

Características de un sistema eléctrico de transporte masivo con tranvías¹

Characteristics of a Tram-Based Massive Electric Transportation System²

Características de um sistema elétrico de transporte em massa com bonde³

Mario Ríos-Mesías⁴

Gustavo Ramos-López⁵

Gabriel García-Mora⁶

¹ Fecha de recepción: 8 de abril de 2010. Fecha de aceptación: 12 de enero de 2011. Este artículo se deriva del proyecto de investigación denominado *Modelos para el planeamiento de sistemas de distribución con alimentación a sistemas de transporte eléctrico masivo*, número de registro Colciencias 1204-426-20589, financiado por Colciencias y Codensa y desarrollado por la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

² Submitted on April 8, 2010. Accepted on January 12, 2011. This article is derived from the research project *Models for Planning Distribution Systems that Supply Massive Electric Transportation Systems* with Colciencias registration number 1204-426-20589, funded by Colciencias and Codensa and developed by the Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

³ Data de recepção: 8 de abril de 2010. Data de aceitação: 12 de janeiro de 2011. Este artigo deriva do projeto de pesquisa denominado *Modelos para o planejamento de sistemas de distribuição com alimentação a sistemas de transporte elétrico de massa*, número de registro Colciencias 1204-426-20589, financiado por Colciencias e Codensa e desenvolvido pela Universidade de los Andes, Bogotá, Colômbia.

⁴ Ingeniero eléctrico. Magíster en Ingeniería Eléctrica. Doctor en Ingeniería, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Doctor en Ingeniería Eléctrica, Institute Nationale Polytechnique de Grenoble, Francia. Profesor asociado, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad de los Andes. Correo electrónico: mrios@uniandes.edu.co.

⁵ Ingeniero eléctrico. Magíster en Ingeniería Eléctrica. Doctorado en Ingeniería, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Profesor asistente, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad de los Andes. Correo electrónico: gramos@uniandes.edu.co.

⁶ Ingeniero eléctrico. Estudiante de la Maestría en Ingeniería Eléctrica, Universidad los Andes, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: jg.garcia67@uniandes.edu.co.

Resumen

Este artículo presenta las características típicas de un sistema de tracción eléctrico de transporte masivo usando tranvía, como son: tamaño, peso y capacidad de cada vehículo. Igualmente, se describen las características de los sistemas de alimentación, tanto en corriente alterna como en corriente directa, y los medios de conexión con la red de distribución de media tensión, como son las subestaciones rectificadoras. Finalmente, se presentan algunos ejemplos de ciudades que usan este sistema de transporte.

Palabras clave

Subestaciones eléctricas, distribución de energía eléctrica, tranvías.

Abstract

This paper presents the typical characteristics in a massive electric traction transportation system using trams, such as size, weight and passenger capacity. It also describes the characteristics of the electric supply, like AC or DC, and the connection means to the medium voltage electric power distribution system like, for example, rectifier substations. Finally, it presents a number of examples of cities where this transportation system is used.

Keywords

Electric substations, electric power distribution, electric driving, street-railroads.

Resumo

Este artigo apresenta as características típicas de um sistema de tração elétrico de transporte em massa usando bonde, que são: tamanho, peso e capacidade de cada veículo. Também são descritas as características dos sistemas de alimentação, tanto em corrente alternada como em corrente contínua, e os meios de conexão com a rede de distribuição de tensão média, como as subestações retificadoras. Para concluir, são apresentados alguns exemplos de cidades que utilizam este sistema de transporte.

Palavras chave

Subestações elétricas, distribuição de energia elétrica, bondes.

Introducción

Los sistemas de transporte eléctrico tipo tranvía son vehículos ligeros que se encuentran a distancias cercanas del suelo, lo cual facilita su acceso. Suplen la demanda de potencia necesaria para su funcionamiento de la red de distribución de media tensión por medio de subestaciones de interconexión de diferentes niveles de tensión, tanto en corriente alterna (AC) como en corriente directa (DC). Los tranvías utilizan motores eléctricos, que le permiten movilizarse a diferentes velocidades. Así mismo, usan con frecuencia componentes de electrónica de potencia, tal como el sistema de frenado regenerativo, el cual utiliza elementos del tipo *Insulated Gate Bipolar Transistors* (IGBT) para controlar la energía liberada y, en ciertos casos, reutilizarla o almacenarla en componentes como ultracapacitores. El tranvía hace parte de los medios de transporte masivos utilizados en las principales ciudades de Europa, parte de Asia, Australia, entre otras. Empresas internacionales como ABB, Alstom y Siemens pertenecen al grupo de fabricantes de este sistema de transporte.

1. Características generales

El tranvía es un sistema de transporte masivo que transita en centros urbanos e interurbanos a velocidades que no sobrepasan los 80 km/h. Son vehículos livianos que pesan 62.000 kg aproximadamente. Las dimensiones externas del vehículo son en promedio 29,4 m de largo, 2,3 m de ancho y 3,36 m de alto. Los tranvías pueden transportar un promedio de 175 pasajeros en condiciones normales y tienen una capacidad límite de 252 pasajeros en condiciones extremas (Brisou, 2008).

En la actualidad, los sistemas de transporte eléctrico tipo tranvía utilizan el sistema de catenarias, en conductor de cobre, para hacer la conexión eléctrica del vehículo con la red de alimentación DC o AC. En un sistema tipo tranvía, los motores eléctricos (ME), la iluminación y el sistema de aire acondicionado hacen parte de las cargas eléctricas más relevantes del sistema. Estas cargas son

controladas y alimentadas empleando circuitos en el interior del vehículo, que utilizan dispositivos de electrónica de potencia, como tiristores IGBT que, conectados con arreglos de resistencias, componen los circuitos de control eléctrico (Godman, 2006; Muller, 2000).

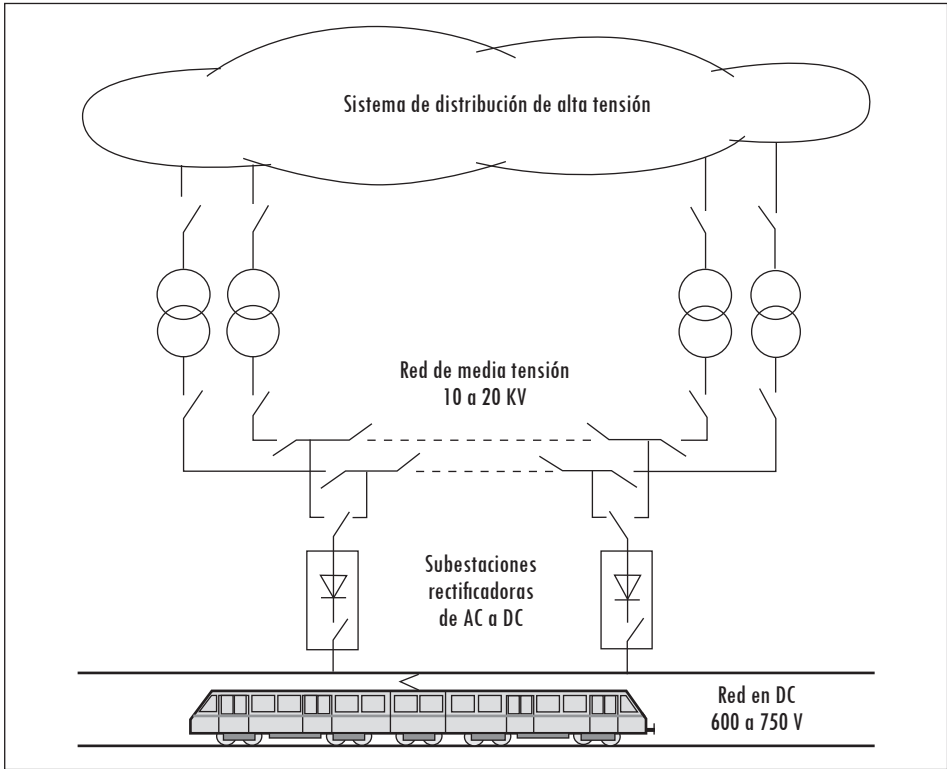
2. Sistemas de alimentación

El sistema de distribución de media tensión (MT) de la ciudad suple la potencia necesaria para el funcionamiento de los tranvías, por medio de subestaciones rectificadoras que se encuentran conectadas a dicha red. Tales subestaciones están constituidas por transformadores, rectificadores y circuitos de protección ultrarrápidos (disyuntores ultrarrápidos) que permiten alimentar el sistema de tracción con corriente DC (Godman, 2006). Las distancias que separan las subestaciones rectificadoras se encuentran en un rango de 2 a 2,5 km. En algunas subestaciones aéreas interurbanas, el nivel de tensión se eleva con el fin de aumentar la distancia entre ellas. La potencia disponible en las subestaciones rectificadoras se encuentra en un intervalo de 900 a 1200 kW y los motores de inducción que tiene el tranvía consumen menos de 600 kW (Godman, 2006; Muller, 2000).

Los tranvías operan en sistemas radiales de corriente DC con niveles de tensión estandarizados de 600 a 750 Vdc y los interurbanos emplean 3000 V, con el fin de evitar interferencias electromagnéticas. Estos niveles permiten disminuir las caídas de tensión en la línea y garantizar la seguridad óptima de operación. Estos niveles de tensión en DC son suministrados por las subestaciones rectificadoras, que están conectadas al sistema de media tensión, como muestra la Figura 1 (Muller, 2000; Perrin y Venard, 1991; Chapas, 2003).

Los tranvías que funcionan en zonas interurbanas son alimentados en AC, con niveles de tensión entre 15 y 25 kV a 50 o 60 Hz, a través de subestaciones de AC conectadas al sistema de distribución (138 kV o 115 kV u otros niveles) (Godman, 2006; Muller, 2000). En la Figura 1 se observa un esquema típico de alimentación a una línea de tranvía desde el sistema de distribución de alta tensión. A este se conectan dos subestaciones doble circuito de AT/MT, ubicadas una en cada extremo de la línea del tranvía. A su vez, estas se conectan entre sí con un doble circuito AC a MT de donde se alimenta cada una de las subestaciones rectificadoras, que alimentan en paralelo la red de distribución del tranvía con niveles de tensión de 600 o 750 Vdc (Muller, 2000; Perrin y Venard, 1991; Fisher y Bolton, 2006). Las subestaciones de AT/MT proporcionan voltajes de MT entre 10 y 20 kV.

Figura 1. Sistema de alimentación en DC para un tranvía

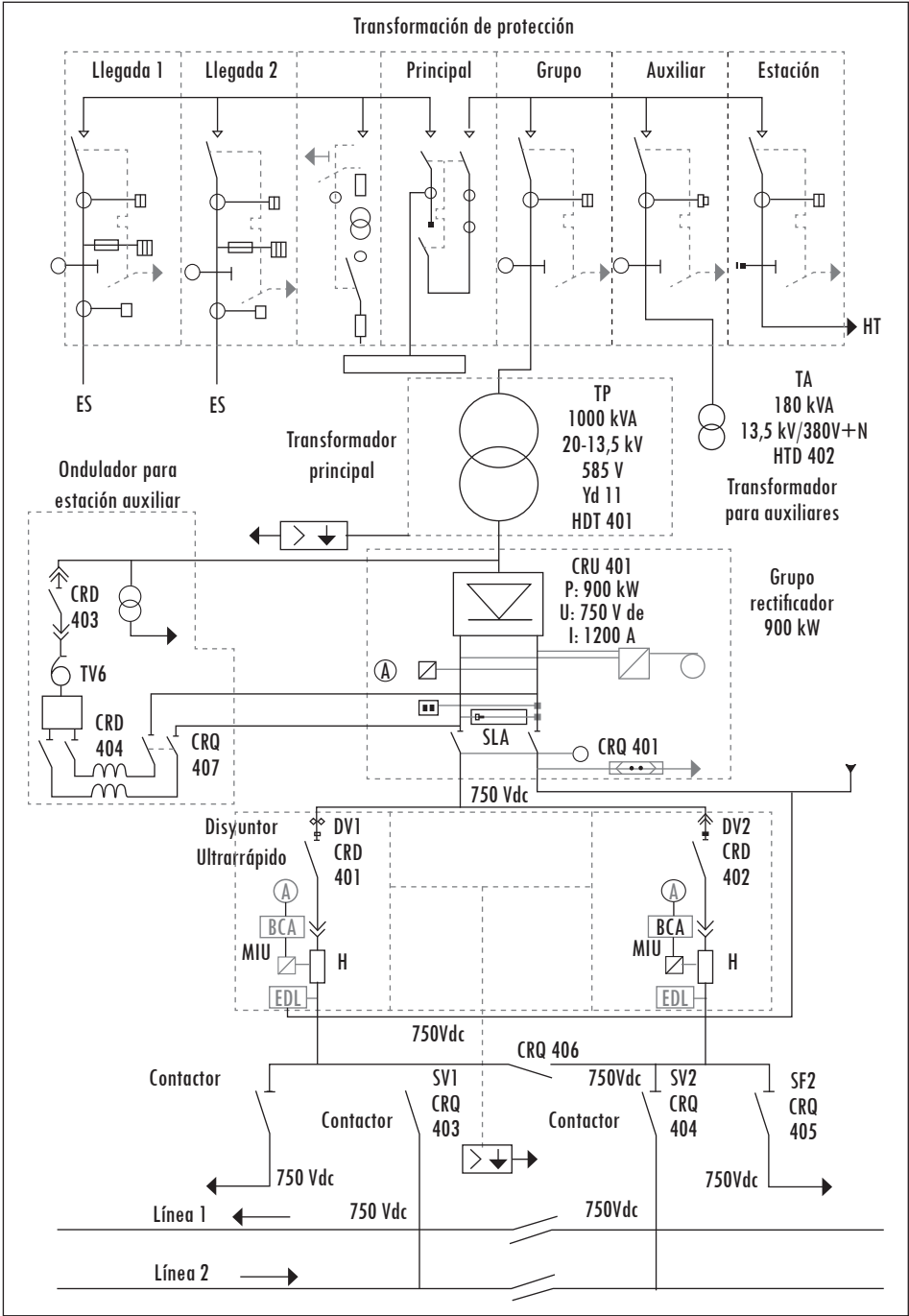


Fuente: modificado de (Chapas, 2003).

Las subestaciones rectificadoras tienen elementos que transforman y rectifican el voltaje AC entregado por la red de MT (11,4 kV o 13,2 kV, por ejemplo) a niveles de voltaje de 600 y 750 Vdc, los cuales alimentan cada vehículo del sistema de tranvía (Godman, 2006). La Figura 2 muestra los componentes que hacen parte de una subestaciones rectificadora:

- Celdas de MT: tienen a su interior líneas de entrada de MT en doble circuito, seccionadores principales, alimentación del transformador de 1000 kVA, alimentación a sistemas auxiliares de 160 kVA, 13,2 kV/BT.
- Transformador de MT: 1000 kVA, 10 a 20 kV/0,585 kV.
- Convertidores de AC/DC: con puentes rectificadores de seis o doce pulsos que conectados en paralelo entregan un voltaje de 750 Vdc.
- Disyuntores ultrarrápidos.
- Salidas a red en DC que alimenta el sistema de tranvía.

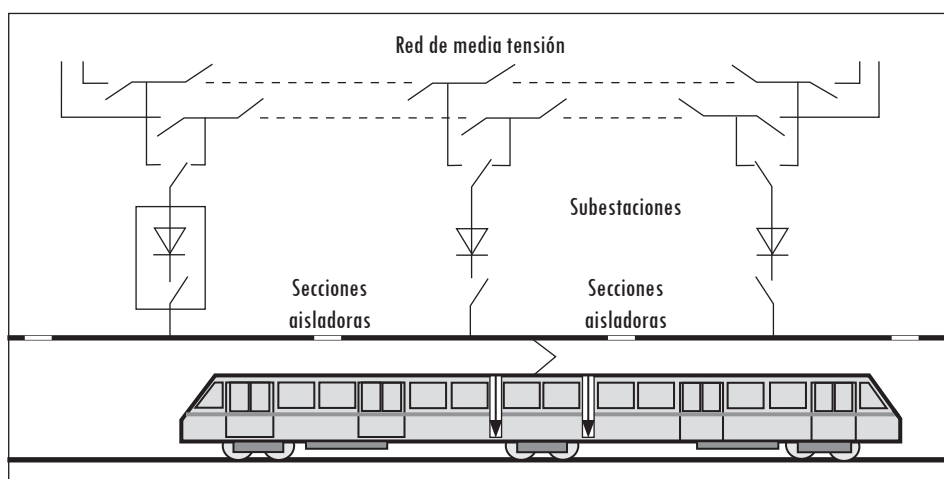
Figura 2. Subestación con suministro DC



Fuente: (Muller, 2000).

A las subestaciones rectificadoras se conecta la red de DC que alimenta los vehículos del sistema de tranvía por medio de secciones o tramos de red, las cuales no sobrepasan la mitad de la distancia entre dos subestaciones, como muestra la Figura 3. Adicionalmente, estas secciones o tramos de red se encuentran acopladas por una aislante no conductor, el cual sirve de guía cuando el sistema de catenaria pasa de una sección a otra. La conexión por secciones tienen el objeto de proteger las subestaciones vecinas, aislándolas en el momento de ocurrir una falla (Godman, 2006; Muller, 2000).

Figura 3. Secciones aisladoras

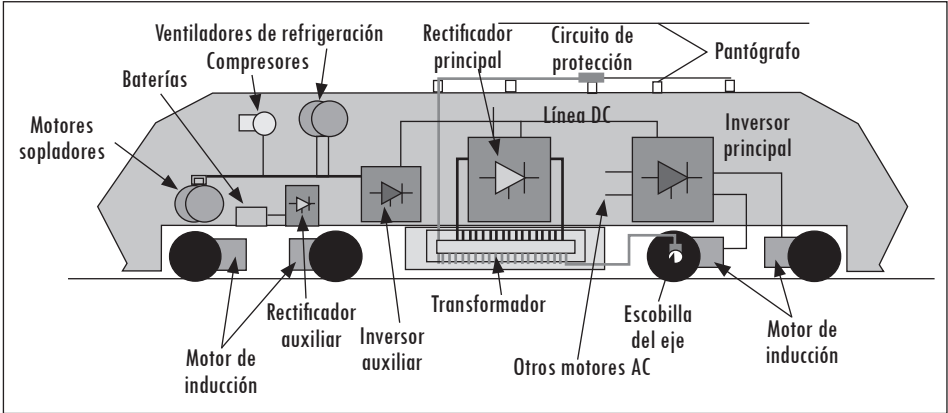


Fuente: modificado de (Chapas, 2003).

3. Cargas eléctricas

La Figura 4 muestra las cargas eléctricas más relevantes y los elementos que contienen electrónica de potencia dentro de un tranvía y que se encuentran dentro de sus vagones (Godman, 2006; PRC Rail Consulting, 2008).

Figura 4. Topología del vehículo de tracción



Fuente: modificado de (PRC Rail Consulting, 2008).

En la actualidad, los tranvías utilizan motores de inducción (MI) trifásicos tipo jaula de ardilla, por ser máquinas más robustas y menos costosas que los motores síncronos, que proporcionan la fuerza necesaria al sistema de tracción para movilizarse por las vías férreas. Estas máquinas eléctricas tienen un consumo de 44 a 280 kW por motor, ubicados en los vagones del vehículo. Cada vagón puede albergar hasta 12 motores, según el peso del vagón y la fuerza necesaria para su desplazamiento (Muller, 2000). La Tabla 1 muestra las características más relevantes de los vehículos de un tranvía, como son la longitud del vagón, el peso del tranvía sin pasajeros y la potencia en kW multiplicada por el número de motores que tiene cada vagón. Estos sistemas de transporte tienen una longitud promedio de 29.116 mm de largo y 2.457 mm de ancho. Igualmente, la Tabla 1 describe la relación potencia-peso, que brinda información del número de motores y la potencia por motor necesaria para mover un vagón con un determinado peso en toneladas.

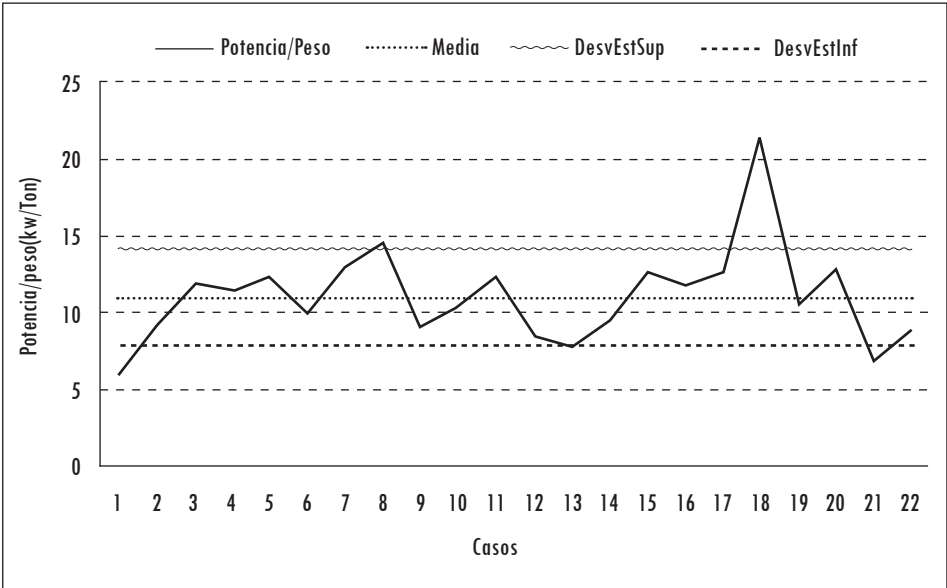
Tabla 1. Longitud, potencia y peso en diferentes tranvías del mundo

Ciudad	Largo (mm)	Ancho (mm)	Potencia/peso (kW/Ton)
Cottbus	26.770	2.200	4×45/29,8
Brno	30.300	2.480	8×45/39
Magdeburgo	29.400	2.300	4×95/32,5
Viena	26.800	2.650	4×100/35
Grenoble	29.400	2.300	2×275/45
Boston	22.555	2.641	4×100/40
Estocolmo	30.100	2.650	4×120/37
Montpellier	29.630	2.650	4×140/39
Berlín	26.540	2.300	3×100/29
Múnich	27.260	2.300	3×120/29
Estrasburgo	43.050	2.440	16×26,5/51
Milán	34.000	2.400	12×26,5/41
Sídney	28.000	2.650	8×45/38
Erfurt	30.520	2.300	4×100/32
Melbourne	19.080	2.650	4×100/34
Ámsterdam	26.380	2.300	4×100/32
Roma	41.450	2.400	6×183/52
Zúrich	35.500	2.400	5×80/37
Lyon	32.326	2.400	4×120/38
Francfortsur-le-Main	24.490	2.650	2×130/38
Manchester	29.000	2.650	4×105/48

Fuente: (Muller, 2000).

La Figura 5 muestra la relación en kW por tonelada de los tranvías construidos en los últimos diez años. Se observa que el valor medio está en 11,01 kW/Ton, con una desviación estándar de 3,21 kW/Ton. Ello representa el uso promedio de un tranvía que tiene cuatro motores con potencias de 100 kW cada uno, capaz de mover un peso aproximado de 35 Ton. Del mismo modo, la Figura 5 muestra el valor mínimo y máximo de esta relación en 6,05 y 21,12 kW/Ton, respectivamente.

Figura 5. Casos relación potencia-peso



Fuente: presentación propia de los autores.

Otra carga importante que hace parte del vehículo tranvía son los ventiladores de refrigeración, encargados de mantener los sistemas que contienen electrónica de potencia a temperaturas normales. El suministro de potencia para estos ventiladores se realiza por medio de inversores en AC a niveles de 400 V. Los motores sopladores (Motor Blowers) también conforman las cargas eléctricas del sistema. Estos trabajan como ventiladores de los MI, cuando se calientan en jornadas altas de trabajo, y funcionan con un suministro de AC trifásica a 400 V aproximadamente, suministrados por un inversor auxiliar (PRC Rail Consulting, 2008).

Los tranvías tienen baterías para alimentar algunos circuitos de control, procesadores digitales y luces de emergencia, entre otros, cuando el suministro de la línea falla. Algunos tranvías tienen en sus vehículos transformadores que permiten disminuir la tensión cuando funcionan a niveles de 25 o 50 kVAC con 60 Hz —normalmente en tranvías interurbanos— (PRC Rail Consulting, 2008; Cougnon y Cavenaile, 1993).

Existen otras cargas que se alimentan de la línea de distribución del tranvía, como son: el sistema de aire acondicionado (compresores y condensadores refrigerantes) y la iluminación. Adicionalmente, se emplean baterías para suplir la tensión en el momento de ocurrir una falla y para alimentar sus sistemas de

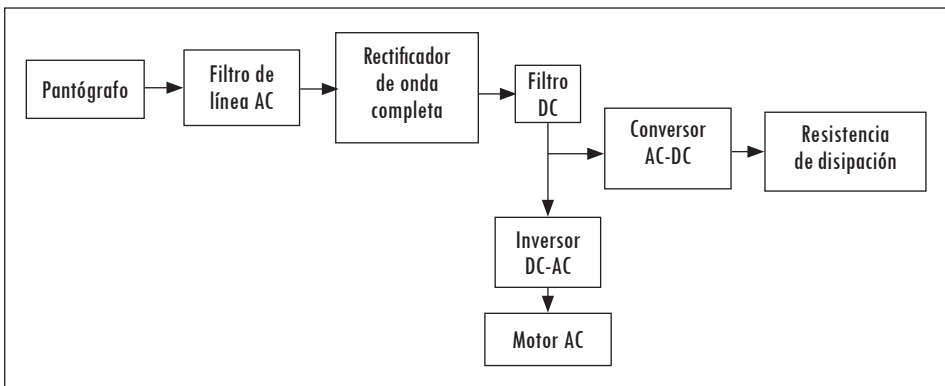
control a niveles de tensión en DC (Fisher, 2006; Cougnon y Cavenaile, 1993). El sistema de tranvía tiene iluminación de emergencia alimentada por medio de inversores de alta frecuencia (Fisher, 2006).

4. Control de las cargas eléctricas

En la mayoría de tranvías el control de las cargas eléctricas hace parte del vehículo de transporte, y tecnologías como tiristores *Gate Turn Off* (GTO) e IGBT, que utilizan modulación por ancho de pulso (PWM) se implementan en circuitos, rectificadores AC/DC, inversores DC/AC y filtros, los cuales permiten controlar parámetros como cambios de velocidad y frenado en el sistema de tracción (Godman, 2006). Los circuitos inversores utilizan los transistores IGBT para alimentar los MI trifásicos, a diferencia de los GTO, por su habilidad de respuesta en situaciones de corto circuito. Del mismo modo, los circuitos de frenado utilizan IGBT para variar la velocidad y detener la máquina rodante. Existen dos clases de frenado en sistema de tranvía: el frenado con reóstato y el frenado regenerativo (Perrin y Venard, 1991; Steimel, 1996; Forero, 2008).

La Figura 6 ilustra el esquema del sistema de frenado con reóstato, que utiliza un convertidor bidireccional que permite conectar el arreglo de resistencias de frenado, las cuales absorben la energía liberada por el circuito de tracción y la disipan en forma de calor. Del mismo modo, se observa la distribución del sistema de control de la carga eléctrica, como son: el filtro en AC para la línea, los rectificadores de onda completa para sistemas alimentados con AC de 25 y 50 kV a 50 o 60 Hz, filtros en DC, así como inversores de voltaje que permiten suplir la alimentación del motor de inducción trifásico en AC (Forero, 2008).

Figura 6. Diagrama de frenado con reóstato

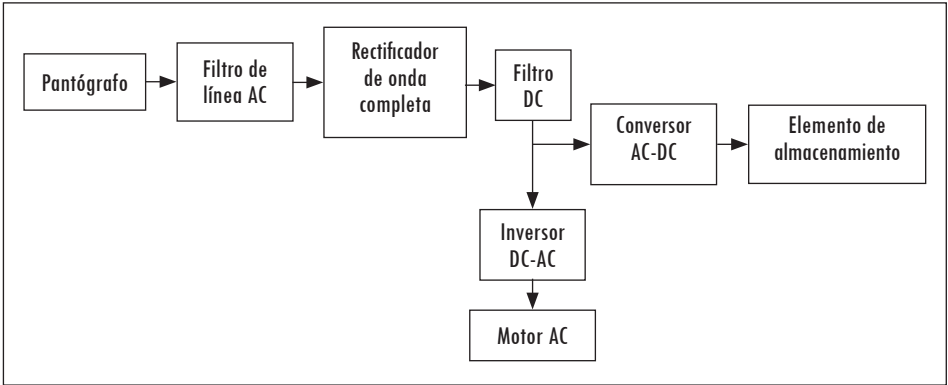


Fuente: modificado de (Forero, 2006).

Sin embargo, en la actualidad, el sistema de frenado regenerativo es el más utilizado en sistemas de tranvía, y existen algunos que usan las dos clases de frenado de manera simultánea. Existen dos formas de realizar el frenado regenerativo: inyección de la energía hacia la línea con el fin de alimentar otros vehículos y almacenamiento en ultracapacitores, con el objeto de retener la energía y utilizarla en el momento de arranque y aceleración. Los componentes de electrónica de potencia que utilizan los circuitos de frenado regenerativo son los IGBT y los GTO con arreglos de reóstatos en paralelo (Perrin y Venard, 1991; Forero, 2008).

La Figura 7 muestra el sistema de control eléctrico de un tranvía con frenado regenerativo, el cual tiene un elemento de almacenamiento de energía como es el ultracapacitor. También se observa el filtro en AC, el rectificador para tranvías que son alimentados en AC, el filtro en DC y el sistema de inversión compuesto de transistores IGBT, que permiten alimentar el motor de inducción trifásico del tranvía (Forero, 2008).

Figura 7. Diagrama de frenado regenerativo con elemento de almacenamiento



Fuente: modificado de (Forero, 2006).

5. Experiencias internacionales

En los últimos diez años se ha construido un número considerable de tranvías. La Tabla 2 muestra los fabricantes más importantes en las principales ciudades del mundo (Muller, 2000).

Tabla 2. Ejemplos de tranvías construidos en los últimos diez años

Ciudad	Año	Fabricantes
Cottbus	1997	CKD/MGB/SWP/FIAT-SIG
Schwerin	2001-2005	Bombardier -DWA/Kiepe
Brno	1998	CKD-Tatra
Magdeburgo	1994-2000	DWA/LHB/ABB
Viena	1993-2000	Bombardier/Kiepe
Grenoble	1986-1997	Alstom/De Dietrich
Boston	1998-2000	Breda/ADtranz
Estocolmo	1999	Bombardier/ADtranz
Montpellier	1999-2000	Alstom
Berlín	1994-2001	ADtranz
Múnich	1994-2000	ADtranz/Siemens
Sídney	1997	ADtranz
Melbourne	2001-2002	Siemens
Roma	2000	FIAT
Zúrich	2001-2004	ADtranz
Lyon	2002	Alstom
Francfort-sur-le-Main	1994-1998	Düwag/Siemens
Manchester	1992-1997	Ansaldo/Firema/Alstom

Fuente: (Muller, 2000).

6. Conclusiones

Este artículo presentó las principales características técnicas y operacionales de los tranvías, haciendo hincapié en los esquemas típicos de alimentación de energía eléctrica. De la misma manera, se mostraron los componentes de las subestaciones rectificadoras, que son los equipos que se encargan de transformar y rectificar el voltaje a niveles apropiados para la alimentación en DC de los vehículos de tracción. Finalmente, se realizó un resumen detallado de los principales componentes de los vehículos de tracción.

Referencias

- BRISOU, F. *Tramway TFS (Grenoble, Rouen et Bobigny)*. 2008. <<http://pagesperso-orange.fr/florent.brisou/Fiche%20Grenoble.htm>> [consulta: 10-04-2008].
- CHAPAS, P. Composantes et applications électriques du système ferroviaire. En: *Techniques de l'Ingénieur*. Alstom Transport, 2003.

- COUGNON, P. H. y CAVENAILE, F. The Brussels Tramway 2000 with Asynchronous Traction. *The European Power Electronics Association*. 1993, vol. 5, núms. 13-16, pp. 299-302.
- FISHER, I. y BOLTON, G. Auxiliary power systems for rolling stock. *Metronet Rail*. 2006, pp. 167-175.
- FORERO, M. *Aplicaciones de electrónica de potencia en tracción vehicular*. Proyecto de grado. Bogotá: Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, 2006.
- GOODMAN, C. Overview of electric railway system and the calculation of train performance. *The 9th Institution of Engineering and Technology Professional Development Course on Electric Traction Systems. Electric Traction System*, Manchester, 2006, pp. 1-24.
- MULLER, G. Tramway. *Techniques de l'Ingénieur*, August, 2000.
- PERRIN, J. P. y VENARD, C. Transports électriques urbains – Distribution d'énergie. Automatismes de contrôle. *Techniques de l'Ingénieur*, 1991.
- PRC RAIL CONSULTING. *Railway technical web pages electric traction*, 2008. <<http://www.railway-technical.com/elec-loco-bloc.shtml>> [consulta: 15-03-2008].
- STEIMEL, A. Electric railway traction in Europe. *IEEE Industry Applications Magazine*. 1996, vol. 1, November, pp. 40-48.