

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Estudio técnico económico de volantes de inercia como método alternativo para la generación y conservación energética del sistema de tracción del Metro de Medellín

Ferley Alexander Ospina Fernández

José Fabriciano Salinas Quiceno

John Alejandro Gaviria Castro

Ingeniería Electromecánica

Carlos Alberto Acevedo Álvarez, IM

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

Marzo de 2018

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RESUMEN

El propósito principal del estudio técnico económico de volantes de inercia como método alternativo para la generación y conservación energética para el sistema de tracción del Metro de Medellín, es mirar la viabilidad y factibilidad de la implementación de un sistema de volantes de inercia como método de ahorro energético y a su vez amigable con el medio ambiente. La metodología implementada fue la recopilación de datos tomados por los sensores a bordo del tren en el mismo momento que se realiza el frenado electrodinámico (freno regenerativo) y las medidas obtenidas del consumo de energía en las subestaciones de tracción del metro de Medellín, se realizan los cálculos físicos de la volante de inercia y se respalda con la simulación en MATLAB, donde se comparan los datos obtenidos para la recuperación de al menos el 10% de la energía generada en el frenado y su futura utilización.

Las volantes de Inercia tienen un costo de mantenimiento menor que otros sistemas de acumulación de energía y su vida útil es aproximadamente 20 años, el costo de la energía eléctrica para el Metro de Medellín siempre ha sido el mayor costo que se tiene en la prestación del servicio comercial, ya que es su principal fuente para el movimiento de los trenes, estos dos factores y ponderando los datos obtenidos en los trenes y la subestación de tracción se obtendrá un almacenamiento del 10% del frenado regenerativo del tren que es 3 kWh, en dinero sería \$126'528.497,4 mensuales a un costo de $293,17 \frac{\$}{\text{kWh}}$ con el horario Cristina V.2.

Como resultado principal podemos afirmar que este método de almacenamiento de energía cumple con las expectativas planteadas dentro del objetivo principal, tanto en el modo de operación de ahorro de energía, como de control de voltaje.

Palabras clave: Volante de inercia, Coche motor, Frenado electrodinámico, Pantógrafo, subestación de tracción, catenaria.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RECONOCIMIENTOS

Agradecimiento a todas aquellas personas que se transportan en el tren cada mañana, tarde y noche en las diferentes estaciones en su afán de llegar a su lugar de destino, que son las que nos motivan e impulsan a mejorar nuestro sistema de transporte para así contribuir más a la sociedad y a su vez al planeta.

Quisiéramos también agradecer a nuestras familias por su comprensión y apoyo en todo momento, al tener que alejarnos de casa para cumplir con nuestros propósitos.

Un agradecimiento en especial al Ingeniero Electricista, Magíster y Doctor Andrés Emiro Diez Restrepo y al Profesor Ingeniero Mecánico Carlos Alberto Acevedo, IM. Por haber valorado nuestra idea y habernos proporcionado todo su conocimiento con respeto al tema.

Gracias a nuestra Empresa Metro de Medellín por darnos la oportunidad de ser parte de ella y poder contribuir al desarrollo de la ciudad.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ACRÓNIMOS

Alimentación: En electrotecnia todo dispositivo, línea, elemento o sistema destinado a suministrar energía eléctrica.

A: Amperios, Unidad de medida de la corriente.

AC: Corriente Alterna.

Ah: Amperios hora

ATO: Conducción Automática del tren

ATP (protección automática de trenes): Equipos de procesamiento de información instalados en los trenes que calculan las distancias recorridas y las posibles irregularidades de la información de los circuitos de vía (telegramas de LZB). Constituye la seguridad para el sistema LZB.

Batería: Fuente de tensión continua constituida por una o más células que convierten en energía eléctrica la energía química, térmica, nuclear o solar.

Bogie: Conjunto de dos pares de ruedas montadas sobre dos ejes, próximos, paralelos y solidarios que soportan un coche, un vehículo auxiliar o plataforma.

CAF: Empresa fabricante de trenes, Construcciones y Auxiliares de Ferrocarriles

Carga máxima: Número de usuarios que pasan por el tramo más cargado durante la hora pico y se expresa en pasajeros por hora y sentido. Este parámetro es la base para determinar el número de trenes que se requieren en una hora pico y, por consiguiente, la flota de trenes necesaria.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Catenaria: Línea eléctrica de suspensión longitudinal, a través de la cual los trenes de pasajeros captan la corriente eléctrica para alimentar los motores de tracción mediante los pantógrafos.

Circuito de vía: Sección de vía compuesta de un circuito electrónico que utiliza los rieles como conductores, permite detectar la presencia de vehículos en el tramo correspondiente, mostrándolo en forma de ocupación debido al cortocircuito que provocan los ejes de los trenes.

Coche motor: vagón extremo de una unidad, que además de tener compartimiento de pasajeros, también posee una cabina de mando y equipos de tracción.

DC: Corriente Directa.

Distancia de frenado: Trayecto que se recorre a partir del momento en que el tren inicia el frenado hasta su detención, o hasta que logra la velocidad reducida deseada, aplicando una desaceleración tal que los usuarios no sufran incomodidad o alarma.

ED: Freno electrodinámico

EMTP: *Electromagnetic Transients Program*

EP: Freno de fricción

ETMVA: Empresa de Transporte Masivo del Valle de Aburra

EPM: Empresas Públicas de Medellín

FESS: *Flywheel Energy Storage System*

Frenado de servicio: Frenado por lo general por etapas, para detener el tren o disminuir la velocidad de acuerdo a las indicaciones del sistema LZB.

Freno electro Dinámico: modo de frenado del sistema del tren.

Galibo: Espacio seguridad definido

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

GNU/Linux: Sistema Operativo

Hz: Hertz, unidad de medida de la frecuencia.

HM: Mecanismo hombre muerto, dispositivo de Presencia

IDE: Entorno de desarrollo Integrado

IEEE: Instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos de los EEUU.

IGBT: *Insulated Gate Bipolar Transistor*

JERS: Aceleración de confort permitida

KERS: *kinetic energy recovery system*

$\frac{\text{km}}{\text{h}}$: Kilómetros por hora, Unidad de medida de la velocidad

m : Metros, unidad de medida de distancia

$\frac{\text{m}}{\text{s}^3}$: Metro sobre segundo cubico, Unidad de medida de la aceleración

MAC: Sistema operativo

MATLAB: laboratorio de matrices

PANTOGRAFO: Mecanismo que trasmite la energía eléctrica al tren

PBE: Patios Bello

PCC: Puesto Central de Control

RMS: Raíz media cuadrada.

s: Segundos, unidad de medida de tiempo.

SET ACE: Subestación de tracción Acevedo.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

SET AYU: Subestación de tracción Ayurá.

SET BEO: Subestación de tracción Bello.

SET EST: Subestación de tracción Estadio.

SET ITA: Subestación de tracción Itagüí.

SET STA: Subestación de tracción Estrella

SET JAV: Subestación de tracción San Javier.

SET POB: Subestación de tracción Poblado.

SET SAA: Subestación de tracción San Antonio, barra de alimentación de línea A.

SET SAB: Subestación de tracción San Antonio, barra de alimentación de línea B.

SEP: Subestación de Pasajeros SET:

Subestación de Tracción UNI: Subestación de tracción Universidad.

UPB: Universidad Pontificia Bolivariana.

Unidad: composición del tren, # de coches

Unix: sistema operativo

V: Voltios, unidad de medida de tensión.

VA: Voltio-Amperios, unidad de medida de potencia eléctrica aparente

VDC: Voltaje de corriente directa

VHDL: lenguaje de especificación definido por el IEEE, utilizado para describir circuitos digitales y para la automatización de diseño electrónico

Watts: Unidad de medida de potencia eléctrica activa

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Windows: Sistema Operativo.

WSP: *Wheel slide protection.*

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	15
1.2 OBJETIVOS	17
2. MARCO TEORICO	18
2.1 ACUMULADOR DE ENERGÍA	18
2.10 FRENADO REGENERATIVO	42
2.11 SUBESTACIÓN ELÉCTRICA.....	44
2.11.1 Tipos de subestaciones	44
2.12 TIPOS DE SUBESTACIÓN ELÉCTRICA EN EL METRO DE MEDELLÍN	45
2.13 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE CORRIENTE PARA TRENES DE PASAJEROS	46
2.13.1 El aseguramiento del servicio eléctrico de trenes	46
2.13.2 Instalaciones para el servicio eléctrico de trenes	47
2.13.3 El equipo de catenaria.....	47
2.13.4 Alimentación y distribución de la red de catenaria	47
2.13.5 Control de las instalaciones para el servicio eléctrico de trenes	48
2.14 SOFTWARE DE SIMULACIÓN Y MODELACIÓN.....	48
2.15 MATLAB.....	49
2.2 TIPOS DE ACUMULADORES	18
2.2.1 Principales parámetros de un acumulador de energía eléctrica	18
2.3 VOLANTE DE INERCIA	19
2.4 FUNCIONAMIENTO DE UNA VOLANTE DE INERCIA.....	20
2.4.1 Elementos de una Volante de inercia	24
2.5 APLICACIONES DE LA VOLANTE DE INERCIA	26
2.6 TIPOS DE SISTEMAS DE TRACCIÓN FÉRREOS	27
2.7 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA UNIDAD DE TREN DEL METRO DE MEDELLÍN.....	29
2.7.1 Alimentación eléctrica.....	31
2.7.2 Composición de los trenes	32
2.7.3 Características del tren.....	33

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.8 OPERACIÓN DE LOS TRENES DEL METRO DE MEDELLIN	35
2.8.1 Modos de operación	35
2.9. 1 Técnicas de frenado ('braking techniques')	39
2.9. 2. Funciones de frenado (braking functions)	40
2.9. TIPOS DE FRENADO EN LA UNIDAD DE TREN METRO DE MEDELLÍN	38
3. METODOLOGÍA.....	51
3.1 VARIABLES QUE INCIDEN EN LA ACUMULACIÓN DE ENERGÍA EN UNA VOLANTE DE INERCIA ..	51
3.1.1 Generalidades de la volante de inercia para el Metro de Medellín.....	54
3.2 Determinar las condiciones de aplicación de sistemas de recuperación de energía en el sistema de tracción del metro de Medellín.....	61
3.2.1 Consumo actual de Energía eléctrica de los trenes en el Metro de Medellín	62
3.2.2. Capacidad de carga de energía eléctrica en la subestación de tracción SET	65
3.2.3 Aprovechamiento actual de la energía eléctrica generada en el frenado regenerativo	66
3.2.4 Ahorro de energía generado por la volante de inercia para el Metro de Medellín.....	67
3.3 ESTABLECER EL ESTADO TECNOLÓGICO ACTUAL DE LA VOLANTE DE INERCIA COMO ACUMULADOR DE ENERGÍA PARA EL SISTEMA FERROVIARIO	71
3.3.1 Aplicación de la volante de inercia.....	72
3.3.2 Antigüedad y utilización de la volante de inercia	74
3.4 DETERMINAR LAS CONDICIONES TECNICO – ECONOMICAS PARA HACER VIABLE LA IMPLEMENTACION DE RECUPERACION DE ENERGIA MEDIANTE VOLANTES DE INERCIA PARA EL METRO DE MEDELLIN.....	75
3.4.1 Costo del kWh de la energía eléctrica para el metro de Medellín.....	78
3.4.2 kWh generado por la volante de inercia	79
3.4.3 Tipo y costo de mantenimiento	79
3.5 CARACTERIZACION DEL CONSUMO ACTUAL PARA EFECTOS DE COMPARACION DEL SISTEMA CON O SIN EL CONJUNTO VOLANTE DE INERCIA	80
3.6 COMPARAR CON UN SOTWARE EN MATLAB LOS CALCULOS FISICO-ELECTRICOS Y MECANICOS OBTENIDOS.....	83
3.6.2 Graficas de comparación de los cálculos obtenidos.....	85
3.7 CONTRASTAR LOS CÁLCULOS DE LA VOLANTE DE INERCIA COSTOS VS AHORRO ENERGÉTICO	87
3.7.1 Graficas de proyección de Ahorro.....	88

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.7.2 Contribución al medio ambiente por ahorro energético.....	89
3.8 ANALIZAR LOS RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS FÍSICO-ELÉCTRICOS DE LA CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA DE UNA VOLANTE DE INERCIA PARA EL SISTEMA DE TRACCIÓN DE METRO PARA IDENTIFICAR SUS POSIBLES BENEFICIOS EN EL AHORRO DE ENERGÍA.....	90
4. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO.....	91
REFERENCIAS.....	95
APÉNDICE	97

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

LISTAS IMÁGENES

FIGURA 1. VOLANTE DE INERCIA.	18
FIGURA 2. GRAFICA TORQUE, VELOCIDAD ANGULAR VS DESPLAZAMIENTO POLAR.	21
FIGURA 3. COMPONENTES DE UNA VOLANTE DE INERCIA.	23
FIGURA 4 CLASIFICACIÓN SEGÚN EL TIPO DE TRACCIÓN.	26
FIGURA 5. CLASIFICACIÓN CON TRACCIÓN ELÉCTRICA.	26
FIGURA 6. CURVAS DE CORRIENTE Y TENSIÓN ELÉCTRICA EN EL SISTEMA DE TRACCIÓN.	35
FIGURA 7. FUNCIONES Y TÉCNICAS DE FRENADO.	40
FIGURA 8. SITUACIÓN ACTUAL DE APROVECHAMIENTO FRENADO EN EL METRO DE MEDELLÍN.	40
FIGURA 9. DISTRIBUCIÓN ALIMENTACIÓN DE CORRIENTE.	44
FIGURA 10. ESQUEMA DE ALIMENTACIÓN SET SAA.	46
FIGURA 11. MOMENTO DE INERCIA DE DIFERENTES SÓLIDOS.	50
FIGURA 12. CILINDRO SOLIDO	51
FIGURA 13. CILINDRO SOLIDO QUE GIRA SOBRE UN EJE QUE PASA POR SU CENTRO DE MASA.	51
FIGURA 14 . CONSUMO DETALLADO, CADA 15 MINUTOS EN KWH.	61
FIGURA 15 . CONSUMO DIARIO EN KWH DE CADA SET.....	62
FIGURA 16. CURVAS DE DEMANDA DE POTENCIA PARA LAS SET MEDIDAS EN SITIO.	63
FIGURA 17 . DIAGRAMA DE ALIMENTACIÓN DE LAS SET EN EL SISTEMA DE GESTIÓN Y TRAFICO SGT DEL METRO DE MEDELLÍN.	66
FIGURA 18. MUESTRA EL SISTEMA KERS EN AUTOMÓVIL DE LA FÓRMULA 1.	71
FIGURA 19 . VIABILIDAD DE CARGA Y DESCARGA EN LOS TIPOS DE ACUMULADORES.	72
FIGURA 20. COMPARACIÓN DE LA DENSIDAD DE POTENCIA EN FUNCIÓN DE LA DENSIDAD DE ENERGÍA ENTRE ACUMULADORES DE ENERGÍA.	74
FIGURA 21. COSTOS ESPECÍFICOS DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA.	75
FIGURA 22. ESQUEMA ELÉCTRICO DE ACUMULACIÓN DE ENERGÍA DE UNA VOLANTE DE INERCIA.	77
FIGURA 23. ESQUEMA MODELO ELÉCTRICO Y MECÁNICO.	82
FIGURA 24. VELOCIDAD ANGULAR ACOPLE MECÁNICO Y MAQUINA ELÉCTRICA.	84
FIGURA 25. VOLTAJE DE ALMACENAMIENTO ACOPLE MECÁNICO Y MAQUINA ELÉCTRICA.	84
FIGURA 26. POTENCIA ENTREGADA ACOPLE MECÁNICO Y MAQUINA ELÉCTRICA.	85
FIGURA 27 . PROYECCIÓN DE AHORRO CON VOLANTE DE INERCIA.	87

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

LISTA ANEXOS

ANEXO A.ESPECIFICACIONES DE CÁLCULO PROYECTO METRO DE MEDELLÍN.....	91
ANEXO B.HOJA DE VIDA DE ACERO ALEACIÓN 5754 Y CLASES DE RUEDAS SEGÚN LA AAR.....	92

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1. INTRODUCCIÓN

El Metro de Medellín, en sus 20 años de operación comercial se ha destacado por su puntualidad, rapidez y seguridad que se siente al viajar en sus trenes. Pero esto es más costoso para la empresa por la demanda del número de trenes que se deben mover y la frecuencia en el ingreso y salida de las estaciones, por lo tanto, se juega con diferentes horarios con diferentes intervalos y frecuencias para satisfacer las necesidades de los usuarios y al mismo tiempo buscando una economía para la empresa.

Por lo anterior el consumo de energía eléctrica es elevado y una de las formas para reducirlo es la adaptación de un acumulador de energía volante de inercia para el sistema de tracción, que disminuye el consumo de energía eléctrica generada por el arranque de los trenes en estaciones y puntos de parada. En el sistema de tracción del Metro de Medellín se está implementando una ampliación de la flota de trenes, la cual incrementa de manera considerable la carga eléctrica de las subestaciones. La propuesta del trabajo de grado es realizar los cálculos de generación de energía con una volante de inercia como medio redundante a los ultra capacitores, ya que puede implementarse en las subestaciones de tracción, garantizando una disponibilidad de abastecimiento de energía eléctrica para la tracción inicial de los trenes en las paradas de las estaciones. La entrega de potencia en kVA sería para la tracción inicial (vencimiento de la inercia del tren), una vez el tren se mueva el consumo de energía será de la red. Adicionalmente se presenta la simulación con software, donde se pudo ponderar la energía medida en kWh necesarios para el abastecimiento de los trenes en sus puntos de parada en las estaciones del sistema Metro mostrando las bondades, ventajas y desventajas de la volante de inercia.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1.2 OBJETIVOS

General

Desarrollar un estudio técnico económico de volantes de inercia como método alternativo para la generación y conservación energética para el sistema de tracción del Metro de Medellín.

Específicos

1. Determinar las variables que inciden en la acumulación de energía en una volante de inercia.
2. Establecer el estado tecnológico actual de la volante de inercia como acumulador de energía para el sistema ferroviario.
3. Determinar las condiciones de aplicación de sistemas de recuperación de energía en el sistema de tracción del Metro de Medellín.
4. Determinar las condiciones técnico-económicas para hacer viable la implementación de recuperación de energía mediante volantes de inercia para el Metro de Medellín.
5. Caracterizar el consumo actual para efectos de comparación del sistema con y sin el conjunto volante de inercia.
6. Comparar con un software en MATLAB los cálculos físico-eléctricos y mecánicos obtenidos.
7. Contrastar los cálculos físico-eléctricos y mecánicos teóricos de la volante vs costos-beneficios vs ahorro energético.
8. Analizar los resultados de los cálculos físico-eléctricos y mecánicos de la conservación de la energía eléctrica de una volante de inercia para el sistema de tracción del METRO para identificar sus posibles beneficios en el ahorro de energía.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2. MARCO TEÓRICO

2.1 ACUMULADOR DE ENERGÍA

Un acumulador de energía es un dispositivo capaz de almacenar energía y regresarla en el momento necesario. Los acumuladores actúan cuando a un sistema no se les suministra energía de forma continua, acumulando energía del motor y devolviéndola cuando éste no produce trabajo. (Diez, 2017)

2.2 TIPOS DE ACUMULADORES

- **Acumuladores estacionarios:** suelen estar en un lugar fijo y proporcionan corriente eléctrica de manera permanente o esporádica para diversos fines. En ningún momento, sin embargo, se les pide que den valores de intensidades elevadas en tiempos cortos.
- **Acumuladores de arranque:** se encargan de producir energía eléctrica con valores de intensidad de corriente elevados durante tiempos cortos, por ejemplo, en los de los coches cada vez que se ponen en marcha, o bien cuando se arranca un motor. Las placas de los electrodos de estos acumuladores tienen más grueso que los de los estacionarios y su vida útil es más corta debido a las "duras" condiciones de trabajo.
- **Acumuladores de tracción:** se encargan de proporcionar corriente a pequeños vehículos eléctricos y, por tanto, se les pide unas intensidades de corriente relativamente altas durante periodos de algunas horas.

2.2.1 Principales parámetros de un acumulador de energía eléctrica

- **Capacidad:** Máxima cantidad de electricidad que puede almacenar. En la práctica, y para evitar daños irreversibles en la batería, sólo puede proporcionar una parte de la capacidad total, que llamamos capacidad útil. La capacidad útil depende del tipo de

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

acumulador y de las condiciones de trabajo, pero suele tener valores desde el 30% hasta más del 90% (en acumuladores alcalinos de buena calidad) de la capacidad máxima. La cantidad de electricidad que puede proporcionar un acumulador también depende del tiempo de descarga, por lo que la capacidad será mayor cuanto más lentamente se produzca la descarga. La capacidad de la batería se expresa en amperios hora (Ah). Con la notación C5, C25, C100 se representa el tiempo de descarga en horas, respectivamente 5, 25 o 100 (C5 = descarga en 5 horas). Estos valores nos dan el número de horas durante las que teóricamente podríamos disponer de una intensidad de corriente determinada procedente del acumulador.

- **Profundidad de descarga:** Es el tanto por ciento sobre la capacidad máxima del acumulador que se puede extraer de la batería en condiciones normales. Es un término muy variable que depende mucho del tipo de acumulador y que influye en su vida útil.
- **Vida útil:** se suele medir en ciclos (más que en años), por lo que un ciclo es un proceso completo de carga-descarga (hasta llegar a la profundidad de descarga recomendada). Si suponemos un ciclo medio de un ciclo por día y un acumulador bien mantenido, debería durar un mínimo de 10 años.
- **Auto descarga:** es un fenómeno por el que un acumulador, por causas diversas, se descarga lentamente pero de manera continua aunque no esté conectado a un circuito externo. (www.solar-energia.net, 2016)

2.3 VOLANTE DE INERCIA

El volante de inercia es un sistema de almacenamiento de energía mecánica, la cual absorbe y sede energía en poco tiempo, donde un disco metálico o aleación comienza a girar cuando se le aplica un par motor, cuando está girando solo se puede frenar con un par resistente. La ecuación de energía almacenada en una volante es:

$$E = \frac{1}{2} I \cdot \omega^2 \quad (1)$$

Dónde:

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

E = Energía almacenada [Joul]

I = Momento de inercia, que es función de la masa y la distancia al eje de giro [Kg.m^2]

ω = velocidad angular [$\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$]

La ecuación (1) se interpreta, la energía es directamente proporcional a su masa y a la distancia del centro de giro, mayor energía almacenada. Como la velocidad angular está al cuadrado, resulta más rentable incidir en tratar de elevar el número de revoluciones antes que aumentar la masa o las dimensiones para alcanzar una mayor energía almacenada.

También son empleados como elementos para suavizar la rotación de un eje, pudiendo así regular la generación eléctrica en centrales, por ejemplo. También se utilizan como frenos regenerativos en vehículos, generalmente eléctricos (aprovechan la energía de la frenada del vehículo)

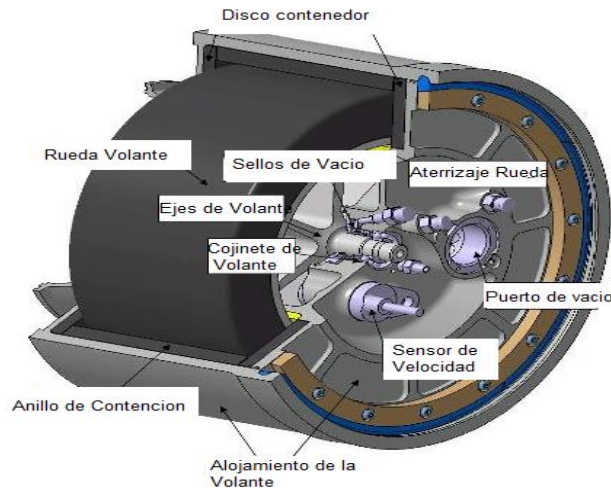


figura 1. Volante de inercia. Fuente: (www.pistonudos.com, 2015)

2.4 FUNCIONAMIENTO DE UNA VOLANTE DE INERCIA

Su funcionamiento básicamente es el principio de la energía rotacional, dentro del cuerpo del sistema de volante de inercia tenemos girando un cilindro sobre su eje, ¿cuánta energía puede almacenar? Esta depende de la velocidad a la que puede girar y el momento polar de inercia del volante. El momento polar de inercia es la cifra que indica la tendencia de un

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

cuerpo a seguir girando alrededor de un eje, cuanto más lejos tiene la masa del eje, el volante tiene más Momento polar de inercia y por tanto almacena más energía en su rotación por esta razón, las volantes de inercia se diseñan con casi todo su peso concentrado en la parte exterior del cilindro. (www.pistonudos.com, 2015)

Básicamente la cantidad de energía que se puede almacenar es el resultado de la multiplicación del momento polar de inercia por la velocidad de rotación máxima que se puede darle al volante de inercia sin que se rompa, dividido entre dos.

- **leyes físicas o modelo matemático para una volante de inercia**

La ecuación de momento para un volante de inercia es:

$$\sum M = T_i * (\theta_i, \theta_i') - T_0 * (\theta_0, \theta_0') - I * \theta'' = 0 \quad (2)$$

Donde la sumatoria de momentos es igual al Torque inicial por los ángulos de giro, menos el Torque final por los ángulos de giro, menos el momento de Inercia por el ángulo final es igual a cero. Teniendo que:

T_i = Torque de entrada entregado al volante (positivo) correspondiente a la coordenada θ_i

T_0 = Torque de salida (negativo) correspondiente a la coordenada θ_0

θ = desplazamiento angular o coordenada de posición del volante

θ' = velocidad angular (ω) o primera derivada de $\frac{d\theta}{dt}$

θ'' = aceleración angular (α) o segunda deriva de $\frac{d\theta}{dt}$

I = momento de inercia de masa sobre el eje de rotación

La ecuación (3) es el torque para un volante de inercia:

$$\sum T = I_m * \alpha \quad (3)$$

De la ecuación (3) se obtiene la diferencia de torques que es igual al momento de inercia por la aceleración angular.

$$T_l - T_m = I_m * \alpha$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$T_m =$ torque promedio o deseado

Se despeja la aceleración angular aplicando derivadas para obtener el momento de inercia.

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d\omega}{dt} * \left(\frac{d\theta}{d\omega} \right) = \omega * \frac{d\omega}{d\theta}$$

$$T_l - T_{prom} = I_m * \omega * \frac{d\omega}{d\theta}$$

$$(T_l - T_{prom}) * \frac{d\theta}{\delta} = I_m * \omega * d\omega$$

Donde (I_m) es el momento de inercia de toda la masa sobre la flecha con respecto al eje de rotación, pero los volantes pueden ser tan sencillos como un disco macizo o de construcción con rayos como una masa y un aro; esta configuración es la más recomendada porque concentra su masa en el aro y por lo tanto más eficiente.

$$I_m = \frac{m}{2} * (r_o^2 + r_i^2)$$

$$I_m \text{ hueco} = \frac{\pi * \delta}{2 * g} * (r_o^4 + r_i^4) * t \quad (4)$$

Donde las siguientes variables son fundamentales para poder calcular la energía cinética de un disco.

$\delta =$ Peso específico del material $\left[\frac{N}{m^3} \right]$

$g =$ Gravedad $\left[\frac{m}{s^2} \right]$

$t =$ Espesor [m]

$r_o =$ Radio exterior [m]

$r_i =$ Radio interior [m]

La energía cinética E_k en un sistema en rotación es (Norton, 1999):

$$E_k = \frac{1}{2} * m * V^2 = \frac{1}{2} * I_m * \omega^2 \quad (5)$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Para el diseño de un volante se tiene que calcular primero la energía necesaria para la uniformidad del sistema y el momento de inercia necesario para absorber dicha energía. Con la figura 2 se explicará mejor la función de un volante de inercia:

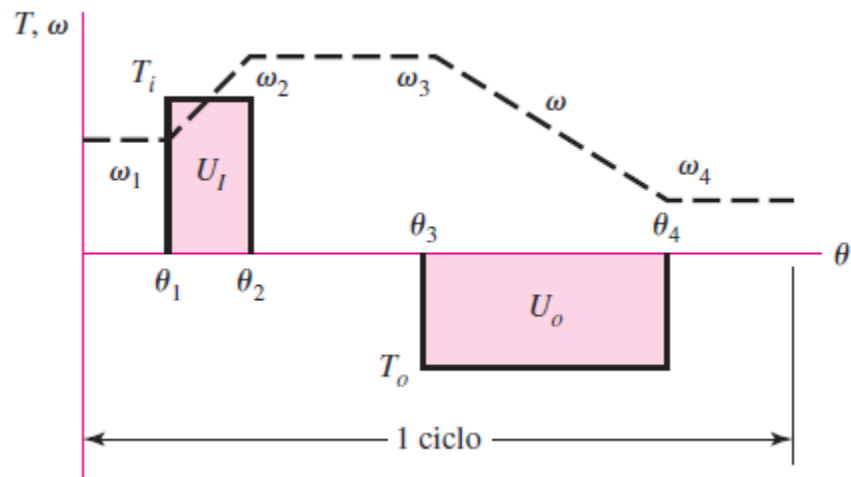


figura 2. Grafica torque, velocidad angular vs desplazamiento polar. Fuente: (Shigley, 2008)

En el eje donde se encuentra montado el volante de inercia se aplica un torque o momento constante (T_i) entregado por un motor eléctrico, durante un intervalo de desplazamiento de θ_1 a θ_2 , como este torque o momento es positivo se dibuja hacia arriba y por lo tanto existirá una aceleración positiva porque $\omega_1 < \omega_2$ ahora el eje gira a una velocidad ω_2 constante durante un desplazamiento θ_2 a θ_3 , con momento nulo, luego se añade una carga o momento torsional de salida de magnitud constante durante un desplazamiento de θ_3 a θ_4 , haciendo que el eje desacelere hasta una velocidad angular $\omega_4 < \omega_3$ y se grafica por debajo por ser negativo, el motor que anteriormente entregó energía para el inicio ahora hace las veces de generador (Shigley, 2008).

El trabajo de entrada al volante es el área del rectángulo U_1 y el trabajo entregado es el área del rectángulo U_o , si se cumple las siguientes condiciones:

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Si U_0 es mayor que U_1 la carga necesita mayor energía que la entregada por el motor y por lo tanto $\omega_4 < \omega_1$

Si U_0 es igual que U_1 la carga de entrada y entregada son iguales y por lo tanto $\omega_4 = \omega_1$

Si U_1 es mayor que U_0 la velocidad angular $\omega_4 > \omega_1$

U_2 y U_1 serán las energías cinéticas en el estado 1 y 2 correspondiente:

$$E1 = \frac{1}{2} * I * \omega_1^2 \quad (6)$$

$$E2 = \frac{1}{2} * I * \omega_2^2 \quad (7)$$

Entonces la variación en la energía cinética será:

$$E2 - E1 = \frac{1}{2} * I * (\omega_2^2 - \omega_1^2) \quad (8)$$

Los sistemas de almacenamiento cinéticos de energía basados en volantes de inercia FESS (sistema de almacenamiento de energía con volante) están caracterizados por ser capaces de proporcionar picos muy altos de potencia, de hecho, la potencia de pico de entrada/salida está limitada sólo por la potencia del convertidor usado, mientras que la energía almacenada en el módulo está determinada por la velocidad, la masa y la geometría del volante de inercia. Los FESS tienen una alta densidad de potencia y tienen una durabilidad “infinita” en número de ciclo de trabajo, así que su principal aplicación es en sistemas que implican un gran número de ciclos de carga y descarga, como en el transporte y en la mejora de la calidad de la red eléctrica. (Lafoz, 2010)

2.4.1 Elementos de una Volante de inercia

En las aplicaciones más clásicas las volantes reciben la energía a través de una transmisión mecánica, como si fueran un subconjunto de la máquina. En estos casos es habitual que tengan un multiplicador para aumentar las revoluciones, o incluso un variador para adaptarse a distintos regímenes, cada vez es más frecuente que el volante incorpore un motor-generador eléctrico propio, de forma que configura una máquina aislada, conectada al exterior únicamente por cables eléctricos igual que una batería eléctrica. Su principal

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ventaja es la versatilidad porque se adapta fácilmente a cualquier necesidad energética mediante una adecuada regulación electrónica (Ver figura 3).

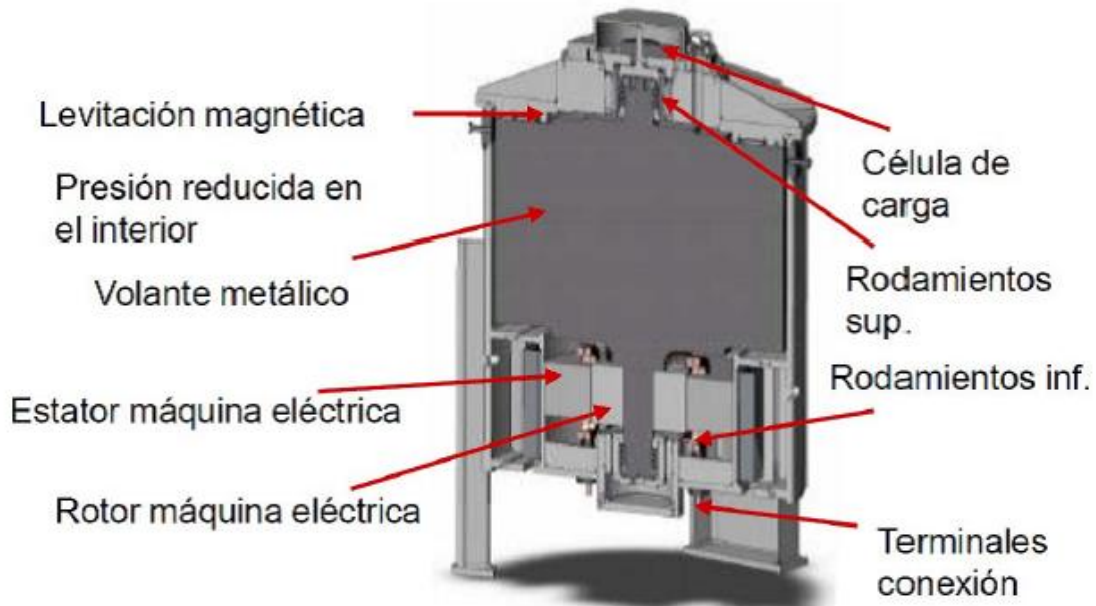


figura 3. Componentes de una volante de inercia. Fuente: (Lafoz, 2010)

Los elementos de un acumulador cinético que pueden ver en la figura 3 son:

Motor-Generador, Rotor, Recipiente, Cojinetes, son elementos de un acumulador cinético son:

- El rotor es el elemento central del acumulador, donde se almacena propiamente la energía. Está formado principalmente por la masa cilíndrica y el eje central.
- Los cojinetes de giro suelen ser simples rodamientos de alta velocidad. En modelos más sofisticados se montan cojinetes de levitación magnética que eliminan las pérdidas por rozamiento.
- El motor-generador convierte la energía eléctrica en cinética y viceversa. Gira solidaria al rotor y puede estar situado en paralelo con el disco, como se muestra en la figura 3, o concéntrico a la masa circular. En este último las bobinas estatóricas se sitúan sobre el eje central fijo y las rotoricas en el interior de la masa cilíndrica.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

El conjunto está encerrado en un recipiente de protección que evita el acceso a los elementos móviles. En algunos casos se efectúa el vacío para eliminar el rozamiento aerodinámico.

Además de las partes mecánicas, incorpora un equipo de regulación de la potencia eléctrica que gestiona el flujo de energía con el exterior.

Este tipo de acumuladores, además de ser versátiles, minimizan las pérdidas por fricción y la energía se mantiene durante horas o incluso días. Por contra, tienen pérdidas en la entrada y salida de energía debido al rendimiento eléctrico del motor. (Lafoz, 2010)

2.5 APLICACIONES DE LA VOLANTE DE INERCIA

La aplicación más destacable de los últimos años ha sido para el suministro de energía eléctrica a satélites en la industria aeroespacial. Durante las horas solares se almacena la energía proveniente de las placas fotovoltaicas, de forma similar a las baterías eléctricas, pero con menos peso y mayor fiabilidad.

Otro campo es la aplicación a los vehículos urbanos, cuya velocidad es discontinua y la energía cinética se pierde en forma de calor durante las frenadas. El acumulador cinético es capaz de almacenar la energía de la frenada porque su potencia, a diferencia de las baterías químicas, es suficiente para absorber la energía en unos segundos y para devolverla en la aceleración. Se aplica a automóviles, y a autobuses, En los trenes, tanto urbanos como interurbanos, trabajan igual que en los vehículos urbanos y se aplican tanto si el motor es eléctrico como de combustión interna.

De forma similar, aunque para menos energía se aplica a los tranvías urbanos, En cambio, en los trenes de alta velocidad es distinto, el acumulador debe estar situado en las estaciones porque su masa es muy grande comparada con la masa del tren.

Existen otras aplicaciones, por ejemplo, en las redes de suministro de energía eléctrica para evitar los cortes de corriente. Se utilizan como fuente complementaria durante las

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

interrupciones de corta duración, con periodos de tiempo entre 10 y 60 segundos. (GV, 2013)

2.6 TIPOS DE SISTEMAS DE TRACCIÓN FÉRREOS

El hombre necesito transportar cargas y personas a grandes distancias, por lo cual seideo un vehículo que cumpliera con este cometido, “El ferrocarril”, el cual es un sistema guiado sobre una vía férrea y que tiene una gran capacidad de tracción.

Aunque en sus inicios la tracción era ejercida por esclavos, siglo VI a.C. en caminos sobre piedras, esta evoluciono hasta el transporte sobre carriles en Europa a finales de la Edad Media, el cual era sobre carriles de madera accionada mediante cuerda por fuerza humana o animal. (Berbey, 2013)

La revolución industrial y el desarrollo del motor a vapor impulsó la idea de crear locomotoras de vapor que pudieran arrastrar trenes por líneas férreas; La primera locomotora de vapor que arrastró trenes de transporte público fue diseñada por George Stephenson en Inglaterra, y fueron utilizadas en las líneas de Europa y Estados Unidos.

La tracción eléctrica fue iniciada en 1838 por Rober Davidson, cuando construyó un carruaje equipado por baterías. La empresa Siemens en Berlín desarrollo la alimentación por cables de los ferrocarriles y tranvías los cuales hasta entonces eran arrastrados por mulas o caballos. (Berbey, 2013)

En la década de 1890 las grandes ciudades como Paris, Londres, México, utilizaron la técnica de línea electrificada para los metros urbanos (Ferrocarriles Urbanos) utilizando corriente continua, en 1904 se utilizó corriente alterna como modo de tracción.

En las figuras 4 y 5 se presentan los diferentes modos de tracción de los ferrocarriles de acuerdo a la tracción que las acciona.

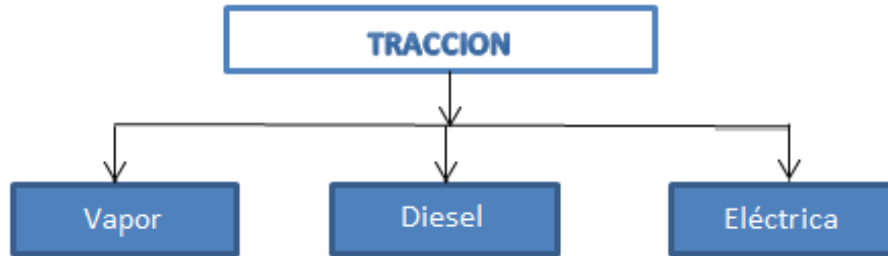


figura 4 Clasificación según el tipo de tracción. Fuente: (autores, 2017)

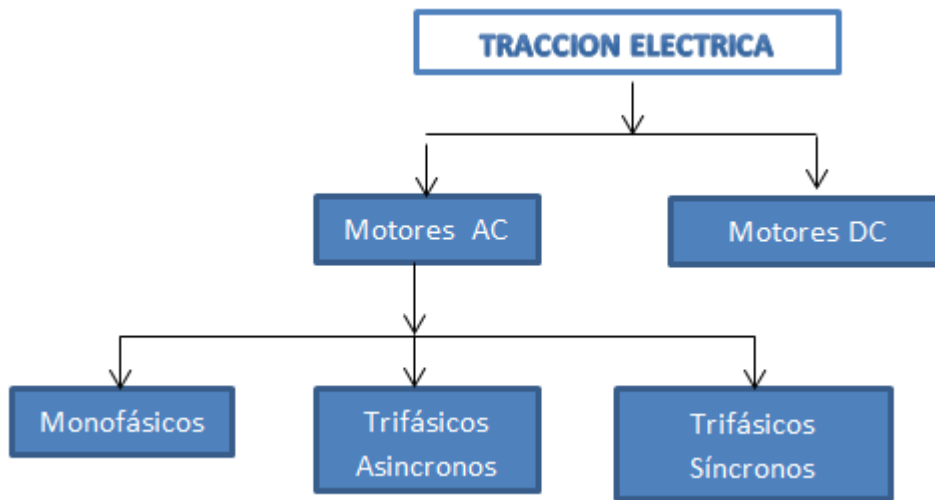


figura 5. Clasificación con tracción eléctrica. Fuente: (autores, 2017)

- **Eléctrica:** La fuente de energía eléctrica es externa (catenaria, tercer riel) alimentada directamente o mediante transformadores o convertidores (las más recientes con tecnología *Insulated Gate Bipolar Transistor*) los motores de tracción eléctricos.
- **Diesel-hidráulica:** Uno o varios motores diesel accionan los ejes. La transmisión es generalmente por turbinas hidráulicas.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- **Diesel-eléctrica:** Un motor diesel mueve un generador eléctrico que, directamente o mediante un rectificador alimenta el o los convertidores y los motores eléctricos de tracción. A estos últimos se les denomina generalmente motores de tracción para diferenciarlos del motor diesel del generador eléctrico. La mayoría de las locomotoras pesadas diesel, desde los años 1960, son diesel-eléctricas.
- **Dual, híbrida, o eléctrico-diésel:** Existen dos fuentes alternativas de energía: (1) corriente eléctrica externa o (2) un motor diésel que actúa como grupo electrógeno. La tracción dual puede considerarse como una tracción diésel-eléctrica en la que en tramos electrificados se puede prescindir del grupo electrógeno diésel. La disminución del peso de los equipos de tracción, debido a los avances en la electrónica de potencia y de los motores, permite cada vez más abordar esta alternativa, especialmente interesante para redes parcialmente electrificadas y para tráficos en terminales de mercancías.
- **Híbrida:** Otros fabricantes reservan el término "tracción híbrida" para los vehículos de tracción eléctrica (o menos frecuentemente diesel eléctrico) que cuentan con un sistema de almacenamiento de energía eléctrica (por ejemplo mediante baterías o ultra condensadores). Especialmente para tranvías modernos se está desarrollando con fuerza, a partir de los años 2000, este tipo de tracción que permite salvar tramos cortos sin catenaria. (Berbey, 2013)

2.7 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA UNIDAD DE TREN DEL METRO DE MEDELLÍN

El Metro de Medellín Ltda. Es una empresa con un sistema de tracción eléctrica de naturaleza especial con respecto a los sistemas de transporte público masivo que se tienen en el país, es el único sistema de tracción eléctrica de este tamaño y por consiguiente requiere consideraciones y exigencias especiales.

Los trenes están formados por unidades básicas de máximo 69 m de longitud, que acoplados forman trenes de 138 m.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Los trenes cuentan con una capacidad mínima de 1100 personas, a $\frac{8 \text{ pasajeros}}{m^2}$, para la unidad básica de tren, con lo que un tren acoplado en servicio comercial de Línea A, tiene una capacidad mínima de 2200 personas. Cada unidad de tren (tres coches) es reversible y cuenta con una cabina de conducción y enganche automático en cada extremo. (trenes, 2014)

El sistema tipo Metro dispone, para transmitir la potencia hasta los vehículos, de un sistema de catenarias aéreas, el cual es un conjunto de conductores desnudos que se tiende sobre el recorrido de los vehículos (catenarias) y estos a su vez se conectan por medio del uso de pantógrafos ubicados en la parte superior de los vehículos.

La red de DC está diseñada en función a ciertos requerimientos básicos, como son:

- Permitir los picos de corrientes originados por las corrientes de arranque o aceleración de los trenes, en cualquier posición del sistema.
- Suministrar una señal de tensión estable, confiable y segura, que permita el funcionamiento óptimo de los vehículos del sistema.
- Permitir retirar del servicio equipos, para realizar labores de mantenimiento, sin que se vea afectada la prestación del servicio.
- Asegurar la prestación del servicio, aún bajo condiciones de fallas en alguno de los equipos de distribución. (trenes, 2014)

Las características generales de la alimentación eléctrica para los trenes son por medio de catenaria a una Tensión eléctrica 1500 Vcc (+20% /- 30 %).

Esta red es alimentada por las subestaciones rectificadoras, las cuales a su vez obtienen esta energía de una red de suministro de media o alta tensión, entregando una señal de DC al nivel de tensión requerido por los vehículos. Los tramos de vía se aíslan unos de otros en operación normal y están alimentados desde ambos extremos para darle seguridad al sistema, además se cuenta con interruptores que posibilitan la conexión entre los tramos en caso de fallas.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

El sistema de tracción de Metro de Medellín está constituido por nueve subestaciones de tracción que se encargan de energizar los trenes propulsados por motores de DC con los cuales opera el sistema, para esto utiliza un sistema de catenarias, pantógrafos en los trenes y retorno de corriente a través de los rieles sobre los que transitan los vehículos, además cuenta con sistema de frenado regenerativo, el cual permite que los vehículos entreguen la energía que generan sus motores durante el proceso de frenado, retorno de corriente a la catenaria, o a las resistencias de frenado, frenado disipativo. (MAN, 1995)

El sistema se alimenta de la red de 110 kV de las Empresas Públicas de Medellín (EPM), conectándose desde tres subestaciones (Zamora, San Diego y Envigado), cada subestación cuentan con un transformador Trafo-Unión (SIEMENS) de 31,5/40 MVA que les permiten reducir el nivel de tensión a 13,8 kV, con lo cual energizan dos sistemas de cables, el primero destinado a alimentar las subestaciones de tracción (SET) y el segundo alimenta todas las subestaciones de pasajeros (SEP), la de taller patios de Bello (PBE), la torre de control (TRC) y el puesto central de control (PCC). El conjunto rectificador lo componen dos transformadores tridevanados en paralelo y un rectificador de seis pulsos en cada terminal secundario de los transformadores, lo cual configura un transformador de 12 pulsos que entrega 1500 VDC en condiciones de operación regular. (SIEMENS, 1998)

2.7.1 Alimentación eléctrica

Las características generales de la alimentación eléctrica para los trenes son por medio de catenaria; el tren se adapta a las secciones de catenaria y sus equipos eléctricos y electrónicos responden de manera continua a los cambios de secciones eléctricas, la cual tiene las características registradas en la Tabla 1.

Tabla 1. *Características generales de la Catenaria*

Tracción eléctrica	
Tensión eléctrica de la Catenaria:	1500 Vcc (+20% /- 30 %)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Tensión mecánica de la Catenaria:	12 kN (hilo de contacto)
Longitud de un vano (máximo):	70 m
Abertura(distancia del hilo de contacto al cable sustentador) de la Catenaria nominal:	1.40 m y 1.60 m
Altura del hilo de contacto (encima de los rieles):	4.25 m – 6.50m
Zig - zag del hilo de contacto	Vía recta: ± 25 cm.) curva: ± 30 cm.

Construcción de la catenaria

Vías principales	Cable sustentador	2*150 mm ² Cu con fuerza tensora de 24 kN
	Hilo de contado	1*120 mm ² Cu con fuerza tensora de 12 kN
	Péndola	10 mm ² Bronce
Vías secundarias Patio Bello	Cable sustentador	1*150 mm ² Cu con fuerza tensora de 12 kN
	Hilo de contado	1 *120 mm ² Cu con fuerza tensora de 12 kN
	Péndola	10 mm ² Bronce
Patio Bello	Hilo de contado	1*120 mm ² Cu con fuerza tensora de 12 kN

Fuente: (electricas, 1995)

2.7.2 Composición de los trenes

Los trenes pueden operar como unidades simples (tres coches) o trenes acoplados (dos unidades simples), respetando las características de las estaciones, del sistema y las capacidades de movilización de usuarios establecidas en estas especificaciones.

La conformación actual de las unidades del Metro de Medellín se encuentra descrita en el Anexo 01.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- **Capacidad de carga de pasajeros de los trenes**

Los diferentes niveles de cargas son los siguientes:

AW0. Peso en vacío listo para la operación sin carga de pasajeros

AW1. AW0 + 6 pasajeros de pie/m² y todos los asientos ocupados

AW2. AW0 + 8 pasajeros de pie/m² y todos los asientos ocupados

CD. AW0 + 10 pasajeros /m². Carga de diseño. (ED.3, 2011)

Nota:

El peso medio de cada uno de los pasajeros deberá considerarse de 65 kg. (ED.3, 2011)

2.7.3 Características del tren

Las características están definidas por la velocidad máxima, la aceleración, la desaceleración y el nivel de sacudidas (Jerk), se define a carga excepcional (AW2).

- **Velocidad máxima:** La velocidad máxima en operación comercial es de 80 km/h y la velocidad de diseño es de 100 km/h. (ED.3, 2011)

Aceleración: La aceleración inicial ($\frac{m}{s^2}$) se considera constante para un valor mínimo de tensión de 1050 V, en vía recta con el 100% de la tracción hasta alcanzar los 40 km/h y teniendo en cuenta la siguiente tabla 2.

Tabla 2. Aceleración del tren en función de la pendiente del terreno.

Pendiente (%)	Carga AW1	Carga AW2
0,0	1,00	0,90
3,7	0,60	0,50

Fuente: (ED.3, 2011)

Las variaciones de aceleración (Jerk) no sobrepasan el valor de $\frac{1m}{s^3}$. La adherencia requerida al arranque no sobrepasa, en porcentaje la masa adherente en 19%.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Tanto una unidad (tres coches) como un tren acoplado (seis coches) en servicio comercial, son capaces de arrancar en el valor de pendiente máxima (3,7%) con la carga de diseño C.D., tanto en vía seca como vía húmeda. Igualmente una unidad o un tren acoplado son capaces de arrancar en pendiente de 3,7% en servicio comercial, con carga AW2, con vía húmeda y sin que funcione el 50% del circuito de los motores ni en tracción ni en frenado. (ED.3, 2011)

- **Desaceleraciones de servicio**

La desaceleración normal de servicio es independiente de la tensión o alimentación eléctrica de la línea. La desaceleración máxima de $1,2 \frac{m}{s^3}$ es aplicable por el conductor de acuerdo con la posición de la palanca de mando. El Jerk máximo es menor o igual a $\frac{1m}{s^3}$. Las desaceleraciones son uniformes y constantes de acuerdo al grado de frenado solicitado por el conductor.

Las características de frenado son medidas utilizando la norma UIC 544-1.

- **Desaceleraciones de emergencia**

- La desaceleración del freno de emergencia es de $1,3 \text{ m/s}^2$ y aplicable por el conductor, con la palanca de mando sobrepasando un punto de presión claramente perceptible que limita el rango de frenado de servicio o automáticamente por los sistemas de control de seguridad. (ED.3, 2011)

Frenado eléctrico

El frenado eléctrico es realizado mediante el retorno de corriente a la catenaria o a las resistencias de frenado. Dicho frenado es calculado de manera de reducir al máximo las sollicitaciones de frenado neumático.

- **Nivel de sacudidas (Jerk)**

El jerk se calcula sobre un período de 200 ms en condiciones normales, es decir en las condiciones de arranque, en el corte de la corriente de tracción, al restablecimiento de la corriente y en la fase final de frenado de servicio; el Jerk, en todos los casos, no es superior a $\frac{1m}{s^3}$.

- **Antipatinaje, antideslizamiento**

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Se cuenta con dispositivos de antipatinaje y antideslizamiento que optimizan los resultados de las condiciones de adherencia, bajo condiciones normales de operación, de lluvia, de exceso de grasa o cualquier tipo de suciedad en la vía. Estos dispositivos actúan en cualquier tipo o modo de marcha.

- **Masa del vehículo**

Se reparte y limita la carga máxima por eje (170 kN en AW2) de los vehículos para evitar esfuerzos sobre las vías. (ED.3, 2011)

2.8 OPERACIÓN DE LOS TRENES DEL METRO DE MEDELLIN

2.8.1 Modos de operación

- **Modo de marcha**

El modo de marcha normal es automático o semiautomático (manual controlada) compatible con el sistema de señalización de la vía. Adicionalmente los trenes permiten la marcha manual para los siguientes casos:

Marcha manual en línea comercial, con una velocidad máxima de $40 \frac{km}{h}$

Marcha manual en maniobras, en línea comercial o en Patios y Talleres de Bello, con una velocidad máxima de $20 \frac{km}{h}$.

Marcha manual en modo de operación acople, en línea comercial o en Patios y Talleres de Bello, con una velocidad entre 2 y $3 \frac{km}{h}$.

Marcha manual en modo de operación lavado, en Patios y Talleres de Bello, con una velocidad entre 2 y de $3 \frac{km}{h}$.

Marcha manual hacia atrás, con una velocidad máxima de $5 \frac{km}{h}$.

En cada modo de operación manual el conductor tiene constantemente accionado el mecanismo de “hombre muerto” y su velocidad está limitada por el regulador de velocidad.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- **Reversibilidad**

Los trenes como unidades simples o acopladas son reversibles, y tienen una cabina de conducción en cada extremo.

- **Órganos de acoplamiento y fijación**

La unidad de tres coches está equipada en cada extremo con un enganche automático que permite garantizar el acoplamiento y el desacoplamiento rápido de los vehículos durante la operación, en una duración menor o igual a diez (10) segundos.

Este enganche garantiza las conexiones mecánicas, eléctricas, electrónicas y neumáticas entre los vehículos. (ED.3, 2011)

- **Sistema de captación de corriente**

Los trenes están equipados con un sistema que permita el retorno y la transmisión de la corriente de tracción procedente de las líneas aéreas de contacto.

La captación de la corriente está garantizada para las configuraciones de 1 o 2 unidades acopladas, para la velocidad máxima de la línea.

El pantógrafo garantizar un aislamiento eléctrico seguro del techo para todas las condiciones ambientales posibles.

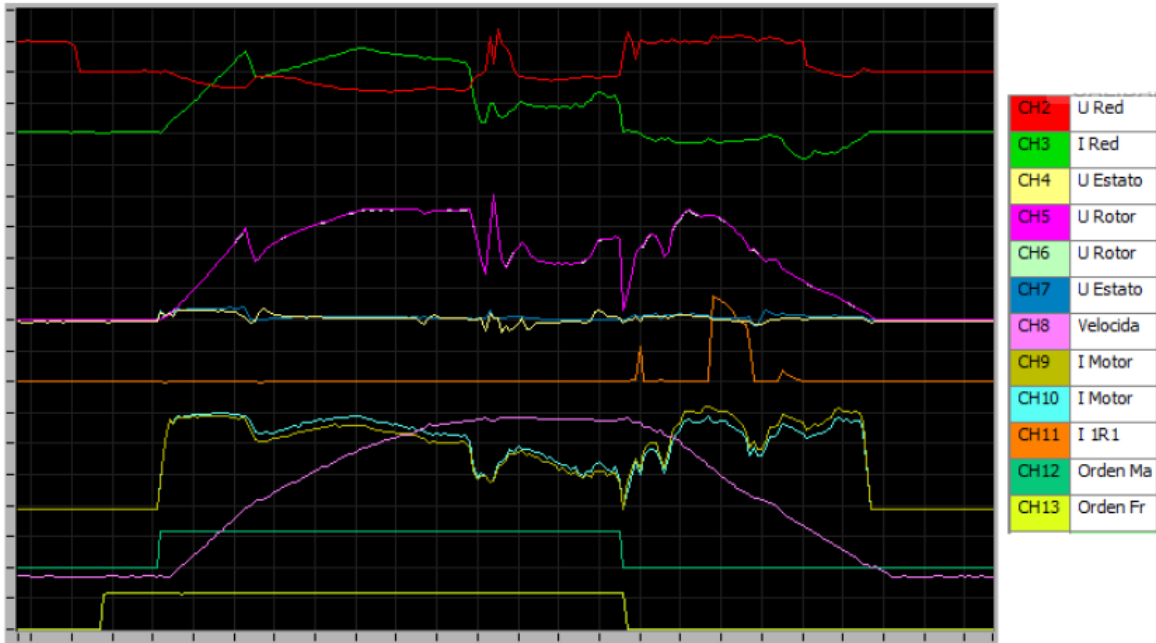


figura 6. Curvas de Corriente y tensión eléctrica en el sistema de tracción. Fuente: (ED.3, 2011)

La tabla 3 describe lo observado en la figura 6 que corresponde a un itinerario entre dos estaciones del Metro de Medellín, donde relaciona cada uno de los canales, que fueron obtenidos con el equipo graficador térmico de 16 canales GRAPHTEC WR300 y la exportación de los datos se utiliza el Software (WR300-APS) correspondiente al graficador y registrador (GRAPHTEC WR300). Ver en el apéndice A y B el manual y la forma en que se configuro Microsoft Excel para el análisis de los datos.

Tabla 3. Configuración de canales en el graficador GRAPHTEC WR300.

N° Canal	Señal a monitorizar
CH2-Canal 2	Tensión de red, en catenaria.
CH2-Canal 3	Corriente de red, consumo motores en tracción.
CH2-Canal 4	Tensión estator, en tracción.
CH2-Canal 5	Tensión rotor, en tracción.
CH2-Canal 6	Tensión rotor, en tracción

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

CH2-Canal 7	Tensión estator, en tracción.
CH2-Canal 8	Velocidad del tren.
CH2-Canal 9	Corriente motor, grupo1.
CH2-Canal 10	Corriente motor, grupo2
CH2-Canal 11	Corriente de frenado que se disipa en las resistencias.
CH2-Canal 12	Orden marcha.
CH2-Canal 13	Orden freno.

Fuente: (autores, 2017)

2.9. TIPOS DE FRENADO EN LA UNIDAD DE TREN METRO DE MEDELLÍN

El sistema de freno de la unidad de tren Metro de Medellín se basa en las regulaciones de la norma EN13452-1. Esta norma fija las restricciones a tener en cuenta para definir un sistema de freno embarcado en material rodante ferroviario.

- **Tipos de frenos**

Los trenes están equipados de dos tipos de frenos:

Un freno eléctrico moderable que permita realizar un frenado reostático o por recuperación.

Un freno mecánico con accionamiento neumático modelable, dimensionado para respetar los resultados especificados sin calentamiento anormal (banda de rodamiento en las ruedas, exfoliaciones...); el cual debe cumplir con la norma vigente. (UIC-540, UIC-541-5, UIC-544).

La norma diferencia entre:

- Técnicas de Frenado (*'Braking Techniques'*), que son las diferentes maneras para realizar las funciones de frenado.
- Funciones de Frenado (*'Braking Functions'*), que son las diferentes maneras de parar o mantener parado el tren.

Para cada función de frenado es importante determinar cómo se realiza:

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

La generación y transmisión de la demanda de freno a los coches (sistema de control de freno o *'brake control system'*) y la conversión de esta demanda en una fuerza de frenado en cada coche (sistema de aplicación de freno o *'brake application system'*).

2.9. 1 Técnicas de frenado (*'braking techniques'*)

Para realizar las funciones de frenado que se indican más adelante, la unidad de tren Metro de Medellín dispone de las siguientes técnicas de frenado (*'braking techniques'*):

- **Freno electrodinámico** (*'electro-dynamic brake'*), freno efectivo sólo con el tren en movimiento en el que se usan los motores como generadores. La unidad de tren Metro de Medellín dispone de esta técnica de frenado en sus dos variedades:
 - **Reostático:** la corriente de frenado se consume en las resistencias de freno.
 - **Regenerativo:** la corriente de frenado se devuelve a la línea de alimentación.
- **Freno electroneumático** (*'electroneumatic brake'*), frenado de fricción de zapatas sobre discos de freno calados en las ruedas de los ejes de los bogies, el esfuerzo de mordaza a las zapatas se transmite mediante aire comprimido siendo el control eléctrico. La unidad de tren Metro de Medellín dispone de 1 disco de freno por rueda.
- **Protección anti patinaje-antideslizamiento de ruedas** (*wheelslide protection WSP*), sistema que optimiza las prestaciones del freno en condiciones de mala adherencia rueda-carril. Como tanto el freno electrodinámico como el electroneumático pueden dar lugar a bloqueo de ruedas, el tren dispone de dos maneras de realizar la protección de ruedas: por una parte el equipo de propulsión controla que el esfuerzo eléctrico de freno no bloquee las ruedas, reduciendo si es necesario dicho esfuerzo, y por otra el clásico equipo de antibloqueo neumático controla que el esfuerzo de freno de fricción de zapatas en discos no bloquee las ruedas, actuando si es necesario sobre el circuito neumático que genera dicho esfuerzo. (ED.3, 2011)
- **Freno combinado** (*'brake blending'*), empleo al mismo tiempo del freno electrodinámico y el freno electroneumático.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- **Vigilancia de la carga de los coches** (peso), permite conseguir una deceleración instantánea máxima constante independiente de la carga. La información del peso de cada coche se obtiene indirectamente a través de la lectura del transductor de presión de la suspensión secundaria. Como la altura de la caja respecto al bogie se mantiene constante mediante la suspensión secundaria, el peso de la caja es directamente proporcional a la presión de la secundaria. (ED.3, 2011)

2.9. 2. Funciones de frenado (braking functions)

A continuación, se describen en detalle una a una las diferentes funciones de frenado de las que dispone la unidad de tren Metro de Medellín.

La tabla 4 y la figura 7 se relaciona las diferentes funciones de frenado con las técnicas empleadas en cada función.

Tabla 4. Tipos y funciones de frenado.

TIPOS DE FRENADO	Freno ED	Freno de fricción EP	WSP	Vigilancia de la carga
Frenado de servicio	SI	SI	SI	SI
Frenado de Emergencia	NO	SI	SI	SI
Freno de Retención	NO	SI	NO	SI
Freno de Estacionamiento	NO	SI	NO	NO

Fuente: (ED.3, 2011)

- **Frenado de servicio** (*service braking*)

El frenado de servicio es el frenado empleado normalmente por la unidad de tren Metro de Medellín, bajo control del conductor del tren o del equipo de conducción automática ATO.

Es un frenado totalmente moderable que ofrece unos niveles de deceleración entre 0 y $1,2 \text{ m/s}^2$. El tiempo de respuesta equivalente te máximo es de 1,5 segundos (según definición de la norma EN 13452-1). El Jerk medio máximo será 1 m/s^2 .

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- **Frenado de emergencia** (*emergency braking*)

El frenado de urgencia es el frenado que asegura una distancia de parada menor con un alto nivel de integridad.

Es un frenado no moderable que ofrece un nivel de deceleración mínimo de $1,3 \text{ m/s}^2$. El tiempo de respuesta equivalente te máximo es de 1 segundo (según definición de la norma EN 13452-1).

- **Freno de retención** (*'holding brake'*) El freno de retención es el que normalmente retiene al tren parado con pasajeros en una estación con la maneta de marcha/frenado en la posición de neutro (*coasting*). Es capaz de mantener el tren en posición bajo las siguientes condiciones:

Carga de pasaje AW2 (8 viajeros porm^2).

3,7 % de pendiente.

1 hora de tiempo.

- **Freno de estacionamiento** (*parking brake*)

El freno de estacionamiento es el que puede retener al tren permanentemente parado con una carga determinada en una pendiente determinada. Es capaz de mantener el tren en posición bajo las siguientes condiciones:

Carga de pasaje AW0 (tara).

3,7 % de pendiente.

Indefinidamente.

- **Freno de parada** (*stopping brake*)

El freno de parada es un caso especial de frenado de servicio, pero por su importancia en el control se especifica más detalladamente.

Debido a la pérdida de eficacia del freno electrodinámico (ED) a bajas velocidades y a la respuesta dinámica del freno de fricción de accionamiento neumático (EP), se hace necesaria durante la parada del tren una sustitución del primero por el segundo totalmente coordinada, de manera que no dé lugar a variaciones apreciables en la deceleración. (ED.3, 2011)

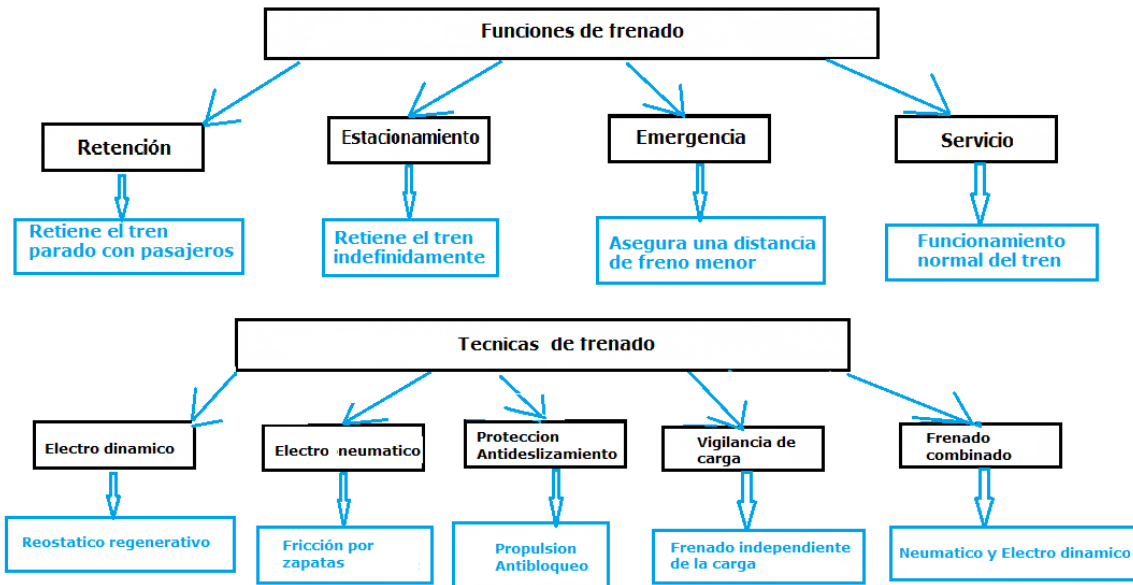


figura 7. Funciones y técnicas de frenado. Fuente: (autores, 2017)

2.10 FRENADO REGENERATIVO

En el frenado la fuerza contra electromotriz genera una corriente en sentido contrario y podemos decir que el motor se comporta como generador de energía, dicha energía puede disiparse en la resistencia de frenado o bien puede devolverse a la red, si en ese momento hay un vehículo que pueda aceptar dicha energía. Ver figura 8.

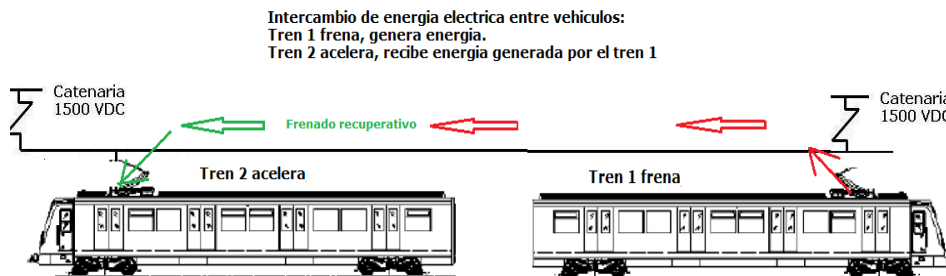


Figura 8. Situación actual de aprovechamiento frenado en el Metro de Medellín. Fuente: (autores, 2017)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Un freno regenerativo (*KERS-kinetic energy recovery system*, «sistema de recuperación de energía cinética») es un dispositivo que permite transformar parte de la energía cinética del frenado de un vehículo en energía eléctrica. Esa energía alimenta la fuente de energía del tren eléctrico directamente o en un vehículo que puede ser almacenada en una batería.

El frenado tradicional, basado en la fricción, se sigue usando junto con el regenerativo debido a que el frenado regenerativo no reduce de manera efectiva la velocidad aniveles bajos, además la cantidad de energía a disipar está limitada a la capacidad de absorción de ésta por parte del sistema de energía. Un efecto no regenerativo puede ocurrir si otro vehículo conectado a la red suministradora de energía no la consume. Por esta razón es necesario contar con un freno reostático que absorba el exceso de energía; mientras que el frenado regenerativo ya se usa en variedad de trenes, la energía se desperdicia cuando no hay un tren de aceleración cerca para aceptar la energía de un tren en desaceleración.

En general los sistemas de frenado regenerativo optimizan el consumo de energía en vehículos eléctricos, además, pueden ofrecer otras ventajas secundarias como estabilización de voltaje en el bus principal del sistema o la posibilidad de carga rápida para cierto tipo de vehículos que no se conectan a unas líneas de transmisión e.g. los trenes eléctricos sino que usan baterías. (VILLEGAS, 2014)

2.11 SUBESTACIÓN ELÉCTRICA

Una subestación eléctrica es una instalación, o conjunto de dispositivos eléctricos, que forma parte de un sistema eléctrico de potencia. Su principal función es la producción, conversión, transformación, regulación, repartición y distribución de la energía eléctrica. La subestación debe modificar y establecer los niveles de tensión de una infraestructura eléctrica, para que la energía eléctrica pueda ser transportada y distribuida. El transformador es el equipo principal de una subestación. (SIEMENS, 1998)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En el caso de Colombia, su subestación más grande es Bacatá, encargada de transformar el voltaje de 500kV a 115kV, para ser distribuido directamente al sistema eléctrico de Codensa, encargada de hacerlo llegar a sus 2.8 millones de clientes. Bacatá cuenta con seis transformadores de 150 MVA cada uno, cinco líneas de 115kV, equipos de soporte, monitoreo, seguridad y protección. (Elespectador, 2015)

2.11.1 Tipos de subestaciones

Las subestaciones eléctricas pueden ser estaciones de transformación, con uno o varios transformadores que elevan o reducen la tensión; o subestaciones de maniobra, que más que transformar la tensión lo que hacen es conectar dos o más circuitos, de transformación pura, cambio de número de fases, rectificación y subestación reversible.

- **Subestación reversible**

Una subestación de tracción es aquella subestación eléctrica que convierte la energía eléctrica desde la forma provista por la red general a unas condiciones de voltaje, frecuencia y corriente apropiada para su uso en medios de transporte como el ferrocarril (incluyéndose tranvías y medios relacionados) o trolebuses.

Por tanto, la energía regenerada en el frenado sólo puede aprovecharse por otros trenes que se encuentren en la misma sección eléctrica. La energía eléctrica que no puede ser aprovechada por otros trenes es disipada en calor y, por tanto, desaprovechada. (www.energynews.es, 2013)

2.12 TIPOS DE SUBESTACIÓN ELÉCTRICA EN EL METRO DE MEDELLÍN

El metro de Medellín cuenta con subestaciones de pasajeros SEP que alimentan las diferentes estaciones del sistema que es por donde ingresan los usuarios compuesta por seccionadores bajo carga de 13.8kV, un transformador de 13.8 kV a 110/220V para las necesidades de la estación (torniquetes, alumbrado, aire acondicionado, salas de relés cuartos técnicos etc., las hay normales o con enclavamiento).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- **Subestaciones de tracción**

Son las que alimentan los trenes, cuentan con interruptores extra rápidos para la conexión y desconexión tanto de 13.8 kV como de 1500 Vcc.

Cuentan con transformadores rectificadores de 13.8 kV a 1220 V DC, luego este voltaje pasa a un rectificador de 24 pulsos y se convierte en corriente continua donde el positivo va a la catenaria y el negativo al riel.

La alimentación de esta subestación es de Empresas públicas de Medellín EPM por medio de tres transformadores con un primario a 110 kV y un secundario a 13.8 kV de una potencia de 31.5 a 40 MVA una corriente primaria de 300 Amperios ubicado en las subestaciones de alimentación, desde allí se alimentan las subestaciones de pasajeros, subestaciones especiales y subestaciones de tracción. (electricas, 1995)

2.13 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE CORRIENTE PARA TRENES DE PASAJEROS

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ALIMENTACIÓN DE CORRIENTE

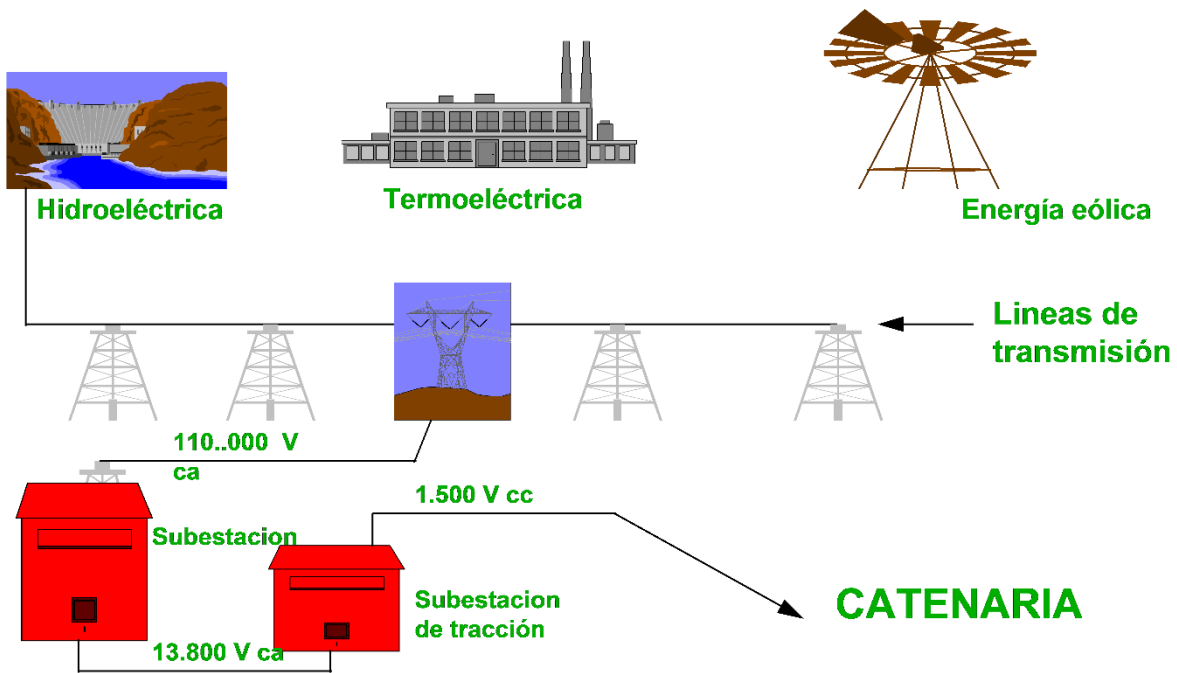


figura 9. Distribución alimentación de corriente. Fuente: (electricas, 1995)

2.13.1 El aseguramiento del servicio eléctrico de trenes

La seguridad del servicio eléctrico de trenes requiere:

- La alimentación fiable y continuada de corriente para la catenaria
- Mantener libre el gálibo, también en la zona de los pantógrafos de los vehículos
- La correcta posición del hilo de contacto en relación con la vía y
- La conservación de las instalaciones de conducción de corriente de retorno y de la puesta a tierra ferroviaria.

2.13.2 Instalaciones para el servicio eléctrico de trenes

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Las instalaciones para el servicio eléctrico de trenes son todos los equipos fijos como, por ejemplo, las subestaciones y a lo largo de las líneas, las líneas de alimentación y el equipo de catenaria.

Los trenes de pasajeros del Metro de Medellín funcionan con 1500 V corriente continua. (electricas, 1995)

2.13.3 El equipo de catenaria

Equipo de catenaria como instalación para el servicio eléctrico de trenes, pertenece la catenaria y sus componentes como mástiles, anclajes y sus fundaciones, zonas de Pórticos, zonas de cambiavías y equipamiento tensores.

Los rieles de rodadura y otros conductores de retorno conectados. (electricas, 1995)

2.13.4 Alimentación y distribución de la red de catenaria

En la operación rutinaria, todas las catenarias y líneas de alimentación están bajo 1500 Vcc, la red de catenaria se alimenta con corriente mediante un total de nueve subestaciones de tracción, ellas son:

Patio de Bello (Zamora -PBE) para el Patio y el extremo norte de la línea A-Norte del sistema Metro, Acevedo (ACE), Universidad (UNI), San Antonio (SAA) para partes de las líneas A y B Poblado (POB), Ayurá (AYU), Itagüí (ITA), Estrella (STA), Estadio (EST), San Javier (JAV). (electricas, 1995)

2.13.5 Control de las instalaciones para el servicio eléctrico de trenes

Las instalaciones para el servicio eléctrico de trenes son controladas por el Operador Técnico en el Puesto Central de Control. Él es la persona competente para todas las medidas de alimentación de corriente y, en caso de presentarse irregularidades, para la puesta en vigor de las medidas necesarias en las instalaciones (Ver Figura 10).

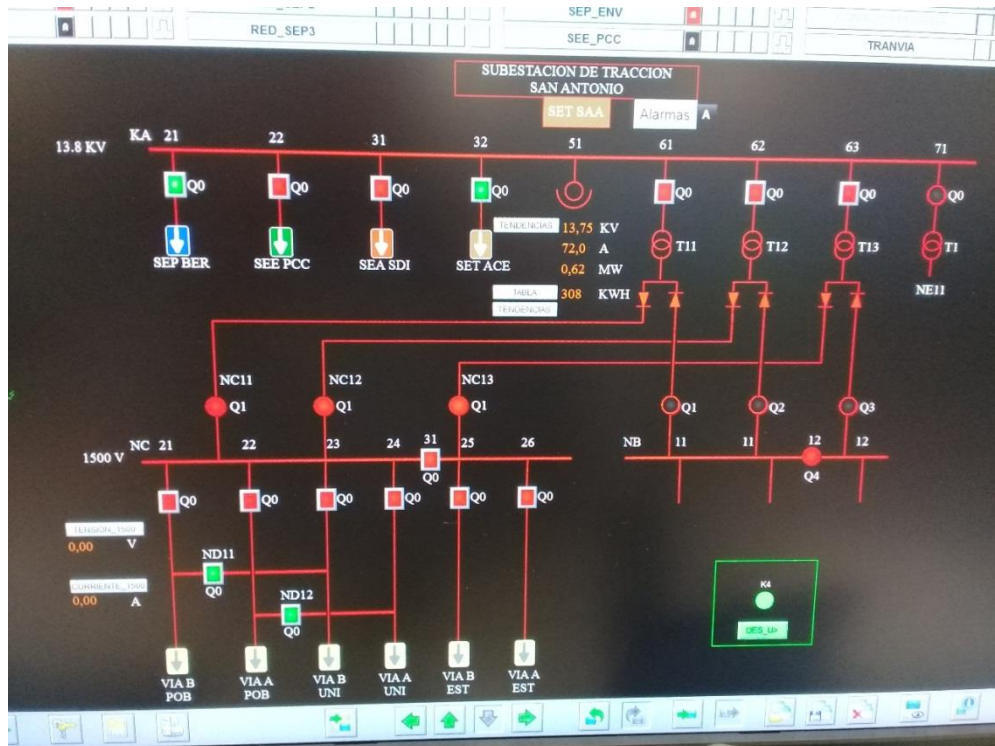


figura 10. Esquema de alimentación SET SAA. Fuente: (autores, 2017)

2.14 SOFTWARE DE SIMULACIÓN Y MODELACIÓN

La importancia de la disciplina del Modelado y la Simulación actualmente se evidencia en las tendencias de las ciencias y áreas en las cuales ella se aplica (Biología, Ecología, Economía, Ciencias Ambientales, Ingeniería, Nanotecnología, Ciencias sociales, por citar algunas), y también en las disciplinas básicas que le dan su soporte (Matemáticas, Estadística, Física y Ciencias de la Computación).

En el contexto de la ingeniería, especialmente en las dos últimas décadas, ha cobrado importancia la implementación del modelado y la simulación como una herramienta

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

indispensable y transversal para resolver problemas científicos y tecnológicos planteados desde las ingenierías de sistemas, civil, química, industrial, biomédica, mecánica y otras. Todas las disciplinas de la ingeniería -y así concluye al respecto el reporte de la *National Science Foundation* deberán incorporar los beneficios y ventajas que resultan del modelado y la simulación, especialmente en lo referente a la optimización, el control, la cuantificación de incertidumbres, el diseño de mecanismos para toma de decisiones y la respuesta a desafíos en tiempo real, para su incorporación al desarrollo en el mundo competitivo del siglo XXI. (<http://www.utadeo.edu.co>)

2.15 MATLAB

MATLAB (abreviatura de MATrix LABoratory, "laboratorio de matrices") es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para las plataformas Unix, Windows, Mac OS X y GNU/Linux.

Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos de hardware. El paquete MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones, a saber, Simulink (plataforma de simulación multidominio) y GUIDE (editor de interfaces de usuario - GUI). Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB con las cajas de herramientas (toolboxes); y las de Simulink con los paquetes de bloques (blocksets).

Es un software muy usado en universidades y centros de investigación y desarrollo. En los últimos años ha aumentado el número de prestaciones, como la de programar directamente procesadores digitales de señal o crear código VHDL. (la.mathworks.com, 2016)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.METODOLOGÍA

Para el diseño de una volante de inercia, como método alternativo para la generación y conservación energética para el sistema de tracción del Metro de Medellín, se deben considerar algunos cálculos físicos y matemáticos.

3.1 VARIABLES QUE INCIDEN EN LA ACUMULACIÓN DE ENERGÍA EN UNA VOLANTE DE INERCIA

Las variables que más inciden en la volante de inercia como acumulador de energía son: la masa (M), densidad del material de la volante (ρ), momento de inercia de la volante (I), velocidad angular (ω), posición angular (Θ), energía cinética (K).

De esta manera la energía cinética almacenada en una masa que está girando es:

$$E = \frac{1}{2} I \cdot \omega^2 \quad (1) \text{ (Norton, 1999)}$$

El momento de inercia de la volante (I) depende del radio que gira (R), la masa (M), del eje de rotación y de la constante K que depende del tipo de figura geométrica la que gira.

$$I = \frac{1}{2} MR^2 \quad (9) \text{ (Norton, 1999)}$$

La constante K varía para los diferentes tipos de sólidos que giran en torno a su eje determinado.

Momentos de inercia de diversos cuerpos

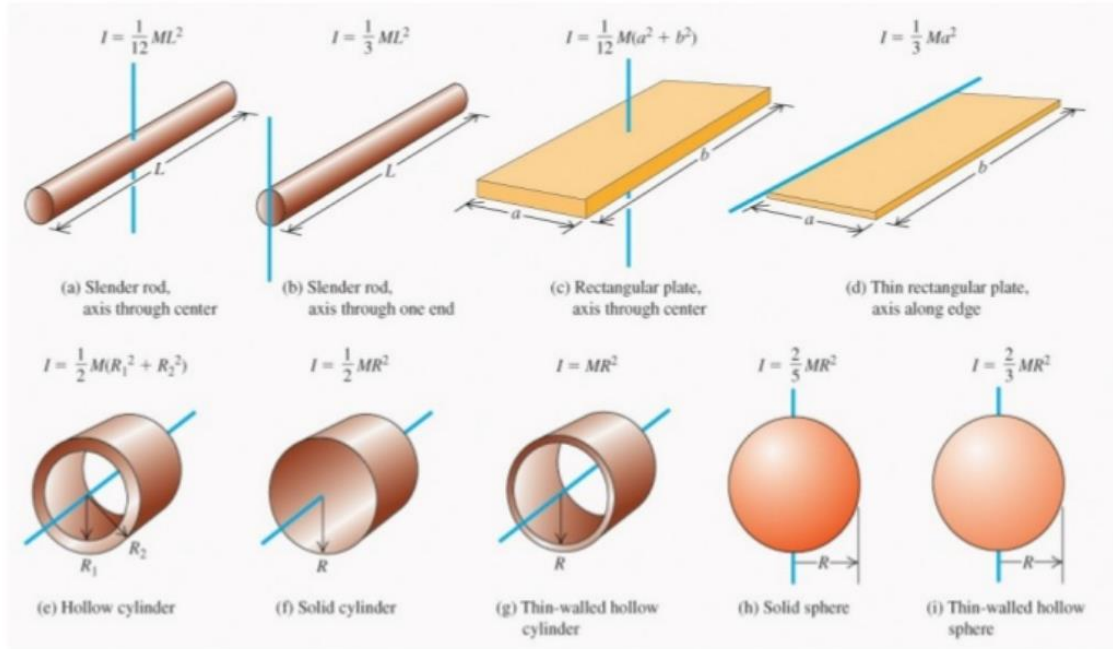


figura 11. Momento de inercia de diferentes sólidos. Fuente: (SEARS.FREEDMAN, 2004)

El momento de inercia de una distribución continua de masa de un cuerpo le confiere inercia que es la resistencia que el cuerpo opone al cambio de su momento lineal, cuando sobre una partícula aplicamos distintas fuerzas e influimos en las aceleraciones que éstas producen, donde se puede observar que existe una constante de proporcionalidad entre ambas magnitudes, la cual se llama masa inerte de la partícula, el momento de inercia de un sólido da una resistencia al cambio de su momento angular, se le puede llamar inercia a la rotación.

El momento de inercia para una distribución continua de masa se denomina de la siguiente forma:

$$I = \int r^2 dm = \int_{r_1}^{r_2} r^2 \rho(2\pi r L dr) \quad \text{Sus unidades en el S.I será } [I] = [\text{kg}\cdot\text{m}^2] \quad (10)$$

Tomará como modelo la figura de un cilindro sólido para el análisis físico matemático de una volante en general.

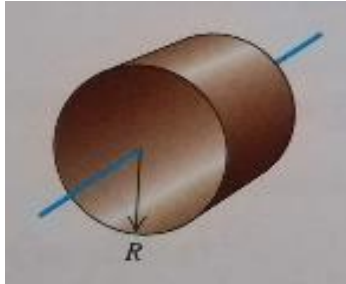


figura 12. Cilindro solido (SEARS.FREEDMAN, 2004)

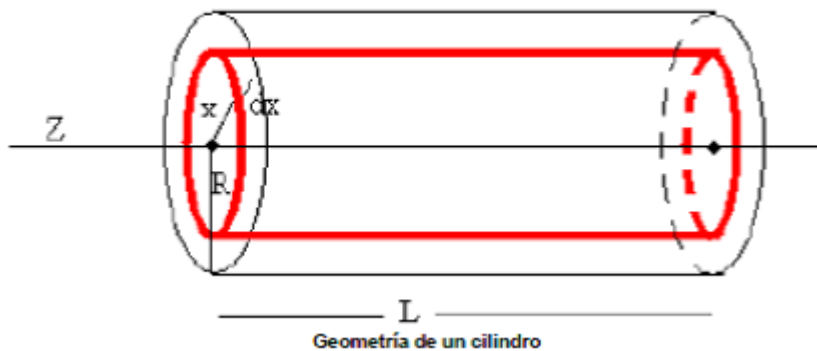


figura 13. Cilindro solido que gira sobre un eje que pasa por su centro de masa. Fuente: (SEARS.FREEDMAN, 2004)

Cuando tenemos el sólido homogéneo se debe recurrir a la densidad del material para poder realizar el cálculo del momento de inercia.

$$\rho = \frac{dm}{dv} \quad (11) \text{ (SEARS.FREEDMAN, 2004)}$$

Dado que nuestro modelo tiene su eje de simetría "Z" se puede asumir dos radios R y (x + dx). Podemos analizar la masa derivada con respecto al radio de la figura de la siguiente forma:

$$dm = 2\pi x L \rho dx$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Por estar distribuida la masa simétricamente por el eje “Z” como se muestra en la figura 13. Y además por ser sólido, se deriva la longitud con respecto a la masa;

$$dl = x^2 dm$$

Remplazando dm, se obtiene

$$dl = 2\pi L\rho x^3 dx$$

Ahora se consigue la anti derivada de I;

$$I = \int_0^R 2\pi L\rho x^3 dx = 2\pi L\rho \int_0^R x^3 dx = 2\pi L\rho \frac{R^4}{4} \quad (12) \text{ (SEARS.FREEDMAN, 2004)}$$

$$\text{Como la masa total del cilindro es: } M = \pi R^2 L\rho \quad (13) \text{ (SEARS.FREEDMAN, 2004)}$$

Remplazando ecuaciones (12) en (13) obtenemos:

$$I = \frac{1}{2} MR^2 \quad (14) \text{ (SEARS.FREEDMAN, 2004)}$$

3.1.1 Generalidades de la volante de inercia para el Metro de Medellín

Para poder analizar y conocer el valor de la potencia que consume un coche motor de un tren para vencer su inercia, se usó unos datos extraídos de un coche motor del tren por medio de un Graficador de señales eléctricas, el cual se usó en un día de operación y arrojó los siguientes datos en Tabla 5. El tren se encontraba en un 98% de su capacidad durante la muestra.

Tabla 5. Graficador en tren coche motor.

velocidad(km/h)	Voltaje	corriente	Potencia (kW)
0,73	1699,4	50,7	86,15958
1,95	1648,2	68,5	112,9017
2,99	1589,6	90,5	143,8588
3,85	1581	110,6	174,8586
5,19	1576	129	203,304

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Fuente: (autores, 2017)

El promedio de las potencias es $\sum_1^5 \text{potencia} = \frac{720.95kW}{5} = 144.19kW$. En el análisis de las generalidades de una volante para el Metro de Medellín, se deben considerar las mismas propiedades físicas y mecánicas que rigen los estudios realizados para otras aplicaciones de volantes de inercia en otros sistemas, con algunas particularidades específicas como: máxima energía almacenada (J), masa (M), tipo de material (ρ), radio (R), longitud (L), tiempo de carga y descarga (s).

Como la volante de inercia va almacenar la energía del frenado regenerativo, debe de ser capaz de almacenar la energía que le entrega el tren, como los trenes están generando energía al frenarse se tendría que:

$$\text{Energía cinética lineal es: } E_c = \frac{1}{2} MV^2 = \text{Joul}$$

La masa de una unidad a plena carga es de 200 TON y un tren de 400 TON.

$$M_{\text{total tren en operación}} = 400000\text{kg}$$

$$V_{\text{max tren}} = 80 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

$$E_c = \frac{1}{2} (400000\text{kg}) \left(\frac{80000\text{m}}{3600\text{s}} \right)^2 = 98765.4321\text{kJ} \approx 98765.4321 \text{kJ} \left(\frac{1 \text{kWh}}{3600 \text{kJ}} \right) =$$

27.43 kW, como hay más trenes en la sección eléctrica ellos aprovecharan parte de esta energía (frenado regenerativo), solo se aprovecharía el 10% de esta energía para alimentar la volante de inercia que será 2.74 kWh \approx 3kWh.

Se define la forma de la volante como un cilindro hueco donde su momento de inercia es:

$$I = \frac{1}{2} M (R_1^2 + R_2^2) [\text{kg} \cdot \text{m}^2]$$

Como lo muestra la Figura 12 dibujo (e).

Se adopta como material acero (aleación) ALUMINIO Aleación 5754 (Al Mg 3)

Con una densidad

$$\rho = 2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (\text{SEARS.FREEDMAN, 2004})$$

Con radios $R_1 = 0.25 \text{ m}$ y $R_2 = 0.75 \text{ m}$, longitud $L = 0.50 \text{ m}$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Para efectos de cálculos, se asume una posición angular bajo la ecuación (15):

A velocidad angular constante, se tiene:

$$\theta = \left(\text{numero} \frac{\text{rad}}{\text{s}^3} \right) t^3 \quad (15) \text{ (SEARS.FREEDMAN, 2004)}$$

En este orden de ideas se toma para los cálculos los siguientes valores para la ecuación (15):

numero = $3.0 \frac{\text{rad}}{\text{s}^3}$; Se toma el valor 3.0 para efectos de ensayo, donde se acomoda para los cálculos de nuestra volante de inercia.

t^3 = Tiempo de frenado regenerativo del tren al ingreso a una estación, aproximadamente 10s; tiempo de almacenamiento de energía cinética de la volante de inercia, aproximadamente 20s (tiempo de parada del tren en estación, hasta nuevamente su arranque).

Se define que:

$$1 \frac{\text{rev}}{\text{min}} = 2\pi \frac{\text{rad}}{\text{s}}; 1 \text{ rpm} = \frac{2\pi}{60} \frac{\text{rad}}{\text{s}};$$

La energía cinética rotacional de un cuerpo rígido está definida por la ecuación [1] definida como:

$$EK = \frac{1}{2} I\omega^2 [\text{Joul}] \quad (15)$$

La masa varía dependiendo de la densidad del material:

$$M = \rho\pi LR_2^2 [\text{kg}] \quad (13)$$

Para la velocidad angular se tiene:

$$\omega_{\text{med}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{d\theta}{dt} = \omega_{\text{med}} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{t_2 - t_1} \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] \quad (16) \text{ (SEARS.FREEDMAN, 2004)}$$

Se definen los valores iniciales de la volante de inercia para dar inicio con los cálculos donde estos se ajustarán y cambiarán en una hoja de Excel donde se dará con la potencia requerida para nuestro caso.

$$L = 0.50 \text{ m}$$

$$\theta = \left(3.0 \frac{\text{rad}}{\text{s}^3} \right) t^3$$

$$t_1 = 10_s$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$t_2 = 20_s$$

$$R_1 = 0.25 \text{ m}$$

$$R_2 = 0.75 \text{ m}$$

Iniciamos hallando la posición angular de la volante de inercia para t_1 ; t_2 ; respetivamente:

$$\theta_1 = \left(3.0 \frac{\text{rad}}{\text{s}^3}\right) (10_s)^3 = 3000 \text{ rad}$$

$$\theta_1 = 3000 \text{ rad} \left(\frac{360^\circ}{2\pi \text{ rad}}\right) = 171^\circ$$

$$\theta_2 = \left(3.0 \frac{\text{rad}}{\text{s}^3}\right) (20_s)^3 = 24000 \text{ rad}$$

$$\theta_2 = 24000 \text{ rad} \left(\frac{360^\circ}{2\pi \text{ rad}}\right) = 1375^\circ$$

La volante de inercia tiene un desplazamiento angular de:

$$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 = (24000 - 3000)\text{rad}$$

$$\Delta\theta = 21000 \text{ rad}$$

Por lo tanto, la velocidad angular media de la volante de inercia es:

$$\omega_{\text{med}} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{21000 \text{ rad}}{10_s} = 2100 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$\omega_{\text{med}} = \left(2100 \frac{\text{rad}}{\text{s}}\right) \left(\frac{1 \text{ rev}}{2\pi \text{ rad}}\right) \left(\frac{60_s}{1 \text{ min}}\right) = 20053.5 \frac{\text{rev}}{\text{min}}$$

También podemos saber la velocidad angular instantánea de la volante de inercia en t_1 ; t_2 ; derivando la ecuación de la posición angular.

$$\omega_z = \frac{d\theta}{dt} = \frac{d}{dt} \left[\left(3.0 \frac{\text{rad}}{\text{s}^3}\right) t^3 \right] = \left(3.0 \frac{\text{rad}}{\text{s}^3}\right) 3t^2$$

Después de derivar la ecuación $\omega_z = \frac{d\theta}{dt} = \frac{d}{dt} \left[\left(3 \frac{\text{rad}}{\text{s}^3}\right) t^3 \right]$ se halla ω_1 para $t_1 = 10_s$

$$\omega_1 = \left(3.0 \frac{\text{rad}}{\text{s}^3}\right) 3t^2 = \left(9 \frac{\text{rad}}{\text{s}^3}\right) t^2 = \left(9 \frac{\text{rad}}{\text{s}^3}\right) (10_s)^2 = 900 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$\omega_1 = \left(900 \frac{\text{rad}}{\text{s}}\right) \left(\frac{1 \text{ rev}}{2\pi \text{ rad}}\right) \left(\frac{60_s}{1 \text{ min}}\right) = 8594.3 \frac{\text{rev}}{\text{min}}$$

Ahora para ω_2 para $t_2 = 20_s$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$\omega_2 = \left(3 \frac{\text{rad}}{\text{s}^3}\right) 3t^2 = \left(9 \frac{\text{rad}}{\text{s}^3}\right) t^2 = \left(9 \frac{\text{rad}}{\text{s}^3}\right) (20_s)^2 = 3600 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$\omega_2 = \left(3600 \frac{\text{rad}}{\text{s}}\right) \left(\frac{1 \text{ rev}}{2\pi \text{ rad}}\right) \left(\frac{60_s}{1 \text{ min}}\right) = 34377.4 \frac{\text{rev}}{\text{min}}$$

Teniendo estos valores también conocemos su aceleración angular media e instantánea en t_1 ; t_2 ; para la volante de inercia.

$$\alpha_{\text{med}} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{t_2 - t_1} = \frac{(3600 - 900) \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{(20 - 10)s} = 270 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

Para calcular la aceleración angular instantánea, debemos derivar la ecuación de la velocidad angular o sacar la segunda derivada de la posición angular.

$$\alpha_{\text{med}} = \frac{d}{dt} = \frac{d\theta}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

Ahora miramos la aceleración instantánea para $t_1 = 10_s$

$$\alpha_1 = \frac{d\omega_1}{dt} = \frac{d}{dt} = \left(9 \frac{\text{rad}}{\text{s}^3}\right) t^2 = \left(9 \frac{\text{rad}}{\text{s}^3}\right) 2t = \left(18 \frac{\text{rad}}{\text{s}^3}\right) t$$

$$\alpha_1 = \left(18 \frac{\text{rad}}{\text{s}^3}\right) 10_s = 180 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

Para $t_2 = 20_s$:

$$\alpha_2 = \frac{d\omega_2}{dt} = \frac{d}{dt} = \left(9 \frac{\text{rad}}{\text{s}^3}\right) t^2 = \left(9 \frac{\text{rad}}{\text{s}^3}\right) 2t = \left(18 \frac{\text{rad}}{\text{s}^3}\right) t$$

$$\alpha_2 = \left(18 \frac{\text{rad}}{\text{s}^3}\right) 20_s = 360 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

Debemos calcular la masa de la volante de inercia donde es fundamental la densidad del material del Acero, para nuestro caso se eligió un Acero (aleación ALUMINIO Aleación 5754 (Al Mg 3)) que tiene una densidad $\rho = 2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Entonces:

$$M = \rho \pi L R_2^2 = \left(2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \pi (0.50 \text{ m})(1.0 \text{ m})^2$$

$$M = 2385.65 \text{ kg} \approx 2.3 \text{ TON}$$

Ahora podemos calcular el momento de inercia para nuestra volante de inercia la cual se modela como un cilindro hueco.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$I = \frac{1}{2}M(R_1^2 + R_2^2)$$

$$I = \frac{1}{2} (2385.65 \text{ kg})((0,25)^2 + (0.75)^2)$$

$$I = 745.51 \text{ kg. m}^2$$

Ya se tiene la información necesaria para poder calcular la energía cinética rotacional de la volante de inercia.

$$EK_v = \frac{1}{2}I\omega_{med}^2$$

$$EK_v = \frac{1}{2}(745.51 \text{ kg. m}^2) \left(2100 \frac{\text{rad}}{\text{s}}\right)^2$$

$$EK_v = 16.44 \text{ GJ}$$

Convertir esta energía cinética en potencia, realizamos la siguiente operación.

$$1\text{kWh} = 3.6\text{GJ} \text{ Donde } 16.44 \text{ GJ} \left(\frac{1\text{kWh}}{3.6\text{GJ}}\right) = 4.57 \text{ kWh}$$

En teoría con los valores de esta volante de inercia de: $M = 2385.65 \text{ kg} \approx 2.3 \text{ TON}$ de acero, con $R_1 = 0,25 \text{ m}$; $R_2 = 0.75 \text{ m}$; $L = 0.50 \text{ m}$; y una velocidad angular media $\omega_{med} = 2100 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ Alcanza a almacenar una energía cinética rotacional de $EK_v = 16.44 \text{ GJ}$. Esta es la capacidad de almacenamiento de energía de la volante de inercia, la cual está por encima del 10% de la energía generada al frenar el tren.

NOTA: como la volante en un ciclo de trabajo (recibe y entrega) la energía cinética tendrá dos momentos, uno positivo otro negativo. Por lo tanto para poder conocer la variación de la energía cinética se tiene:

$$EK_{v1} - EK_{v2} = \frac{1}{2}I(\omega_2^2 - \omega_1^2)$$

$$\Delta EK_v = \frac{1}{2}(745.51 \text{ kg. m}^2)((3600)^2 - (900)^2) \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$\Delta EK_v = 45,29 \text{ GJ}$$

Estos cálculos están registrados y verificados en las tablas 6 y 7; donde se tienen cada uno de las variables físicas.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Tabla 6. Valores estáticos de la volante de inercia

Datos estáticos	Valor	Unidades
Longitud	0,50	m
Tiempo_1(frenado regenerativo)	10,00	s
Tiempo_2 (Inicio marcha tren)	20,00	s
Densidad Acero (aleación)	2700,00	$\frac{kg}{m^3}$
Radio_1	0,25	m
Radio_2	0,75	m
Posición Angular (θ)	3,00	rad
1kWh	3,60	GJ

Fuente: (autores, 2017)

Tabla 7. Resultado dinámicos de energía de la volante de inercia

Datos Dinámicos	Valor	Unidades
Posición Angular_1 (θ)	3000,00	rad
Posición Angular_2 (θ)	24000,00	rad
Aceleración Angular media (α)	270,00	$\frac{rad}{s^2}$
Aceleración Angular_1 (α)	180,00	$\frac{rad}{s^2}$
Aceleración Angular_2 (α)	360,00	$\frac{rad}{s^2}$
Velocidad Angular_1 (ω)	900,00	$\frac{rad}{s}$
Velocidad Angular_2 (ω)	3600,00	$\frac{rad}{s}$
Velocidad Angular media (ω)	2100,00	$\frac{rad}{s}$
Momento Inercia (I)	745,51	Kg.m ²

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Energía Cinética (κ)	16,44	GJ
Potencia (P)	4,57	kWh
masa (M)	2385,65	kg
Variación Energía Cinética (ΔK)	45,29	GJ
costo 293,17 \$/kWh	1338,69	(\$)

Fuente: (autores, 2017)

3.2 Determinar las condiciones de aplicación de sistemas de recuperación de energía en el sistema de tracción del metro de Medellín.

En el Metro de Medellín el equipo eléctrico está diseñado para trabajar con corriente continua de valor comprendido entre + 1000 V. y + 1800 V. (siendo el valor nominal de funcionamiento de + 1500 V) La tensión máxima no permanente admisible es de 1950Vdc durante 5 minutos. En relación a las sobretensiones, el equipo se ha diseñado de acuerdo al anexo A de EN50163 y la norma UIC-600-OR.

Los equipos de tracción son reversibles pudiéndose realizar un frenado regenerativo devolviendo la energía cinética en energía eléctrica aprovechando esta energía en freno electrodinámico del mismo vehículo o devolviendo a la red de catenaria si esta es receptiva (con devolución de energía a la red) o reostático, con prioridad al frenado regenerativo de forma que se obtenga la máxima recuperación de energía. Sólo en caso de que la red no sea receptiva se procederá a realizar un frenado eléctrico reostático.

La conmutación entre frenado eléctrico regenerativo y reostático se realiza de forma automática sin influencia cinemática alguna en cualquier momento de la fase de frenado. Cuando la catenaria no puede absorber más energía (catenaria no receptiva), la tensión de bus comienza a aumentar. A partir de un determinado valor, en torno a 1800V, se activa el freno reostático, enviando la energía generada por los motores a las resistencias de freno. Una vez la tensión de bus se reduce y entra en los límites establecido se da paso de nuevo al freno regenerativo.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.2.1 Consumo actual de Energía eléctrica de los trenes en el Metro de Medellín

El Metro de Medellín por ser un consumidor mayorista no regulado, tiene unas tarifas de cobro por consumo especiales de mutuo acuerdo y revisadas por la CREG y supervisado por el ministerio de minas y energía. (www.grec.gov.co, 2009)

Tiene ciertos privilegios en cuanto a la calidad y prioridad en la prestación del servicio de energía eléctrica frente a otras entidades consumidoras del sector empresarial, hospitalario y comercial.

Cada mes varía el costo del kWh, ya que está regulado un tope máximo y un mínimo para el año, por lo tanto cada mes se mueve el costo en ese rango. Para el mes de octubre, valor que se tomó para este estudio del trabajo de grado es de $293.17 \frac{\$}{\text{kWh}}$.

El Metro cuenta con tres grandes subestaciones Alimentadoras de energía eléctrica ZAM (Zamora) - SDI (sandiego) – ENV (envigado) por medio de tres transformadores con un primario a 110 KV y un secundario a 13.8 KV de una potencia de 31.5 a 40 MVA una corriente primaria de 300 Amperios, están conectadas y alimentadas directamente por EPM. La interconexión de las tres subestaciones está realizada en anillo, de forma que garantice siempre la conexión eléctrica para la prestación del servicio comercial, como se visualiza en la figura 16.

Para tener un control y administración del consumo y de la energía entregada por el proveedor (EPM), se tiene medidores digitales en las subestaciones que monitorean en tiempo real el consumo y suministro de la energía eléctrica, estos equipos están intercomunicados y enlazados con EPM, en las SET se tienen también equipos de monitoreo y de control pero solo esta información esta supervisada por PCC desde el puesto de control

del operador técnico. La información capturada de cada una de las subestaciones SET está administrada por el SGT, es una aplicación para la supervisión y gestión del tráfico férreo.

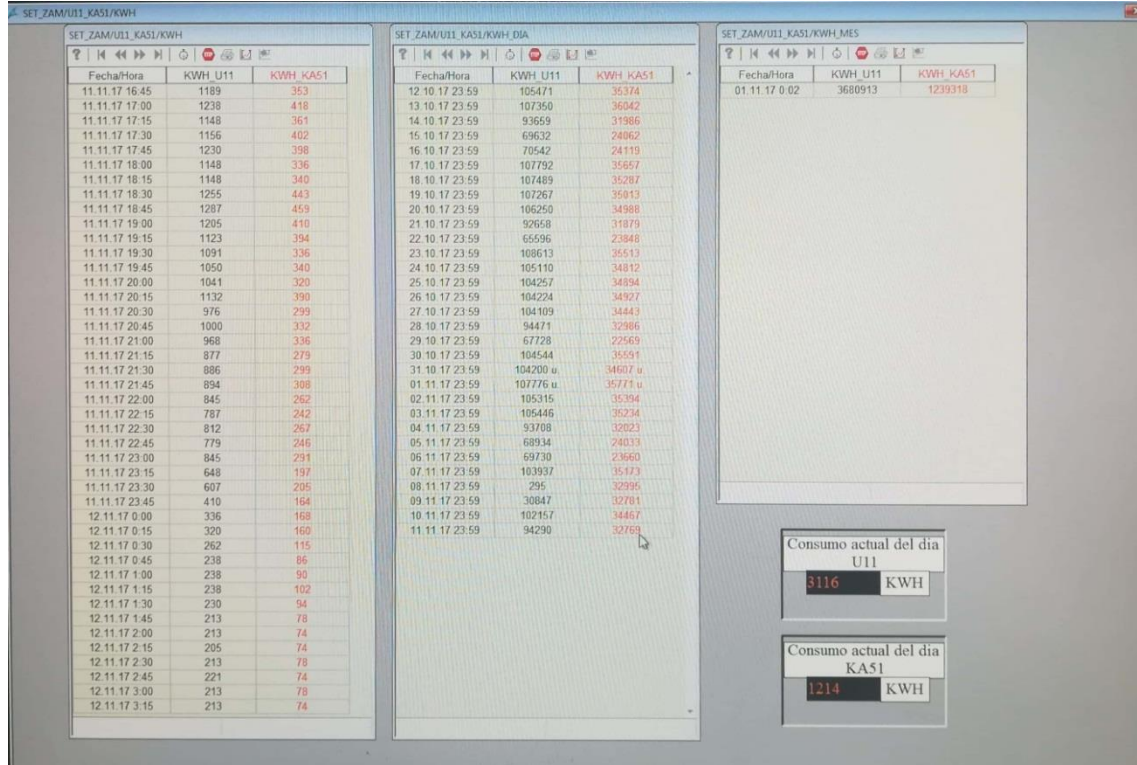


figura 14 . Consumo detallado, cada 15 minutos en kWh. Fuente: (autores, 2017)

En esta figura14. Se evidencia la captura del consumo de potencia de cada subestación SET donde el dato que conviene es el de color rojo que es del transformador que alimenta el barraje de la línea de tracción. Se tiene información diaria cada 15 minutos columnas lado izquierdo o el total del mes columna lado derecho.

En el mes de octubre, el costo por consumo es: $1239318 \text{ kWh} \times 293.17 \frac{\$}{\text{kWh}} = \$363'330.858,06$ solo de SET ZAM.

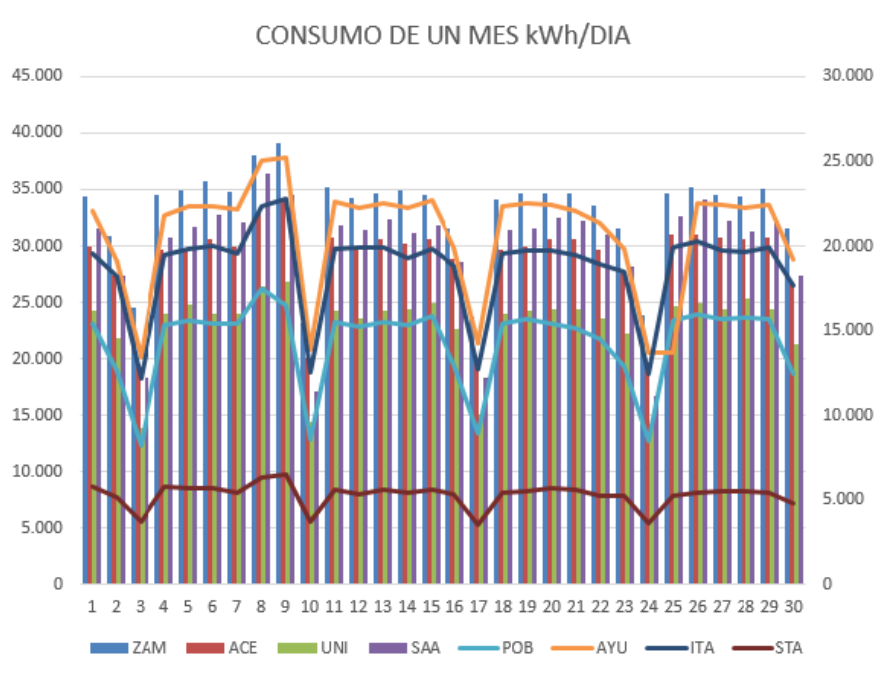


figura 15 . Consumo diario en kWh de cada SET. Fuente: (autores, 2017)

En esta figura 15 se visualiza el consumo diario de cada subestación donde se puede observar la subestación ZAM con un alto consumo ya que tiene más secciones de tracción asociadas, en una sección eléctrica puede haber varios trenes simultáneamente, por esto se refleja este nivel de consumo alto.

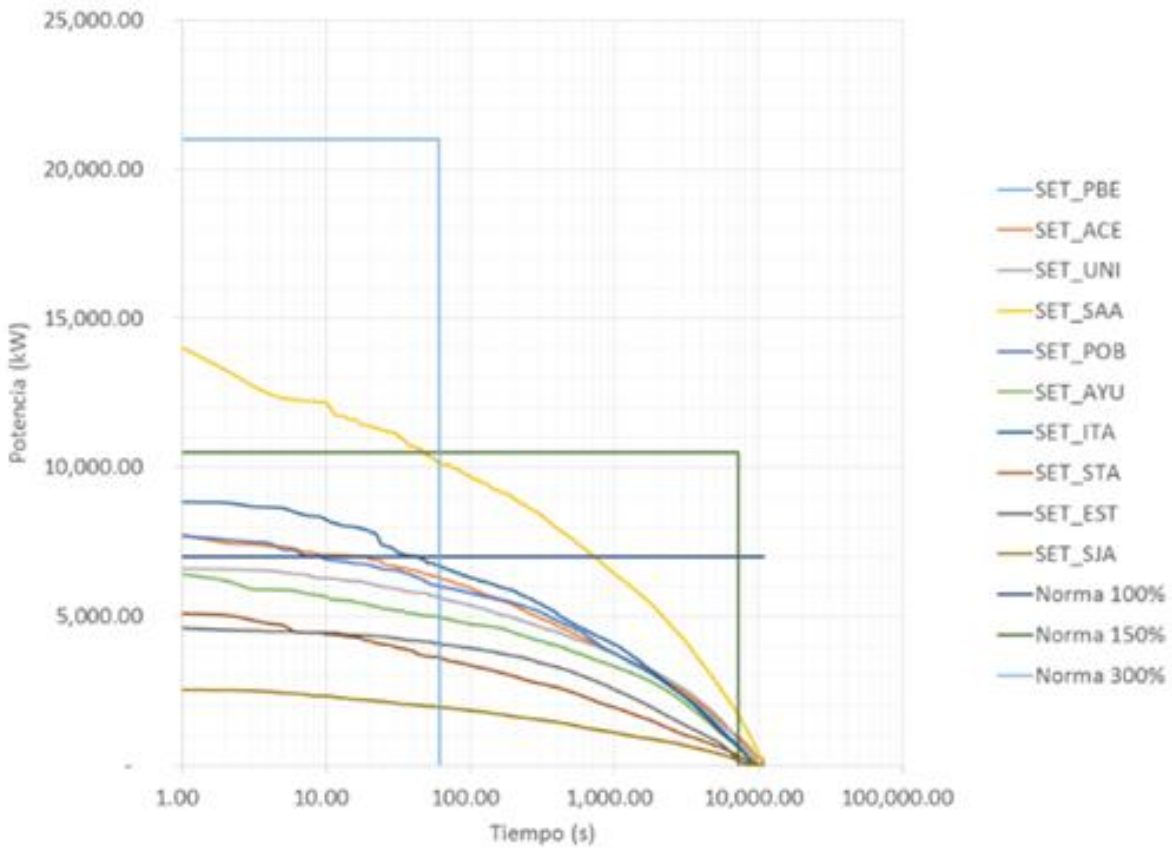


figura 16. Curvas de demanda de potencia para las SET medidas en sitio. Fuente: (autores, 2017)

Como se puede evidenciar en la figura 16, por su valor elevado atípico, la SET de San Antonio (curva amarilla) considera tanto la carga en línea A como en línea B (tres grupos de rectificadores).

3.2.2. Capacidad de carga de energía eléctrica en la subestación de tracción SET

La empresa Metro de Medellín tiene en su plan maestro al 2030, busca tener una flota de trenes amplia, que pueda prestar servicio comercial cada 2.5s, esto con lleva que la carga de las subestaciones aumente gradualmente al ingresar más trenes a circular. Es por eso que se piensan en repotenciar las subestaciones SET, por que actualmente están muy cerca de su valor nominal, dos grupos rectificadores de 3.8 MVA para un total por SET de 7.6 MVA.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En este orden de ideas, también está contemplado en el plan maestro ampliar la línea A hacia el norte con dos estaciones más y un retorno, el costo de repotenciar la SET ZAM o hacer una nueva subestación SET en NIQ sería un costo muy alto, la volante de inercia podría suplir en gran parte este incremento de potencia y minimizar los picos de voltaje en las líneas de alimentación.

3.2.3 Aprovechamiento actual de la energía eléctrica generada en el frenado regenerativo

La preocupación por el medio ambiente y las políticas de sostenibilidad empresarial hacen que existan avances en la reducción del consumo energético abordando diferentes puntos de vista como es mejoras en la aerodinámica, reducción de la masa de los vehículos, uso de los servicios auxiliares, diferentes prestaciones de servicio, uso de diversos horarios, estudios en nuevos trazados de la línea ferroviaria y desarrollos importantes asociados a la devolución de energía a la red durante el proceso de frenado regenerativo, entre otros.

Durante el proceso de frenado, la energía cinética es convertida en energía eléctrica y utilizada principalmente para el frenado eléctrico de estos vehículos, si no, es enviada a la atmosfera mediante resistencias embarcadas de disipación.

Los sistemas de tracción actual de los vehículos eléctricos ferroviarios son muy eficientes en comparación con otros sistemas de transporte y esta energía eléctrica generada en el proceso de frenado es devuelta a la red y consumida por parte de otro tren que se encuentre en el mismo circuito eléctrico y que este en el proceso de marcha o tracción, reduciendo notablemente el consumo eléctrico de estos vehículos.

En la actualidad las volantes de inercia, ultra capacitores, subestaciones reversibles, son técnicas muy empleadas para la recuperación y aprovechamiento de esta energía, han estado en continuo desarrollo, son combinaciones ecológicas y económicas por que reducen el consumo de energía y la emisión de CO₂, estabilizan la red de catenaria y reduce costos de mantenimiento.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Estos sistemas son empleados en la fase de propulsión, como estabilizadores de red, para los momentos en que hay una demanda extra de energía eléctrica, cuando hay caídas de tensión eléctrica y para permitir recorrer tramos cortos sin catenaria.

3.2.4 Ahorro de energía generado por la volante de inercia para el Metro de Medellín

El Metro de Medellín implementa una variedad de horarios de explotación de los trenes donde buscan que los usuarios tengan disponibilidad de abordar trenes en un intervalo de tiempo mínimo entre cada paso de tren por una estación.

Cada horario tiene un nombre específico y un intervalo de tiempo con una cantidad de trenes rodando por toda la línea A y B del sistema Metro.

Como ejercicio tomamos el horario vigente a la fecha, horario Cristina V.2 de lunes a viernes en línea A, con un costo a de kWh de $293.17 \frac{\$}{\text{kWh}}$ el cual está conformado de la siguiente forma:

- Hora pico en la mañana va desde las 05:00 horas hasta las 08:00 horas con 28 trenes de 6 coches cada uno y un intervalo de tiempo de 3 min.
- Hora valle en la mañana va desde las 08:00 horas hasta las 15:09 horas con 15 trenes de 6 coches cada uno y un intervalo de tiempo de 5:45 min.
- Hora pico en la tarde va desde las 15:09 horas hasta las 20:15 horas con 28 trenes de 6 coches cada uno y un intervalo de tiempo de 3 min.
- Hora valle en la noche va desde las 20:15 horas hasta las 23:30 horas con 15 trenes de 6 coches cada uno y un intervalo de tiempo de 8 min.

De esta forma se puede garantizar que el usuario perciba un buen servicio desde que no existan eventualidades técnicas, externas y propias.

El consumo de energía eléctrica de un coche motor en un tren en un punto de parada para vencer su inercia y poder dar inicio de marcha es de 144.19 kWh, potencia que es suministrada desde la subestación de tracción (SET ZAM – SET ACE – SET UNI – SET SAA – SET POB – SET AYU- SET ITA – SET STA) ver figura 15.

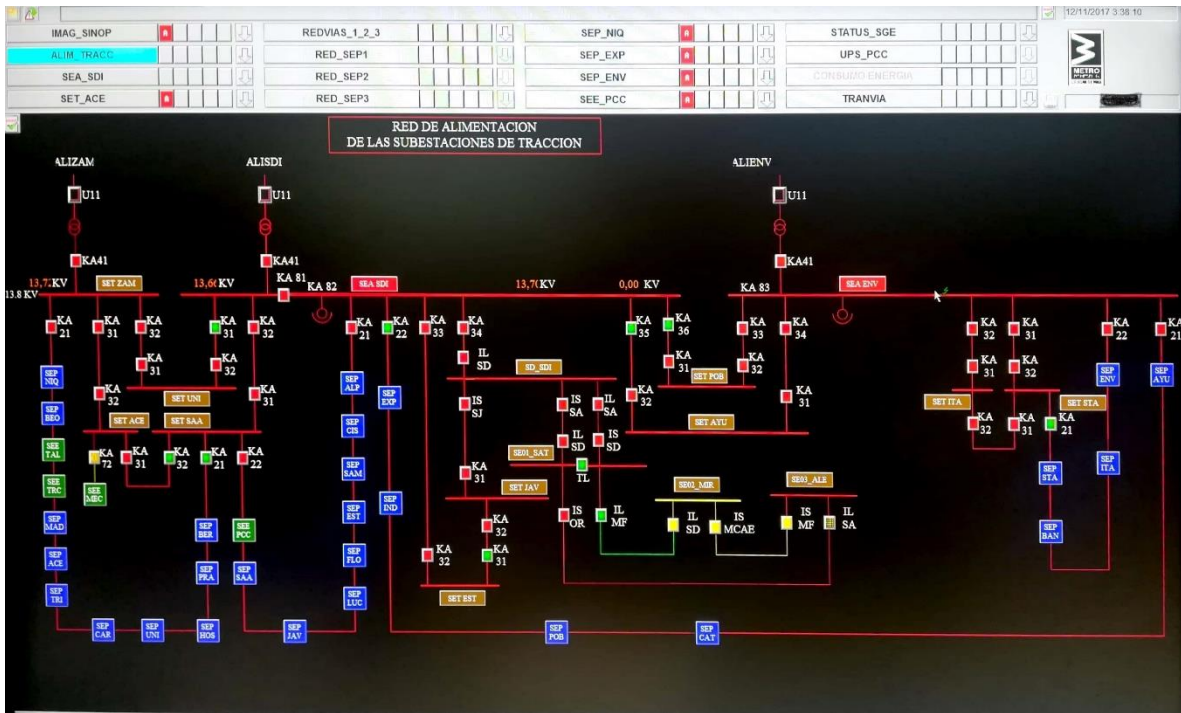


figura 17 . Diagrama de alimentación de las SET en el sistema de gestión y tráfico SGT del Metro de Medellín. Fuente: (autores, 2017)

Ahora realizaremos el cálculo del aporte de la volante de inercia con un 10% de la energía kWh para el suministro en la red para dar marcha los trenes en los puntos de paradas de las estaciones con un valor $293.17 \frac{\$}{\text{kWh}}$ a tarifa de mes de Octubre del 2017 y tomando una potencia mínima del frenado generativo de 3 kWh.

- **Analizando el consumo por horario Cristina V.2 hora pico mañana.**

En las horas pico un tren está rodando por 3 horas aproximadamente donde:

$$3 \text{ horas} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hora}} = 180 \text{ min} \rightarrow \frac{180 \text{ min}}{3 \text{ min}} = 60 \text{ veces}$$

Cantidad de veces que llega un tren las 21 estación en 3 horas, la línea A, miramos el consumo de ese tren en kWh y su respectivo costo:

$$60 \times 3 \text{ kWh} = 180 \text{ kWh} \rightarrow 180 \text{ kWh} \times 293.17 \frac{\$}{\text{kWh}} = \$52.770,6$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Esto significa que el consumo de ese tren para las 60 veces que inicia marcha en una estación cuesta \$52770.6, pero recordemos que en hora pico son 28 trenes que están circulando, entonces:

$$\$52770.6 \times 28 \text{ trenes} = \$1'477.576,8$$

Este es el costo del consumo de los 28 trenes con una frecuencia de 3 minutos en el horario Cristina V.2

- **También se considera pertinente que esta hora pico se repite en las horas de la tarde, con los mismos factores analizar con la salvedad del tiempo, así para obtener un costo total de hora pico-día**

$$5 \text{ horas} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hora}} = 300 \text{ min} \rightarrow \frac{300 \text{ min}}{3 \text{ min}} = 100 \text{ veces}$$

Cantidad de veces que recorre un tren las 21 estación en 7 horas, la línea A, miramos el consumo de ese tren en kWh y su respetivo costo:

$$100 \times 3 \text{ kWh} = 300 \text{ kWh} \rightarrow 300 \text{ kWh} \times 293.17 \frac{\$}{\text{kWh}} = \$87.951$$

Esto significa que el consumo de ese tren para las 140 veces que inicia marcha en una estación cuesta \$87.951, pero recordemos que en hora pico son 28 trenes que están circulando, entonces:

$$\$87.951 \times 28 \text{ trenes} = \$2'462.628$$

Este es el costo del consumo de los 28 trenes con una frecuencia de 3 minutos en el horario Cristina V.2

Costo total de hora pico – día es:

$$\begin{aligned} \text{costo hora pico mañana} + \text{costo hora pico tarde} &= \text{costo total} \\ \$1'477.576,8 + \$2'462.628 &= \$3'940.204,8 \end{aligned}$$

- **Ahora miremos el mismo ejercicio, pero en hora valle.**

En las horas valle un tren está rodando por 7 horas aproximadamente donde:

$$7 \text{ horas} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hora}} = 420 \text{ min} \rightarrow \frac{420 \text{ min}}{5.45 \text{ min}} = 77 \text{ veces}$$

Cantidad de veces que recorre un tren las 21 estación en 7 horas, la línea A, miramos el consumo de ese tren en kWh y su respetivo costo:

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$77 \times 3 \text{ kWh} = 231 \text{ kWh} \rightarrow 231 \text{ kWh} \times 293.17 \frac{\$}{\text{kWh}} = \$67.722,27$$

Esto significa que el consumo de ese tren para las 77 veces que inicia marcha en una estación cuesta \$67.722,27, pero recordemos que en hora valle son 15 trenes que están circulando, entonces:

$$\$67.722,27 \times 15 \text{ trenes} = \$1'015.834,05$$

Este es el costo del consumo de los 15 trenes con una frecuencia de 5.45 minutos en el horario Cristina V.2

- **También se considera pertinente considerar que esta hora valle se repite en las horas de la tarde, con los mismos factores analizar con la salvedad del tiempo, así para obtener un costo total de hora valle-día**

En las horas valle un tren está rodando por 3.5 horas aproximadamente donde:

$$3.25 \text{ horas} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hora}} = 195 \text{ min} \rightarrow \frac{195 \text{ min}}{8 \text{ min}} = 24 \text{ veces}$$

Cantidad de veces que recorre un tren las 21 estación en 3.5 horas, la línea A, miramos el consumo de ese tren en kWh y su respetivo costo:

$$24 \times 3 \text{ kWh} = 72 \text{ kWh} \rightarrow 72 \text{ kWh} \times 293.17 \frac{\$}{\text{kWh}} = \$21.987,75$$

Esto significa que el consumo de ese tren para las 26 veces que inicia marcha en una estación cuesta \$21.987,75, pero recordemos que en hora valle son 15 trenes que están circulando, entonces:

$$\$21.987,75 \times 15 \text{ trenes} = \$329.816,25$$

Este es el costo del consumo de los 15 trenes con una frecuencia de 8 minutos en el horario Cristina V.2

- **Costo total de hora valle – día es:**

$$\text{costo hora valle mañana} + \text{costo hora valle tarde} = \text{costo total}$$

$$\$1'015.834,05 + \$329.816,25 = \$1'345.650,3$$

Como este horario es de lunes a viernes se tiene un nuevo costo de consumo de energía:

- **Costo semana de hora pico:**

$$5 \times \$3'940.204,8 = \$19'701.024 \text{ Valor de la semana}$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- **Costo semana de hora valle:**

$$5 \times \$1'345.650,3 = \$6'728.251,5 \text{ Valor de la semana}$$

Ahora si podemos ponderar un valor mensual y anual del consumo de energía eléctrica de los trenes en cada punto de parada de las estaciones.

- **Costo mensual de hora pico;**

$$4 \text{ semanas} \times \text{costo semana hora pico}$$

$$4 \times \$19'701.024 = \$78'804.096$$

- **Costo mensual de hora valle;**

$$4 \text{ semanas} \times \text{costo semana hora valle}$$

$$4 \times \$6'728.251,5 = \$26'913.006$$

En resumen se tiene un costo total del mes de $\$78'804.096 + \$26'913.006 = \$105'717.102$; donde este valor es ahorrado con la volante, se dejaría de pagar al proveedor de energía eléctrica.

Se debe tener en cuenta que este valor de $\$105'717.102$; es por las 8 subestaciones SET donde el valor aproximado por SET es: $\frac{105'717.102}{8 \text{ SET}} = \$13'214.637,75$; que equivale a 45075 kWh, este es el ahorro real por SET en un mes con horario Cristina V.2

3.3 ESTABLECER EL ESTADO TECNOLÓGICO ACTUAL DE LA VOLANTE DE INERCIA COMO ACUMULADOR DE ENERGÍA PARA EL SISTEMA FERROVIARIO

En la actualidad hay muchas investigaciones en la búsqueda de aplicaciones de las volantes de inercia; a nivel industrial ya existen muchas compañías que trabajan en el aprovechamiento de la energía cinética generada por los trenes en el momento de frenar, esta energía se puede utilizar en el momento del arranque del tren.

Los ferrocarriles eléctricos que usan un sistema de freno regenerativo, la energía eléctrica extraída del frenado alimenta nuevamente las líneas de potencia; con los nuevos diseños

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

de volantes de inercia como acumulador de energía, se logran mayores rendimientos en tales fines.

3.3.1 Aplicación de la volante de inercia

En la actualidad en el tren de Madrid desarrolla proyectos con los frenos regenerativos KERS (*kinetic energy recovery system*), estos se basan en el principio del motor eléctrico que puede utilizarse como generador eléctrico, el motor eléctrico de tracción se reconecta como generador durante el frenado y la alimentación del motor se convierte en suministrador de energía eléctrica, dicha energía se acumulada al final del circuito mediante una volante de inercia posibilitando devolver esta energía a la red o a otro tren, es decir, absorber la energía de frenado de un vehículo, de modo que se reutilice posteriormente en su aceleración (KERS). (Lafoz, 2010)

También las volantes de inercia se usan como dispositivos para suavizar el funcionamiento de instalaciones generadores de energía eléctrica mediante energía eólica y energía fotovoltaica, así como diversas aplicaciones eléctricas industriales.

La figura 18 muestra el sistema de freno regenerativo en ingles llamado KERS (Kinetic Energy Recovery System) es un sistema que permite reducir la velocidad transformando la energía cinética en eléctrica en los automóviles. En el año 2009 el sistema kers fue implementado en la fórmula 1, este sistema aprovecha la energía cinética que se desperdicia en forma de calor en el momento de accionarse el freno disco del vehículo, la acumulan en una volante de inercia y luego la transmiten a las ruedas traseras con una potencia de 80 C.V. por un tiempo de 7 segundos en el momento en que el piloto lo decida.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



figura 18. Muestra el sistema Kers en automóvil de la fórmula 1. Fuente: (Gutiérrez-Benjumea, 2017)

En el año 2011 fue puesta en funcionamiento una planta de almacenamiento de energía en Norteamérica con una capacidad de 20 MW y con un tiempo de respuesta de 4 segundos, esta planta funciona con 200 volantes de inercia de alta velocidad y es de las más grandes de este tipo, le pertenece a la empresa Stephentown de Beacon Poder; esta fue creada para regular la frecuencia y ofrecer estabilidad a la red eléctrica de Nueva York donde no consume combustibles fósiles ni emite emisiones de contaminantes. De igual forma en el 2014 un proyecto liderado por la empresa Endesa en las islas canarias donde integraron tres tecnologías de almacenamiento de energía (baterías ion-Li, ultra condensadores y volantes de inercia) han dado muy buenos resultados y han demostrado que es indispensable para sostener un sistema eléctrico estable y sostenible con el medio ambiente, la utilización de dichas tecnologías implicando muchos beneficios para los gobiernos y empresas.

También existe un proyecto que se está desarrollado desde el 2012 por un consorcio de instituciones y empresas, universidad de Málaga, universidad de Sevilla, instituto Andaluz de tecnología, Green Power Tech Isofoton, Affima Energy, MP sistemas y MP productividad donde Adif (El Administrador de Infraestructuras Ferroviarias es una entidad pública empresarial española dependiente del Ministerio de Fomento que tiene como objetivo la

construcción de líneas de ferrocarril y la gestión de su explotación) es el líder donde buscan integrar una serie de sistemas auxiliares de apoyo basado en energía renovables mediante el aprovechamiento de la energía generada al frenar los trenes a través de postes de recarga para vehículos eléctricos conectados a la red ferroviaria llamado FERROLINERA. (energía 12, 2014).

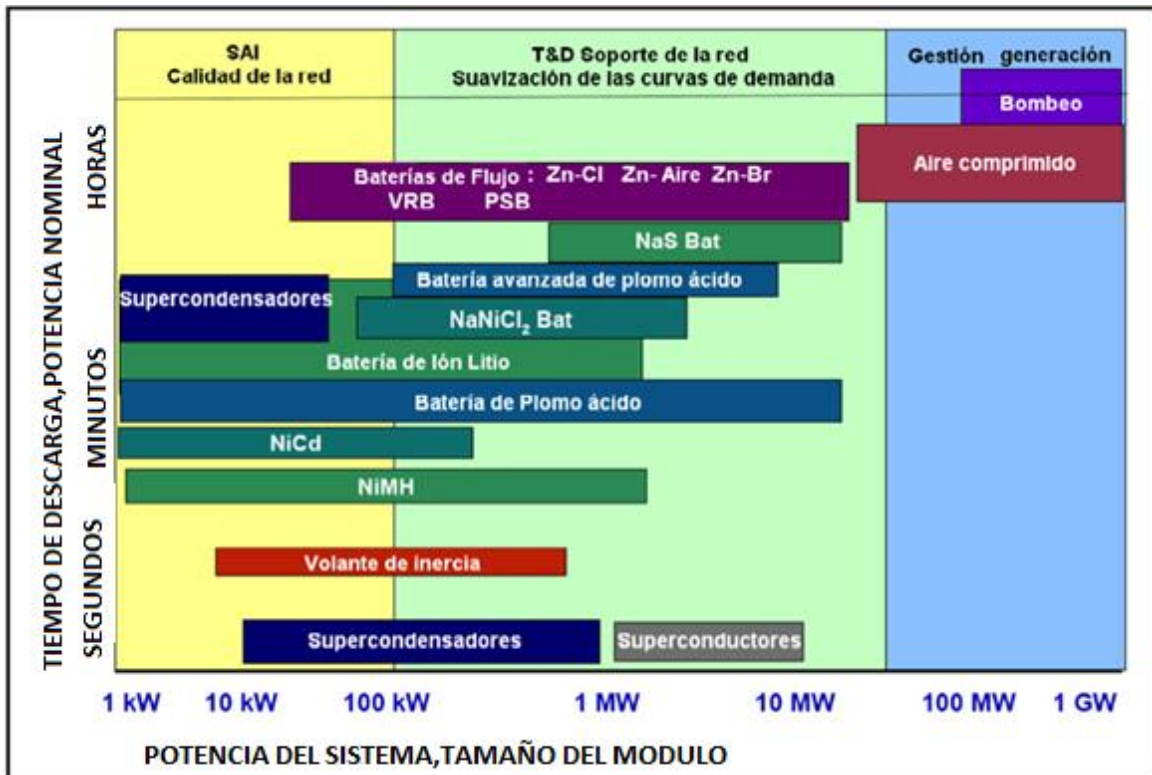


figura 19 . Viabilidad de carga y descarga en los tipos de acumuladores. Fuente: (www.pistonudos.com, 2015)

3.3.2 Antigüedad y utilización de la volante de inercia

Según reportes arqueológicos, no existe un precedente de quien la invento, pero la tecnología Flywheel (volante de inercia) por los años 3500 A.C de antigüedad, donde se utilizaban en los tornos de los alfareros y en husos para hilar.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En la revolución industrial, James Watt contribuyó al desarrollo de la volante de inercia con la máquina de vapor y James Pickard la utilizó combinando con una manivela la forma de transformar el movimiento alternativo en movimiento rotativo.

Ya en 1950 se empezó a conocer el concepto de vehículos con acumuladores de energía cinética mediante una volante de inercia y desarrollado por Oerlikon y fueron creados buscando una alternativa a los autobuses que utilizaban baterías eléctricas los Gyrobuses.

Uno de los grandes problemas de estos Gyrobuses es que necesitaban de volantes de 3 toneladas de peso y poca autonomía donde debían conectarse a unos postes eléctricos cada 5 Km para poderse recargar.

Ya en la actualidad existen modernas soluciones de levitación magnética para evitar el rozamiento y con materiales como la fibra de carbón donde han reinventado la rueda y así posibilitando el mejoramiento de la utilización de la volante de inercia, y así se permiten velocidades de 50.000r.p.m hasta 175.000 ciclos completos de carga y descarga. A nivel mundial se registran 52 proyectos en funcionamiento con capacidad de 972 MW.

3.4 DETERMINAR LAS CONDICIONES TÉCNICO – ECONÓMICAS PARA HACER VIABLE LA IMPLEMENTACION DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE VOLANTES DE INERCIA PARA EL METRO DE MEDELLIN

Las grandes aplicaciones que tiene las volantes de inercia en cuanto a respaldo, libre de mantenimiento, estabilización de la red eléctrica, y vida útil de funcionamiento son las bondades que tienen estos sistemas, las ponen en los altos escalafones como opción para sistemas de almacenamiento de energía. Su gran eficiencia en la rapidez de almacenar grandes cantidades de energía rotacional en tiempo muy corto y su capacidad de entregar esa energía rotacional acoplada a un motor-generador de forma continua y a baja velocidad. Hace que su rendimiento sea óptimo frente a otros sistemas o elementos de almacenamiento de energía como son las baterías secas, ultra capacitores.

Para comparar los acumuladores cinéticos con otros sistemas de almacenamiento se utilizan los conceptos de densidad de energía y densidad de potencia para expresar la capacidad de almacenar y de intercambiar energía por unidad de masa del acumulador. (Ver figura 20).

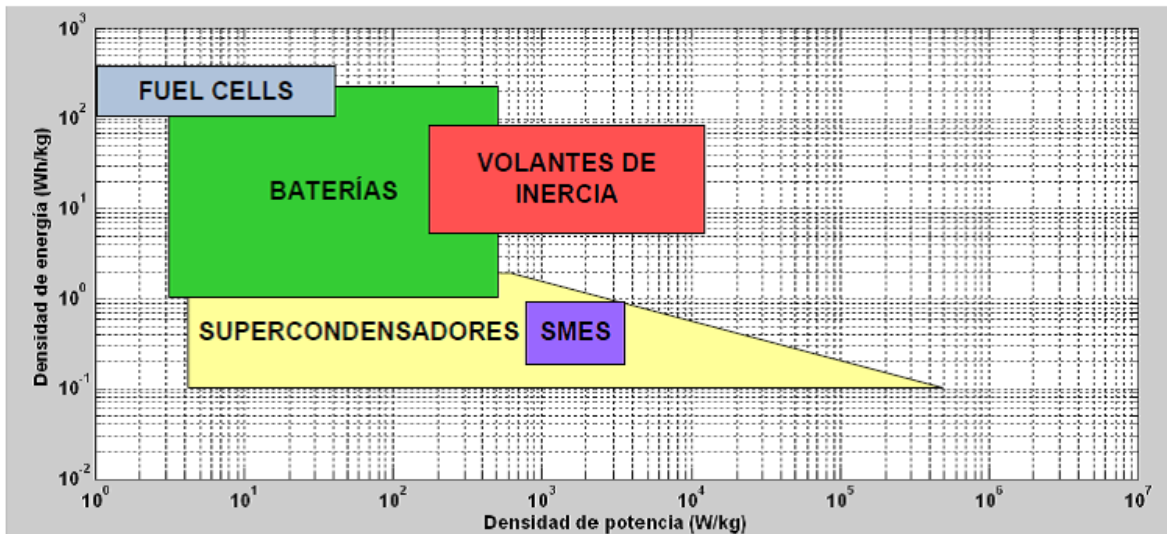


figura 20. Comparación de la densidad de potencia en función de la densidad de energía entre acumuladores de energía. Fuente: (Lafoz, 2010)

En la figura 20 se observa que la densidad de potencia en los volantes de inercia es muy elevada comparada con los diversos tipos de baterías químicas, incluso con los súper condensadores, almacenamiento magnético súper conductor (SMES). Por lo tanto, la principal característica de las volantes de inercia es su alta densidad de potencia.

La figura 20 se comparan las volantes de inercia con los sistemas más tradicionales pero existen otros sistemas alternativos menos convencionales como los ultra capacitores los cuales tienen el mismo principio de la volante de inercia pero funciona como una especie de resorte eléctrico con los electrones, estos se comprimen y se almacena una energía potencial eléctrica y luego se liberan entregando esa energía. Estos ultra capacitores se analizarán con la volante más adelante.

El diseño o fabricación tiene un costo relativamente alto frente a otros sistemas de almacenamiento ya mencionados, pero en los estudios previos a este proyecto se pudo

verificar que estas volantes de inercia tienen una vida útil de 20 años de máximo trabajo continuo, tiempo que sirve para librar la inversión, ya para nuestro caso fabricar una volante de inercia se tendría el ahorro inicial en la materia prima, el acero, dado que se usaria las ruedas y los rieles que se dan de baja por vida útil, estos elementos se funden y se fabrica la volante de inercia.

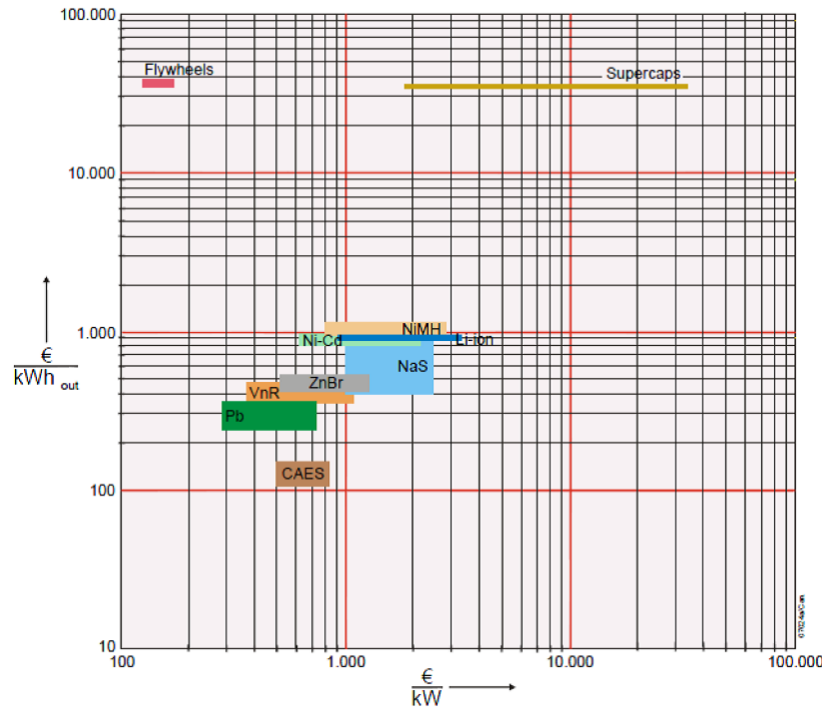


figura 21. Costos específicos de sistemas de almacenamiento de energía. Fuente: (Kulkarni, 1982)

En esta figura 21 se muestra la diferencia de la vida útil de los diferentes sistemas de almacenamiento y los costos específicos relacionados con el número de ciclos disponibles, los cálculos muestran que desde el punto de vista del costo de la energía, las volantes de inercia son mejores que las baterías u otros almacenadores químicos.

Se debe tener en cuenta otras características adicionales para la implementación de la volante como fuente de almacenamiento de energía, como la infraestructura donde se

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

instalará la volante de inercia, elementos de seguridad, protecciones, sistema de regulación y de transformación de la energía rotacional a energía eléctrica (motor – generador).

3.4.1 Costo del kWh de la energía eléctrica para el Metro de Medellín

El costo de la energía eléctrica para el Metro de Medellín siempre ha sido el mayor gasto que se tiene en la prestación del servicio comercial, ya que es su principal fuente para el movimiento de los trenes y para el consumo general de la empresa. Como se mencionó en otros puntos anteriores el Metro es un consumidor mayorista no regulado, y su costo varía en el tiempo.

Nuestro sistema de alimentación y de distribución interna de las subestaciones de energía está muy bien equilibrado, gracias a esto el consumo es muy parejo de las subestaciones, como lo muestra la Figura 14 si se considera que las 8 subestaciones SET tienen el mismo consumo mensual tendríamos costo de $\$363'330.858,06 \times 8 = \$2906'646.864$

3.4.2 kWh generado por la volante de inercia

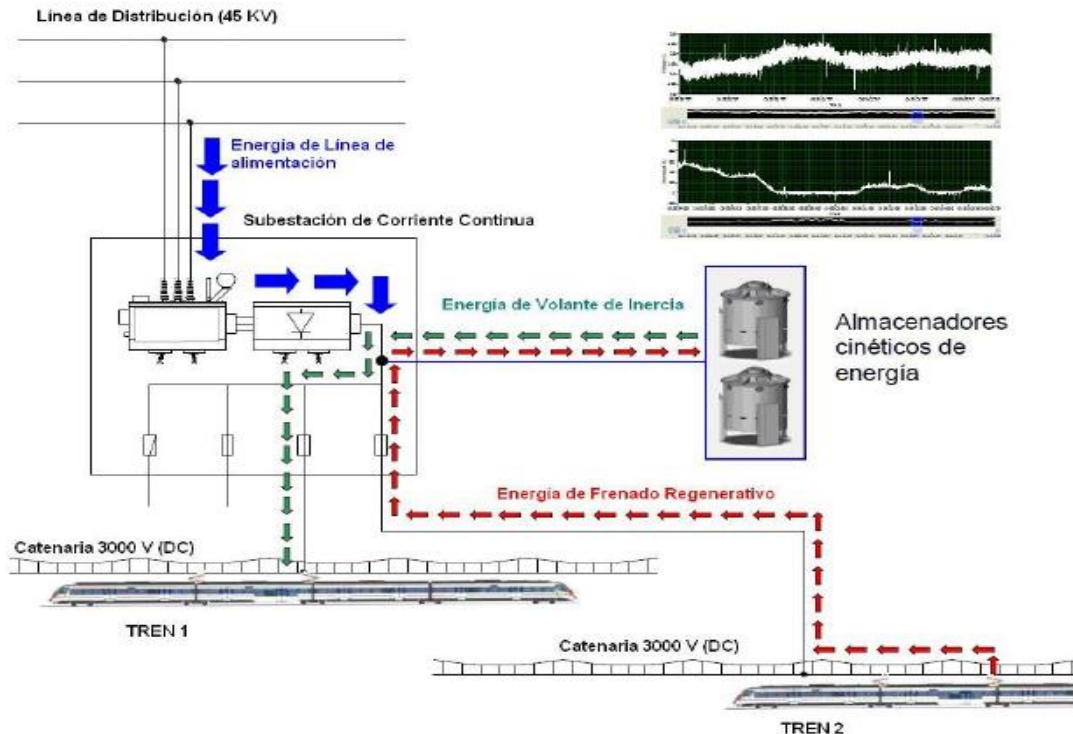


figura 22. Esquema eléctrico de acumulación de energía de una volante de inercia.
 Fuente: (Lafoz, 2010)

La figura 22 muestra como es la conexión con la red y la carga, donde para el caso de la volante de inercia del Metro de Medellín se obtendrá un almacenamiento del 10% del frenado regenerativo del tren que es 3 kWh, en dinero sería \$126'528.497,4 mensuales a un costo de $293,17 \frac{\$}{\text{kWh}}$ con el horario Cristina V.2.

3.4.3 Tipo y costo de mantenimiento

Estos sistemas son libres de mantenimiento pero no quiere decir que no se inspeccione, deben ser inspeccionados y llevar un estado físico de todos sus componentes, es por eso que se debe implementar un tipo de Mantenimiento Predictivo (MP), donde este se basa en que la mayoría de partes de la maquina dará un tipo de aviso antes de que fallen,

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

logrando determinar el estado de la volante de inercia, este tipo de mantenimiento optimiza la vida útil de los componentes y evitando fallas en la volante repentinas, lesiones en los operarios, generación de ruidos y vibraciones, se puede llevar un registro del deterioro de los elementos, los elementos que pueden generar más pérdidas en cuanto al funcionamiento de la volante de inercia son los cojinetes o rodamientos, pero para este caso en especial se utilizaran cojinetes magnéticos que giran sin tener contacto con la superficie, por lo que no existe desgaste por fricción , ni se necesita lubricar, estos combinan un movimiento rotativo de precisión con la mínima vibración, proporcionando una mayor confiabilidad de la volante de inercia y sus componentes.

3.5 CARACTERIZACIÓN DEL CONSUMO ACTUAL PARA EFECTOS DE COMPARACIÓN DEL SISTEMA CON O SIN EL CONJUNTO VOLANTE DE INERCIA

En la tabla 8 se registran las características y comparaciones entre los 3 tipos de tecnología más utilizados como almacenadores de energía.

Tabla 8. Características y de comparación entre los 3 tipos de tecnología más utilizados como almacenadores de energía.

	VOLANTE DE INERCIA	ULTRACAPACITORES	BATERIAS Plomo-Acido
Mecanismo de almacenamiento	Mecánico	Electroestático	Químico
Potencia	50KW-4000 kW	1-3000 F	1kW-1000 kW
	< 5 min	Minutos y segundos	Horas
	Liberaran la energía	Liberaran la energía	Necesita más tiempo
Tiempo de carga/descarga	En poco tiempo	En poco tiempo y muy rápido	para cargarse Liberan la energía de una forma lenta y por mucho más tiempo

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO		Código	FDE 089
			Versión	03
			Fecha	2015-01-22

	1000000	1000000	1000-2000
Numero de descargas/cargas	Se pueden cargar y descargar miles de veces	Se pueden cargar y descargar miles de veces	Están limitados por la cantidad de ciclos
Tiempo de vida	>20 años	>20 años	3-5 años
Auto descarga	2%	1%	2-5%
Potencia especifica	30W-600W/kg Tiene disponible toda su carga y es reducida por la perdidas que pueda tener	1W-10KW/kg No tienen disponible toda la energía acumulada	20W-200W/kg Su carga está limitada por el efecto de memoria
Energía especifica	10-80Wh/kg	1-80 Wh/kg	20-50 Wh/kg
Eficiencia eléctrica	≈ 90-95% Se puede saber exactamente la energía almacenada por medio de las revoluciones	≈ 98% Solo puede almacenar una quinta o décima parte de la energía que acumulada o una pila	≈ 88-92% Puede almacenar grandes cantidades de energía
Estado tecnológico	En estudio	En estudio	Desarrollado totalmente
Eficiencia total	≈ 90%	≈ 90%	≈ 75%
Mantenimiento	Mínimo mantenimiento a lo largo se du vida útil Necesitan un espacio de superficie	Mínimo mantenimiento a lo largo de su vida útil Pueden ser acumuladores que estén	Necesitan mantenimiento periódico Pueden ser acumuladores que
Espacio de instalación	cuadrada en un foso con protección si falla	dentro del tren o en tierra	estén dentro del tren o en tierra

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

	debe ser, debe ser instalado en tierra		
Disposición final	Contribuyen al medio ambiente ya que utiliza materiales inertes o benignos	No poseen elementos tóxicos	El residuo se debe tener un tratamiento especial como sustancia peligrosa
Tamaño	Por lo general son muy pesadas y de gran tamaño	Son más livianas en comparación con los otros dos	Son pesadas pero más livianas que las volantes, pero también pueden tener diferentes configuraciones de tamaños
Limitantes	Depende mucho de cómo supere las perdidas mecánicas generadas por el rozamiento de los rodamiento y la fricción con el aire	Para altos voltajes deben conectarse en serie con otros ultra capacitores y balancear el voltaje	Fuerte impacto ambiental debido a los materiales tóxicos que emplean en su construcción

Fuente: (energía 12, 2014)

La tabla 8 se puede comparar los tres tipos de tecnologías más utilizados en el almacenamiento de energía y posibles combinaciones de estas. Las baterías como se pueden observar en comparación con la volante y los ultra capacitores se encuentran en desventajas por perder sus características en cada ciclo de carga y descarga, tiene una vida útil más corta y menor rendimiento, requieren de un mantenimiento regular mientras que los otros dos sistemas su mantenimiento es así nulo, pero las baterías tienen ventajas como su bajo costo, su gran energía almacenada es igual a la de la volante pero mayor que los ultra capacitores y además esta tecnología no es adecuada donde existan grandes transferencia de potencia y un número significativo de ciclos de carga y descarga. En cuanto

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

a la volante de inercia y los ultra capacitores tienen características básicas muy similares, los ultra capacitores tienen un tiempo de respuesta más rápido que la volante pero la volante tienen mayor capacidad de energía almacenada y pueden suministrar la energía durante más tiempo en cambio los ultra capacitores son solo para tiempos muy cortos donde sí se combinan con las baterías darían una mejor eficiencia. Hasta el momento la tecnología más usada en las de las baterías ya que es la única totalmente desarrollada por otro lado los ultra capacitores y las volantes de inercia aunque ya se encuentran en varias aplicaciones a nivel industrial todavía se encuentran en desarrollo con un futuro muy prometedor.

3.6 COMPARAR CON UN SOFTWARE EN MATLAB LOS CÁLCULOS FÍSICO-ELÉCTRICOS Y MECÁNICOS OBTENIDOS

3.6.1 Modelación Matemática de los Cálculos obtenidos

La figura 23 muestra cómo se empleó el modelo matemático de los elementos mecánicos y la maquina eléctrica la cual podrá hacer la entrega final del almacenamiento de energía cinética a la red del sistema de tracción del Metro de Medellín.

Se empleó el software Simulink (Matlab) y se crearon unas situaciones netamente académicas para poder llevar a cabo la simulación de condiciones ideales de trabajo en el acople de la volante de inercia y la maquina eléctrica, teniendo en cuenta las variables que se presentan con la cantidad de torques, momentos que existen en la transmisión y conversión, algunas constantes de temperatura por la fricción se tienen en cuenta.

Se acoplan estos dos modelos para que arrojen unos datos muy parecidos a los hallados algebraicamente, esto nos dice que este sistema es muy estable y que su energía entregada a la red es casi del 90%, ya que, por fricción, torque, temperatura se pierde el 10% información obtenida con los resultados de Simulink y comparados con los calculados.

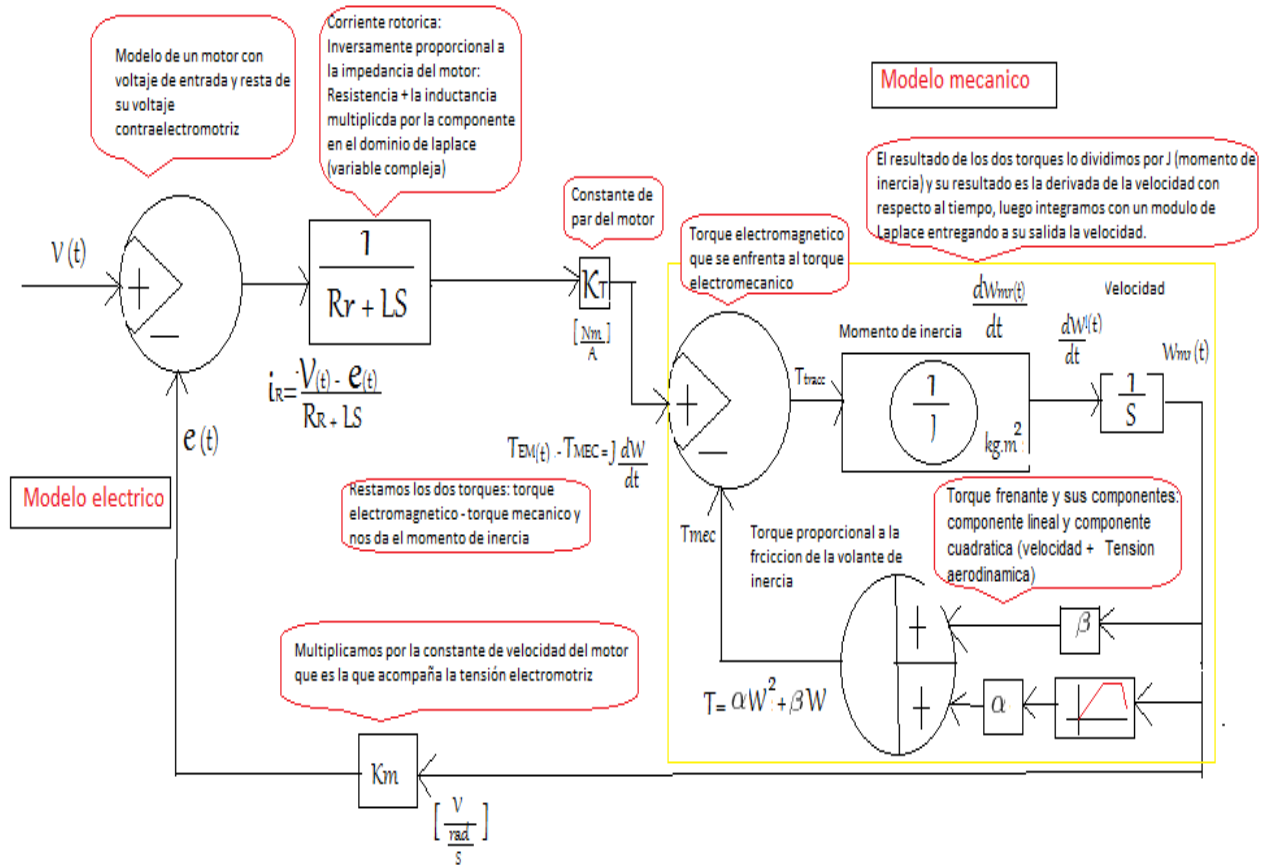


figura 23. Esquema Modelo Eléctrico y Mecánico. Fuente: (Fabriciano, 2017)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.6.2 Gráficas de comparación de los cálculos obtenidos

- La figura 24, se observa que es muy conveniente que la velocidad angular no llegue a cero para evitar la fricción estática y no tener que vencer nuevamente la inercia donde se genera un consumo adicional de energía.
- La figura 25, se toma un voltaje máximo de 1800 VCD como inicio de carga de la volante de inercia y a su vez funciona como protección de apantallamiento. Esto nos ayudara a estabilizar la red eléctrica donde la volante de inercia absorbe los picos de tensión que afectan el normal funcionamiento de la catenaria.
- La figura 26, se observa que a medida que la volante de inercia pierde velocidad angular disminuye su potencia hasta iniciar un nuevo ciclo.

Dependiendo del horario de operación (frecuencia paso de trenes) se regula la velocidad máxima alcanzada por la volante de inercia, con esto se garantiza que no se desborde su capacidad de almacenamiento.

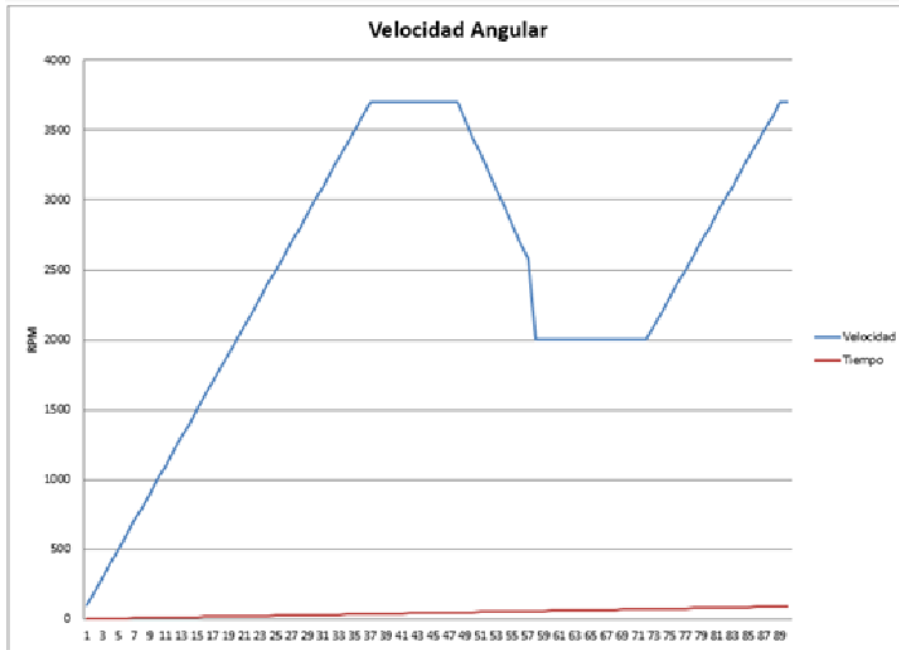


figura 24. Velocidad Angular acople Mecánico y maquina Eléctrica. Fuente: (Autores, 2018)

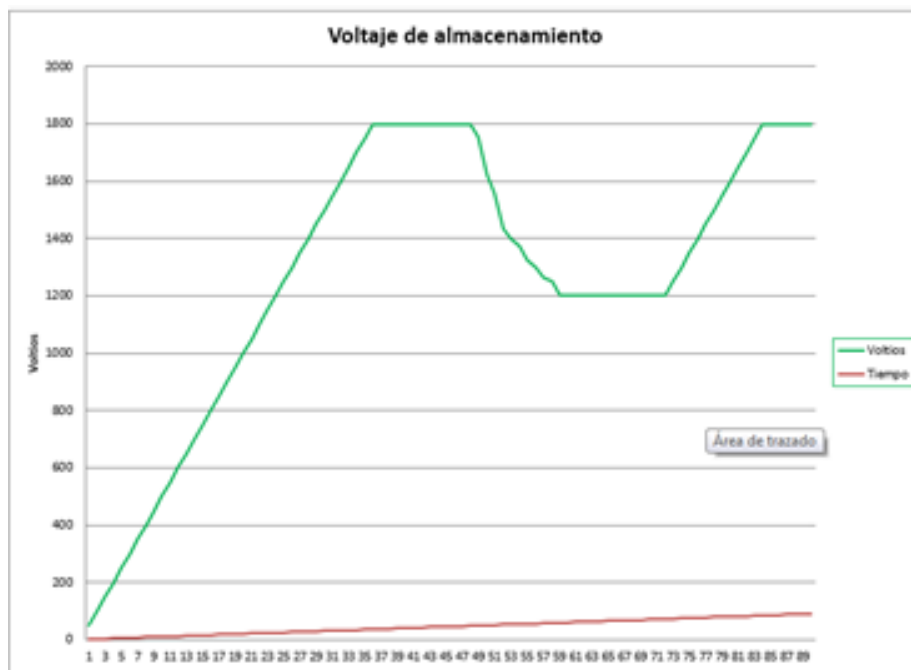


figura 25. Voltaje de Almacenamiento acople Mecánico y Maquina Eléctrica. Fuente: (Autores, 2018)

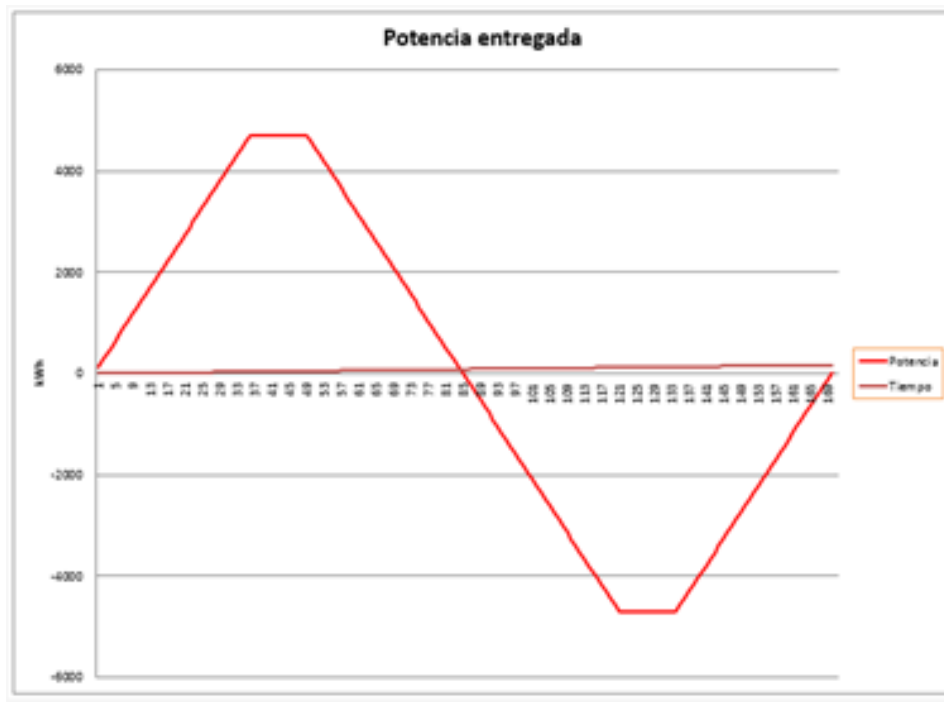


figura 26. Potencia Entregada acople Mecánico y Maquina Eléctrica. Fuente: (Autores, 2018)

3.7 CONTRASTAR LOS CÁLCULOS DE LA VOLANTE DE INERCIA COSTOS VS AHORRO ENERGÉTICO

Aunque por sus características constructivas este tipo de dispositivos es costoso a corto plazo comparado con otros sistemas de almacenamiento, la relación costo-beneficio a largo plazo puede ser una buena estrategia económica ya que este sistema de almacenamiento de energía basado en energía cinética donde no depende de la carga y descarga como si sucede con otro sistema de almacenamiento de energía es factible, además si se observa la cantidad de gases que se dejaron emitir tanto en la construcción como en su disposición final esto sería un beneficio incalculable para la empresa y el planeta. Por ejemplo mientras

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

una batería tiene una vida útil de 4 años, una volante puede durar 20 años aproximadamente, teniendo en cuenta todos los parámetros mecánicos y físicos que inciden ella como es la fricción con el aire, la pérdida de energía en los cojinetes por rozamientos, y otros despreciables sigue siendo beneficiosa. Por tanto decimos que la proyección de ahorro energético y económico de la volante de inercia en un año es: $45075\text{kWh} \times 12 \times 20 = 10818000\text{kWh}$ que representa en pesos \$3.171' 513.060.

3.7.1 Gráficas de proyección de Ahorro

La gráfica 2 de proyección del ahorro con la volante de inercia fue creada con la información suministrada por el horario Cristina V.2 y los cálculos obtenidos por el costo kWh. Esta proyección tiene en cuenta la cantidad de trenes que circula en un día a diferentes intervalos de tiempo, asumiendo que el recorrido de estos trenes es sin anomalías en la prestación del servicio.

Tabla 9. Costo de hora valle y hora pico.

	\$ Hora pico día	\$ Hora valle día	\$ Hora pico Semana	\$ Hora Valle Semana	\$ Hora pico _Mes	\$ Hora Valle Mes	\$ Hora pico Año	\$ Hora Valle Año
Mañana	1477576,8	1015834,0	7387884,0	5079170,2	29551536	20316681	354618432	243800172
Tarde	2462628,0	329816,2	12313140,0	1649081,2	49252560	6596325	591030720	79155900
Total	3940204,8	1345650,3	19701024,0	6728251,5	78804096	26913006	945649152	322956072

Fuente: (autores, 2017)

PROYECCIÓN DE AHORRO CON VOLANTE DE INERCIA

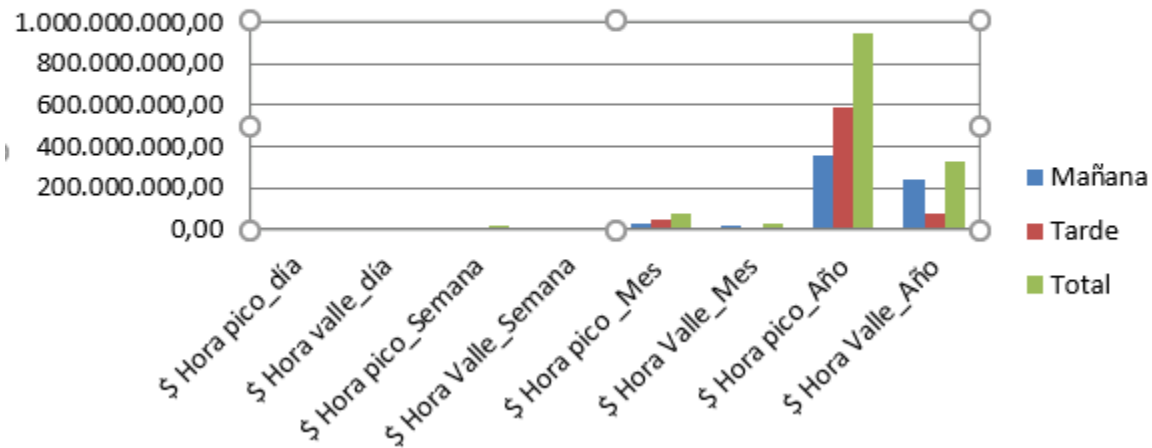


figura 27 . Proyección de ahorro con Volante de Inercia. Fuente: (autores, 2017)

En la figura 23 se puede visualizar el beneficio económico que la Empresa Metro de Medellín tendrá con la implementación de la volante de Inercia en cada una de las 8 SET de tracción. Se puede contemplar un ahorro significativo ya que la volante de Inercia tiene una vida útil aproximada de 20años.

3.7.2 Contribución al medio ambiente por ahorro energético

En los últimos años se ha generado conciencia sobre el cuidado del medio ambiente y se ha prestado mucha atención sobre el problema de la contaminación generada por los combustibles fósiles, toda actividad humana produce desechos, deja rastros y huella, es por esto que cada ser humano debe ser consiente para prevenir y evitar al máximo el daño que se le está haciendo al planeta; es por esto que todos los gobiernos, empresas, profesionales debemos estar sincronizados con este problema y contribuyendo al desarrollo de nuevas alternativas que permitan la implementación de tecnologías donde se aprovechen toda clase de energías, es así como la volante de inercia puede contribuir en gran parte a la

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

reducción del impacto ambiental, debido que esta tecnología aprovecha la energía cinética que usualmente se desperdicia en forma de calor y la transforma en energía eléctrica, ya que si no se continua con estas implementaciones y desarrollos en todos los medios de transporte seguiremos afectando el medio ambiente.

Lo primero que podemos observar es el cambio climático por causa del efecto invernadero debido a la gran cantidad de Co2 que emiten los combustibles fósiles, estos aumentan la temperatura del planeta provocando desbalances en el clima (tornados, huracanes, fenómeno del niño y niña), la temperatura del océano aumenta provocando la pérdida de biodiversidades y fluctuaciones en las corrientes marinas, el descongelamiento de los polos que estos a su vez aumentarían el nivel de los océanos provocando inundaciones, destrucciones en la fauna y flora.

3.8 ANALIZAR LOS RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS FÍSICO-ELÉCTRICOS DE LA CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA DE UNA VOLANTE DE INERCIA PARA EL SISTEMA DE TRACCIÓN DE METRO PARA IDENTIFICAR SUS POSIBLES BENEFICIOS EN EL AHORRO DE ENERGÍA

Se tendría una mejor estabilización de la red eléctrica en las subestaciones de tracción y un menor pago del costo del consumo de energía eléctrica, se aprovecharía el convertidor – regulador (BUCK – BOOST), para conectar el volante de Inercia a la red; es el mismo utilizado en la investigación de ultra capacitores y que este funciona perfectamente. Si se quiere implementar este tipo de sistemas de almacenamiento de energía es pertinente continuar dicha investigación haciendo un análisis de los tipos de convertidores y su control respectivo, así entrelazar estas dos investigaciones para obtener datos más precisos y acercarse más a la construcción física y puesta en marcha en la red eléctrica del Metro de Medellín.

El estudio y análisis de resultados muestran que en el futuro estos sistemas de almacenamiento tienden hacer sistemas híbridos donde se complementen unos a otros mejorando la eficiencia, la capacidad de respuesta y demanda.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

- En el caso del Metro de Medellín se estima que la energía disipada en calor es de 1,3 GWh al año (un 2,4 % de la energía de tracción) (Lee et al., 2013). En la red eléctrica de Colombia, aunque predominantemente hidráulica, las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la producción de la electricidad que se disipa en calor en los trenes, corresponde 130 TON-CO2 equivalentes al año. (Diez, 2017)
- Las variables que inciden en la acumulación de energía en una volante de inercia para el metro de Medellín son: $M = 2385.65 \text{ kg} \approx 2.3 \text{ TON}$ de acero, con $R_1 = 0,25 \text{ m}$; $R_2 = 0.75 \text{ m}$; $L = 0.50 \text{ m}$; y una velocidad angular media $\omega_{\text{med}} = 2100 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$. Alcanza a almacenar una energía cinética rotacional de $K_v = 16.44 \text{ GJ}$. Que equivale al 10% de la energía almacenada al frenar el tren.
- A nivel tecnológico la volante de inercia aportara a la red eléctrica de tracción del Metro de Medellín una regulación de voltaje de catenaria a su vez que almacena energía del frenado regenerativo.
- Con la volante de inercia se recupera la energía calorífica que se está perdiendo en los trenes, cuando se activa el freno reostático.
- La volante de inercia ahorra un 3,6% del dinero que se paga por consumo en una sub estación de SET al año.
- La principal característica de las volantes de inercia es su alta densidad de potencia, larga vida útil, libres de mantenimiento.
- Su gran eficiencia en la rapidez de almacenar grandes cantidades de energía rotacional en tiempo muy corto y su capacidad de entregar esa energía rotacional, haciendo sus ciclos de carga y descarga infinitos.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Sin la volante de inercia el consumo de una subestación SET es de 1239318 kWh \cong \$363'330.858.06 y con la volante de inercia la reducción de este consumo sería del 3.6% que en potencia es 45075 kWh \cong \$13'214.637,75
- Aunque por sus características constructivas este tipo de dispositivos es costoso a corto plazo comparado con otros sistemas de almacenamiento, la relación costo-beneficio a largo plazo puede ser una buena estrategia económica ya que este sistema de almacenamiento de energía basado en volantes de inercia no depende de la carga y descarga como si sucede con las baterías. Así su eficiencia se incrementa; mientras una batería dura alrededor de 4 años, un volante puede durar 20 años.
- Ya que en esta investigación se asumió que el convertidor de frecuencia, para conectar el volante de Inercia a la red, es el mismo utilizado en la investigación de ultra capacitores y que este funciona perfectamente, si se quiere implementar este tipo de sistemas de almacenamiento de energía es pertinente continuar dicha investigación haciendo un análisis de los tipos de convertidores y su control respectivo, así entrelazar estas dos investigaciones y obtener datos más precisos y acercarse más a la construcción física y puesta en marcha en la red eléctrica del Metro de Medellín.
- Otro tipo de investigación para obtener mayores beneficios sería el aprovechamiento de reciclado de ruedas y rieles analizando los materiales, reducción así costos alrededor de la construcción de la máquina.
- Está limitada solo por la potencia del convertidor usado y la energía almacenada por su masa.
- Cuanto menor sea la distancia media entre estaciones el nivel de aprovechamiento de energía será mayor.

5. ANEXOS

Anexo A. Especificaciones de cálculo proyecto Metro de Medellín.

	Especificación de Cálculo PROYECTO DE METRO MEDELLÍN	C.E8.93.014	-
	Página 4 de 15		

1. INTRODUCCION

El presente informe describe los requerimientos estáticos y de fatiga para la estructura del Metro de Medellín. También presenta la metodología a usar en el análisis estático de dicha estructura mediante el Método de los Elementos Finitos (FEM) así como las hipótesis a considerar. Además, se presentan y se referencian los datos a utilizar en los cálculos.

2. DATOS DE CÁLCULO: PESOS

La Tabla 3.1 muestra los valores de masa de los vehículos del Metro de Medellín.

	M1/M2	R
TARA: Masa de la caja del vehículo listo para trabajar, incluyendo el peso de los bogies.	40550 kg	35538 kg
CARGA DE FATIGA: Viajeros sentados + 4 pax/m ²	13065 kg	14690 kg
CARGA EXCEPCIONAL: Viajeros sentados + 8 pax/m ²	23660 kg	26715 kg
CARGA DE DISEÑO: Viajeros sentados + 10 pax/m ²	28990 kg	32695 kg
CARGA MÁXIMA: Tara + Carga de diseño	69540 kg	68233 kg

Tabla 3.1. Valores de masa (en kg) de los vehículos del Metro de Medellín.

Los valores de TARA incluyen la masa de los bogies, definidas en la Tabla 3.2. Para el cómputo de la carga de los viajeros se ha considerado una masa media de 65kg. por pasajero, de acuerdo con Especificación técnica funcional [4].

BOGIE MOTOR	9200 kg
BOGIE PORTANTE	6800 kg

Tabla 3.2. Valores de masa (en kg) de los bogies de los vehículos del Metro de Medellín.

La Tabla 3.3 muestra los valores de las masas más desfavorables de los diferentes coches del vehículo. Estos valores son los que se tomarán para la validación de la estructura.

	Masa	Origen
TARA: Masa de caja del vehículo listo para trabajar (sin bogies), m_1 .	22150 kg	M1/M2
CARGA DE FATIGA: Viajeros sentados + 4 pax/m ² , m_2 .	14690 kg	R
CARGA EXCEPCIONAL: Viajeros sentados + 8 pax/m ² , m_3 .	26715 kg	R
CARGA DE DISEÑO: Viajeros sentados + 10 pax/m ² , m_4 .	32695 kg	R
MASA DEL BOGIE MOTOR: m_5	9200 kg	Bogie motor

Tabla 3.3. Valores utilizados (en kg) en el modelo de cálculo del vehículo Metro de Medellín.

La carga correspondiente a los viajeros (m_2 , m_3 y m_4) se aplicará íntegramente en el bastidor mientras que la carga correspondiente a la TARA (m_1) se distribuirá de la siguiente forma:

- La masa de los equipos más importantes y pesados bajo el bastidor repercutirá directamente al bastidor.
- La TARA que quede al deducirle la masa de estos equipos se distribuirá 20% en cubierta, 30% en costados y 50% en bastidor.

3. REFERENCIAS

- [1] EN 12663:2000. Requisitos de dimensionamiento de las estructuras de los vehículos ferroviarios, Junio 2001.
- [2] ENV 1999-1, Design of Aluminum Structures. Part 1: General.
- [3] ENV 1999-2, Design of Aluminum Structures. Part 2: Structures Susceptible to Fatigue, May 1998.
- [4] Especificación técnica funcional contratación para el suministro y puesta en funcionamiento de catorce (14) unidades de tren. Marzo de 2009.

 ITM Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Anexo B. hoja de vida de acero aleación 5754 y clases de ruedas según la AAR

ALUMINIO Aleación 5754 (Al Mg 3)

Aleación de elevada resistencia mecánica, con buena resistencia a la corrosión, comparable a la del aluminio puro en general y mejor aún que la de éste, si de

COMPOSICION QUIMICA										
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Mn+Cr	Otros	Al
0,40%	0,40%	0,10%	0,10-0,50%	2,60-3,60%	0,30%	0,20%	0,15%	0,25%	0,15%	Resto

CARACTERISTICAS TECNICAS					APLICACIONES	
Estado			0	H32	H34	Se aplica en calderería, bien sea soldada o remachada. Indicada para la fabricación de recipientes a presión, para la producción y almacenaje de gases. Por su gran resistencia a la corrosión en ambiente marino, es muy apropiada para la construcción naval, frigoríficos, etc.
Peso específico	gr/cm ³	2,7	Recocido	1/4 Duro	1/2 Duro	FORMATOS DE SUMINISTRO Chapas Espesores de 1 a 10 mm 2000 x 1000 mm 2500 x 1250 mm 3000 x 1500 mm
Carga de rotura	Kgr/mm ²	220				
Límite elástico	Kgr/mm ²	100				
Alargamiento	%	23				
Temperatura de fusión	°C	70000				
Módulo Elástico	N/mm ²	130				
Dureza Brinell	HB	50				

Clases de ruedas según la AAR.

Clase	Tratamiento térmico	Rango de dureza	Porcentaje de carbón*	Tipo de servicio a prestar
L	Llanta	197 - 277	<0.047	Trenes de alta velocidad para pasajeros con condiciones más severas de frenado que las otras clases y para cargas ligeras.
A	Llanta	255 - 321	0.47 - 0.57	Trenes de alta velocidad para pasajeros con condiciones severas de frenado y para cargas moderadas.
B	Llanta	277 - 341	0.57 - 0.67	Trenes de carga, trenes de alta velocidad para pasajeros con condiciones severas de frenado y para cargas pesadas. Recomendada para locomotoras. Buena combinación de dureza y fragilidad.
C	Llanta	321 - 363	0.67 - 0.77	Trenes de carga; trenes de alta velocidad para pasajeros con condiciones suaves de frenado y para cargas pesadas; trenes de pasajeros con condiciones de duro frenado donde la banda de rodadura sufre. Recomendada para locomotoras. Más resistente a bombardeos pero se rompe con mayor facilidad debido a que es muy frágil.
U	Sin tratamiento térmico	N/A	N/A	Ya no se producen.

* La mezcla de acero varía principalmente por el contenido de carbono, sin embargo, a cada cantidad química se le permite variar un poco. La composición química incluye manganeso (0,60 - 0,85%), fósforo (<0,05%), de azufre (<0,05%) y silicio (> 0,15%).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

REFERENCIAS

- autores, L. (15 de 08 de 2017). Esquema de alimentacion SET SAA. Medellin, Antioquia, Colombia.
- Berbey, R. J. (2013). Trenes: material rodante del transporte ferroviario. *Revistas academicas UTP*.
Obtenido de <http://www.revistas.utp.ac.pa/index.php/prisma/article/view/509/html>
- Daniel VILLEGAS, A. E. (2014). Prototipo a escala de un sistema de frenado regenerativo. *IEEE*, 1-9.
Obtenido de Facultad IEE; Universidad Pontificia Bolivariana; Cir. 1 #70-01, B11, Medellín, Colombia. daniel.villegas.p@gmail.com)
- Diez, A. E. (2017). Simulación, Implementación y Pruebas de un Sistema de compensacion en corriente. *informacion tecnologia*, 179-188.
- energia 12*. (28 de 03 de 2014). Obtenido de <https://energia12.com/2014/03/28/el-aprovechamiento-de-la-energia-proyecto-ferrolinera-3-0-y-proyecto-train2car/>
- espectador, e. (07 de mayo de 2015). *www.elespectador.com*. Obtenido de <https://www.elespectador.com/noticias/bogota/inicio-operaciones-bogota-subestacion-electrica-mas-gra-articulo-559345>
- Fabriciano, J. (16 de 10 de 2017). clasificacion sistemas de traccion . Medellin, Antioquia, Colombia.
- Gutiérrez-Benjumea, F. (2017). *www.fiamexico.org*. Obtenido de <http://fiamexico.org/2011/12/el-kers-o-sistema-de-recuperacion-de-la-energia-cinetica/>
- GV, D. (8 de abril de 2013). *www.nosoloingenieria.com*. Obtenido de <http://nosoloingenieria.com/almacenamiento-energia-volante-de-inercia/>
- <http://www.utadeo.edu.co>. (s.f.). Obtenido de <http://www.utadeo.edu.co/es/link/maestria-en-modelado-y-simulacion-mms/26106/layout-1/que-es-modelado-y-simulacion-ms>
- Lafoz, M. (2010). sistemas de almacenamiento de energia de alta densidad. *proyecto SAAVE*.
españa: ciemat.
- Medellin, M. d. (28 de 01 de 1995). Gestion del manteneiminto Manuales Tren MAN. Bello, Antioquia, Colombia.
- Medellin, M. d. (22 de ENERO de 1995). Manual de mantenimiento de subestaciones electricas. Bello, Antioquia, Colombia.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Medellin, M. d. (24 de 06 de 2011). Gestion de Mantenimiento Manuales trenes CAF ED.3. Bello, Antioquia, Colombia.

Norton, R. L. (1999). *Diseño de Maquinas*. Mexico: Pearson.

SEARS.EMANSKY_YOUNG.FREEDMAN. (2004). *FISICA UNIVERSITARIA*. Mexico: PEARSON ADDISON WESLEY.

Shigley, J. E. (2008). *Diseno de ingenieria mecanica*. mexico: McGraw-Hill.

Shigley, Joseph Edward. (2008). *Diseño de ingeniería mecánica*. mexico: McGraw-Hill.

SIEMENS. (21 de 12 de 1998). Manual de Manejo. suministro Electrico Metro de Medellin . Bello, Antioquia, Colombia.

trenes, M. d. (20 de 05 de 2014). Gestion Recursos Energetico Metro de Medellin. Bello, Antioquia, Colombia.

V, K. S. (1982). Composite Material Flyheels and Containment Systems. *Energy and Tech*, 18-29.

wikipedia.org. (08 de octubre de 2016). Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Subestaci%C3%B3n_el%C3%A9ctrica

www.energynews.es. (17 de 10 de 2013). Obtenido de <https://www.energynews.es/exito-en-la-primer-subestacion-electrica-de-corriente-continua-reversible-en-la-linea-malaga-fuengirola/>

www.grec.gov.co. (28 de Diciembre de 2009). Obtenido de <http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1aed427ff782911965256751001e9e55/1537b9d298788e2b0525785a007a7218?OpenDocument>

www.monografias.com. (24 de noviembre de 2016). Obtenido de <http://www.monografias.com/docs111/tesis-analisis-energetico-sistema-recuperador-energia-cinetica-kers/tesis-analisis-energetico-sistema-recuperador-energia-cinetica-kers.shtml>

www.pistonudos.com. (11 de junio de 2015). Obtenido de <http://www.pistonudos.com/reportajes/como-funciona-un-volante-de-inercia-para-recuperar-energia-cinetica/>

www.solar-energia.net. (7 de abril de 2016). Obtenido de <https://solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/elementos/instalaciones-autonomas/acumuladores-electricos>

www.wikipedia.org. (17 de 10 de 2017). Obtenido de <https://es.wikipedia.org/wiki/MATLAB>

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

APÉNDICE

Apéndice A:

<http://www.graph-tec.com/instruments/wr300/>

<http://passthrough.fw-notify.net/static/644597/downloader.html>

Apéndice B:

<https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/3048/manual-usuario.pdf?sequence=3&isAllowed=y>