (2,23%)	21,611 (2,21%)	51,094 (2,19%)
Superior 3		3,684 (2,35%)	22,992 (2,35%)	54,612 (2,34%)
Gap 1		4,904 (3,13%)	32,843 (3,35%)	80,220 (3,44%)
Gap 2		4,998 (3,19%)	33,664 (3,44%)	82,331 (3,53%)
Inferior 2		16,005 (10,22%)	101,619 (10,39%)	244,525 (10,51%)
Inferior 3		17,252 (11,02%)	110,152 (11,26%)	265,091 (11,39%)
Inferior 1		19,989 (12,77%)	123,989 (12,68%)	293,430 (12,61%)
Trasera		19,084 (12,19%)	126,678 (12,95%)	307,594 (13,22%)
Frontal		58,325 (37,26%)	360,833 (36,90%)	855,412 (36,76%)
Total			156,524	977,724

De dicho estudio se obtienen conclusiones importantes respecto al fin que se quiere mostrar en este trabajo y es que una de las partes que se modificó para determinar la reducción del consumo energético con respecto al tren con carenaje no aerodinámico, coincide con una de las zonas donde se presentó mayor fuerza de arrastre (parte frontal del vehículo) a nivel computacional.

Este resultado muestra que si con el nuevo carenado se logra una reducción en la parte frontal y trasera de la fuerza de arrastre del tren se reduce en gran porcentaje y por ende se mejorara el rendimiento energético del tren, porque a menor fuerza de arrastre menor es el consumo (ver Tabla 4).

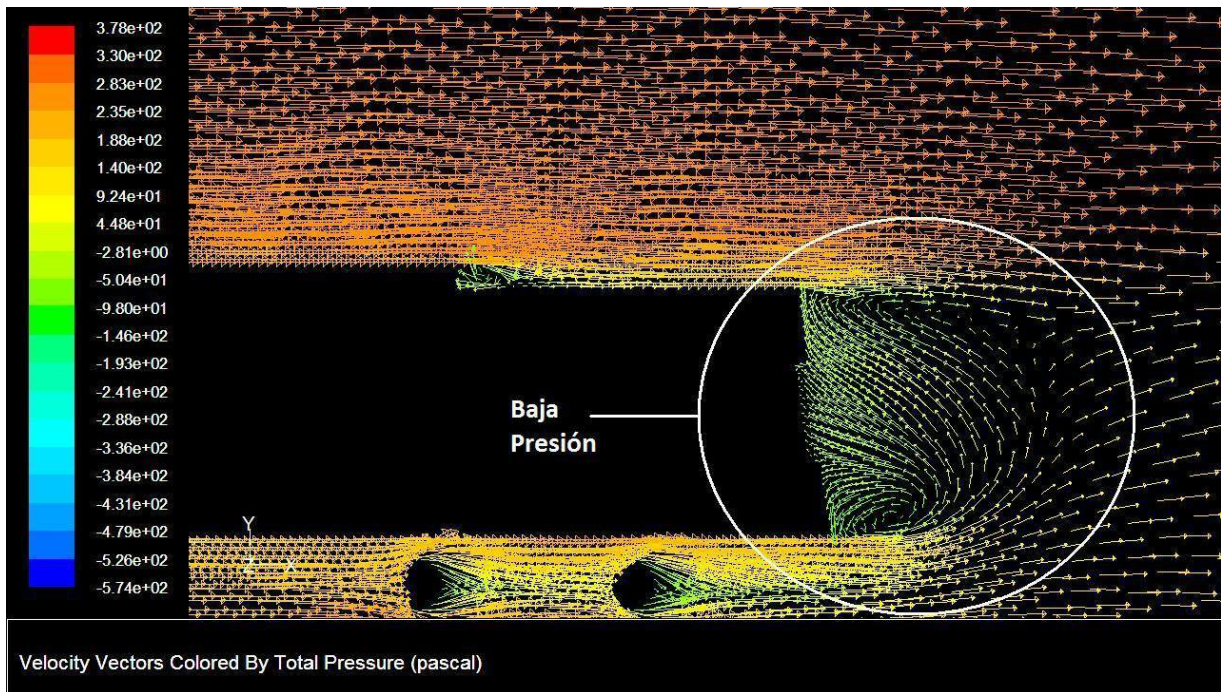


Figura 18. Vectores de presión total sección trasera tren (80km/h). [2]

La baja presión en la parte trasera es generada debido al cambio brusco en la forma del tren, esto genera una fuerza resultante de succión que tiene una contribución de aproximadamente 13% del arrastre total.

En la Figura 19 se puede observar que la zona de mayor presión es la zona frontal del tren, está simulación en el túnel de viento verifica los datos calculados en la Tabla 15. Este fenómeno se ve ayudado por la depresión que poseen en la zona del parabrisas las unidades de primera generación.

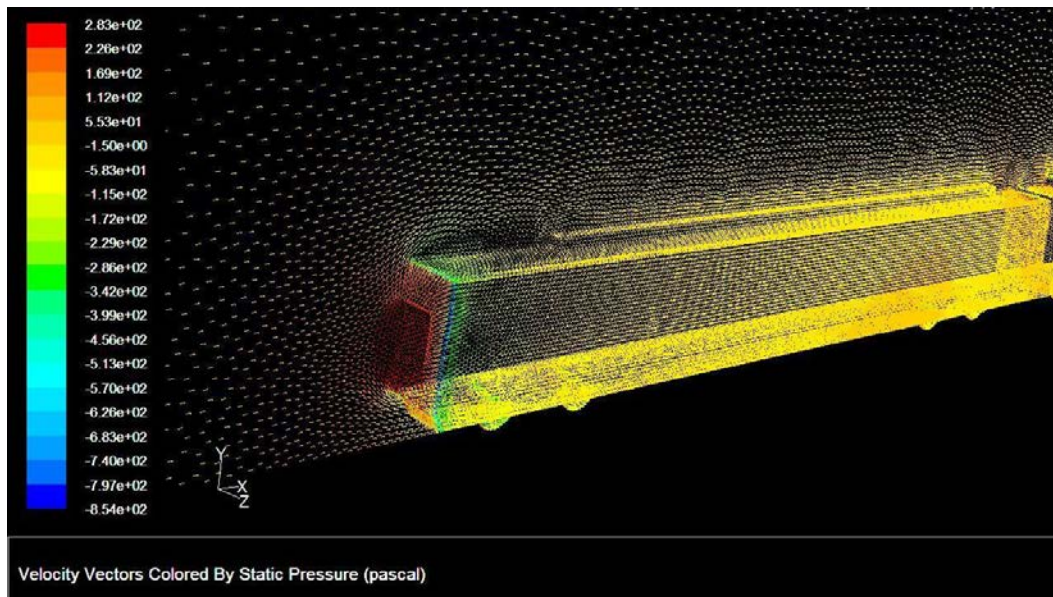


Figura 19. Vectores de presión estática, sección frontal del tren (80km/h). [2]

En la Figura 20 se observan los diseños propuestos para la carena trasera y delantera.



Figura 20. Modificación propuesta cara frontal y trasera. [2]

En la Tabla 6 se puede observar que las carenas propuestas reducen efectivamente la fuerza de arrastre aerodinámica con una reducción máxima del 9.65%.

Tabla 6. Resultados con la modificación de la carenas. [2]

Velocidad [km/h]	Arrastre [N]		Disminución arrastre [%]
	Original	Modificación	
0	0	0	0
10	41,62	38,78	6,82
20	156,52	143,86	8,08
30	342,9	313,65	8,53
40	599,74	546,30	8,91
50	977,72	887,47	9,23
60	1322,66	1198,27	9,40
70	1789,11	1618,35	9,54
80	2326,42	2101,84	9,65

2.3 ESTUDIO COMPUTACIONAL DE LAS FUERZAS DE ARRASTRE AERODINÁMICAS QUE SE EJERCEN SOBRE LAS CARENAS IMPLICADAS EN EL PROYECTO.

A continuación en este literal se muestran tablas con valores correspondientes a las fuerzas de arrastre aerodinámicas obtenidas por medio de simulaciones, realizadas por el profesor Andrés Tabares de la UPB de Medellín sobre las carenas mostradas en la Figura 12 (a) y (b).

Tabla 7. Constantes utilizadas para cálculo de los costos. [14]

\$ Kwatt/hr	\$ 200
Operation Hours/day	13
Number of units	42

Tabla 8. Simulación de fuerzas. [14]

METRO ACTUAL 17,9 [m/s]				Elements
Section	Total force by Post processor	Consumption [Kwatt]	Operation cost per day	60689257
Frontal	1164.04	20.836316	\$ 54,174.42	
Trasera	257.32	4.606028	\$ 11,975.67	
Inferior	156.23	2.796517	\$ 7,270.94	
Intervag	10.18	0.182222	\$ 473.78	
Lateral	14.25	0.255075	\$ 663.20	
Superior	17.33	0.310207	\$ 806.54	
TOTAL	1619.35	28.986365	\$ 75,364.55	

METRO CARENA COMPLETA 17,9 [m/s]				Elements
Section	Total force by Post processor	Consumption [Kwatt]	Operation cost per day	53242236
Frontal	967.536	17.3188944	\$ 45,029.13	
Trasera	266.45	4.769455	\$ 12,400.58	
Inferior	175.87	3.148073	\$ 8,184.99	
Intervag	16.96	0.303584	\$ 789.32	
Lateral	25.38	0.454302	\$ 1,181.19	
Superior	31.19	0.558301	\$ 1,451.58	
TOTAL	1483.386	26.5526094	\$ 69,036.78	

METRO CARENA NUEVA 001 17,9 [m/s]				Elements
Section	Total force by Post processor	Consumption [Kwatt]	Operation cost per day	59655678
Frontal	1021.18	18.279122	\$ 47,525.72	
Trasera	262.13	4.692127	\$ 12,199.53	
Inferior	122.38	2.190602	\$ 5,695.57	
Intervag	7.62	0.136398	\$ 354.63	
Lateral	11.46	0.205134	\$ 533.35	
Superior	12.14	0.217306	\$ 565.00	
TOTAL	1436.91	25.720689	\$ 66,873.79	

METRO CARENA NUEVA 002 17,9 [m/s]				Elements
Section	Total force by Post processor	Consumption [Kwatt]	Operation cost per day	59752802
Frontal	967.55	17.319145	\$ 45,029.78	
Trasera	251.46	4.501134	\$ 11,702.95	
Inferior	132.57	2.373003	\$ 6,169.81	
Intervag	10.24	0.183296	\$ 476.57	
Lateral	16.03	0.286937	\$ 746.04	
Superior	15.38	0.275302	\$ 715.79	
TOTAL	1393.23	24.938817	\$ 64,840.92	

Como se puede observar el modelo más eficiente corresponde al de la nueva carena 002 (Figura 12(b)), que al compararlo con el modelo actual del metro, se obtiene una eficiencia del 13.96%. Cabe mencionar que esta prueba se basó en un modelo a escala de la nueva carena bajo condiciones ideales, por lo tanto este consumo puede variar. A continuación en la Figura 21 se puede observar un diagrama de barras, este indica la sumatoria de las fuerzas aerodinámicas de arrastre presentes en los modelos evaluados y en la Figura 22 se observa la distribución de las mismas.

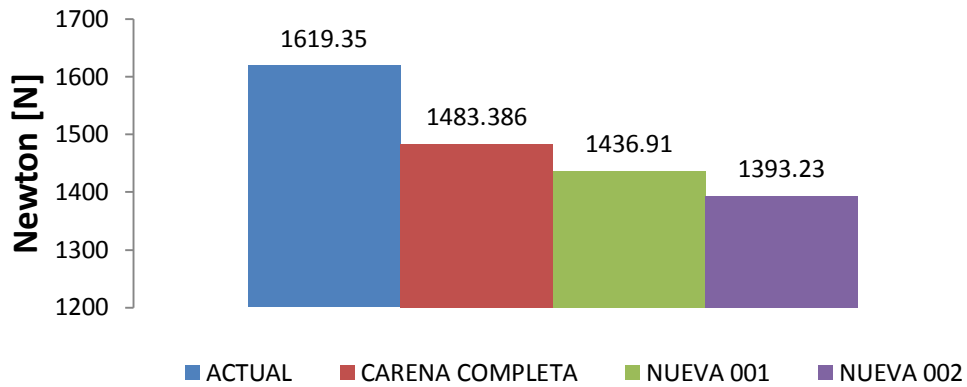


Figura 21. Sumatoria de fuerzas sobre las distintas carenas. [14]

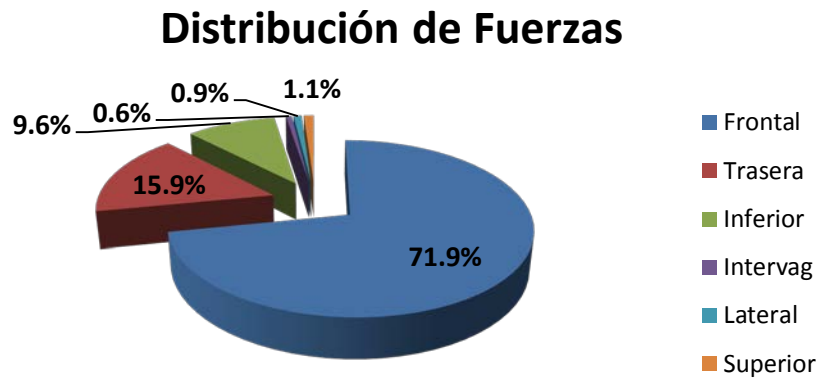


Figura 22. Distribución de fuerzas. [14]

Tabla 9. Pruebas realizadas en la noche el 30/12/12. [14]

Evaluación por dirección de recorrido Niquia Itagüí					Evaluación por dirección de recorrido Itagüí Niquía				
Dirección Niquia/itagüí	Distancia Recorrida	KWh	KWh/Km	Porcentaje de Reducción	Dirección itagüí/Niquia	Distancia Recorrida	KWh	KWh/Km	Porcentaje de Reducción
Actual sin usuarios 37A	22.7	111	4.89		Actual sin usuarios 37A	22.4	83	3.71	
Actual sin usuarios 37B	22.6	112	4.96	-	Actual sin usuarios 37B	22.6	84	3.72	-
Modificado si usuarios 37A	22.9	107	4.67		Modificado si usuarios 37A	22	78	3.55	
Modificado si usuarios 37B	22.5	108	4.80	3.14%	Modificado si usuarios 37B	22.7	80	3.52	5.18%
Actual sin usuarios 37A	22.5	109	4.84		Actual sin usuarios 37A	22.3	82	3.68	
Actual sin usuarios 37B	22.6	111	4.91	-	Actual sin usuarios 37B	22.6	83	3.67	-
Modificado si usuarios 37A	22.6	108	4.78		Modificado si usuarios 37A	22.2	77	3.47	
Modificado si usuarios 37B	22.6	108	4.78	2.70%	Modificado si usuarios 37B	22.6	77	3.41	7.23%
Actual sin usuarios 37A	22.5	110	4.89		Actual sin usuarios 37A	22.3	82	3.68	
Actual sin usuarios 37B	22.6	113	5.00	-	Actual sin usuarios 37B	22.6	83	3.67	-
Modificado si usuarios 37A	22.6	103	4.56		Modificado si usuarios 37A	22	78	3.55	
Modificado si usuarios 37B	22.6	106	4.69	6.19%	Modificado si usuarios 37B	22.6	80	3.54	3.61%
Actual sin usuarios 37A	22.6	76	3.36		Actual sin usuarios 37A	22.4	54	2.41	
Actual sin usuarios 37B	22.6	78	3.45	-	Actual sin usuarios 37B	22.6	55	2.43	-
Modificado si usuarios 37A	22.6	78	3.45		Modificado si usuarios 37A	22.3	51	2.29	
Modificado si usuarios 37B	22.8	79	3.46	-0.39%	Modificado si usuarios 37B	22.6	51	2.26	7.27%

A continuación se evalúa el consumo y la eficiencia de la carena nueva sobre pruebas realizadas en la noche del 30 de diciembre del 2012. La prueba consistió en ocho recorridos hechos por la unidad U37 sobre la línea A mostrada en la Figura 23

En la Tabla 10 se puede observar que se estima un rango de eficiencia entre 1.95 % y 4.56%, donde la condición más crítica corresponde cuando no hay paradas, ya la velocidad promedio es mayor por lo tanto la resistencia aerodinámica tiene una magnitud más significativa y por ende se observa un mayor consumo, ya que como se había mencionado antes, esta resistencia es proporcional al cuadrado de la velocidad.



Figura 23. Recorrido línea A metro de Medellín.

Tabla 10. Análisis realizado de pruebas realizadas en la noche el 30/12/12. [14]

	Km	KWh total	KWh/Km	Reducción promedio		Km	KWh total	KWh/Km	
CON CARENA	vuelta 1	45	373	8.252	3.78%	vuelta 1	45	390	8.628
	vuelta 2	45.2	370	8.186	4.56%	vuelta 2	45.2	385	8.518
	vuelta 3	45.2	367	8.119	5.33%	vuelta 3	45.2	388	8.584
	Promedio		370.00	8.186	4.56%	Promedio		387.67	8.577
	vuelta 4 sin paradas	45.4	259	5.705	1.95%	vuelta 4	45.2	263	5.819
					ACTUAL				

CAPÍTULO 3. PRESENTACIÓN DEL APLICATIVO Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Este capítulo es la síntesis de toda la información incluida en el presente trabajo, ya que se presenta el impacto de la modificación del carenado en la parte frontal de la unidad U37 y U38 del Metro de Medellín en términos del consumo energético.

Para la obtención de los resultados fue necesario la instalación de distintos sensores de tensión y corriente sobre las unidades anteriormente mencionadas, en la Figura 24 se ilustra la parte donde estarían ubicados los sensores. Esto es determinante a la hora de evaluar las condiciones del consumo, ya que este no es lo mismo en las siguientes condiciones:

- Unidad U37A mando norte y al sur.
- Unidad U37A acoplada con otra unidad.

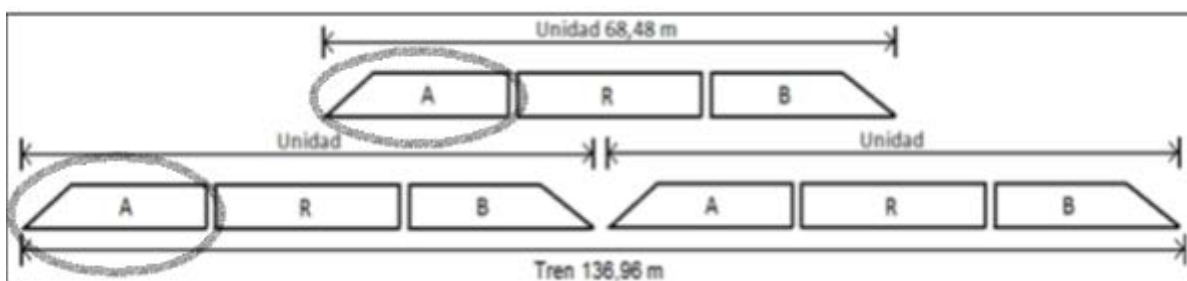


Figura 24. Estructura de la unidad analizar. [2]

Los datos fueron tomados durante las horas de operación comerciales para algunos meses del año 2012, durante las cuales estuvo en funcionamiento el metro de Medellín, los horarios son los siguientes:

De lunes a viernes: 4:30 am a 11:30 pm.

Domingos y festivos: 5:30 am a 10:30 pm.

Los datos son capturados por un registrador que posee el Metro de Medellín y procesados en un software que posee dicha empresa, conocido como WR300-APS, en este se visualizan los datos registrados por los sensores instalados en la unidad U37A y a la vez este permite exportar los datos en un archivo de Excel con extensión (.csv), con el fin de poder trabajar con ellos y poder determinar el consumo energético.

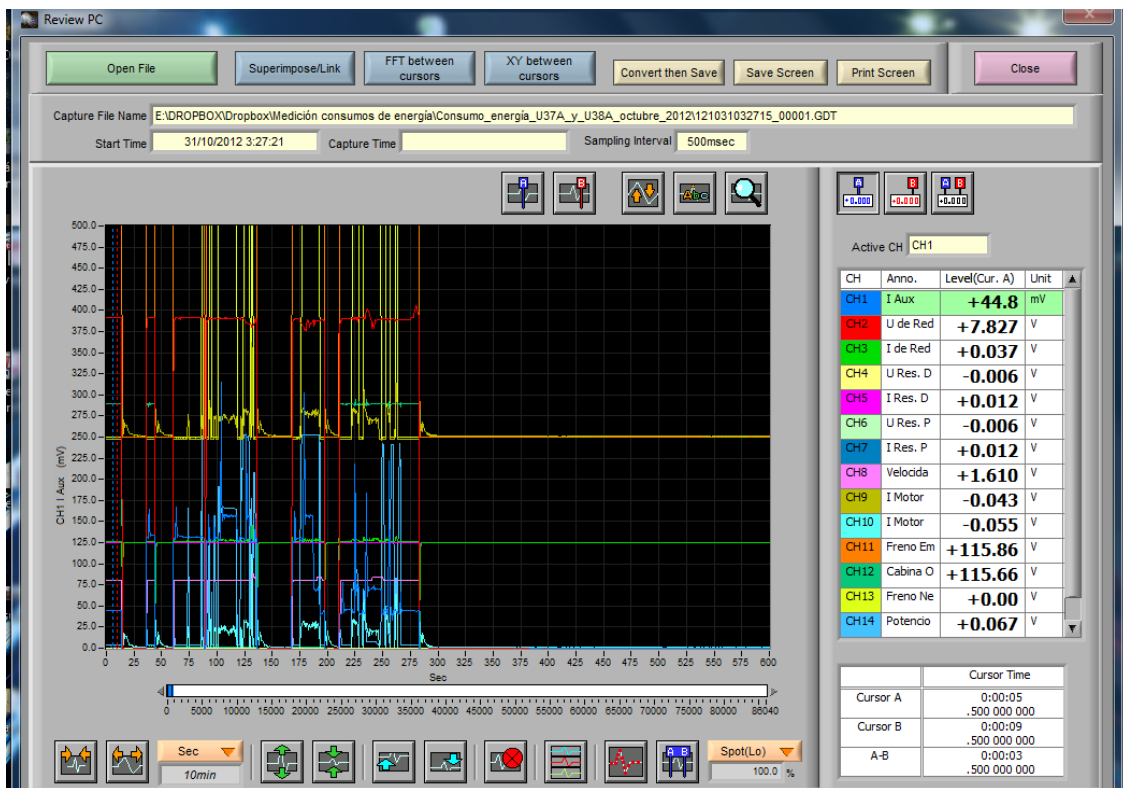


Figura 25. Software WR300-APS. [15]

En la Tabla 11 que se muestra en el resumen fueron especificadas las variables con las cuales se trabajó para determinar el consumo energético. Estas variables fueron afectadas por unos factores de escala, todo esto con el fin de dar un sentido físico a los datos que definen cada una de las variables expuestas en dicha tabla.

A continuación se presentan los factores de escala que fueron trabajados en el aplicativo.

Tabla 11. Factores de escala utilizados en el aplicativo. [15]

Canal	Señal	Escala
CH1	I Auxiliares (Compresor y DBU)	10V = 1000A.
CH2	U de Red	10V = 2000V
CH3	I de Red	10V = 1000A.
CH4	U Res. Disipativas	5V = 2000V
CH5	I Res. Disipativas	10V = 1000A.
CH6	U Res. Previas de Freno	5V = 2000V
CH7	I Res. Previas de Freno	10V = 1000A.
CH8	Velocidad	(valor - 1.6) * 16 = Km
CH9	I Motor 1	10V = 1000A.
CH10	I Motor 2	10V = 1000A.
CH11	Freno de Emergencia	0V = Freno de Emergencia Aplicado 115V = Freno de Emergencia Desaplicado
CH12	Cabina Ocupada	0 V = Cabina no Ocupada 115V = Cabina Ocupada
CH13	Freno Neumático	0 V = Freno Neumático Aplicado 115V = Freno Neumático Desaplicado
CH14	Potenciómetro	4.8 V → Tracción Máxima 0V → Coasting 4.8 V → Freno Máximo - 6ta etapa

En la Figura 26 se puede observar el panel de control correspondiente al aplicativo diseñado en Microsoft Excel.

En él se ejecuta lo básico del programa: cargar datos, eliminar datos, guardar datos y ver el historial de datos guardados.



Figura 26. Panel de Control de aplicativo diseñado.

Para el cálculo del consumo se tuvo en cuenta el detalle de operación de la unidad U37, con el fin de calcular el consumo diario en las horas mostradas en la Tabla 12 y no tener en cuenta las demás horas grabadas, que podrían alterar la medida, ya que en estas horas la unidad no tendría operación y el kilometraje por ende no se alteraría.

Tabla 12. Detalles de operación unidad U37. [15]

U37											
Item	Fecha	Hora-ingreso	Hora-salida	Acople	Mando	Item	Fecha	Hora-ingreso	Hora-salida	Acople	Mando
1	16/10/2012	5:24:00	20:59:00	31B-A37	U37B-SUR	30	07/11/2012	04:20	20:51:00	28A-B37	U37A-SUR
2	17/10/2012	4:47:00	23:12:00	24B-A37	U37B-SUR	31	08/11/2012	04:16	19:37:00	35A-37B	U37A-SUR
3	18/10/2012	15:54:00	20:04:00	37A-A24	U37B-NOR	32	09/11/2012	05:25	23:30:00	31A-37B	U37A-SUR
4	19/10/2012	16:11:00	19:00:00	37A-B03	U37B-NOR	33	10/11/2012	04:00	23:11:00	06A-B37	U37A-SUR
5	19/10/2012	5:48:00	8:26:00	37A-B20	U37B-NOR	34	11/11/2012	04:33		U37	U37A-SUR
6	20/10/2012	5:03:00	12:06:00	37A-B04	U37B-NOR	35	12/11/2012	12:50:00	22:32	U37	U37B-SUR
7	21/10/2012	No opero				36	13/11/2012	05:17	22:59	15B-A37	U37B-SUR
8	22/10/2012	16:26:00	19:18:00	15B-B37	U37A-SUR	37	14/11/2012	3:56	08:19	37B-B35	U37A-NOR
9	22/10/2012		11:06:00	04B-B37	U37A-SUR	38	15/11/2012		8:42	37B-B17	U37A-NOR
10	23/10/2012		22:49:00	11A-B37	U37A-SUR	39	15/11/2012		19:45	37B-B17	U37A-NOR
11	23/10/2012	LA		11A-B37	U37A-SUR	40	16/11/2012	4:19	20:12	37B-B09	U37A-NOR
12	24/10/2012	5:18:00	21:34:00	37A-A01	U37B-NOR	41	17/11/2012	04:01	LA	37B-B09	U37A-NOR
13	25/10/2012	04:16	23:28:00	28B-B37	U37A-SUR	42	17/11/2012		20:33	37B-B09	U37A-NOR
14	26/10/2012	4:19:00	20:42:00	01B-B37	U37A-SUR	43	18/11/2012	12:38		U37	U37A-SUR
15	27/10/2012	05:36	10:00:00	28B-B37	U37A-SUR	44	19/11/2012	5:19	23:10	19A-B37	U37A-SUR
16	27/10/2012	12:12:00	19:18:00	37B-A28	U37A-NOR	45	20/11/2012	4:33	14:27	19B-B37	U37A-SUR
17	28/10/2012	No opero				46	21/11/2012	05:18	23:10	11B-B37	U37A-SUR
18	29/10/2012	5:21:00	12:20:00	37B-A41	U37A-NOR	47	22/11/2012	05:15	23:22	41B-B37	U37A-SUR
19	30/10/2012	05:21		37B-A40	U37A-NOR	48	23/11/2012	5:20	23:30	41B-B37	U37A-SUR
20	30/10/2012		19:08:00	37B-A01	U37A-NOR	49	24/11/2012	5:12	22:50	41B-B38	U37A-SUR
21	31/10/2012	15:30:00	19:44:00	37B-B39	U37A-NOR	50	25/11/2012	No opero			
22	31/10/2012	04:48	8:53:00	37B-B26	U37A-NOR	51	26/11/2012	4:41	9:03	37B-B34	37A-Norte
23	01/11/2012	04:20		37B-A28	U37A-NOR	52	26/11/2012	16:38	19:42	37B-B34	37A-Norte
24	02/11/2012	04:16	23:26:00	37B-A28	U37A-NOR	53	27/11/2012	5:18	23:20	37B-B25	37A-Norte
25	03/11/2012	04:21	19:36:00	37B-A38	U37A-NOR	54	28/11/2012	5:17	2:52	37B-A40	37A-Norte
26	04/11/2012	No opero				55	29/11/2012	4:19	2:25	37B-A41	37A-Norte
27	05/11/2012	12:17:00	20:26:00	U37	U37A-SUR	56	30/11/2012	5:25	23:00	37B-A40	37A-Norte
28	06/11/2012	4:18:00		28A-B37	U37A-NOR	57	01/12/2012	5:05	18:46	37B-B19	37A-Norte
29	07/11/2012	22:49:00	LB	37A-B38	U37B-NOR	58	02/12/2012	4:17	20:50	37B-B17	37A-Norte
						59	03/12/2012	4:00	8:56	37B-B19	37A-Norte
								16:30	19:25	37B-A10	37A-Norte

A continuación se presenta el consumo energético obtenido de los días analizados en este proyecto.

Tabla 13. Consumo obtenido de los días analizados.

Ítem	Mapa de tiempos				Energía_red	Energía_Res_disp	Distancia	Consumo	%Energía_disp	Energía_Aux	Energía_P_Frenado	Energía_Red+Reg	E_Recuperada	Consumo+reg
	Fecha de inicio	Hora de inicio	Fecha de terminación	Hora de terminación	kWh	kWh	km	kWh/km	%	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh/km
UNIDAD U37 MES DE MAYO														
1	10/05/2012	0:09:22	10/05/2012	22:39:49	2045.11	52.45	621.23	3.29	2.56	294.93	999.05	2689.94	644.83	4.33
2	11/05/2012	5:21:44	11/05/2012	21:48:18	642.53	13.17	188.94	3.40	2.05	118.03	314.97	859.44	216.91	4.55
3	12/05/2012	6:33:10	13/05/2012	3:56:04	1684.50	55.27	506.31	3.33	3.28	270.38	814.38	2208.47	523.97	4.36
4	15/05/2012	0:00:00	15/05/2012	22:00:00	1653.99	44.77	472.66	3.50	2.71	250.53	778.65	2164.39	510.40	4.58
5	17/05/2012	4:15:57	17/05/2012	20:29:25	2079.97	51.05	587.55	3.54	2.45	278.52	1003.14	2732.32	652.34	4.65
6	17/05/2012	4:15:57	17/05/2012	20:29:25	2079.97	51.05	587.55	3.54	2.45	278.52	1003.14	2732.32	652.34	4.65
7	18/05/2012	4:46:13	18/05/2012	20:58:14	1840.71	45.70	522.50	3.52	2.48	259.23	893.64	2423.01	582.30	4.64
8	19/05/2012	5:40:47	19/05/2012	23:59:00	1726.48	46.95	491.40	3.51	2.72	252.22	830.87	2267.14	540.65	4.61
9	20/05/2012	0:00:00	20/05/2012	23:59:00	2159.81	56.43	585.28	3.69	2.61	293.26	998.00	2817.48	657.67	4.81
10	21/05/2012	0:00:00	21/05/2012	22:35:58	2181.70	48.38	597.19	3.65	2.22	292.03	1030.86	2856.42	674.72	4.78
11	22/05/2012	0:00:00	22/05/2012	23:59:32	947.57	16.40	280.83	3.37	1.73	148.56	441.61	1248.70	301.13	4.45
12	23/05/2012	2:33:58	23/05/2012	23:59:00	2033.82	53.47	604.11	3.37	2.63	310.73	954.79	2656.08	622.26	4.40
13	24/05/2012	0:00:00	24/05/2012	22:31:55	2003.35	46.10	607.00	3.30	2.30	293.52	948.36	2630.13	626.79	4.33
14	26/05/2012	2:51:17	26/05/2012	20:45:13	1770.11	39.16	521.69	3.39	2.21	264.95	828.22	2322.11	552.00	4.45
15	28/05/2012	1:32:30	28/05/2012	23:59:00	2209.68	50.66	658.25	3.36	2.29	314.57	1052.36	2900.54	690.87	4.41
16	29/05/2012	0:00:00	29/05/2012	23:59:00	2246.87	58.66	653.23	3.44	2.61	321.08	1070.54	2941.22	694.35	4.50
17	30/05/2012	4:16:40	30/05/2012	22:34:52	2171.23	51.94	606.92	3.58	2.39	291.19	1060.79	2850.30	679.08	4.70
18	31/05/2012	5:24:26	30/05/2012	23:59:00	1915.80	51.48	548.28	3.49	2.69	267.77	941.29	2520.33	604.53	4.60
UNIDAD U37 MES DE JUNIO														
1	01/06/2012	0:00:00	01/06/2012	22:09:49	2129.59	51.27	596.63	3.57	2.41	294.74	1037.46	2816.83	687.24	4.72
2	02/06/2012	4:48:28	02/06/2012	23:59:00	2384.21	70.98	668.34	3.57	2.98	322.27	1170.09	3128.40	744.19	4.68
3	03/06/2012	0:00:00	03/06/2012	21:15:32	2231.82	56.98	597.65	3.73	2.55	289.97	1044.11	2909.13	677.32	4.87
4	04/06/2012	4:46:14	04/06/2012	23:59:00	782.88	17.24	223.54	3.50	2.20	122.99	374.12	1038.12	255.23	4.64
5	05/06/2012	0:00:00	05/06/2012	23:10:00	984.26	22.84	286.99	3.43	2.32	152.75	473.55	1296.80	312.54	4.52
6	08/06/2012	4:37:10	08/06/2012	21:58:34	2144.66	78.71	623.69	3.44	3.67	291.60	1037.95	2773.71	629.05	4.45
UNIDAD U37 MES DE OCTUBRE														
1	20/10/2012	5:03:00	20/10/2012	12:06:00	938.10	19.60	260.42	3.60	2.09	118.74	408.71	1212.06	273.96	4.65
2	23/10/2012	0:00:00	23/10/2012	23:47:12	2558.77	67.22	713.63	3.59	2.63	327.31	1119.91	3264.85	706.08	4.57
3	24/10/2012	0:02:40	24/10/2012	22:52:41	2194.51	47.34	620.96	3.53	2.16	286.99	940.20	2823.02	628.51	4.55
4	25/10/2012	4:16:05	25/10/2012	23:28:34	2556.24	53.21	725.32	3.52	2.08	344.57	1103.55	3285.60	729.36	4.53
5	26/10/2012	4:19:00	26/10/2012	20:42:00	2159.67	52.50	622.24	3.47	2.43	293.04	937.18	2753.04	593.37	4.42
6	27/10/2012	5:36:00	27/10/2012	19:18:00	1556.60	34.95	419.46	3.71	2.25	195.43	667.92	2007.19	450.59	4.79
7	29/10/2012	4:36:17	29/10/2012	23:59:00	1519.34	33.56	421.22	3.61	2.21	203.81	683.72	1979.61	460.27	4.70
8	30/10/2012	2:47:07	30/10/2012	23:59:00	1876.65	41.91	520.06	3.61	2.23	252.14	840.54	2433.04	556.39	4.68
9	31/10/2012	3:27:21	31/10/2012	19:44:00	1133.40	15.10	319.16	3.55	1.33	160.62	511.00	1493.26	359.86	4.68
UNIDAD U37 MES DE NOVIEMBRE Y DICIEMBRE														
1	01/11/2012	3:23:00	01/11/2012	23:59:00	1674.10	31.08	473.39	3.54	1.86	230.22	740.46	2178.67	504.56	4.60
2	02/11/2012	4:16:00	02/11/2012	23:26:00	2591.94	51.61	724.68	3.58	1.99	339.21	1148.36	3372.18	780.23	4.65
3	05/11/2012	2:56:43	05/11/2012	23:59:00	1086.15	16.26	296.67	3.66	1.50	140.52	485.30	1433.15	347.01	4.83
4	06/11/2012	4:18:00	06/11/2012	23:59:00	1973.41	30.48	571.25	3.45	1.54	258.34	861.67	2534.32	560.91	4.44
5	07/11/2012	4:19:00	07/11/2012	22:49:00	2142.34	36.07	625.55	3.42	1.68	291.77	937.76	2758.90	616.56	4.41
6	08/11/2012	0:00:00	08/11/2012	22:59:23	1452.92	44.65	412.61	3.52	3.07	251.26	608.95	1822.73	369.81	4.42
7	09/11/2012	5:25:00	09/11/2012	23:30:00	2004.23	48.18	566.95	3.54	2.40	291.78	858.95	2571.55	567.32	4.54
8	10/11/2012	4:00:00	10/11/2012	23:11:00	2542.51	51.88	725.48	3.50	2.04	341.84	1153.22	3319.95	777.43	4.58
9	11/11/2012	4:33:00	11/11/2012	22:41:00	2464.51	42.68	673.48	3.66	1.73	328.17	1104.68	3251.99	787.48	4.83
10	12/11/2012	12:50:00	12/11/2012	22:32:00	1366.31	33.70	362.85	3.77	2.47	177.98	610.57	1791.50	425.19	4.94
11	13/11/2012	5:17:00	13/11/2012	22:59:00	2280.12	61.21	672.86	3.39	2.68	315.50	992.85	2946.58	666.45	4.38
12	14/11/2012	0:00:00	14/11/2012	23:59:00	987.35	18.22	269.19	3.67	1.85	147.61	427.63	1284.27	296.93	4.77
13	15/11/2012	5:15:00	15/11/2012	19:49:00	949.44	16.86	267.33	3.55	1.78	147.98	424.95	1247.55	298.11	4.67
14	16/11/2012	4:19:00	16/11/2012	20:12:00	2075.30	44.59	570.38	3.64	2.15	271.90	913.81	2696.60	621.31	4.73
15	17/11/2012	4:00:00	17/11/2012	20:33:00	2226.74	54.79	620.11	3.59	2.46	294.42	990.02	2891.67	664.92	4.66
16	20/11/2012	3:28:04	20/11/2012	17:30:00	1773.63	41.02	506.20	3.50	2.31	236.31	780.32	2295.31	521.68	4.53
17	21/11/2012	5:18:00	21/11/2012	23:10:00	2028.69	37.22	570.40	3.56	1.83	298.41	886.54	2620.45	591.76	4.59
18	22/11/2012	5:15:00	22/11/2012	23:24:00	1946.41	33.64	567.01	3.43	1.73	283.70	862.82	2532.77	586.36	4.47
19	23/11/2012	5:20:00	23/11/2012	23:30:00	2184.45	37.91	622.18	3.51	1.74	284.30	984.46	2834.39	649.95	4.56
20	26/10/2012	0:18:53	27/10/2012	00:08:26	2165.84	52.72	624.35	3.47	2.43	297.84	937.18	2759.43	593.59	4.42
21	27/11/2012	4:05:15	27/11/2012	23:20:00	2049.16	41.81	569.71	3.60	2.04	282.48	915.53	2684.18	635.03	4.71
22	28/11/2012	0:21:47	29/11/2012	3:02:52	2545.09	53.07	710.20	3.58	2.09	355.64	1119.03	3308.24	763.15	4.66
23	29/11/2012	3:05:20	30/11/2012	3:42:41	2558.39	48.56	727.53	3.52	1.90	371.76	1123.48	3347.60	789.21	4.60
24	30/11/2012	5:25:00	30/11/2012	23:21:00	2281.21	34.62	619.85	3.68	1.52	308.93	1032.29	3005.48	724.27	4.85
25	03/12/2012	10:50:11	03/12/2012	23:05:14	382.65	6.41	110.79	3.45	1.68	56.65	172.89	503.39	120.73	4.54

La modificación del carenaje de 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.

En el numeral 3.1 se presenta el diagrama de flujo correspondiente a la metodología utilizada para el desarrollo del proyecto, con el fin de calcular el porcentaje de reducción obtenido a través del carenaje aerodinámico propuesto por las Facultades de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Aeronáutica de la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín.

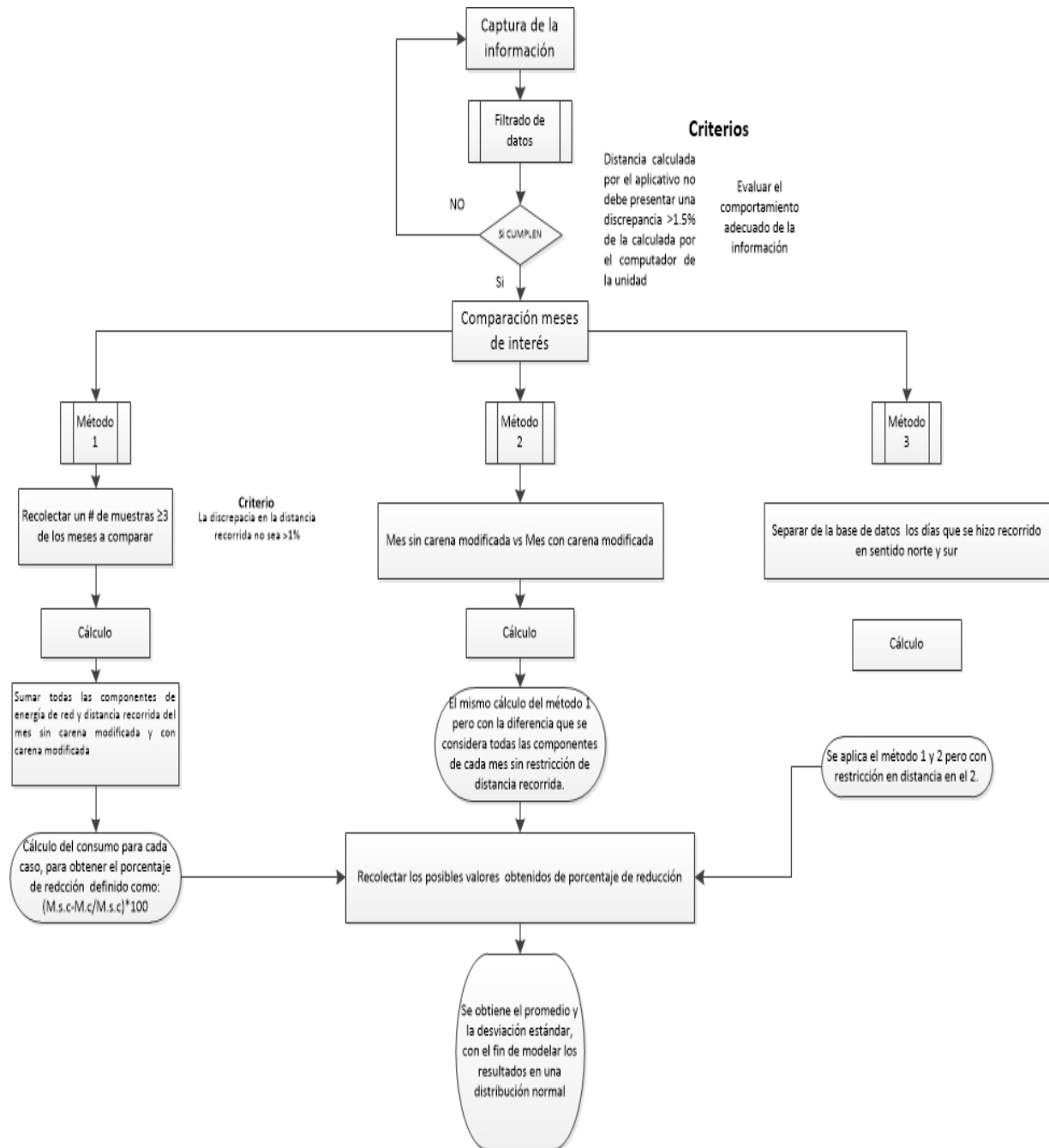
Esta metodología consiste en filtrar los datos obtenidos por el aplicativo con dos criterios y así, obtener información útil para realizar las respectivas comparaciones. Sin este procedimiento se obtendrían datos atípicos que pueden generar confusión durante el análisis, dando resultados incorrectos respecto a la situación real. Para evitar esto los datos se deben encontrar en igualdad de condiciones, por lo que se debe garantizar que en caso de presentarse diferentes condiciones climáticas, cantidad de usuarios y distancia recorrida, se filtre dicha información, de modo que solo se cuente con datos que describan un comportamiento normal.

El principal criterio para filtrar esta información consiste en realizar una regresión lineal de los datos obtenidos, eliminando los datos atípicos que se dieron durante el mes estudiado, de modo que se aumente la confiabilidad de los datos y se describa una relación directamente proporcional de la distancia recorrida vs energía consumida.

Después de realizar este filtrado se procede a proponer tres casos de comparación, obteniendo distintos porcentajes de reducción, seguidamente realizar un breve análisis estadístico y obtener la probabilidad de ocurrencia de cada porcentaje de reducción.

3.1 METODOLOGÍA PARA EVALUAR EL EFECTO QUE PRODUCE DESDE EL PUNTO DE VISTA ENERGÉTICO, EL CAMBIO DE LA CARENA DEL METRO, DESARROLLADA POR LA UPB.

3.1.1 Diagrama de flujo.



Para determinar la fiabilidad de los datos calculados en octubre y noviembre por el aplicativo, se obtiene el porcentaje de error, determinando la magnitud de la diferencia de la distancia calculada por el computador de la unidad U37 respecto al aplicativo. En la Tabla 14 se muestra el kilometraje calculado en la unidad U37.

Tabla 14. Kilometraje del computador de la unidad U37. [15]

ÍTEM	Fecha	Kilometraje recorrido	ÍTEM	Fecha	Kilometraje recorrido
U37					
1	16/10/2012	573	25	09/11/2012	560
2	17/10/2012	656	26	10/11/2012	717
3	18/10/2012	521	27	11/11/2012	668
4	19/10/2012	222	28	12/11/2012	359
5	20/10/2012	259	29	13/11/2012	664
6	21/10/2012	12	30	14/11/2012	266
7	22/10/2012	317	31	15/11/2012	264
8	23/10/2012	711	32	16/11/2012	564
9	24/10/2012	616	33	17/11/2012	675
10	25/10/2012	716	34	18/11/2012	62
11	26/10/2012	615	35	19/11/2012	663
12	27/10/2012	418	36	20/11/2012	506
13	28/10/2012	0	37	21/11/2012	563
14	29/10/2012	466	38	22/11/2012	563
15	30/10/2012	463	39	23/11/2012	617
16	31/10/2012	317	40	24/11/2012	669
17	01/11/2012	468	41	25/11/2012	6
18	02/11/2012	716	42	26/11/2012	620
19	03/11/2012	564	43	27/11/2012	562
20	04/11/2012	0	44	28/11/2012	698
21	05/11/2012	299	45	29/11/2012	716
22	06/11/2012	563	46	30/11/2012	614
23	07/11/2012	618	47	01/12/2012	513
24	08/11/2012	418	48	02/12/2012	660
			49	03/12/2012	285

A partir de la tabla anterior se calcularon los porcentajes de error debido a la discrepancia entre las distancias calculadas por el aplicativo y el computador del tren para este cálculo se utilizó la siguiente ecuación:

$$E\% = \left(\frac{|V_{teórico} - V_{Experimental}|}{V_{teórico}} \right) * 100 \quad (3-1)$$

Tabla 15. Datos correspondientes al mes de octubre (carena modificada).

ítem	Mapa de tiempos				Energía red	Energía Resdisp	Distancia	Consumo	%Energía disp	Energía Aux	Energía P_Frenado	Energía Red+Reg	Energía Recuperada	Consumo con reg	dist-unidad	Error
	Fecha de inicio	Hora de inicio	Fecha de terminación	Hora de terminación	kWh	kWh	km	kWh/km	%	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh/km	km	%
UNIDAD U37 MES DE OCTUBRE																
1	20/10/2012	5:03:00	20/10/2012	12:06:00	938.10	19.60	260.42	3.60	2.09	118.74	408.71	1212.06	273.96	4.65	259	0.548%
2	23/10/2012	0:00:00	23/10/2012	23:47:12	2558.77	67.22	713.63	3.59	2.63	327.31	1119.91	3264.85	706.08	4.57	711	0.370%
3	24/10/2012	0:02:40	24/10/2012	22:52:41	2194.51	47.34	620.96	3.53	2.16	286.99	940.20	2823.02	628.51	4.55	616	0.806%
4	25/10/2012	4:16:05	25/10/2012	23:28:34	2556.24	53.21	725.32	3.52	2.08	344.57	1103.55	3285.60	729.36	4.53	716	1.302%
5	26/10/2012	4:19:00	26/10/2012	20:42:00	2159.67	52.50	622.24	3.47	2.43	293.04	937.18	2753.04	593.37	4.42	615	1.178%
6	27/10/2012	5:36:00	27/10/2012	19:18:00	1556.60	34.95	419.46	3.71	2.25	195.43	667.92	2007.19	450.59	4.79	418	0.349%
7	29/10/2012	4:36:17	29/10/2012	23:59:00	1519.34	33.56	421.22	3.61	2.21	203.81	683.72	1979.61	460.27	4.70	466	9.608%
8	30/10/2012	2:47:07	30/10/2012	23:59:00	1876.65	41.91	520.06	3.61	2.23	252.14	840.54	2433.04	556.39	4.68	463	12.324%
9	31/10/2012	3:27:21	31/10/2012	19:44:00	1133.40	15.10	319.16	3.55	1.33	160.62	511.00	1493.26	359.86	4.68	317	0.680%
UNIDAD U37 MES DE OCTUBRE Y DICIEMBRE																
1	01/11/2012	3:23:00	01/11/2012	23:59:00	1674.10	31.08	473.39	3.54	1.86	230.22	740.46	2178.67	504.56	4.60	468	1.151%
2	02/11/2012	4:16:00	02/11/2012	23:26:00	2591.94	51.61	724.68	3.58	1.99	339.21	1148.36	3372.18	780.23	4.65	716	1.213%
3	05/11/2012	2:56:43	05/11/2012	23:59:00	1086.15	16.26	296.67	3.66	1.50	140.52	485.30	1433.15	347.01	4.83	299	0.779%
4	06/11/2012	4:18:00	06/11/2012	23:59:00	1973.41	30.48	571.25	3.45	1.54	258.34	861.67	2534.32	560.91	4.44	563	1.466%
5	07/11/2012	4:19:00	07/11/2012	22:49:00	2142.34	36.07	625.55	3.42	1.68	291.77	937.76	2758.90	616.56	4.41	618	1.222%
6	08/11/2012	0:00:00	08/11/2012	22:59:23	1452.92	44.65	412.61	3.52	3.07	251.26	608.95	1822.73	369.81	4.42	418	1.289%
7	09/11/2012	5:25:00	09/11/2012	23:30:00	2004.23	48.18	566.95	3.54	2.40	291.78	858.95	2571.55	567.32	4.54	560	1.241%
8	10/11/2012	4:00:00	10/11/2012	23:11:00	2542.51	51.88	725.48	3.50	2.04	341.84	1153.22	3319.95	777.43	4.58	717	1.182%
9	11/11/2012	4:33:00	11/11/2012	22:41:00	2464.51	42.68	673.48	3.66	1.73	328.17	1104.68	3251.99	787.48	4.83	668	0.820%
10	12/11/2012	12:50:00	12/11/2012	22:32:00	1366.31	33.70	362.85	3.77	2.47	177.98	610.57	1791.50	425.19	4.94	359	1.073%
11	13/11/2012	5:17:00	13/11/2012	22:59:00	2280.12	61.21	672.86	3.39	2.68	315.50	992.85	2946.58	666.45	4.38	664	1.334%
12	14/11/2012	0:00:00	14/11/2012	23:59:00	987.35	18.22	269.19	3.67	1.85	147.61	427.63	1284.27	296.93	4.77	266	1.199%
13	15/11/2012	5:15:00	15/11/2012	19:49:00	949.44	16.86	267.33	3.55	1.78	147.98	424.95	1247.55	298.11	4.67	264	1.263%
14	16/11/2012	4:19:00	16/11/2012	20:12:00	2075.30	44.59	570.38	3.64	2.15	271.90	913.81	2696.60	621.31	4.73	564	1.132%
15	17/11/2012	4:00:00	17/11/2012	20:33:00	2226.74	54.79	620.11	3.59	2.46	294.42	990.02	2891.67	664.92	4.66	675	8.132%
16	20/11/2012	3:28:04	20/11/2012	17:30:00	1773.63	41.02	506.20	3.50	2.31	236.31	780.32	2295.31	521.68	4.53	506	0.039%
17	21/11/2012	5:18:00	21/11/2012	23:10:00	2028.69	37.22	570.40	3.56	1.83	298.41	886.54	2620.45	591.76	4.59	563	1.315%
18	22/11/2012	5:15:00	22/11/2012	23:24:00	1946.41	33.64	567.01	3.43	1.73	283.70	862.82	2532.77	586.36	4.47	563	0.713%
19	23/11/2012	5:20:00	23/11/2012	23:30:00	2184.45	37.91	622.18	3.51	1.74	284.30	984.46	2834.39	649.95	4.56	617	0.839%
20	26/10/2012	0:18:53	27/10/2012	0:08:26	2165.84	52.72	624.35	3.47	2.43	297.84	937.18	2759.43	593.59	4.42	620	0.702%
21	27/11/2012	4:05:15	27/11/2012	23:20:00	2049.16	41.81	569.71	3.60	2.04	282.48	915.53	2684.18	635.03	4.71	562	1.372%
22	28/11/2012	0:21:47	29/11/2012	3:02:52	2545.09	53.07	710.20	3.58	2.09	355.64	1119.03	3308.24	763.15	4.66	698	1.748%
23	29/11/2012	3:05:20	30/11/2012	3:42:41	2558.39	48.56	727.53	3.52	1.90	371.76	1123.48	3347.60	789.21	4.60	716	1.611%
24	30/11/2012	5:25:00	30/11/2012	23:21:00	2281.21	34.62	619.85	3.68	1.52	308.93	1032.29	3005.48	724.27	4.85	614	0.953%
25	03/12/2012	10:50:11	03/12/2012	23:05:14	382.65	6.41	110.79	3.45	1.68	56.65	172.89	503.39	120.73	4.54	285	61.127%
															Promedio-general	3.591%

Promedio
3.018%

Promedio
3.797%

De la anterior tabla se escogieron los datos que menor porcentaje de error presentaron, todo esto con el objetivo de formar una base de datos ideal para comparar con los meses de mayo y junio.

En la Tabla 16 se observar que los datos seleccionados presentan un porcentaje de error menor al 1%, el cual se debe por operaciones de maniobra dentro de los talleres del metro Medellín, error numérico del método de integración utilizado en el aplicativo y horas no tomadas a tiempo.

Sin embargo esto no quiere decir que los datos sean del todo confiables, ya que no se ha evaluado que comportamiento que presentan dichos datos.

Tabla 16. Datos escogidos con un porcentaje de error de 0.966%

Ítem	Mapa de tiempos				Energía red	Energía Resdisp	Distancia	Consumo	%Energía disp	Energía Aux	Energía P_Frenado	Energía Red+Reg	Energía Recuperada	Consumo con reg	dist-unidad	Error
	Fecha de inicio	Hora de inicio	Fecha de terminación	Hora de terminación	kWh	kWh	km	kWh/km	%	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh/km	km	%
UNIDAD U37 MES DE OCTUBRE																
1	20/10/2012	5:03:00	20/10/2012	12:06:00	938.10	19.60	260.42	3.60	2.09	118.74	408.71	1212.06	273.96	4.65	259	0.548%
2	23/10/2012	0:00:00	23/10/2012	23:47:12	2558.77	67.22	713.63	3.59	2.63	327.31	1119.91	3264.85	706.08	4.57	711	0.370%
3	24/10/2012	0:02:40	24/10/2012	22:52:41	2194.51	47.34	620.96	3.53	2.16	286.99	940.20	2823.02	628.51	4.55	616	0.806%
4	25/10/2012	4:16:05	25/10/2012	23:28:34	2556.24	53.21	725.32	3.52	2.08	344.57	1103.55	3285.60	729.36	4.53	716	1.302%
5	26/10/2012	4:19:00	26/10/2012	20:42:00	2159.67	52.50	622.24	3.47	2.43	293.04	937.18	2753.04	593.37	4.42	615	1.178%
6	27/10/2012	5:36:00	27/10/2012	19:18:00	1556.60	34.95	419.46	3.71	2.25	195.43	667.92	2007.19	450.59	4.79	418	0.349%
7	31/10/2012	3:27:21	31/10/2012	19:44:00	1133.40	15.10	319.16	3.55	1.33	160.62	511.00	1493.26	359.86	4.68	317	0.680%
UNIDAD U37 MES DE NOVIEMBRE																
1	01/11/2012	3:23:00	01/11/2012	23:59:00	1674.10	31.08	473.39	3.54	1.86	230.22	740.46	2178.67	504.56	4.60	468	1.151%
2	02/11/2012	4:16:00	02/11/2012	23:26:00	2591.94	51.61	724.68	3.58	1.99	339.21	1148.36	3372.18	780.23	4.65	716	1.213%
3	05/11/2012	2:56:43	05/11/2012	23:59:00	1086.15	16.26	296.67	3.66	1.50	140.52	485.30	1433.15	347.01	4.83	299	0.779%
4	06/11/2012	4:18:00	06/11/2012	23:59:00	1973.41	30.48	571.25	3.45	1.54	258.34	861.67	2534.32	560.91	4.44	563	1.466%
5	07/11/2012	4:19:00	07/11/2012	22:49:00	2142.34	36.07	625.55	3.42	1.68	291.77	937.76	2758.90	616.56	4.41	618	1.222%
6	08/11/2012	0:00:00	08/11/2012	22:59:23	1452.92	44.65	412.61	3.52	3.07	251.26	608.95	1822.73	369.81	4.42	418	1.289%
7	09/11/2012	5:25:00	09/11/2012	23:30:00	2004.23	48.18	566.95	3.54	2.40	291.78	858.95	2571.55	567.32	4.54	560	1.241%
8	10/11/2012	4:00:00	10/11/2012	23:11:00	2542.51	51.88	725.48	3.50	2.04	341.84	1153.22	3319.95	777.43	4.58	717	1.182%
9	11/11/2012	4:33:00	11/11/2012	22:41:00	2464.51	42.68	673.48	3.66	1.73	328.17	1104.68	3251.99	787.48	4.83	668	0.820%
10	12/11/2012	12:50:00	12/11/2012	22:32:00	1366.31	33.70	362.85	3.77	2.47	177.98	610.57	1791.50	425.19	4.94	359	1.073%
11	13/11/2012	5:17:00	13/11/2012	22:59:00	2280.12	61.21	672.86	3.39	2.68	315.50	992.85	2946.58	666.45	4.38	664	1.334%
12	14/11/2012	0:00:00	14/11/2012	23:59:00	987.35	18.22	269.19	3.67	1.85	147.61	427.63	1284.27	296.93	4.77	266	1.199%
13	15/11/2012	5:15:00	15/11/2012	19:49:00	949.44	16.86	267.33	3.55	1.78	147.98	424.95	1247.55	298.11	4.67	264	1.263%
14	16/11/2012	4:19:00	16/11/2012	20:12:00	2075.30	44.59	570.38	3.64	2.15	271.90	913.81	2696.60	621.31	4.73	564	1.132%
15	20/11/2012	3:28:04	20/11/2012	17:30:00	1773.63	41.02	506.20	3.50	2.31	236.31	780.32	2295.31	521.68	4.53	506	0.039%
16	21/11/2012	5:18:00	21/11/2012	23:10:00	2028.69	37.22	570.40	3.56	1.83	298.41	886.54	2620.45	591.76	4.59	563	1.315%
17	22/11/2012	5:15:00	22/11/2012	23:24:00	1946.41	33.64	567.01	3.43	1.73	283.70	862.82	2532.77	586.36	4.47	563	0.713%
18	23/11/2012	5:20:00	23/11/2012	23:30:00	2184.45	37.91	622.18	3.51	1.74	284.30	984.46	2834.39	649.95	4.56	617	0.839%
19	26/10/2012	0:18:53	27/10/2012	0:08:26	2165.84	52.72	624.35	3.47	2.43	297.84	937.18	2759.43	593.59	4.42	620	0.702%
20	27/11/2012	4:05:15	27/11/2012	23:20:00	2049.16	41.81	569.71	3.60	2.04	282.48	915.53	2684.18	635.03	4.71	562	1.372%
21	30/11/2012	5:25:00	30/11/2012	23:21:00	2281.21	34.62	619.85	3.68	1.52	308.93	1032.29	3005.48	724.27	4.85	614	0.953%
															Promedio-general	0.983%

3.1.2 Comportamiento de datos calculados.

3.1.2.1 Mes de octubre y noviembre

En las Figura 27 y 28 se puede observar un comportamiento directamente proporcional de la energía consumida vs la distancia recorrida, este tipo de comportamiento indica la fiabilidad de los datos, ya que el consumo de energía eléctrica tiene una tendencia lineal vs la distancia recorrida, sin embargo se puede aumentar aún más la fiabilidad de estos datos eliminando las componentes alrededor de la línea de tendencia calculada.

Esta ecuación que describe dicho comportamiento fue calcula a través de una aproximación numérica en Microsoft Excel donde la constante que acompaña a la variable independiente es el consumo de energía eléctrica y la variable (R^2) es la varianza de la regresión lineal aplicada a la dispersión de datos expuestas.

Recuerde que la varianza es la desviación estándar elevada al cuadrado y la desviación estándar me indica que tan separados se encuentran los datos.

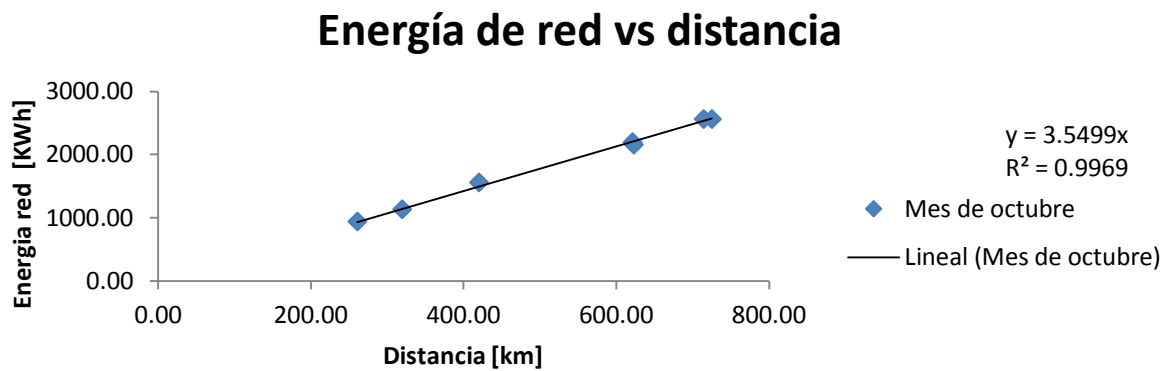


Figura 27. Información sin filtrar de energía consumida en octubre vs distancia recorrida.

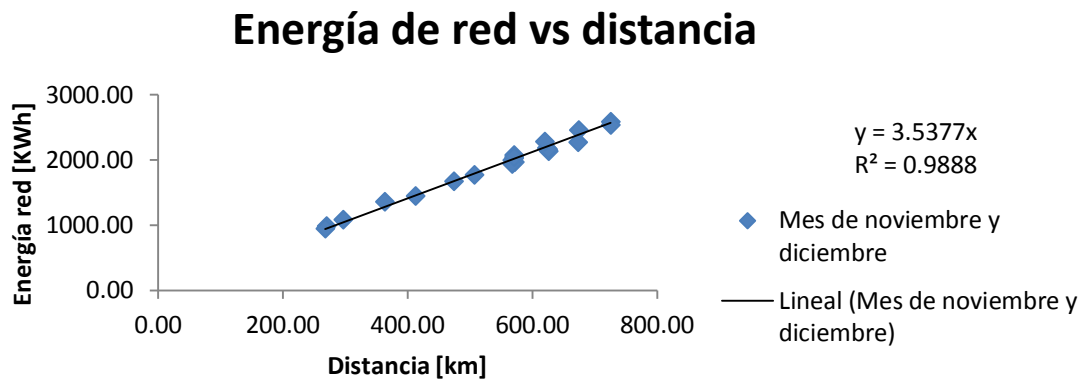


Figura 28. Información sin filtrar de energía consumida en noviembre vs distancia recorrida.

En la siguiente tabla se muestra los datos a utilizar para comparar con los meses de mayo y junio.

Tabla 17. información octubre y noviembre filtrada.

ítem	Mapa de tiempos				Energía red	Energía Resdisp	Distancia	Consumo	%Energía disp	Energía Aux	Energía P_Frenado	Energía Red+Reg	Energía Recuperada	Consumo con reg	dist-unidad	Error
	Fecha de inicio	Hora de inicio	Fecha de terminación	Hora de terminación	kWh	kWh	km	kWh/km	%	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh/km	km	%
UNIDAD U37 MES DE OCTUBRE																
1	20/10/2012	5:03:00	20/10/2012	12:06:00	938.10	19.60	260.42	3.60	2.09	118.74	408.71	1212.06	273.96	4.65	259	0.548%
3	24/10/2012	0:02:40	24/10/2012	22:52:41	2194.51	47.34	620.96	3.53	2.16	286.99	940.20	2823.02	628.51	4.55	616	0.806%
4	25/10/2012	4:16:05	25/10/2012	23:28:34	2556.24	53.21	725.32	3.52	2.08	344.57	1103.55	3285.60	729.36	4.53	716	1.302%
5	26/10/2012	4:19:00	26/10/2012	20:42:00	2159.67	52.50	622.24	3.47	2.43	293.04	937.18	2753.04	593.37	4.42	615	1.178%
6	31/10/2012	3:27:21	31/10/2012	19:44:00	1133.40	15.10	319.16	3.55	1.33	160.62	511.00	1493.26	359.86	4.68	317	0.680%
UNIDAD U37 MES DE NOVIEMBRE																
1	01/11/2012	3:23:00	01/11/2012	23:59:00	1674.10	31.08	473.39	3.54	1.86	230.22	740.46	2178.67	504.56	4.60	468	1.151%
2	06/11/2012	4:18:00	06/11/2012	23:59:00	1973.41	30.48	571.25	3.45	1.54	258.34	861.67	2534.32	560.91	4.44	563	1.466%
3	07/11/2012	4:19:00	07/11/2012	22:49:00	2142.34	36.07	625.55	3.42	1.68	291.77	937.76	2758.90	616.56	4.41	618	1.222%
4	08/11/2012	0:00:00	08/11/2012	22:59:23	1452.92	44.65	412.61	3.52	3.07	251.26	608.95	1822.73	369.81	4.42	418	1.289%
5	10/11/2012	4:00:00	10/11/2012	23:11:00	2542.51	51.88	725.48	3.50	2.04	341.84	1153.22	3319.95	777.43	4.58	717	1.182%
6	13/11/2012	5:17:00	13/11/2012	22:59:00	2280.12	61.21	672.86	3.39	2.68	315.50	992.85	2946.58	666.45	4.38	664	1.334%
7	15/11/2012	5:15:00	15/11/2012	19:49:00	949.44	16.86	267.33	3.55	1.78	147.98	424.95	1247.55	298.11	4.67	264	1.263%
8	20/11/2012	3:28:04	20/11/2012	17:30:00	1773.63	41.02	506.20	3.50	2.31	236.31	780.32	2295.31	521.68	4.53	506	0.039%
9	22/11/2012	5:15:00	22/11/2012	23:24:00	1946.41	33.64	567.01	3.43	1.73	283.70	862.82	2532.77	586.36	4.47	563	0.713%
10	23/11/2012	5:20:00	23/11/2012	23:30:00	2184.45	37.91	622.18	3.51	1.74	284.30	984.46	2834.39	649.95	4.56	617	0.839%
11	26/10/2012	0:18:53	27/10/2012	0:08:26	2165.84	52.72	624.35	3.47	2.43	297.84	937.18	2759.43	593.59	4.42	620	0.702%
															Promedio-general	0.982%

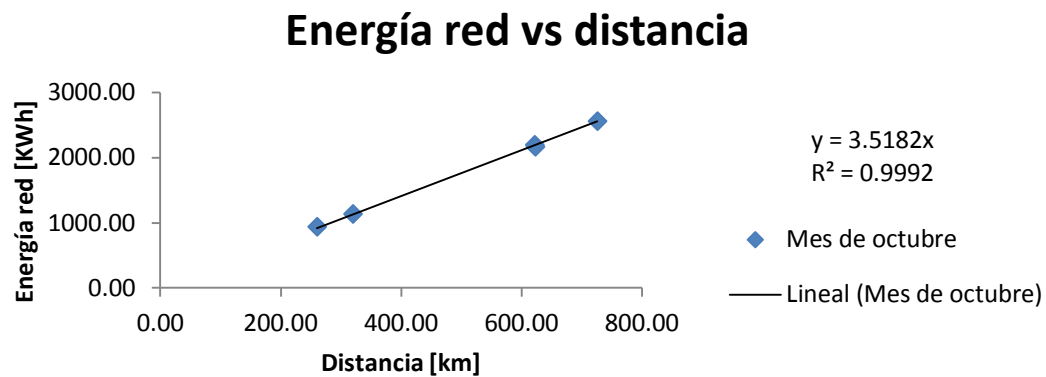


Figura 29. Información filtrada de energía consumida en octubre vs distancia recorrida.

Como se puede observar en las Figuras 29 y 30 la información seleccionada mejoro su fiabilidad optimizando el comportamiento lineal que se debe presentar entre la energía consumida vs la distancia recorrida, esto se refleja claramente en una mejoría de la varianza del 0.23%

Para llegar a este resultado se tuvo que filtrar el 66.66% de los datos de octubre, para el mes de noviembre se realizó el mismo procedimiento con una mejora de la varianza del 0.72% y un filtrado del 44% de los datos.

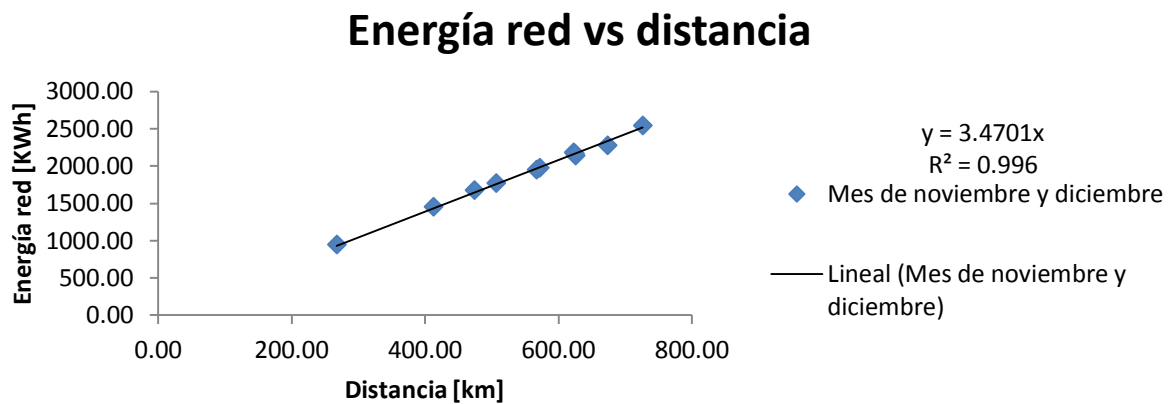


Figura 30. Información filtrada de energía consumida en Noviembre vs distancia recorrida.

3.1.2.2 Mes de mayo y junio

Para el mes de mayo se realizó el mismo Criterio de selección de datos que para los meses de octubre y noviembre, como se puede observar de los cuatros meses expuestos mayo es el que presenta una menor confiabilidad en sus datos, entonces las comparaciones realizadas en este informe respecto a mayo presentara un porcentaje de incertidumbre.

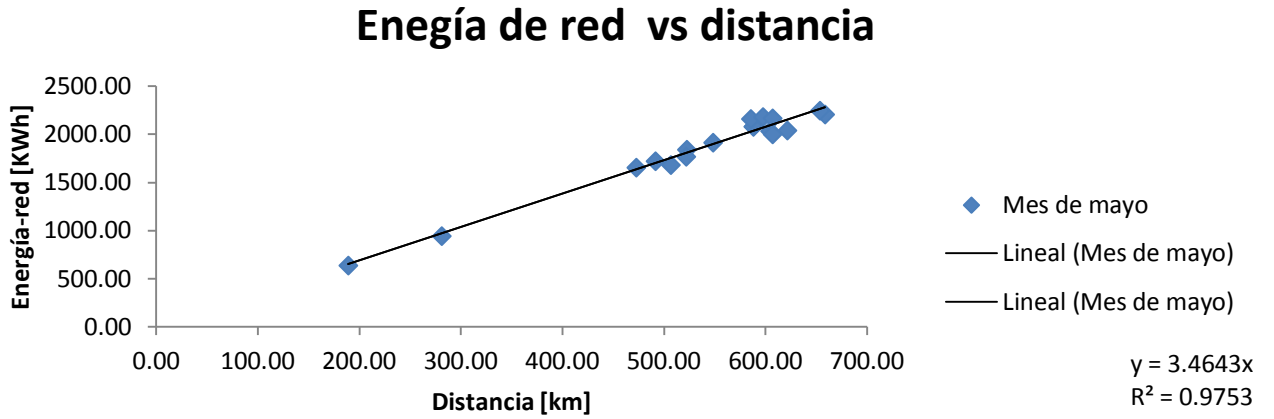


Figura 31. Información sin filtrar de energía consumida en Mayo vs distancia recorrida.

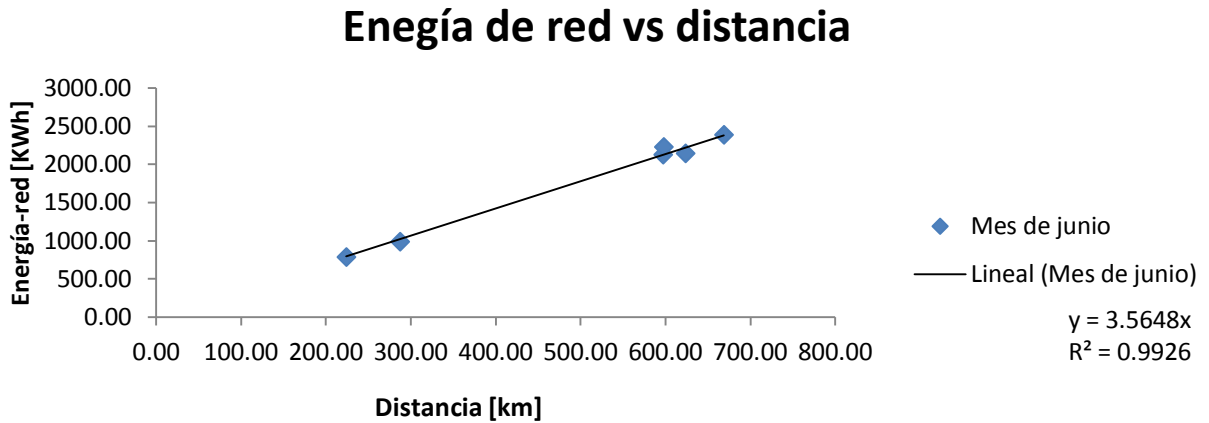


Figura 32. Información sin filtrar de energía consumida en Junio vs distancia recorrida

Tabla 18. Información filtrada de Mayo y Junio.

ítem	Mapa de tiempos				Energía red	Energía Resdisp	Distancia	Consumo	%Energía disp	Energía Aux	Energía P_Frenado	Energía Red+Reg	Energía Recuperada	Consumo con reg
	Fecha de inicio	Hora de inicio	Fecha de terminación	Hora de terminación	kWh	kWh	km	kWh/km	%	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh/km
UNIDAD U37 MES DE MAYO														
1	11/05/2012	5:21:44	11/05/2012	21:48:18	642.53	13.17	188.94	3.40	2.05	118.03	314.97	859.44	216.91	4.55
2	17/05/2012	4:15:57	17/05/2012	20:29:25	2079.97	51.05	587.55	3.54	2.45	278.52	1003.14	2732.32	652.34	4.65
3	17/05/2012	4:15:57	17/05/2012	20:29:25	2079.97	51.05	587.55	3.54	2.45	278.52	1003.14	2732.32	652.34	4.65
4	18/05/2012	4:46:13	18/05/2012	20:58:14	1840.71	45.70	522.50	3.52	2.48	259.23	893.64	2423.01	582.30	4.64
5	19/05/2012	5:40:47	19/05/2012	23:59:00	1726.48	46.95	491.40	3.51	2.72	252.22	830.87	2267.14	540.65	4.61
6	20/05/2012	0:00:00	20/05/2012	23:59:00	2159.81	56.43	585.28	3.69	2.61	293.26	998.00	2817.48	657.67	4.81
7	21/05/2012	0:00:00	21/05/2012	22:35:58	2181.70	48.38	597.19	3.65	2.22	292.03	1030.86	2856.42	674.72	4.78
8	22/05/2012	0:00:00	22/05/2012	23:59:32	947.57	16.40	280.83	3.37	1.73	148.56	441.61	1248.70	301.13	4.45
9	30/05/2012	4:16:40	30/05/2012	22:34:52	2171.23	51.94	606.92	3.58	2.39	291.19	1060.79	2850.30	679.08	4.70
UNIDAD U37 MES DE JUNIO														
1	01/06/2012	0:00:00	01/06/2012	22:09:49	2129.59	51.27	596.63	3.57	2.41	294.74	1037.46	2816.83	687.24	4.72
2	02/06/2012	4:48:28	02/06/2012	23:59:00	2384.21	70.98	668.34	3.57	2.98	322.27	1170.09	3128.40	744.19	4.68
3	03/06/2012	0:00:00	03/06/2012	21:15:32	2231.82	56.98	597.65	3.73	2.55	289.97	1044.11	2909.13	677.32	4.87
4	04/06/2012	4:46:14	04/06/2012	23:59:00	782.88	17.24	223.54	3.50	2.20	122.99	374.12	1038.12	255.23	4.64
5	05/06/2012	0:00:00	05/06/2012	23:10:00	984.26	22.84	286.99	3.43	2.32	152.75	473.55	1296.80	312.54	4.52

En las siguientes figuras se aprecia un gran aumento en la confiabilidad de los datos del mes de mayo y junio, sin embargo recordemos que mayo desde el principio de la prueba, presento un cierto porcentaje de no confiabilidad en su datos, por lo que se desconoce si la nueva selección de los datos sean los que represente un comportamiento equivalente al real.

De la información seleccionada solo el 55.0% de los datos de mayo pasaron el filtro de selección, mientras que para junio 83.33%.

El aumento en la confiabilidad de los datos de mayo es de aproximadamente del 1.02% mientras que para junio presento un aumento en un 0.30%.

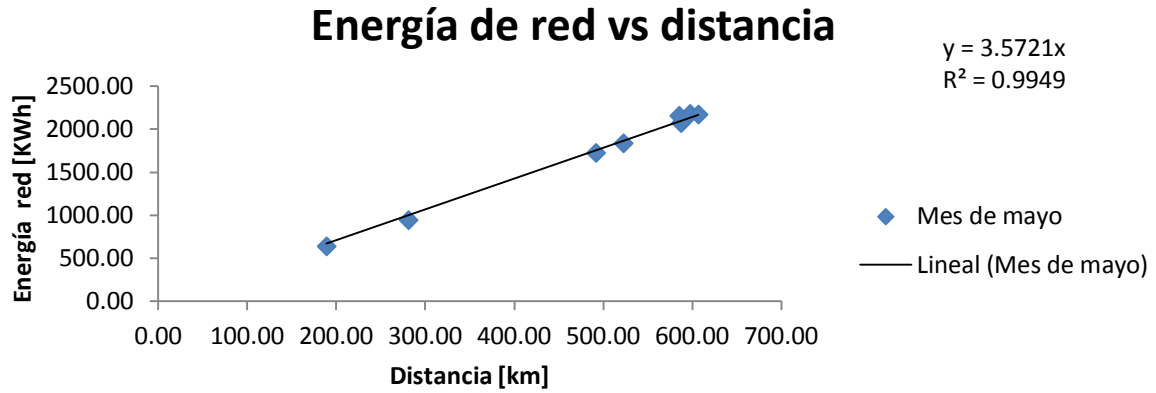


Figura 33. Información filtrada de energía consumida en Mayo vs distancia recorrida.

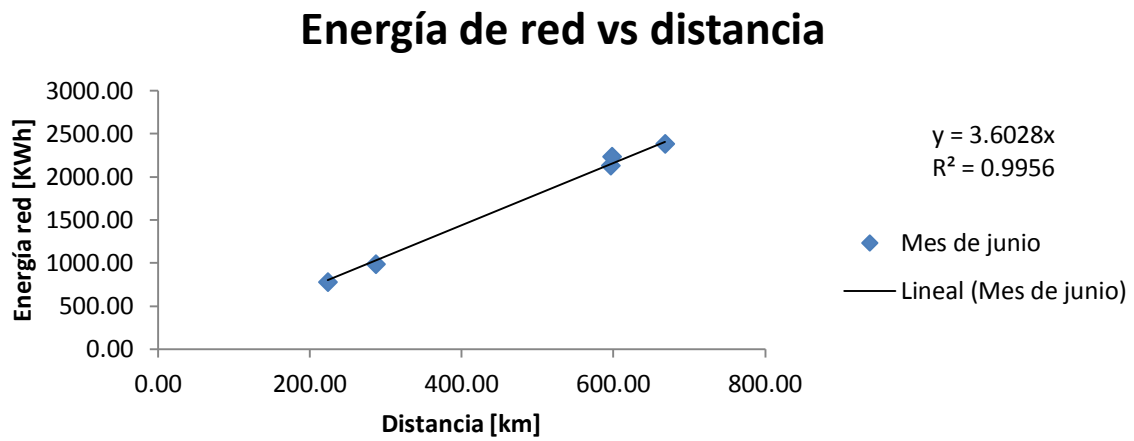


Figura 34. Información filtrada de energía consumida en Junio vs distancia recorrida.

3.1.3 Análisis estadístico

A continuación se presenta un análisis estadístico correspondiente al proyecto propuesto, donde se tienen en cuenta las distintas condiciones operativas de la unidad U37 y U38, para obtener un comportamiento detallado y posteriormente la determinación del consumo energético de esta unidad modificada.

3.1.3.1 Primer caso

El primer caso consiste en construir un escenario donde es posible comparar los datos de mayo y junio vs octubre y noviembre sin importar el sentido de desplazamiento.

En la Tabla 19 se muestra la comparación correspondiente del mes de mayo vs octubre y noviembre, durante esta prueba se tomaron muestras de cada uno de los meses a analizar de tal forma que la discrepancia en la distancia recorrida de un mes respecto a otro fuera la mínima posible.

Tabla 19. Mayo vs Octubre y Noviembre Método 1.

COMPARACIÓN MAYO VS OCTUBRE						
Energía Consumida	Distancia_acum	Consumo				
kWh	km	kWh/km				
MAYO SIN CARENA MODIFICADA						
2171.23	606.92	3.58				
1726.48	491.40	3.51				
2187.87	600.23	3.65	Energía consumida KWh	Distancia-recorrida km	consumo KWh/km	
2159.81	585.28	3.69	8245.39	2283.82		3.610348724
OCTUBRE CON CARENA MODIFICADA						
2194.51	620.96	3.53	DISCREPANCIA %	DISCREPANCIA %		% Reducción 2.60%
2159.70	622.13	3.47	2.441%	0.16545%		
2556.24	725.32	3.52	Energía consumida KWh	Distancia-recorrida km	consumo KWh/km	
1133.71	319.19	3.55	8044.15	2287.60		3.516413569
ERROR DE MEDIDAS OCTUBRE 0.99%						
COMPARACIÓN MAYO VS NOVIEMBRE						
Energía Consumida	Distancia_acum	Consumo				
kWh	km	kWh/km				
MAYO SIN CARENA MODIFICADA						
2171.23	606.92	3.58				
1726.48	491.40	3.51				
2187.87	600.23	3.65	Energía consumida KWh	Distancia-recorrida km	consumo KWh/km	
2159.81	585.28	3.69	8245.39	2283.82		3.610348724
NOVIEMBRE CON CARENA MODIFICADA						
2184.45	622.18	3.51	DISCREPANCIA %	DISCREPANCIA %		% Reducción 3.65%
2142.34	625.55	3.42	3.288%	0.37429%		
1973.41	571.25	3.45	Energía consumida KWh	Distancia-recorrida km	consumo KWh/km	
1674.10	473.39	3.54	7974.30	2292.37		3.478625716
ERROR DE MEDIDAS NOVIEMBRE 1.16%						

Tabla 20. Junio vs Octubre y Noviembre Método 1.

COMPARCIÓN JUNIO VS OCTUBRE		
Energía Consumida	Distancia_acum	Consumo
kWh	km	kWh/km
JUNIO		
2129.20	596.60	3.57
2384.21	668.34	3.57
2231.82	597.65	3.73
984.26	286.99	3.43
OCTUBRE CON CARENA MODIFICADA		
2556.24	725.32	3.52
2194.51	620.96	3.53
2159.70	622.13	3.47
1133.71	319.19	3.55
ERROR DE MEDIDAS OCTUBRE 0.99%		
Energía consumida kWh		
Distancia-recorrida km		
consumo kWh/km		
7729.48	2149.59	3.595799017
DISCREPANCIA %		DISCREPANCIA %
4.071%		6.42050%
		% Reducción 2.21%
Energía consumida kWh		
Distancia-recorrida km		
consumo kWh/km		
8044.15	2287.60	3.516413569

COMPARCIÓN JUNIO VS NOVIEMBRE		
Energía Consumida	Distancia_acum	Consumo
kWh	km	kWh/km
JUNIO		
2129.20	596.60	3.57
2384.21	668.34	3.57
2231.82	597.65	3.73
984.26	286.99	3.43
NOVIEMBRE CON CARENA MODIFICADA		
949.44	267.33	3.55
2184.45	622.18	3.51
2142.34	625.55	3.42
2165.84	624.35	3.47
ERROR DE MEDIDAS NOVIEMBRE 1.15%		
Energía consumida kWh		
Distancia-recorrida km		
consumo kWh/km		
7729.48	2149.59	3.595799017
DISCREPANCIA %		DISCREPANCIA %
3.718%		0.47298%
		% Reducción 3.26%
Energía consumida kWh		
Distancia-recorrida km		
consumo kWh/km		
7442.07	2139.42	3.478546884

A partir de la Tabla 20, se observa que el mes de junio respecto al mes de octubre, presenta el menor porcentaje de reducción, sin embargo en la comparación del mes de junio vs noviembre se obtiene un porcentaje de reducción importante con baja discrepancia en la distancia recorrida, esto se debe a que para el mes de octubre se presentaron condiciones climáticas difíciles, por lo tanto el arrastre aerodinámico frontal presenta una mayor magnitud debido a la oposición del viento.

En la Tabla 21 se escoge como posible intervalo de reducción, al escenario con condiciones más equitativas, en otras palabras, el intervalo que presenta una menor discrepancia en la distancia recorrida.

Tabla 21. Mayo y Junio vs Octubre y Noviembre Método 1

	% REDUCCIÓN	% DISCREPANCIA DIST-RECORRIDA
MAYO VS OCTUBRE	2.60%	0.16%
MAYO VS NOVIEMBRE	3.65%	0.37%
JUNIO VS OCTUBRE	2.21%	6.40%
JUNIO VS NOVIEMBRE	3.26%	0.47%

	AHORRO %	
INTERVALO ESCOGIDO	2.60%	3.65%

En la Tabla 22 se pueden observar los resultados obtenidos por el método 2, que consistió en tomar todos los datos de energía consumida y los de distancia recorrida de un mes de interés, con dichos datos se realiza una sumatoria con el fin de obtener un total de cada ítem que se usan en el cálculo de un consumo total, este estaría definido por una relación de energía total consumida sobre distancia total recorrida del mes a analizar.

Tabla 22. Mayo y Junio vs Octubre y Noviembre Método 2.

Mes	Energía Consumida [KWh]	Distancia total [km]	Consumo [KWh/km]
Mayo	15829.98	4448.15	3.56
Junio	8512.76	2373.16	3.59
Octubre	8981.92	2548.10	3.52
Noviembre	21085.18	6068.21	3.47
	% REDUCCIÓN		
MAYO VS OCTUBRE	1.1%		
MAYO VS NOVIEMBRE	2.5%		
JUNIO VS OCTUBRE	1.9%		
JUNIO VS NOVIEMBRE	3.3%		

De la Tabla 22 se puede decir que en el mes de octubre la carena no tuvo un impacto significativo respecto a mayo y junio, pero por otro lado el mes de noviembre la carena tiene un impacto importante ya que muestra una reducción de energía eléctrica respecto a los meses de mayo y junio.

Se puede concluir que en octubre no se visualiza el fenómeno aerodinámico que aporta la carena, debido a las condiciones climáticas de dicho mes respecto a los otros, ya que la mayor parte del tiempo de este periodo en Medellín-Colombia fue temporada lluviosa, lo que altera

significativamente el consumo energético debido a vientos en contra y reducción de la velocidad de operación que es donde la fuerza de arrastre aerodinámica es importante.

3.1.3.2 Segundo caso

La segunda prueba consistió en tomar los datos de octubre y noviembre y clasificarlos de tal forma que una familia de datos sería U37A sentido norte y U37A sentido sur. Esta familia de datos es comparada vs los meses de mayo y junio por método 1 y 2.

A continuación en la Tabla 23 se puede observar la clasificación de los meses de octubre y noviembre.

Tabla 23. U37A sentido sur y norte en octubre y noviembre

Unidad U37A -Norte														
Ítem	Mapa de tiempos				Energía red kWh	Energía Resdisp kWh	Distancia km	Consumo kWh/km	%Energía disp %	Energía Aux kWh	Energía P. Frenado kWh	Energía Red+Reg kWh	Energía Recuperada kWh	Consumo con reg kWh/km
	Fecha de inicio	Hora de inicio	Fecha de terminación	Hora de terminación										
UNIDAD U37 MES DE MAYO														
1	20/10/2012	5:03:00	20/10/2012	12:06:00	938.10	19.60	260.42	3.60	2.09	118.74	408.71	1212.06	273.96	4.65
6	31/10/2012	3:27:21	31/10/2012	19:44:00	1133.40	15.10	319.16	3.35	1.33	160.62	511.00	1493.26	359.86	4.68
UNIDAD U37 MES DE NOVIEMBRE														
1	01/11/2012	3:23:00	01/11/2012	23:59:00	1674.10	31.08	473.39	3.54	1.86	230.22	740.46	2178.67	504.56	4.60
2	06/11/2012	4:18:00	06/11/2012	23:59:00	1973.41	30.48	571.25	3.45	1.54	258.34	861.67	2534.32	560.91	4.44
7	15/11/2012	5:15:00	15/11/2012	19:49:00	949.44	16.86	267.33	3.55	1.78	147.98	424.95	1247.55	298.11	4.67
11	26/10/2012	0:18:53	27/10/2012	0:08:26	2165.84	52.72	624.35	3.47	2.43	297.84	937.18	2759.43	593.59	4.42
Unidad U37A -SUR														
Ítem	Mapa de tiempos				Energía red kWh	Energía Resdisp kWh	Distancia km	Consumo kWh/km	%Energía disp %	Energía Aux kWh	Energía P. Frenado kWh	Energía Red+Reg kWh	Energía Recuperada kWh	Consumo con reg kWh/km
	Fecha de inicio	Hora de inicio	Fecha de terminación	Hora de terminación										
UNIDAD U37 MES DE OCTUBRE														
4	25/10/2012	4:16:05	25/10/2012	23:28:34	2556.24	53.21	725.32	3.52	2.08	344.57	1103.55	3285.60	729.36	4.53
5	26/10/2012	4:19:00	26/10/2012	20:42:00	2159.67	52.50	622.24	3.47	2.43	293.04	937.18	2753.04	593.37	4.42
UNIDAD U37 MES DE NOVIEMBRE														
3	07/11/2012	4:19:00	07/11/2012	22:49:00	2142.34	36.07	625.55	3.42	1.68	291.77	937.76	2758.90	616.56	4.41
4	08/11/2012	0:00:00	08/11/2012	22:59:23	1452.92	44.65	412.61	3.52	3.07	251.26	608.95	1822.73	369.81	4.42
5	10/11/2012	4:00:00	10/11/2012	23:11:00	2542.51	51.88	725.48	3.50	2.04	341.84	1153.22	3319.95	777.43	4.58
6	13/11/2012	5:17:00	13/11/2012	22:59:00	2280.12	61.21	672.86	3.39	2.68	315.50	992.85	2946.58	666.45	4.38
8	20/11/2012	3:28:04	20/11/2012	17:30:00	1773.63	41.02	506.20	3.50	2.31	236.31	780.32	2295.31	521.68	4.53
9	22/11/2012	5:15:00	22/11/2012	23:24:00	1946.41	33.64	567.01	3.43	1.73	283.70	862.82	2532.77	586.36	4.47
10	23/11/2012	5:20:00	23/11/2012	23:30:00	2184.45	37.91	622.18	3.51	1.74	284.30	984.46	2834.39	649.95	4.56

Los datos obtenidos para el caso anterior, se realizaron a través del método 2, este consistió en sumar todas las componentes de energía consumida y distancia recorrida del mes de interés, para obtener un consumo global y compararlo con los consumos respectivos de los otros meses de interés.

De esta prueba se puede concluir que cuando la unidad U37A va en sentido sur de la línea A se obtiene un porcentaje de reducción de 2.21% y 2.98%, mientras que para sentido norte presenta un intervalo de reducción menos significativo (1.33, 2.11).

Tabla 24. Porcentajes de reducción caso 2 por método 2

Mes	Energía total [KWh]	Distancia total [km]	Consumo [KWh/km]
Mayo	15829.97954	4448.154591	3.56
Junio	8512.759391	2373.161962	3.59
Unidad	U37A-N	8834.30	2515.90
	U37A-S	19038.29	4131.88
	% REDUCCIÓN		
	MAYO VS U37A-N	1.33%	
	MAYO VS U37A-S	2.21%	
	JUNIO VS U37A-N	2.11%	
	JUNIO VS U37A-S	2.98%	

3.1.3.3 Tercer caso comparación unidades U37 VS U38

Para este caso se realizó el mismo procedimiento de selección de datos de la unidad U37 en la unidad U38.

En este caso la unidad U38 tuvo funcionamiento los mismos días de noviembre que la unidad U37 todo con el fin de hacer un caso más equitativo que los anteriores; sin embargo, se presentaron problemas en los sensores instalados en la unidad U38A, que no permitieron obtener un adecuado número de muestras. Además, no se pudo obtener una evaluación completa del consumo energético de la U38, debido a que solo se contaba con 3 sensores para dicha unidad.

A continuación se presenta la tabla del detalle de operación de la unidad U38, que fue clave para comparar con la unidad U37 en el análisis estadístico.

Tabla 25. Detalle de operación U38. [15]

U38											
Item	Fecha	Hora-ingreso	Hora-salida	Acople	Mando	Item	Fecha	Hora-ingreso	Hora-salida	Acople	Mando
1	05/11/2012	12:32:00	20:34:00	U38	U38A-SUR	21	19/11/2012		20:36	42B-B38	U38A-SUR
2	06/11/2012	5:17:00	16:15:00	41A-B38	U38A-NOR	22	20/11/2012		23:08	40A-B38	U38A-SUR
3	06/11/2012	17:14:00	15:51:00	06B-B38	U38A-SUR	23	21/11/2012	04:15	14:09	04B-B38	U38A-SUR
4	07/11/2012	22:49:00	LB	37A-B38	U38A-SUR	24	21/11/2012	18:18	19:44	04B-B38	U38A-SUR
5	07/11/2012	04:47	8:56:00	34B-B38	U38A-SUR	25	22/11/2012	4:15	13:20	01A-B38	U38A-SUR
6	07/11/2012	14:58:00	20:41:00	38A-B41	U38B-NOR	25		15:48	20:06	11B-B38	
7	08/11/2012	16:00:00	23:01:00	40B-38B	U38A-SUR	26	23/11/2012	4:28	14:00	11B-B38	U38A-SUR
8	08/11/2012	05:18	13:27:00	28A-38B	U38A-SUR	26		16:15	19:00	11B-B39	
9	09/11/2012	04:32	20:51:00	40B-B38	U38A-SUR	27	24/11/2012	4:46	9:08	11B-B40	U38A-SUR
10	10/11/2012	04:03	23:01:00	40B-B38	U38A-SUR	27		12:42	19:33		
11	11/11/2012	04:33	10:40:00	U38	U38A-SUR	28	25/11/2012	5:37	22:35	34A-B38	U38A-SUR
12	11/11/2012	12:43:00	21:15:00	U38	U38A-SUR	29	26/11/2012	4:57	23:19	38B-B20	38A-Norte
13	12/11/2012	12:27:00	22:11:00	U38	U38B-SUR	30	27/11/2012	4:12	22:05	38B-B20	38A-Norte
14	13/11/2012	04:15		38B-A40	U38A-NOR	31	28/11/2012	4:19	21:00	38B-B20	38A-Norte
15	14/11/2012	04:47	21:11	38B-B09	U38A-NOR	32	29/11/2012	4:39	8:58	38B-A12	38A-Norte
16	15/11/2012	4:28	20:33	38B-B09	U38A-NOR	32		16:24	19:24	38B-B42	38A-Norte
17	16/11/2012		8:05	38-A02	U38A-NOR	33	30/11/2012	4:23	23:26	38B-B42	38A-Norte
18	16/11/2012	16:24	19:13	38B-A01	U38A-NOR	34	01/12/2012	4:43	19:50	38B-B42	38A-Norte
19	17/11/2012	04:04	LA	38B-A01	U38A-NOR	35	02/12/2012	4:34	19:52	38B-B42	38A-Norte
20	18/11/2012	12:24	21:16	U38	U38A-SUR	36	03/12/2012	4:21	22:14	38B-B43	38A-Norte

Tabla 26. Kilometraje calculado por el computador de la unidad U38. [15]

U38 Kilometraje						
Item	Fecha	km	Item	Fecha	km	
1	05/11/2012	293	17	21/11/2012	517	
2	06/11/2012	470	18	22/11/2012	479	
3	07/11/2012	369	19	23/11/2012	468	
4	08/11/2012	647	20	24/11/2012	432	
5	09/11/2012	613	21	25/11/2012	411	
6	10/11/2012	711	22	26/11/2012	562	
7	11/11/2012	522	23	27/11/2012	666	
8	12/11/2012	357	24	28/11/2012	582	
9	13/11/2012	614	25	29/11/2012	265	
10	14/11/2012	625	26	30/11/2012	716	
11	15/11/2012	563	27	01/12/2012	652	
12	16/11/2012	264	28	02/12/2012	564	
13	17/11/2012	610	29	03/12/2012	664	
14	18/11/2012	262	30	30/11/2012	716	
15	19/11/2012	567	31	01/12/2012	563	
16	20/11/2012	665	32	02/12/2012	564	
			33	03/12/2012	664	

Tabla 27. Datos seleccionados U38 Y U37

U38											
Mapa de tiempos				Energía red	Distancia	Consumo	Energía Red-Reg	Energía Recuperada	Consumo con reg	Distancia	Error
Fecha de inicio	Hora de inicio	Fecha de terminación	Hora de terminación	kWh	km	kWh/km	kWh	kWh	kWh/km	Computador	%
15/11/2012	4:28:00	15/11/2012	20:33:00	1979.01	563	3.52	2646.94	667.93	4.70	563.00	0
17/11/2012	4:04:00	17/11/2012	23:59:00	2125.45	610.42	3.48	2836.58	701.13	4.63	610	0.069%
18/11/2012	12:24:00	18/11/2012	21:26:00	933.46	260.19	3.59	1261.95	338.49	4.85	262	0.695%
20/11/2012	5:15:00	20/11/2012	23:08:00	2312.87	664.99	3.48	3061.43	748.56	4.60	665	0.001%
24/11/2012	4:06:00	24/11/2012	19:33:00	1449.04	416.69	3.48	1920.76	471.73	4.61	432	3.675%
27/11/2012	4:12:00	27/11/2012	22:05:00	2369.01	655.45	3.61	3171.68	802.67	4.84	666	1.609%
02/12/2012	3:52:54	02/12/2012	19:55:00	1967.08	563.84	3.49	2641.67	674.59	4.69	564	0.029%
U37											
20/10/2012	5:03:00	20/10/2012	12:06:00	938.10	260.42	3.60	1212.06	273.96	4.65	259	0.548%
13/11/2012	5:17:00	13/11/2012	22:59:00	2280.12	672.86	3.39	2946.58	666.45	4.38	664	1.334%
22/11/2012	5:15:00	22/11/2012	23:24:00	1946.41	567.01	3.43	2532.77	586.36	4.47	563	0.713%
26/10/2012	4:19:00	26/10/2012	20:42:00	2159.67	622.24	3.47	2753.04	593.37	4.42	615	1.178%

La selección de los datos de la unidad U37 se realizó a través En la siguiente tabla se muestra los datos a utilizar para comparar con los meses de mayo y junio.

Tabla 17, por otro lado para la unidad U38 como se mencionó antes no fue posible obtener una muestra amplia de datos sin embargo los datos que se obtuvieron presentaron porcentajes de error muy bajos, por lo que no se tuvo que hacer una selección para esta unidad.

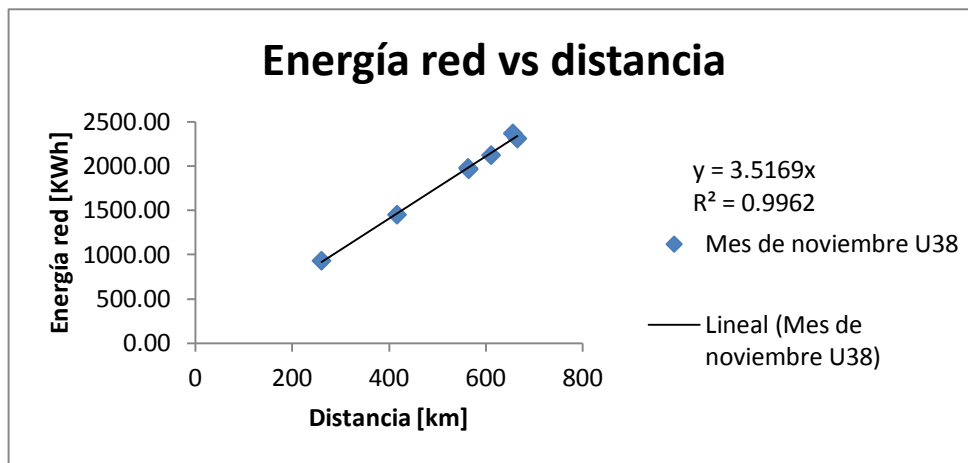


Figura 35. Información sin filtrar unidad U38 mes de noviembre

De la figura anterior se puede concluir que los datos hallados por el aplicativo de la unidad U38 poseen una gran confiabilidad (99.62%), por lo que no se tuvo que filtrar información por comportamiento anormal de los datos.

El procedimiento para la comparación de la unidad U37 y U38 fue el mismo planteado que para el caso 1 por el método 1, este consistía en tomar un número de muestras mayor o igual a 3 del mes de interés y compararlas con las muestras del otro mes de interés, estas muestras deben cumplir como requisito que la discrepancia de la distancia recorrida entre dos meses de interés no debe ser mayor al 1%, esto con el fin de plantear casos equitativos. Después de realizar la comparación se procede a sumar todas las componentes de energía consumida de red y distancia recorrida de cada mes de interés, de tal modo que se pueda obtener un consumo de cada mes con el fin de compararlos para obtener el ahorro de energía.

Tabla 28. Unidad U37 vs U38

U38 VS U37					
Energía Consumida	Distancia_acum	Consumo			
kWh	km	kWh/km			
Unidad-U38-CARENA SIN MODIFICAR					
1979.01	563	3.52			
933.46	260.19	3.59			
2369.01	655.45	3.61			
2312.87	664.99	3.48			
			Energía Consumida	Distancia-recorrida km	consumo KWh/km
			7594.35	2143.64	3.542741013
Unidad-U37 -CARENA MODIFICADA					
938.10	260.42	3.60			
2280.12	672.86	3.39	DISCREPANCIA %	DISCREPANCIA %	% Reducción 2.60%
1946.41	567.01	3.43	3.687%	0.98458%	
2159.67	622.24	3.47	Energía Consumida	Distancia-recorrida km	consumo KWh/km
			7324.30	2122.53	3.450739065

PROMEDIO DE ERROR MEDIDAS 0.7598%

La prueba realizada para el caso 3 reporta un ahorro de energía eléctrica del 2.60%, con una discrepancia en la distancia recorrida de aproximadamente el 0.98%.

3.1.3.4 Caso 4

El caso 4 consistió en clasificar los sentidos de desplazamiento de la unidad U37A como de U38A de modo que para condiciones climáticas similares se realicen desplazamientos con el mismo sentido de orientación y distancia recorrida.

Tabla 29. U37A sentido sur norte.

U37 Norte											
Mapa de tiempos				Energía red	Distancia	Consumo	Energía Red+Reg	Energía Recuperada	Consumo con reg	Distancia	Error
Fecha de inicio	Hora de inicio	Fecha de terminación	Hora de terminación	kWh	km	kWh/km	kWh	kWh	kWh/km	Computador	%
20/10/2012	5:03:00	20/10/2012	12:06:00	938.10	260.42	3.60	1212.06	273.96	4.65	259	0.548%
26/10/2012	4:19:00	26/10/2012	20:42:00	2159.67	622.24	3.47	2753.04	593.37	4.42	615	1.178%
23/11/2012	5:20:00	23/11/2012	23:30:00	2184.45	622.18	3.51	2834.39	649.95	4.56	617	0.839%
26/10/2012	0:18:53	27/10/2012	0:08:26	2165.84	624.35	3.47	2759.43	593.59	4.42	620	0.702%
U37 Sur											
13/11/2012	5:17:00	13/11/2012	22:59:00	2280.12	672.86	3.39	2946.58	666.45	4.38	664	1.334%
22/11/2012	5:15:00	22/11/2012	23:24:00	1946.41	567.01	3.43	2532.77	586.36	4.47	563	0.713%
10/11/2012	4:00:00	10/11/2012	23:11:00	2542.51	725.48	3.50	3319.95	777.43	4.58	717	1.182%
07/11/2012	4:19:00	07/11/2012	22:49:00	2142.34	625.55	3.42	2788.90	616.56	4.41	618	1.222%

Tabla 30. U38A sentido norte y sur

U38 Norte											
Mapa de tiempos				Energía red	Distancia	Consumo	Energía Red+Reg	Energía Recuperada	Consumo con reg	Distancia	Error
Fecha de inicio	Hora de inicio	Fecha de terminación	Hora de terminación	kWh	km	kWh/km	kWh	kWh	kWh/km	Computador	%
15/11/2012	4:28:00	15/11/2012	20:33:00	1979.01	563	3.52	2646.94	667.93	4.70	563.00	0
17/11/2012	4:04:00	17/11/2012	23:59:00	2125.45	610.42	3.48	2826.58	701.13	4.63	610	0.069%
27/11/2012	4:12:00	27/11/2012	22:05:00	2369.01	655.45	3.61	3171.68	802.67	4.84	666	1.609%
02/12/2012	3:52:54	02/12/2012	19:55:00	1967.08	563.84	3.49	2641.67	674.59	4.69	564	0.029%
U38 Sur											
13/11/2012	5:17:00	13/11/2012	22:59:00	2280.12	672.86	3.39	2946.58	666.45	4.38	664	1.334%
22/11/2012	5:15:00	22/11/2012	23:24:00	1946.41	567.01	3.43	2532.77	586.36	4.47	563	0.713%
18/11/2012	12:24:00	18/11/2012	21:26:00	933.46	260.19	3.59	1261.95	328.49	4.85	262	0.695%
20/11/2012	5:15:00	20/11/2012	23:08:00	2312.87	664.99	3.48	3061.43	748.56	4.60	665	0.001%
24/11/2012	4:06:00	24/11/2012	19:33:00	1449.04	416.69	3.48	1920.76	471.73	4.61	432	3.675%

El método 3 consiste en una variación de los métodos 1 y 2 ya que el procedimiento de cálculo es similar al del método 2 pero la restricción es la misma aplicada que el del método 1 además la diferencia de este con los dos anteriores es que los datos también se clasifican según su sentido de desplazamiento.

En otras palabras lo que se va hacer es comparar los datos según su sentido de desplazamiento y diferencia en las distancias recorridas de tal forma que se garantice que las dos unidades están bajo las mismas condiciones.

Tabla 31. Resultados caso 4 por método 3

UNIDAD	Energía total [KWh]	Distancia total [km]	Consumo [KWh/km]
U38A-N	8440.55	2392.71394	3.53
U38A-S	8921.90	2581.74	3.46
U37A-N	7448.05	2129.19	3.50
U37A-S	8911.39	2590.90	3.44
	% REDUCCIÓN	Discrepancia distancia	
U38A-N VS U37A-N	0.85%	11.01%	
U38-S VS U37A-S	0.58%	0.35%	

Para esta prueba se puede concluir que en sentido norte la unidad U37A posee un porcentaje de reducción respecto a la unidad U38A de 0.85% con una diferencia en las distancias recorridas de 11.01%.

Para sentido sur se obtiene un porcentaje de reducción de 0.58% con poca discrepancia distancia en la distancia recorrida (0.35%).

3.2 RANGO DE REDUCCIÓN GENERAL

El análisis consistió en tomar todo los posibles porcentajes de reducción obtenidos en los anteriores casos, para obtener su promedio y desviación estándar con el objetivo de hallar su distribución normal.

En estadística y probabilidad la distribución normal, distribución de Gauss o distribución gaussiana, es una de las distribuciones de probabilidad de variable continua que con más frecuencia aparece aproximada en fenómenos reales como:

- Caracteres morfológicos de individuos como la estatura
- Caracteres fisiológicos como el efecto de un fármaco
- Caracteres sociológicos como el consumo de cierto producto por un mismo grupo de individuos
- Caracteres psicológicos como el cociente intelectual
- Nivel de ruido en telecomunicaciones
- Errores cometidos al medir ciertas magnitudes
- Promedio de notas
- etc.

En otras palabras este análisis trata de asociar un comportamiento estadístico a los posibles valores de reducción de energía.

Los posibles valores de reducción tienen un comportamiento similar al de las notas calificativas en una universidad ya que estos valores oscilan de un valor determinado a otro, como un promedio de notas, es por esta razón que se decide analizar desde esta perspectiva estos datos obtenidos.

En la Tabla 32 se obtiene la probabilidad de ocurrencia de cada valor de reducción de acuerdo a su respectiva distribución normal.

Tabla 32. Rango general de porcentaje de reducción

Rango 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%	Promedio	2.2500%
3.650%	93.0159%	Desviación	0.9479%

En la Figura 36 se observa la distribución normal de cada valor de reducción.

Distribución normal

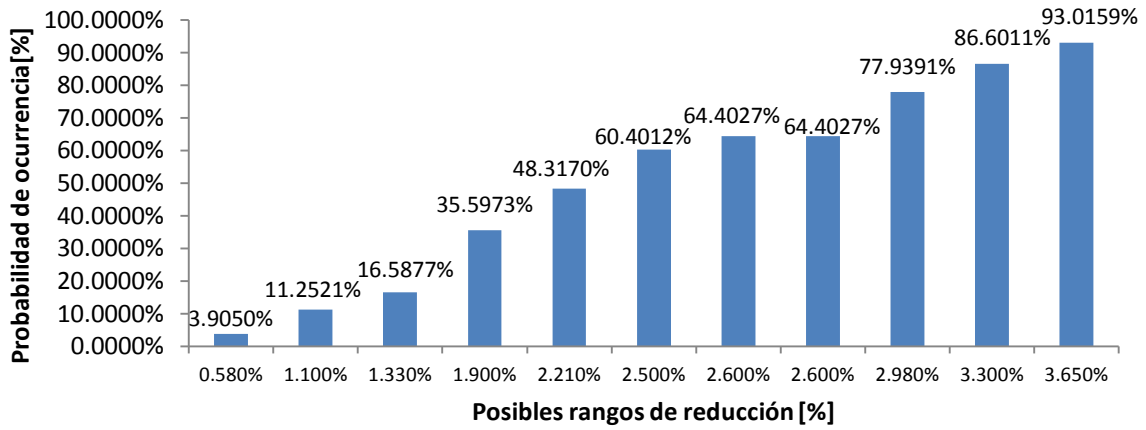


Figura 36. Distribución normal

En la figura anterior 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%.

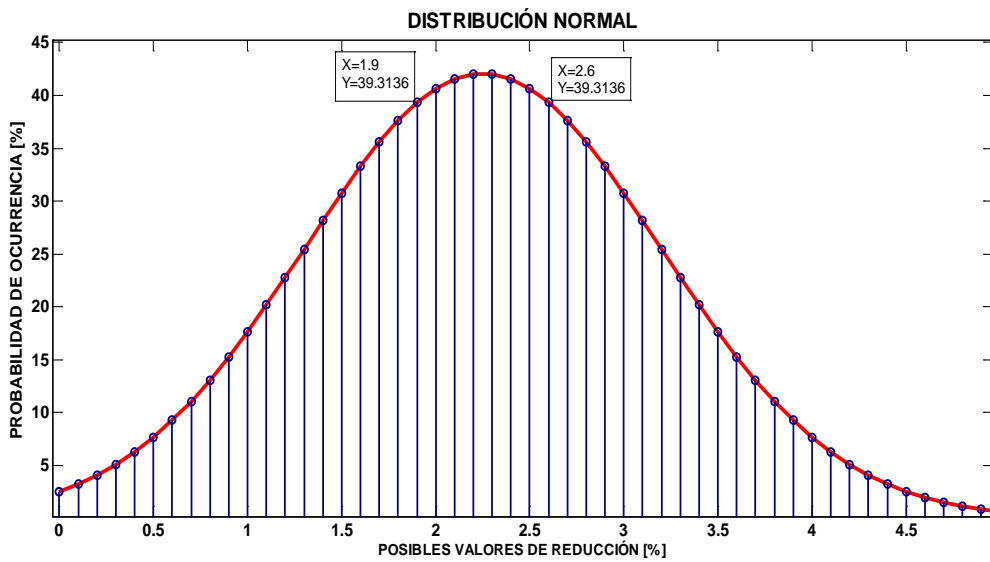


Figura 37. Distribución normal de rango creado

La figura anterior consiste en una simulación realizada en Matlab, en esta gráfica se muestra el comportamiento de una distribución normal de un rango de reducción creado entre 0% a 5% y se generaron 51 valores posibles de reducción.

Esta distribución normal se realizó con el promedio y desviación estándar encontradas en la Tabla 32. De esta simulación se puede concluir que la probabilidad de ocurrencia de que los siguientes porcentajes de reducción se encuentre entre 1.9% y 2.6% es del 21.37% por lo que no significa un rango confiable. En una distribución normal el 68.26% de los datos se encuentran con la siguiente operación:

Rango inferior: (promedio – desviación estándar)

Rango superior: (promedio + desviación estándar)

Por lo tanto la probabilidad de ocurrencia es de 68.26% de los datos se encuentren entre (1.3021% y 3.1979).

3.3 CARACTERIZACIÓN DE PÉRDIDAS

Los datos correspondientes de la Tabla 33 fueron tomados como la discrepancia de energía consumida en el caso 1 por el método 1 y del caso 3 por método 1

Tabla 33. Pérdidas de energía de carena sin modificar

Carena sin modificar	
Pérdidas	
caso 1	2.44%
	3.28%
	4.07%
	3.71%
caso 3	3.66%
Promedio	3.43%

Se puede observar que en los meses de mayo y junio para los cuales la unidad U37 no poseía carenaje aerodinámico, se consumió de más un promedio de 3.43% de energía eléctrica.

3.3.1 Distribución energética

Los resultados fueron obtenidos a partir de la información filtrada (Tabla 17 y Tabla 18). En esta distribución energética se muestra el porcentaje de aporte de cada tipo de energía hallada.

En los diagramas de torta se aprecia mejor esta distribución energética, por lo tanto se puede observar la energía que consumió 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 (E_P_Frenado y E_Reddisp), energía recuperada y la energía consumida.

Tabla 34. Consumo mes de Mayo

Consumo Energía mes de Mayo		
Energía [kw/h]	Total [kw/h]	%
Energía Consumida+Reg	20787.13	100.00%
Energía Total Consumida	15829.98	76.15%
Energía Consumida en Otras Variables	2477.92	11.92%
Energía Resdisp	381.07	2.40%
Energía- Aux	2211.55	13.97%
Energía P_Frenado	7577.02	47.86%
Energía Recuperada	4957.15	23.85%

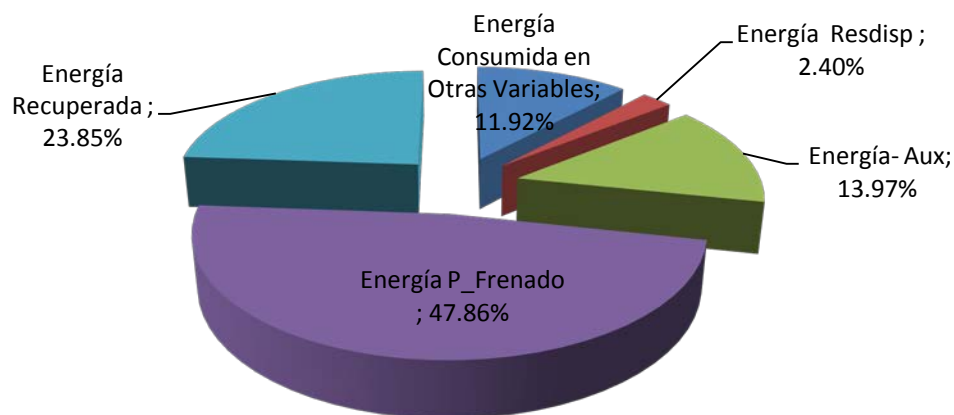


Figura 38. Distribución energética mes Mayo.

Tabla 35. Consumo mes de junio

Consumo Energía mes de Junio		
Energía [kw/h]	Total [kw/h]	%
Energía Consumida+Reg	11189.27	100%
Energía Total Consumida	8512.76	76.08%
Energía Consumida en Otras Variables	3011.40	11.45%
Energía Resdisp	219.31	2.58%
Energía- Aux	1182.72	13.89%
Energía P_Frenado	4099.33	48.16%
Energía Recuperada	2676.51	23.92%

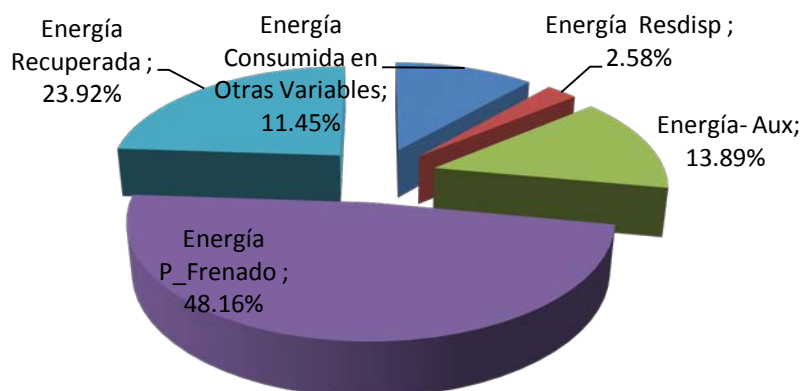


Figura 39. Distribución energética Junio

Tabla 36. Consumo mes de Octubre

Consumo Energía mes de Octubre		
Energía [kw/h]	Total [kw/h]	%
Energía Consumida+Reg	11566.99	100%
Energía Total Consumida	8981.92	78%
Energía Consumida en Otras Variables	3689.57	18.73%
Energía Resdisp	187.75	2.09%
Energía- Aux	1203.95	13.40%
Energía P_Frenado	3900.64	43.43%
Energía Recuperada	2585.07	22.35%

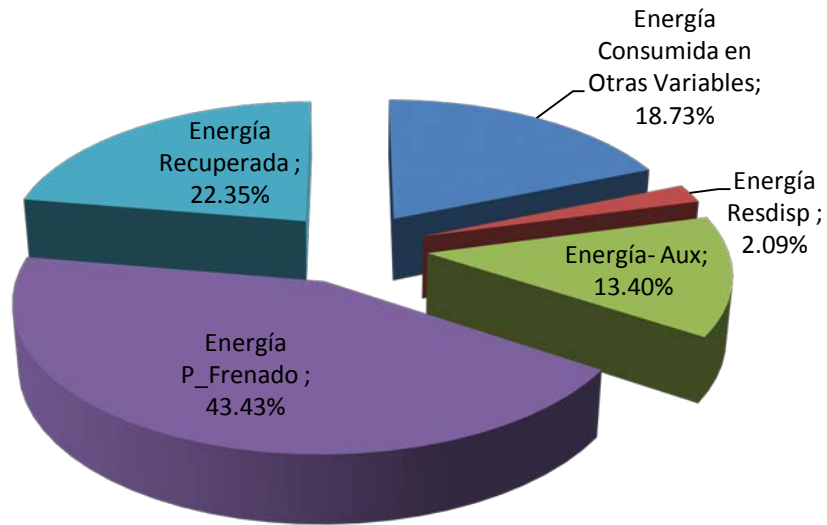


Figura 40. Distribución energética Octubre

Tabla 37. Consumo mes de Noviembre

Consumo Energía mes de Noviembre		
Energía [kw/h]	Total [kw/h]	%
Energía Consumida+Reg	27230.59	100%
Energía Total Consumida	21085.18	77%
Energía Consumida en Otras Variables	8423.97	17.38%
Energía Resdisp	437.52	2.075%
Energía- Aux	2939.06	13.939%
Energía P_Frenado	9284.64	44.034%
Energía Recuperada	6145.41	22.568%

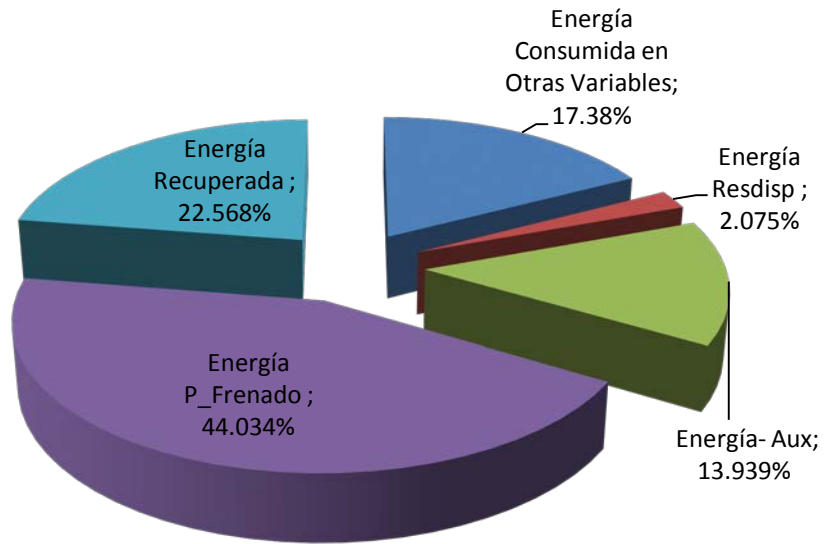


Figura 41. Distribución energética Noviembre

3.4 ESTRATEGIA PARA LA REDUCCIÓN

Realizar la modificación del carenaje de los trenes de primera generación del Metro de Medellín según el estudio energético realizado.

Implementación de un sistema de ultracapacitores para aprovechar la energía en la resistencia de disipación.

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 la unidad U37, todo esto con el fin de comparar dicho consumo obtenido con el consumo de otra unidad no modificada (U38). Este carenado aerodinámico 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.
- Las pérdidas por disipación de energía eléctrica obtenidas presentan un porcentaje promedio de 2.28%, 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.

- El filtrado de los datos por regresión lineal, permitió obtener la base de datos indicada, para realizar un análisis donde se obtuvo información con resultados verídicos que reflejan el consumo de energía eléctrica de las unidades analizadas.
- El Software permitió visualizar resultados optimistas para trabajos futuros como puede ser el uso de ultra capacitores y cambio del sistema de tracción eléctrica del Metro de Medellín, ya que en el resultado del análisis de pérdidas para las resistencias previas de frenado, se obtuvo un consumo promedio del 45.86%, lo que indica un gasto excesivo de energía eléctrica.
- El algoritmo diseñado por integración numérica rectangular hacia atrás, permitió hallar la distancia recorrida y energía consumida en los distintos elementos analizados, con un grado de confiabilidad promedio del 99.02% para la distancia recorrida, indicando un cálculo acertado para la energía consumida, ya que esta posee una relación directamente proporcional con la distancia recorrida y además el cálculo es de la misma forma para estas dos variables, por lo tanto los resultados obtenidos son de gran confiabilidad.
- 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 por la resistencia por la resistencia aerodinámica.
- La simulación realizada en Matlab permitió visualizar una tendencia en los valores de reducción (1.3021% y 3.1979%) que es del 68.26%, lo que se traduce en un rango probable, ya que una distribución normal describe muy aproximadamente a la realidad el comportamiento de fenómenos físicos, como es la oscilación de un valor en un rango determinado, tal y como sucede en este caso.
- El presente proyecto cumple con competencias afines tanto a la Ingeniería Eléctrica como Electrónica, debido a que fue necesario usar conceptos propios de dichos campos

durante el desarrollo, para la primera temas como el funcionamiento de máquinas (motor serie de dc), además de generación y distribución de energía eléctrica, ; mientras que para la segunda, la adaptación de la señal, métodos numéricos, programación y análisis estadístico, además de la ingeniería en general, el conocimiento de la física de las fuerzas opositoras al movimiento.

REFERENCIAS

- [1] O. M. Y. Morato, "Aplicativo para el dimensionamiento de un sistema de tracción eléctrica," UPB, Medellín, 2011.
- [2] S. Martínez Osorio, M. Betáncur Martínez and A. F. Salazar Sánchez, "Determinación, cuantificación y optimización de fuentes de arrestre, del sistema de vagonés del metro de Medellín," Medellín, 2009.
- [3] D. L. DURÁN, "ESTUDIO DEL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA REGENERADA POR LOS TRENES," Madrid, 2010.
- [4] Vossloh-kiepe, "Reference," 2012. [Online]. Available: <http://www.vossloh-kiepe.com/electric-buses/trolleybuses/references>.
- [5] M. G. Y. Ehsani and A. Emadi, *Modern Electric, Hybrid Electric and fuel cell vehicles* (2do Ed.), USA: Taylor and Francis Group, 2010.
- [6] DÍEZ RESTREPO, ANDRÉS EMIRO; FIGUEROO CARRILLO, MAURICIO; VELÁSQUEZ, JESÚS ANDRÉS; ARMSTORFER, ANDREAS; ÁLVAREZ CANO, ELIANA MARÍA,; "SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE TRACCIÓN DEL METRO DE MEDELLÍN," UPB, MEDELLÍN, 2011.
- [7] L. F. B. Castaño, "ASISTENCIA A PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN SOBRE TRACCIÓN ELÉCTRICA," UPB, MEDELLÍN, 2011.
- [8] "Momento de fuerza," 26 09 2012. [Online]. Available: http://es.wikipedia.org/wiki/Momento_de_fuerza.
- [9] "Inercia," 26 09 2012. [Online]. Available: <http://es.wikipedia.org/wiki/Inercia>.
- [10] S. Chapman, "Máquinas Eléctricas," in *Motor DC Serie*, Mc Graw Hill, pp. 576-584.
- [11] H. V. Gallón, *Control industrial*, Medellín: UPB.
- [12] "Scribd," [Online]. Available: <http://es.scribd.com/doc/49679080/56/Frenado-Regenerativo>. [Accessed 12 Noviembre 2012].
- [13] A. Orellano and S. Sperling, "Aerodynamics improvements and associated energy demand reduction of train," Berlin, 2009, pp. 219-230.
- [14] M. Giraldo, C. Nieto, N. Gomez and A. Tabares, "Incremento de la eficiencia energética y el confort del usuario en el metro de Medellín mediante simulación computacional de fluidos," UPB, Medellín, Enero 2012.
- [15] M. Medellín, Medellín, 2012.

ANEXO 1 (MANUAL DE USUARIO)

A continuación se presenta el manual de usuario como una herramienta que facilita el correcto uso del aplicativo.

MANUAL DE USUARIO

APLICATIVO PARA EL ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE LOS TRENES DE PRIMERA GENERACIÓN DEL METRO DE MEDELLÍN



MANUAL DE USUARIO

Como primer paso para que la exportación de datos funcione correctamente, se debe realizar la configuración para Windows XP, 7 y 8.

Configuración de separador de listas

Ir a inicio/Panel de control, en la pestaña de buscar se digita la palabra Región esto siempre y cuando su Windows este en idioma español internacional o español latino, si su Windows no está configurado en este idioma, se debe buscar la traducción adecuada de la palabra región al idioma que esté trabajando su Windows.

Cuando se digita esta palabra se despliega una lista de opciones, donde la opción a escoger es la que dice “Cambiar formatos de fecha, hora o número”.

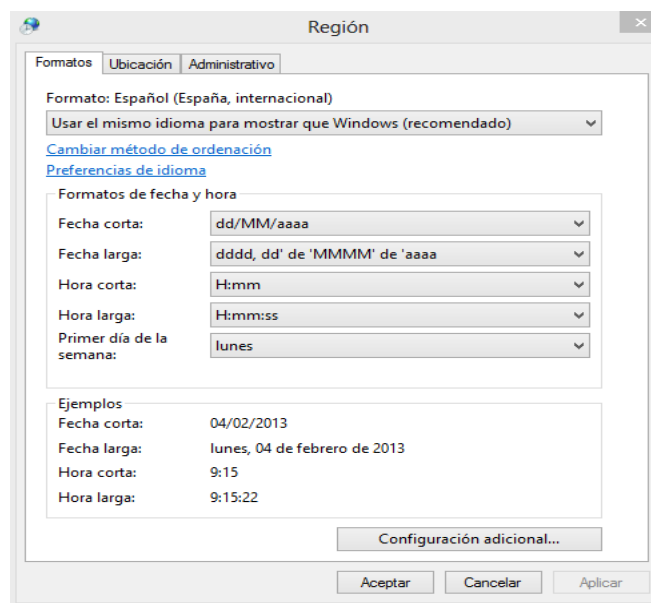


Figura A 1. Configuración de región

Cuando se da Click a la opción de “Cambiar formatos de fecha, hora o número”, aparece la ventana mostrada en la Figura A1. En esta ventana se configuran los parámetros de exportación

de los datos tomados por los sensores, para esto se debe seleccionar la pestaña de Formatos e ir a la opción de Configuración adicional.

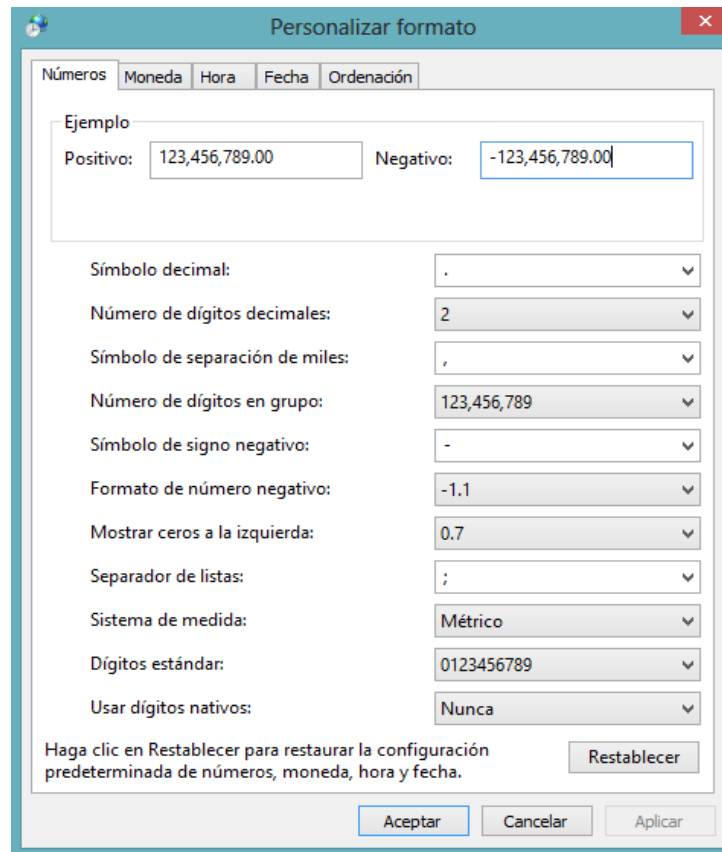


Figura A 2. Personalización de formatos

Los parámetros a configurar son:

- Símbolo decimal
- Símbolo de separación de miles
- Separador de listas

Los ítems anteriormente nombrados tienen que modificarse como se ilustra en la Figura A2.

Exportación de los datos a extensión Excel

Para la exportación de los datos se utiliza el Software (WR300-APS) correspondiente al graficador y registrador (GRAPHTEC WR300).



Figura A 3. Graficador y registrador

Al abrir el Software del graficador puede salir una ventana emergente con el siguiente mensaje.

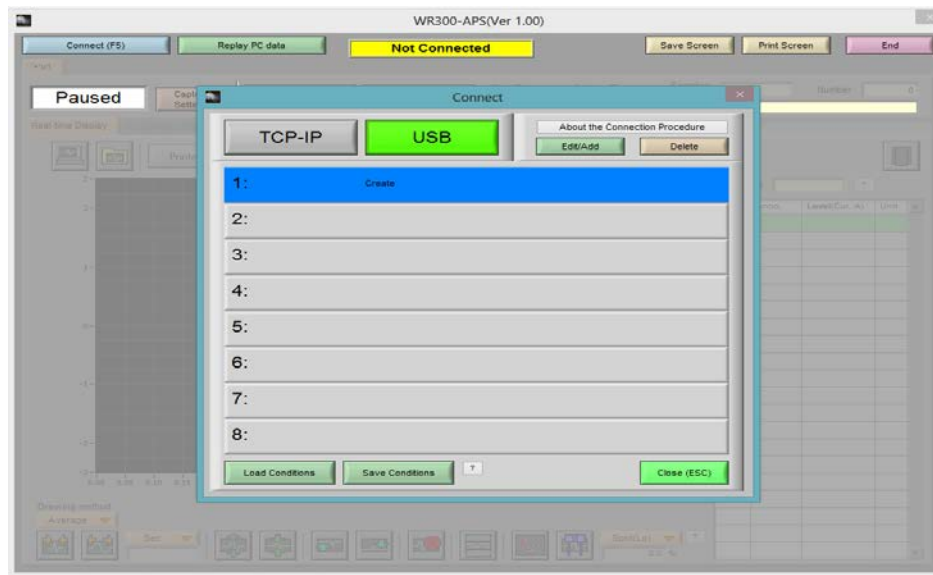


Figura A 4. Ventana emergente WR300-APS

Si al abrir dicho Software aparece la ventana emergente mostrada en la Figura 4, se procede a dar Click en la opción Close (ESC), por último se selecciona la pestaña (Replay Pc Data).

Posterior a este procedimiento saldrá otra ventana como se muestra en la Figura A5, se selecciona la pestaña (Open File), en esta opción se escoge el registro correspondiente al día a analizar.

Nota: Es importante configurar las opciones de Drive y File Location de modo que indiquen la ruta correcta donde se encuentran guardados los registros del graficador y registrador WR-300.

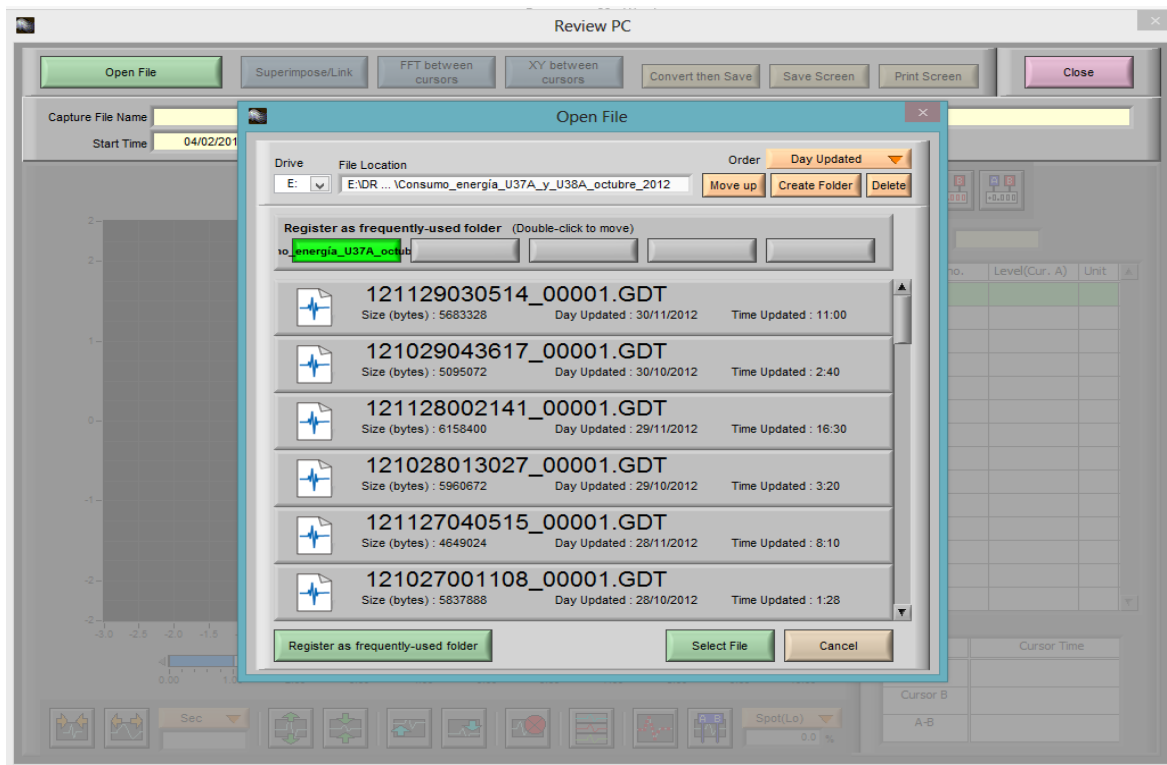


Figura A 5. Selección del día deseado

Conversión a formato .CSV

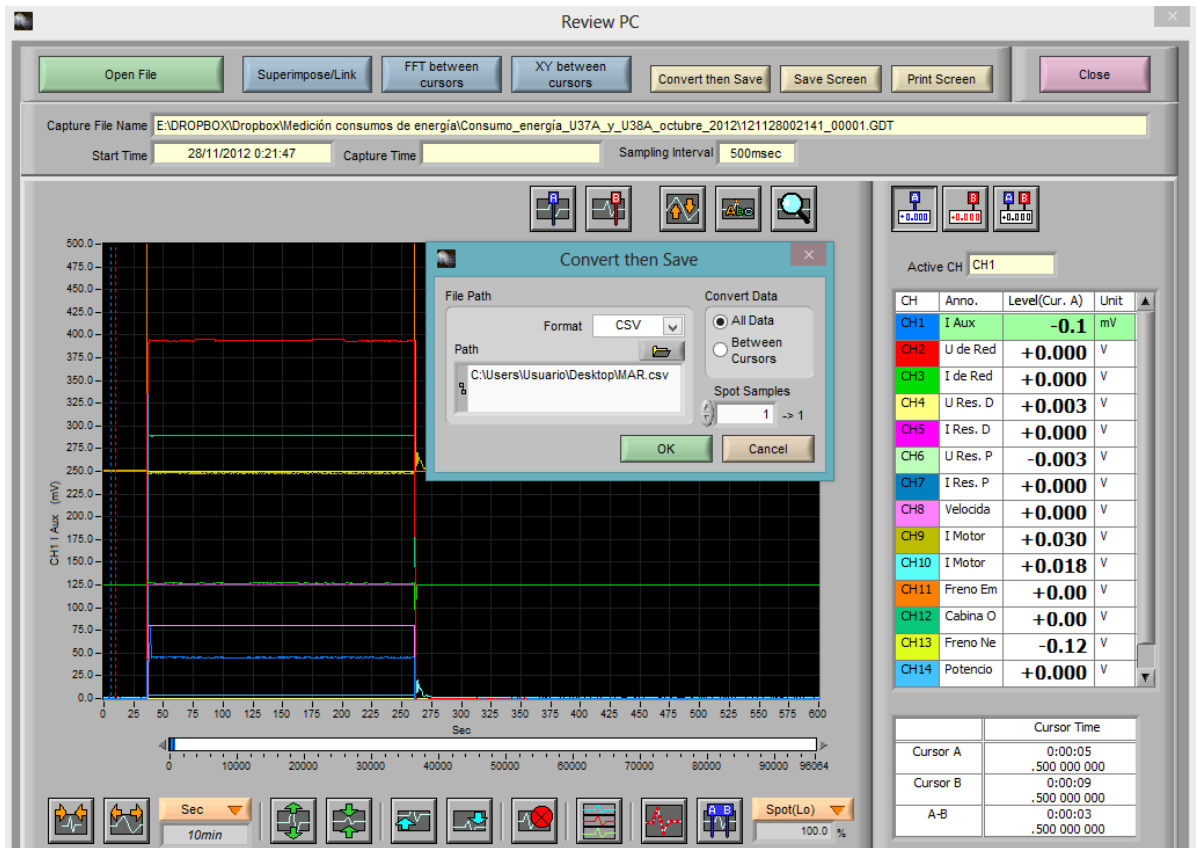


Figura A 6. Exportación de datos

Al seleccionar el día correspondiente aparecerá la ventana mostrada en la Figura A6, en esta ventana se muestran las señales medidas por los sensores en función del tiempo, para exportar esta información a una extensión compatible con el aplicativo, se selecciona la pestaña (Convert then save). Posterior a este procedimiento aparecerá una ventana emergente con el mismo nombre de la pestaña seleccionada, en la opción de Format se escoge la opción **CSV**, después de escoger el formato del archivo se da Click en el icono que tiene la ilustración de una carpeta, en esta opción se escoge la ruta donde se desea que quede guardado el archivo, por último dar Click en ok.

Configuración de Microsoft Excel

La configuración de Microsoft Excel es de vital importancia, ya que el algoritmo del aplicativo se ejecuta bajo ciertos parámetros.

Los pasos para la configuración de Microsoft Excel son los siguientes (Figura A7):

1. Abrir un archivo cualquiera de Microsoft Excel
2. Archivo>Opciones>Avanzadas
3. Deshabilitar la opción usar separadores del sistema
4. Separador decimales (.)
5. Separador de miles (,)

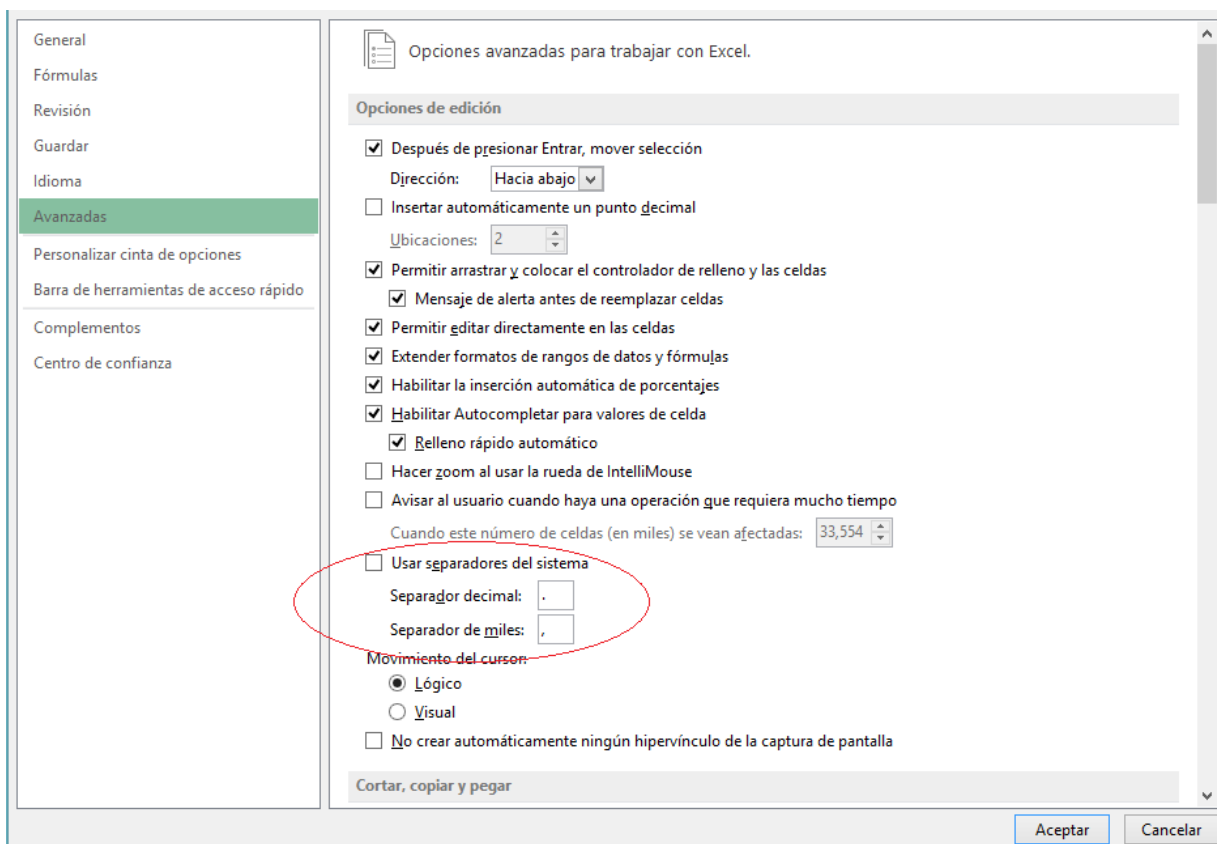


Figura A 7. Configuración Microsoft Excel

Aplicativo

Después de realizar todos los procesos de configuración se procede a realizar la apertura del aplicativo.

Durante el proceso de apertura el aplicativo exige una contraseña (“metroconsumo”) para el ingreso, posteriormente se abrirá la ventana principal del aplicativo (ver Figura A8).



Figura A 8. Ventana Principal Aplicativo.

Cargar Datos

Cuando se escoge la opción de cargar Datos, el aplicativo genera una nueva hoja de cálculo, en donde se realizarán todos los procedimientos respectivos, para obtener las variables de interés relacionada con el consumo energético de las unidades a analizar.

Nota: Es de gran importancia que los datos se carguen en la celda A1, de lo contrario aparecerán errores a la hora de obtener los consumos de energía eléctrica.

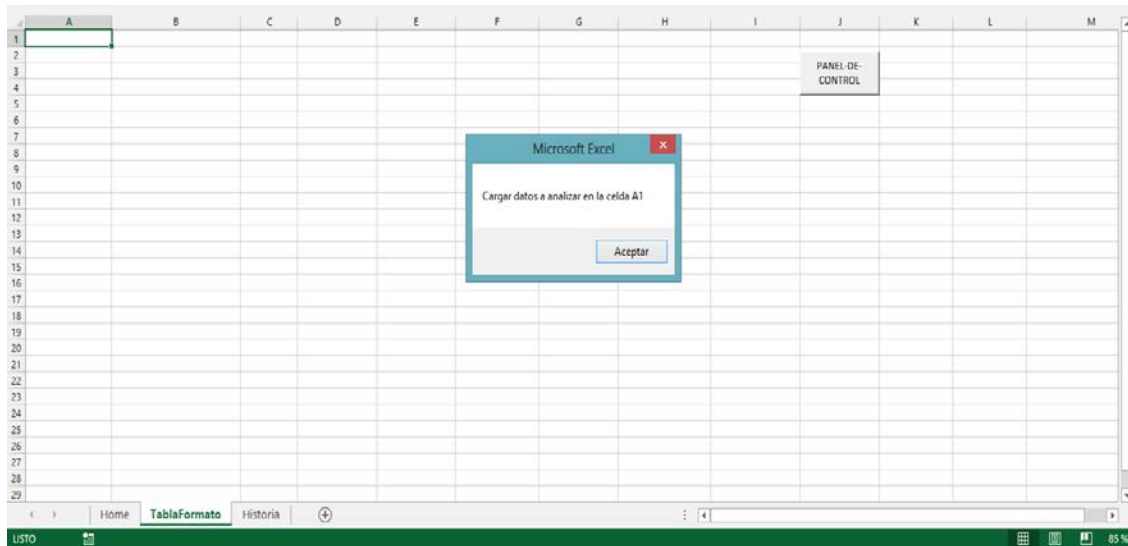


Figura A 9. Hoja de Cálculo

Para cargar los datos el procedimiento es el siguiente:

Seleccionar la Pestaña Datos>Obtener datos externos>Desde texto (ver Figura A10)



Figura A 10. Cargar datos

Una vez realizado dicho proceso abrirá una ventana emergente (Importar archivo de texto), en esta ventana se selecciona el día que se desea analizar, para esto es importante saber dónde se encuentran guardados los archivos generados por el Software del graficador y registrador del WR-300.

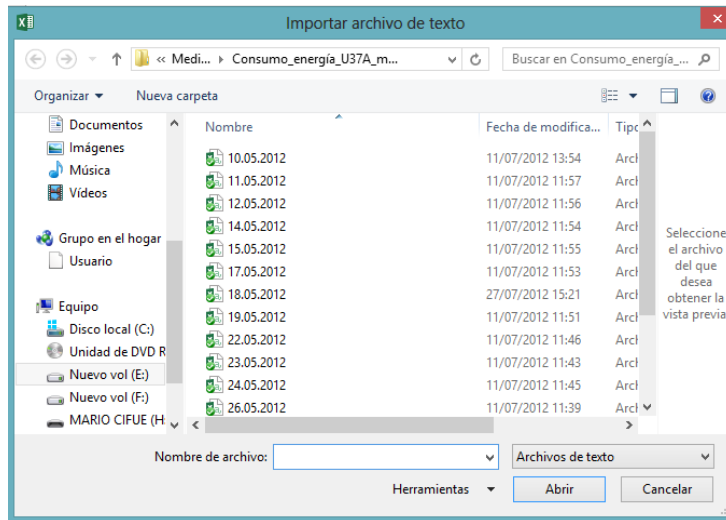


Figura A 11. Selección de archivo.

Una vez seleccionado el archivo se procede a la configuración de este, ya que el Software del WR-300 genera los archivos de tipo lista con sus respectivos separadores, en Excel una lista como tal no es posible trabajar, para solucionar dicho inconveniente se decide delimitar cada canal que contiene el archivo como una columna independiente, eligiendo la opción de que cada carácter se delimite.

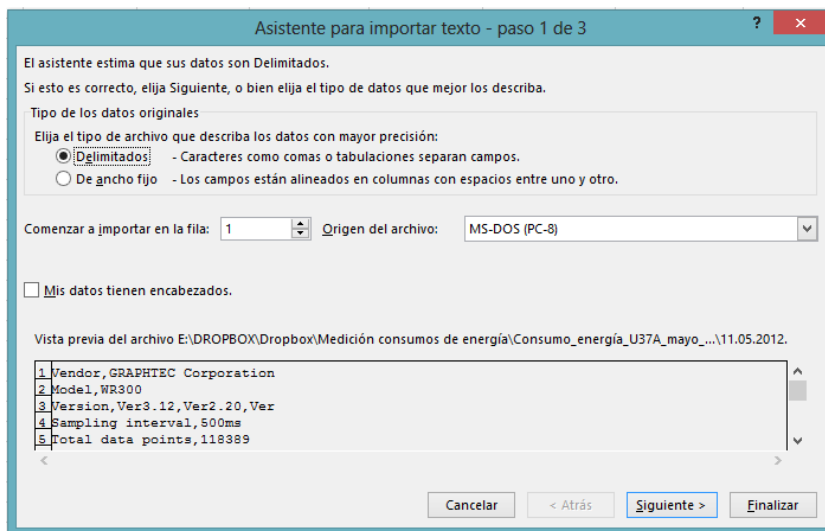


Figura A 12. Configuración de archivo .csv

Una vez hecho el Procedimiento mencionado anteriormente, se originará otra ventana emergente, donde se especificara cómo será la delimitación de cada columna (Tabulación y

Coma). Si se han realizado los anteriores pasos correctamente se observaran unas líneas divisoras que separan el archivo de lista y lo convierten en un archivo con columnas independientes.

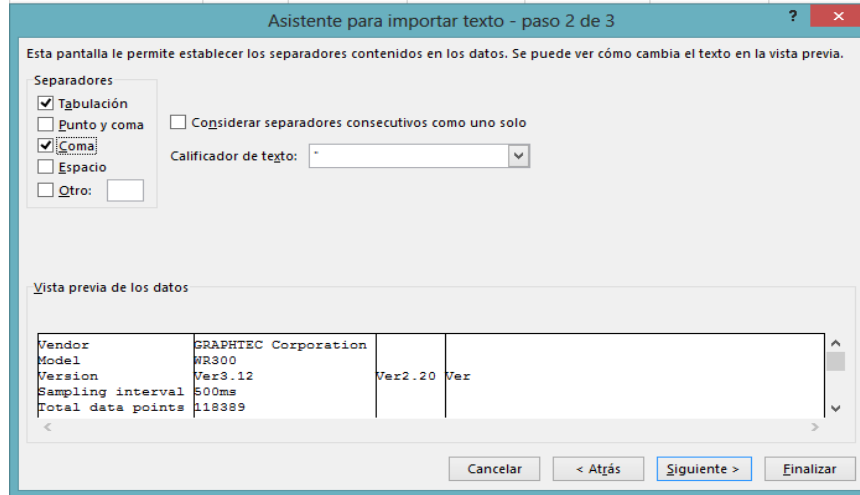


Figura A 13. Tipo de separadores para el archivo .csv

Por último se especifica qué tipo de datos tiene cada columna. Para mayor facilidad se elige la opción general para especificar que la columna incluya todos los tipos de datos posibles en Microsoft Excel.

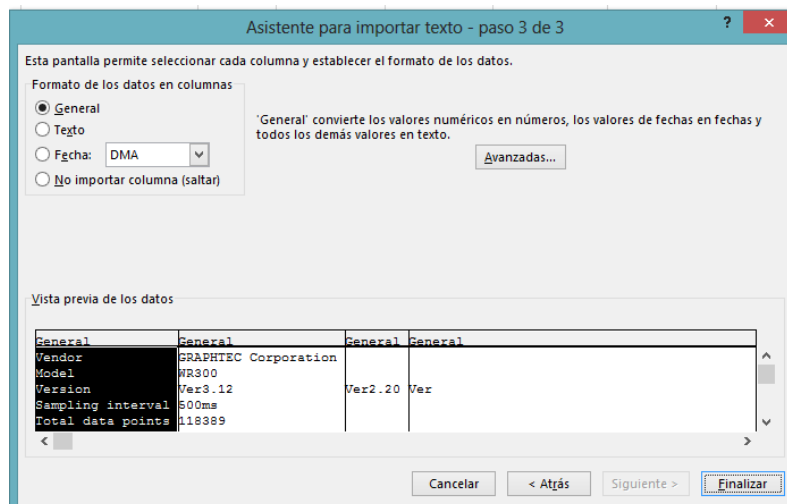


Figura A 14. Lógica de cada delimitador

Cuando damos la opción de finalizar aparecerá una ventana emergente que pregunta donde se desean ubicarlos los datos.

Como se mencionó anteriormente se elige o se escribe la opción que garantice que los datos se generaran a partir de la celda A1 en la TablaFormato (VER Figura A14).

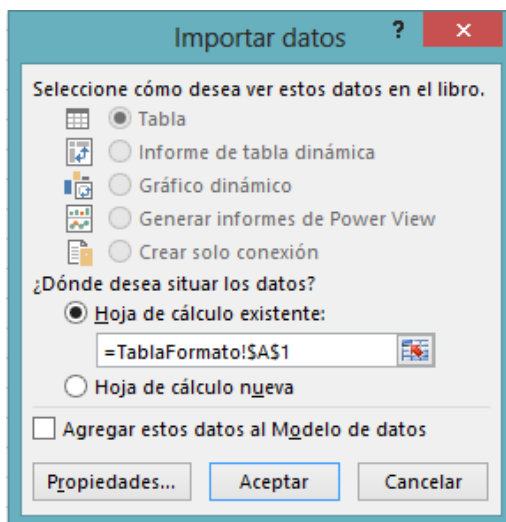


Figura A 15. Ubicación de los datos.

Formato y procedimiento de cálculo

En la Figura A17 se muestran los datos separados en columnas independientes, sin embargo su visualización no es coherente a la de una tabla de datos, por lo que se procede a generar un formato adecuado para dichos datos.

Procedimiento de formato:

Click en el botón de Panel de Control, una vez realizada esta opción se generara automáticamente una ventana emergente (Cálculo), en esta se escogerá la opción Formato donde inmediatamente se generara otra ventana emergente preguntando si la base de datos se encuentra organizada o no, se procede a dar Click en la opción (Si), ya que la base de datos está delimitada correctamente.



Figura A 16. Botón de control de acciones

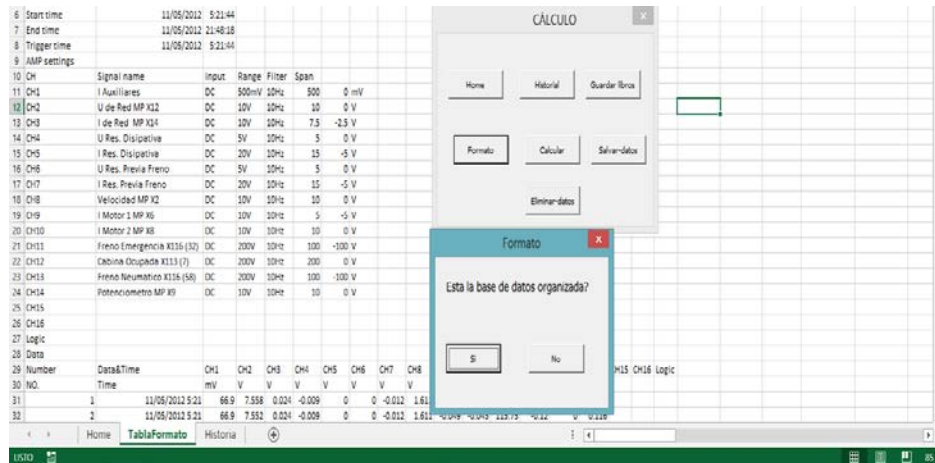


Figura A 17. Formato de la base de datos

Después de haber realizado el anterior procedimiento se puede observar que el aplicativo automáticamente genera una tabla que almacena las variables a analizar con sus respectivos colores.

Para el cálculo de las variables de interés se procede a dar Click sobre el botón de panel de control, con el fin de que se genere la ventana emergente (CÁLCULO), en esta seleccionamos la opción de calcular.

Una vez finalizada esta función se puede observar que el aplicativo muestra los resultados obtenidos en un recuadro de color rojo.

Nota: Es de gran importancia que antes de realizar los cálculos correspondientes se eliminen las filas que corresponden a las horas no deseadas a calcular. Esto se realiza manualmente y se eliminan las horas no deseadas con el botón suprimir o Click derecho eliminar.

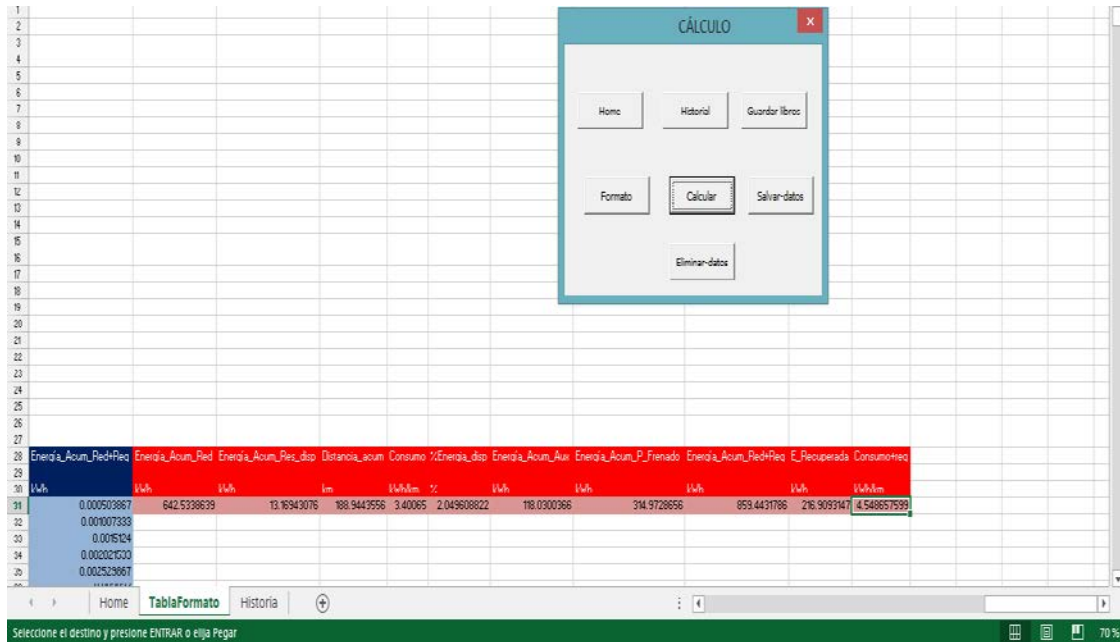


Figura A 18. Procedimiento de cálculo.

Salvar resultados obtenidos

Una vez obtenidos los resultados, se realiza el procedimiento detallado anteriormente, para obtener la ventana emergente (CÁLCULO), con el fin de que se pueda elegir la opción de salvar los datos o de guardar el libro.

La diferencia entre estas dos opciones es que la pestaña de salvar datos realiza la función de copiar los resultados en una tabla de historial mientras que la opción de guardar libro guarda todo lo realizado en el aplicativo.

Como sugerencia para el manejo adecuado del aplicativo se muestran los siguientes pasos para el guardado correcto de los datos:

Salvar datos (está opción copia los datos en la tabla historial)

Si estamos en la tabla historial seleccionamos la opción T_Formato, esto generara automáticamente la ventana de cálculo en donde se selecciona (eliminar datos).

Si está en la hoja (Home), se puede realizar directamente la eliminación de los datos, por último se procede a guardar el libro, esta función se puede realizar de 4 formas 1^{ra} Guardar libro en la hoja Home, 2^{da} Guardar libro en la hoja tabla formato; Panel de control>Guardar libro, 3^{ra} Click en el icono de disket (arriba de archivo) y 4^{ta} en la hoja historial seleccionar la pestaña guardar.

Fecha de inicio	Hora de inicio	Fecha de terminación	Hora de terminación	Energía_Acum_Red kWh	Energía_Acum_Res_disp kWh	Distancia_acum km	Cosmo L/h/m	Energía_disp t	Energía_Acum_Axi kWh	Energía_Acum_P_Freado kWh	Energía_Acum_Red-Reg kWh	E_Recuperado kWh	Cosmoenerg kWh
10/05/2012	0:09:22	10/05/2012	22:38:43	2045.11	52.45	621.23	3.23	2.56	234.53	539.05	2658.34	644.83	4.33
11/05/2012	5:21:44	11/05/2012	21:48:18	642.53	13.17	188.34	3.40	2.05	189.03	314.37	853.44	216.31	4.55
12/05/2012	6:53:30	13/05/2012	3:56:04	1684.30	35.27	506.31	3.23	3.28	270.38	814.38	2205.47	523.37	4.26
14/05/2012	0:00:00	15/05/2012	22:00:00	1653.38	44.17	432.66	3.50	2.71	230.53	718.65	2164.39	510.40	4.58
17/05/2012	4:15:57	17/05/2012	20:25:25	2079.37	51.05	597.55	3.54	2.45	279.52	1003.14	2732.32	652.34	4.65
18/05/2012	4:46:15	18/05/2012	20:56:14	1940.71	45.70	522.50	3.52	2.48	258.23	839.64	2420.01	582.30	4.64
19/05/2012	5:40:47	19/05/2012	23:59:00	1726.48	46.35	491.40	3.51	2.72	252.22	830.87	2287.14	540.55	4.61
20/05/2012	0:00:00	20/05/2012	23:59:00	2753.81	56.43	585.26	3.63	2.61	293.26	938.00	2877.48	657.67	4.61
21/05/2012	0:00:00	21/05/2012	22:35:58	2191.70	48.33	597.19	3.65	2.22	292.03	1030.86	2696.42	674.72	4.78
22/05/2012	0:00:00	22/05/2012	23:59:32	341.57	16.40	280.83	3.37	1.73	148.58	441.61	1248.70	303.15	4.45
23/05/2012	2:33:58	23/05/2012	23:59:00	2053.82	53.47	604.11	3.37	2.63	310.73	954.79	2656.08	622.26	4.40
24/05/2012	2:51:17	24/05/2012	20:45:10	1770.11	38.16	521.65	3.33	2.21	264.35	828.22	2322.11	552.00	4.45
28/05/2012	1:12:30	28/05/2012	23:59:00	2209.68	50.66	658.25	3.36	2.23	314.57	1052.36	2300.54	630.87	4.41
29/05/2012	0:00:00	29/05/2012	23:59:00	2246.87	38.66	653.23	3.44	2.61	321.08	1070.54	2341.22	634.35	4.50
30/05/2012	4:46:40	30/05/2012	22:34:52	2171.23	51.34	606.32	3.58	2.33	291.19	1060.73	2800.30	679.08	4.70
31/05/2012	5:24:26	30/05/2012	23:59:00	195.50	51.69	548.28	3.48	2.63	267.77	341.23	2500.33	604.53	4.60
01/06/2012	3:23:00	01/06/2012	23:59:00	1674.10	31.08	473.35	3.54	1.86	230.22	740.46	2179.67	504.56	4.60
02/06/2012	4:46:00	02/06/2012	23:26:00	2581.94	51.61	724.68	3.58	1.59	339.21	1148.36	3372.18	780.23	4.65
05/06/2012	2:56:43	05/06/2012	23:59:00	1036.15	16.26	296.67	3.66	1.50	140.52	438.30	1433.15	347.01	4.83
06/06/2012	4:18:00	06/06/2012	23:59:00	1973.41	30.48	571.25	3.45	1.54	288.34	861.67	2534.32	560.31	4.44
07/06/2012	4:18:00	07/06/2012	22:48:00	2142.34	36.07	625.55	3.42	1.68	291.77	937.76	2758.30	616.56	4.41
08/06/2012	0:00:00	08/06/2012	22:59:23	1452.32	44.65	423.61	3.52	3.07	251.06	608.95	1922.73	363.01	4.42
09/06/2012	5:25:00	09/06/2012	23:30:00	2004.23	48.19	566.35	3.54	2.40	291.78	851.95	2571.55	567.52	4.54
10/06/2012	4:00:00	10/06/2012	23:11:00	2542.51	51.88	735.48	3.50	2.04	341.84	1153.22	3338.95	771.43	4.58
11/06/2012	4:53:00	11/06/2012	22:41:00	2464.51	42.68	673.48	3.66	1.73	328.07	1104.68	3251.93	707.48	4.83
12/06/2012	12:50:00	12/06/2012	22:32:00	1566.31	33.70	362.86	3.77	2.47	177.88	610.57	1731.50	425.19	4.34
13/06/2012	5:17:00	13/06/2012	22:59:00	2280.12	61.21	672.86	3.39	2.68	315.50	982.85	2946.58	666.45	4.38
14/06/2012	0:00:00	14/06/2012	23:59:00	387.35	18.22	263.19	3.67	1.85	147.61	423.63	1044.27	296.33	4.77
15/06/2012	5:05:00	15/06/2012	19:48:00	3439.44	16.86	287.53	3.55	1.78	187.58	424.95	3247.55	236.11	4.57
16/06/2012	4:18:00	16/06/2012	20:12:00	2075.30	44.53	570.38	3.64	2.15	271.90	933.81	2836.60	621.31	4.73
17/06/2012	4:00:00	17/06/2012	20:33:00	2226.74	54.79	620.11	3.53	2.46	294.42	930.02	2891.67	664.32	4.66
20/06/2012	3:28:04	20/06/2012	17:30:00	1773.63	41.02	506.20	3.50	2.31	236.31	780.32	2295.31	521.68	4.53
21/06/2012	5:16:00	21/06/2012	23:10:00	2028.69	37.22	570.40	3.56	1.83	236.41	886.54	2620.45	591.76	4.53
22/06/2012	5:16:00	22/06/2012	23:24:00	1946.41	33.64	567.01	3.43	1.73	263.70	862.82	2532.77	596.36	4.47
23/06/2012	5:20:00	23/06/2012	23:30:00	2184.45	37.91	622.18	3.51	1.74	294.30	984.46	2534.39	643.95	4.55
26/06/2012	0:18:53	27/06/2012	0:08:26	2165.84	52.72	634.35	3.47	2.43	237.84	933.18	2754.43	533.58	4.42
27/06/2012	4:05:15	27/06/2012	23:20:00	2043.16	41.81	569.71	3.60	2.04	282.48	915.53	2684.18	635.03	4.71
28/06/2012	0:21:47	28/06/2012	3:02:52	2545.09	53.07	710.20	3.58	2.09	395.64	1118.03	3308.24	763.15	4.66
29/06/2012	3:05:20	29/06/2012	3:48:41	2558.39	48.56	727.53	3.52	1.90	371.76	1123.48	3347.60	789.21	4.60
30/06/2012	5:25:00	30/06/2012	22:21:01	2281.21	34.52	615.85	3.68	1.52	305.33	1052.23	3005.48	724.27	4.85
01/07/2012	10:50:11	01/07/2012	23:05:14	382.65	6.41	102.78	3.45	1.68	112.83	350.38	1001.39	120.73	4.54
17/07/2012	4:04:00	17/07/2012	23:59:00	2125.45	0.00	610.42	3.48	0.00	0	0	2826.58	701.13	4.63

Figura A 19. Tabla historial

Eliminar un resultado no deseado

Para eliminar un resultado no deseado de la tabla de historial, se debe seleccionar la columna A de la fila deseada y dar click en el botón de eliminar, si se quiere seleccionar la columna A con los botones de control (lado derecho de la tabla de historial), se debe tener cuidado de no dar más veces click de lo debido en la flecha izquierda, ya que puede salir un error indicando que no hay más columnas de este lado, cuando esto suceda, se elige la opción de finalizar y se termina el problema (ver Figura A20).

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
4	18052002	009522	18052002	220949	204518	5245	42423	329	256	294.93	999.05	2639.94	444.63	4.33											
5	18052002	12944	18052002	24488	44253	1317	18834	340	206	180.03		859.44	296.91	4.85											
6	18052002	63340	18052002	3564	948450	9537	4263	533	338	290.38	894.38	2208.47	421.91	4.36											
7	18052002	000000	18052002	220000	953355	44.17	43245	330	271	250.52	170.85	2164.33	590.40	4.30											
8	18052002	4453	18052002	403245	403033	3095	30133	254	245	430.74	990.14	4302.38	4302.34	4.55											
9	18052002	444640	18052002	205814	184031	4330	52250	352	249	253.23	893.64	2423.91	302.30	4.64											
10	18052002	54047	18052002	235300	116440	4635	49140	351	232	252.22	830.87	2267.14	340.65	4.61											
11	20052002	000000	20052002	235300	203301	3643	30320	363	240	230.28	330.00	2007.40	607.61	4.01											
12	20052002	000000	20052002	201849	200170	4039	60738	245	200	280.00	800.86	2096.40	374.30	4.79											
13	20052002	000000	20052002	214533	34147	1440	20083	337	133	184.56	448.61	1548.70	301.63	4.45											
14	20052002	23117	20052002	204510	177031	3036	32160	330	281	804.09	889.28	2028.11	298.00	4.45											
15	20052002	132000	20052002	235800	200949	5046	49325	336	239	304.87	1052.36	2000.84	490.87	4.41											
16	20052002	000000	20052002	214500	224847	5866	43133	344	240	331.68	1070.54	2341.92	434.35	4.50											
17	20052002	43040	20052002	220342	201120	3134	40940	343	239	300.00	700.00	2000.00	933.89	4.10											
18	20052002	34846	20052002	233500	105100	3140	3140	34	34		2503.30	604.50	400	4.60											
19	20052002	522000	20052002	235800	181430	3108	47	47	47	200.87	304.56	104.56	1.60												
20	20052002	43600	20052002	232800	253134	3161	72	72	72	332.18	300.23	100.23	1.65												
21	20052002	35643	20052002	235300	10000	3626	43	43	43	143.35	247.81	4.63													
22	20052002	43800	20052002	235800	187347	3049	31	31	31	254.32	360.81	4.44													
23	20052002	43800	20052002	224300	242330	3037	45	45	45	230.80	106.56	1.41													
24	20052002	000000	20052002	225262	34230	4480	41	41	41	302.13	263.81	4.42													
25	20052002	52500	20052002	233000	200423	4038	50	50	50	251.55	361.32	4.54													
26	20052002	40000	20052002	201000	284231	3188	70	70	70	308.85	377.43	4.58													
27	20052002	43500	20052002	244000	248431	4238	47	47	47	331.89	303.43	4.83													
28	20052002	125000	20052002	220300	130630	3330	30	30	30	101.30	425.39	4.34													
29	20052002	3100	20052002	225300	220032	6121	67	67	67	2046.30	666.45	4.30													
30	20052002	000000	20052002	235800	30130	1822	26	26	26	1584.27	296.93	4.17													
31	20052002	51600	20052002	244000	34344	1636	26	26	26	3047.55	398.11	4.62													
32	20052002	43300	20052002	201200	207530	4453	60	60	60	2036.00	621.31	4.13													
33	20052002	40000	20052002	203300	222674	3430	71	71	71	2001.67	664.32	4.66													
34	20052002	52000	20052002	175000	173353	4102	50	50	50	2226.11	324.68	4.53													
35	20052002	51800	20052002	233000	202853	3122	33	33	33	2520.45	351.35	4.53													
36	20052002	51800	20052002	232400	134641	3304	30	30	30	2532.17	366.36	4.47													
37	20052002	52000	20052002	203000	210447	3781	63030	331	134	284.30	884.46	2034.28	449.85	4.56											
38	20052002	01893	20052002	20826	246144	3232	42438	247	243	237.74	931.18	2379.43	533.38	4.42											
39	20052002	43030	20052002	222000	204230	4301	36371	240	204	232.43	370.33	2004.36	303.03	4.11											
40	20052002	02147	20052002	01032	224500	5307	10400	350	203	593.64	100.00	5000.24	160.05	4.66											
41	20052002	30820	20052002	203300	222839	4336	3233	332	180	371.36	103.48	3047.60	388.21	4.60											
42	20052002	52000	20052002	225000	220271	3449	48188	348	150	383.53	102.29	3007.48	174.07	4.86											
43	20052002	10300	20052002	210304	35245	541	10119	243	156	30.80	122.83	302.22	302.13	4.34											
44	20052002	40400	20052002	235300	218547	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	2085.50	301.10	4.63											
45	20052002	122100	20052002	202600	39346	0.00	26039	333	0.00	0.00	0.00	1581.95	328.43	4.85											
46	20052002	51800	20052002	216000	230337	0.00	44438	348	0.00	0.00	0.00	3384.63	321.88	4.68											
47	20052002	430600	20052002	183300	144304	0.00	44863	343	0.00	0.00	0.00	1920.19	413.33	4.61											

Microsoft Visual Basic

Se ha producido el error '1004' en tiempo de ejecución:

Error definido por la aplicación o el objeto

Continuar Finalizar Depurar Ayuda

Figura A 20. Eliminar un resultado no deseado