

**LUIZ CARLOS EVANGELISTA DE QUEIROZ**

**Uso de simulação para análise de estratégias que visam economia de energia em sistemas Metro Ferroviários e tecnologias disponíveis de armazenamento: Volante de Inércia e Sistemas de Armazenamento**

**São Paulo  
2016**

**LUIZ CARLOS EVANGELISTA DE QUEIROZ**

**Uso de simulação para análise de estratégias que visam economia de energia em sistemas Metro Ferroviários e tecnologias disponíveis de armazenamento: Volante de Inércia e Sistemas de Armazenamento**

Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Especialista em Tecnologia Metro Ferroviária.

São Paulo  
2016

**LUIZ CARLOS EVANGELISTA DE QUEIROZ**

**Uso de simulação para análise de estratégias que visam economia de energia em sistemas Metro Ferroviários e tecnologias disponíveis de armazenamento: Volante de Inércia e Sistemas de Armazenamento**

Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Especialista em Tecnologia Metro Ferroviária.

Área de Concentração: Sistemas de Potência

Orientador: Prof. Dr. Lourenço Matakas Junior

v.1

São Paulo  
2016

Queiroz, Luiz Carlos Evangelista de

Uso de simulação para análise de estratégias que visam economia de energia em sistemas Metro Ferroviários e tecnologias disponíveis de armazenamento: Volante de Inércia e Sistemas de Armazenamento / L. C. E. Queiroz -- São Paulo, 2016.

32 p.

Monografia (Especialização em Especialização em Tecnologia MetroFerroviária.) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1.Sistemas de armazenamento de energia 2.Volante de inércia (Flywheel) 3.Recuperação de Energia I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia II.t.

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

LUIZ CARLOS EVANGELISTA DE QUEIROZ

Monografia apresentada à Escola Politécnica  
da Universidade de São Paulo para obtenção  
do título de Especialista em Tecnologia Metro  
Ferroviária.

Área de Concentração: Sistemas de Potência

Aprovado em:

Banca examinadora

Prof. Dr. Ivan Eduardo Chabu

Instituição: Universidade de São Paulo      Assinatura: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Lourenço Matakas Júnior

Instituição: Universidade de São Paulo      Assinatura: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Mauricio Barbosa de Camargo Salles

Instituição: Universidade de São Paulo      Assinatura: \_\_\_\_\_

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Lourenço Matakas Junior, pela orientação, entusiasmo e constante estímulo transmitido ao longo de todo o processo deste trabalho.

À Companhia do Metropolitano de São Paulo – Metrô, pelo apoio financeiro e confiança depositada pelas pessoas: Milton Gioia Junior, Roberto Torres Rodrigues, Antonio Marcio de Barros Silva, Glauco Fernandes Lopes, Fábio Siqueira Netto, José Thomaz Winter Filho, Marcio Stevani, Marcelo Zirolto e Jackson de Carvalho Galocha.

À Unimetro, na figura de Raquel Anderman da Silva, Dilce Carvalho de Andrade e Marilisa Pinto França Battiato pelo suporte e atenção ao longo do período.

A todos os professores do curso pela compreensão e conhecimentos compartilhados. A todas as amizades que germinaram durante essa experiência.

A minha esposa Silvana e meu filho Lucas pelo apoio, compreensão, incentivo e companheirismo sempre presente.

Determinação, coragem e autoconfiança são fatores decisivos para o sucesso. Se estivermos possuídos por uma inabalável determinação conseguiremos superá-los. Independentemente das circunstâncias, devemos ser sempre humildes, recatados e despidos de orgulho. (Dalai Lama)

## RESUMO

A busca pela eficiência energética está presente em toda sociedade e não poderia ser diferente no transporte Metro ferroviário. No Metrô de São Paulo, aproximadamente 70% da energia consumida é utilizada na tração do material rodante. A recuperação de energia proveniente da frenagem das composições ao longo da operação comercial vem sendo utilizada em diversas empresas ao redor do mundo como forma de conseguir economizar esta energia consumida. Com esta finalidade, tem-se adotado Sistemas de Armazenamento de Energia ( ESS ) utilizando diversas tecnologias, entre elas, as principais: baterias de alto rendimento, volantes de inércia e supercapacitores. ESS têm conseguido, de acordo com estudos divulgados, uma economia em torno de 15 % a 30 % do total utilizado na tração do Material Rodante.

**Palavras-chave:** Sistemas de armazenamento de energia, volante de inércia, baterias, supercapacitores, recuperação de energia.



## ABSTRACT

The search for energy efficiency is present in every society and could not be different in the railway transport. In the São Paulo subway, approximately 70% of the energy consumed is used in traction the Rolling Stock. The energy recovery from braking of the compositions along the commercial operation has been used in various companies around the world as a way to achieve this save energy. For this purpose it has been adopted Energy Storage Systems (ESS) using various technologies, among which the main ones: high-performance batteries, supercapacitors and flywheels. ESS have achieved, according to published studies, a savings of about 15% to 30% of the total used in traction the Rolling Stock.

**Keywords:** Energy storage system, flywheel, batteries, supercapacitors, energy recovery.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de Propulsão.....	14
Figura 2 – Sistema de Propulsão ( Potência).....	15
Figura 3 – Frenagem Regenerativa.....	15
Figura 4 – Frenagem Reostática.....	16
Figura 5 – Vista interna do Volante Vycon.....	20
Figura 6 – Corte do conjunto do volante de inércia.....	21
Figura 7 – Sistema Flywheel do Metrô de Los Angeles.....	23

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tecnologias de Armazenamento de Energia.....	17
Tabela 2 – ESSs de Bordo.....	26
Tabela 3 – ESSs Estacionárias.....	28

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMB	Rolamentos magnéticos ativos
BESS	Sistemas de armazenamento de energia de bordo
EDLC	Capacitores de dupla camada
ESS	Sistemas de Armazenamento de Energia
EESS	Sistemas de Armazenamento de Energia Estacionário
HMB	Rolamentos magnéticos híbridos
HTSC	Supercondutores de alta temperatura
IGBT	Transistor Bipolar de Porta Isolada
LI-ÍON	Ion Lítio
METRÔ	Companhia do Metropolitano de São Paulo
NI-CD	Níquel-Cádmio
NI-MH	Níquel-hidreto metálico
PB	Chumbo
PMB	Rolamentos magnéticos passivos
VVVF	Inversor de tensão e frequência variáveis

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	FRENAGEM NO SISTEMA METRO FERROVIÁRIO.....	14
3	TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA.....	17
3.1	VOLANTE DE INÉRCIA.....	18
3.1.1	FUNCIONAMENTO BÁSICO.....	18
3.1.2	EQUIPAMENTO DE ARMAZENAMENTO COM FLYWHEEL.....	19
3.1.3	UTILIZAÇÃO NO TRANSPORTE METRO FERROVIÁRIO.....	23
4	SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA.....	24
4.1	SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA DE BORDO...	24
4.2	SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO ESTACIONÁRIO.....	27
5	CONCLUSÃO.....	29
	REFERÊNCIAS.....	30

## 1. Introdução

Em 2014 foi lançada pela Companhia do Metropolitano de São Paulo – Metrô, a política de fontes alternativas de energia e eficiência energética – POL 10-200 (METRO-SP, 2015), definindo diretrizes básicas de arquitetura, sistemas e material rodante, relativos a fontes alternativas de energia e eficiência energética para as novas linhas e para a modernização das linhas existentes.

No ano de 2014 o METRÔ-SP transportou 1 bilhão e 100 milhões de passageiros em sua rede de 66,20 Km de extensão e 59 estações. O consumo anual de energia elétrica para a operação e manutenção do sistema foi de 589 GWh, representando um gasto em torno de R\$ 100 milhões. Deste total, a energia utilizada na tração dos trens foi de 413,8 GWh, ou seja, em torno de 70% do total consumido, ao custo de R\$ 70 milhões (METRO-SP, 2015).

O reaproveitamento da energia cinética de frenagem (frenagem regenerativa) é usado em diversos tipos de veículos elétricos, visando reutilizar a energia cinética que seria desperdiçada na desaceleração destes veículos, tornando-os mais eficientes e sustentáveis. A utilização da frenagem elétrica regenerativa não é uma novidade nos sistemas metroviários, alguns países da Europa e Ásia e os Estados Unidos realizam o reaproveitamento de energia, visando sempre à redução no consumo de energia, conseguindo segundo a literatura, uma redução de até 30% (Barreiro, 2010; Dominguez, 2011; Chymera, 2008).

Este trabalho tem como finalidade apresentar as principais tecnologias de armazenamento de energia (*ESS – Sistemas de Armazenamento de Energia*) e suas aplicações para redução no consumo de energia elétrica na tração dos trens.

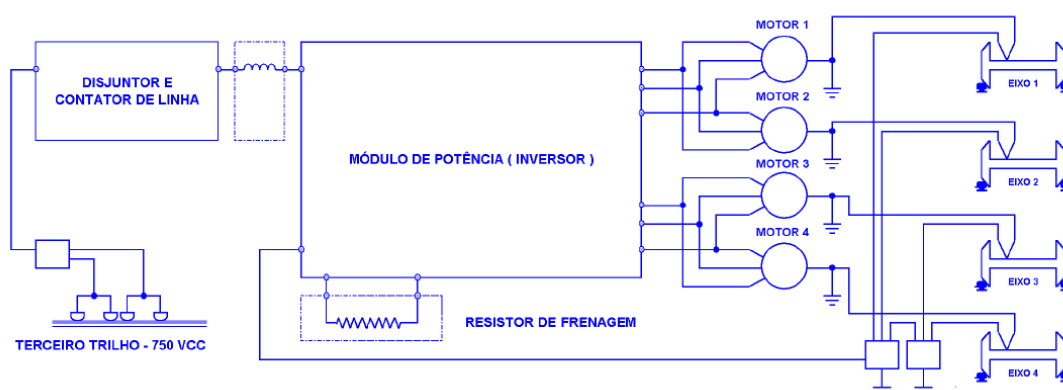
## 2. Frenagem no Sistema Metro Ferroviário

A frenagem no sistema Metro ferroviário pode ser feita com freios mecânicos ou através de frenagem elétrica. As técnicas de frenagem elétrica necessitam de pouquíssima manutenção, são eficientes e garantem a precisão da parada durante a operação do motor, além de possibilitar a regeneração de energia.

Os sistemas de transporte Metro Ferroviários constituem-se em sua grande maioria de composições equipadas por tração elétrica com sistemas de frenagem que podem ser regenerativos ou não. O sistema de frenagem atual é dividido em duas partes, a frenagem dinâmica, que é responsável por grande parte da desaceleração da composição e a frenagem mecânica, que atua para finalizar e manter a parada do trem ou ainda nas frenagens de emergência (Pires, 2013).

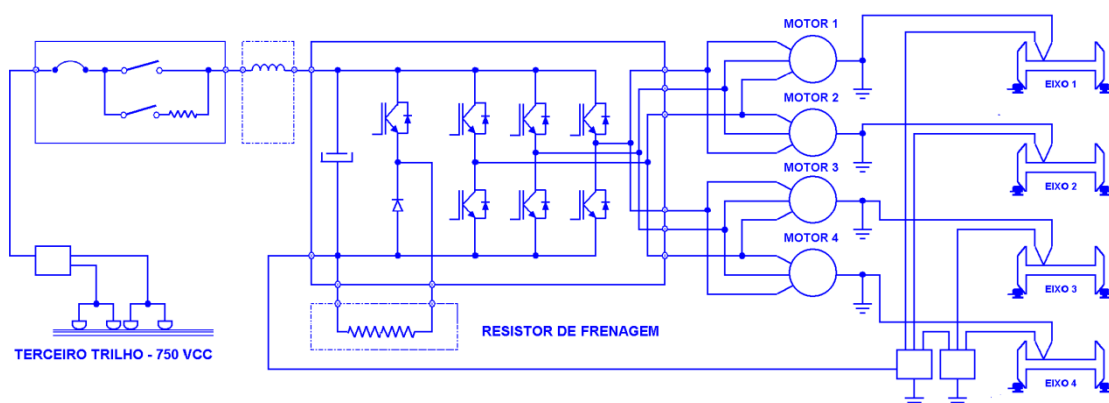
Com a modernização das composições do Metrô de São Paulo iniciada em 2009, a tração passou a contar com motores de corrente alternada, substituindo os motores de corrente contínua. O controle dos motores também foi modernizado, trocando o ultrapassado “chopper” por inversores modernos, microprocessados e com IGBT’s, como mostrado nas figuras 1. A figura 2 mostra a ponte inversora trifásica formada por IGBT’s de alto desempenho, constituindo o sistema de potência do inversor de tensão e frequência variáveis (VVVF) que controla os motores de tração.

Figura 1 - Sistema de Propulsão



Fonte: Alstom (2007)

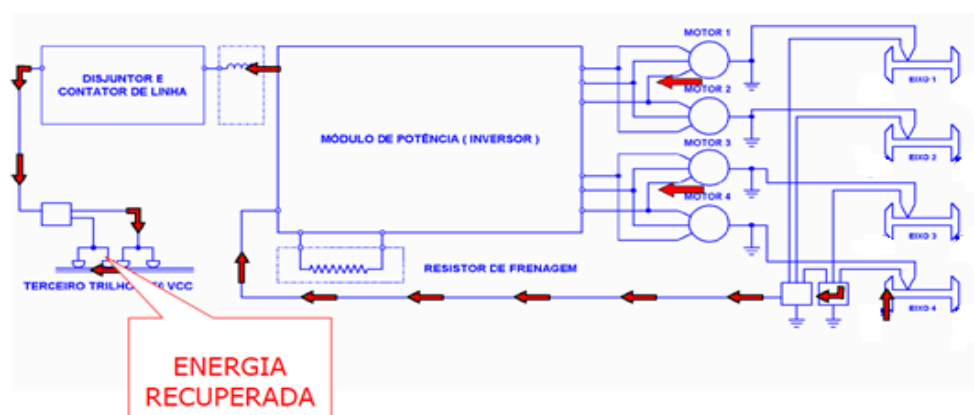
Figura 2 - Sistema de Propulsão – Potência



Fonte: Alstom (2007)

A frenagem regenerativa consiste em recuperar a energia gerada durante a frenagem da composição, passando a utilizar o motor como gerador. Neste caso, O inversor vai alimentar o motor com uma tensão de frequência e amplitude menor, fazendo com que o campo no interior do motor gire com uma velocidade menor. Nessa situação o motor comporta-se como gerador. A recuperação da energia implica na devolução para a rede de alimentação (figura 3). Para que ocorra a frenagem regenerativa, a alimentação do sistema de tração deve estar “receptiva”, ou seja, no caso da linha 1 do Metro -SP que é alimentada por 750 VDC, a tensão não pode estar acima de 900 VDC. Para limitar a variação na rede elétrica, podem-se utilizar sistemas de armazenamento de energia, fazendo com que tenhamos sempre o sistema de alimentação receptivo.

Figura 3 - Frenagem regenerativa

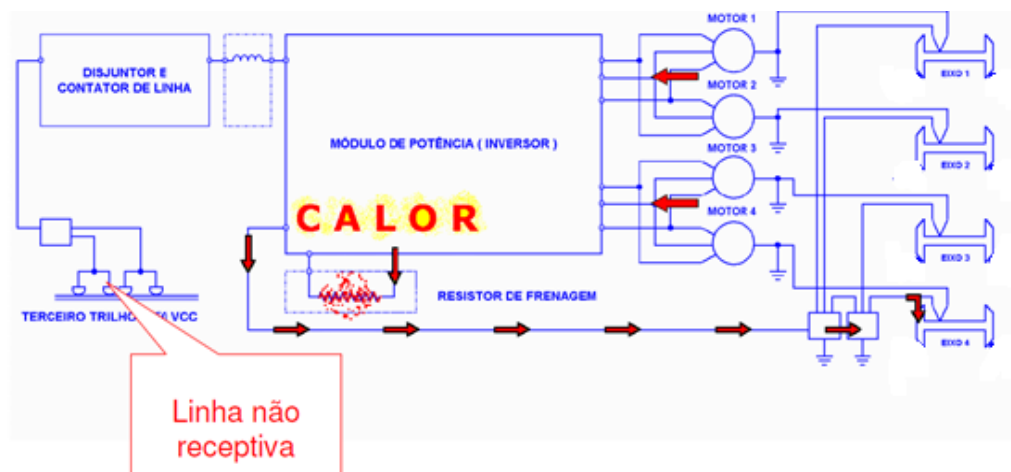


Fonte: Alstom (2007)



A frenagem reostática tem o mesmo princípio da frenagem regenerativa, porém as condições da alimentação do sistema não permitem a devolução da energia gerada durante a frenagem, devendo então ser consumida por uma carga resistiva (figura 4).

Figura 4 - Frenagem Reostática



Fonte: Alstom (2007)

Como pode ser observado, na frenagem reostática toda energia proveniente dos motores é perdida em forma de calor no resistor de frenagem. É a recuperação desta energia que está sendo estudado no presente trabalho.

### 3. Tecnologias de Armazenamento de Energia

As tecnologias de armazenamento de energia convertem energia elétrica em outras formas de energia que podem ser armazenadas para utilização quando necessário. Por exemplo, volantes de inércia, transformam energia elétrica em energia cinética. A escolha da melhor tecnologia depende entre outros motivos, do tempo de resposta, peso, volume, temperatura de operação, ciclo de carga, potência, preço, etc.

Atualmente encontramos muitas tecnologias de armazenamento de energia em estudo, entretanto comercialmente, se destacam: Capacitores de dupla camada (EDLC), volantes de inércia (Flywheel) e baterias. Neste trabalho serão apresentadas as características dos volantes de inércia e no trabalho do Alberto serão abordados os EDLCs e baterias.

A tabela 1 mostra as principais tecnologias e suas características.

Tabela 1- Tecnologias de Armazenamento de energia

<i>Tipo</i>	<i>Eficiência %</i>	<i>Densidade Wh/Kg</i>	<i>Potencia W/Kg</i>	<i>Ciclos de vida</i>	<i>Carga e descarga</i>
<i>Bateria Pb</i>	<i>70 -80</i>	<i>20 -35</i>	<i>25</i>	<i>200 -2000</i>	<i>Baixo</i>
<i>Bateria NI-CD</i>	<i>60-90</i>	<i>40-60</i>	<i>140-180</i>	<i>500-2000</i>	<i>Baixo</i>
<i>Bateria NI-MH</i>	<i>50-80</i>	<i>60-80</i>	<i>220</i>	<i>&lt; 3000</i>	<i>Médio</i>
<i>Bateria Li-íon</i>	<i>70-85</i>	<i>100-200</i>	<i>360</i>	<i>500-2000</i>	<i>Médio</i>
<i>EDLC</i>	<i>95</i>	<i>&lt; 50</i>	<i>4000</i>	<i>&gt;50000</i>	<i>Muito alto</i>
<i>Volante de inércia</i>	<i>95</i>	<i>30</i>	<i>5000</i>	<i>&gt;20000</i>	<i>Muito alto</i>

### **3.1. Volante de Inércia (Flywheel)**

A utilização do volante de inércia para armazenar a energia não é uma tecnologia nova.

Foi durante a revolução Industrial ocorrida entre os anos de 1760 e 1840 que se verificou o despertar do uso da Flywheel, onde esta era aplicada em vários segmentos, tais como, por exemplo, no uso nas máquinas a vapor. Durante vários anos diversos formatos e estudos foram implementados, mas levou até ao início do século XX para o atual estudo da forma do rotor e analisadas as tensões na rotação. Mais tarde em 1970 foi proposta a flywheel como sistema de armazenamento implementada nos veículos elétricos e alternativa para armazenamento em caso de falha de energia. No mesmo tempo devido ao desenvolvimento das tecnologias, os rotores seriam construídos a partir de compósitos de fibra, e na década de 80 os rolamentos magnéticos começaram a aparecer. (DIAS, 2013, p.25).

De acordo com Fisk e Ricci (2006), os volantes podem ser divididos em três gerações: Volantes de primeira geração, que são constituídos de material maciço, pesando dezenas de toneladas, mas com baixa densidade de armazenamento de energia. Volantes de segunda geração, que são constituídos de materiais compostos e têm maior densidade de armazenamento de energia, mas limitado em massa devido às limitações estruturais e de estabilidade. Volantes de terceira geração, com grande capacidade de armazenamento de energia, utilizando rolamentos magnéticos, girando à alta velocidade, armazenando energia cinética.

Os volantes de inércia podem ser utilizados para armazenar energia de freios elétricos, reduzir a demanda de energia elétrica nos horários de pico, isolar o sistema elétrico de sobre tensões, reduzir a incidência de interrupções na transmissão e prover energia no caso de blackouts.

#### **3.1.1 Funcionamento Básico**

O volante de inércia armazena energia na forma de energia cinética em uma massa rotacional acoplada a uma máquina elétrica que trabalha como

motor/gerador. Motor quando está armazenando a energia cinética (conversão de energia elétrica em mecânica, fazendo acelerar a massa) e gerador, quando está convertendo a energia cinética em elétrica (desacelerando a massa).

A energia cinética acumulada ( $E$ ) depende do momento de inércia ( $I$ ) do rotor e do quadrado da velocidade angular ( $\omega$ ):

$$E = 1/2 I * \omega^2 \quad (1)$$

Sendo que o momento de inércia de uma partícula de massa ( $M$ ) que gira em uma circunferência de raio ( $r$ ) em torno de um eixo é dada pela equação 2a. Para corpos rígidos é dada pela equação 2b:

$$I = M * r^2 \quad (2a)$$

$$I = \int_{vol} r^2 \, dm \quad (2b)$$

De acordo com a eq.1, pode-se aumentar a energia acumulada no volante, aumentando o momento de inércia ou a velocidade angular. Entretanto, de acordo com a eq. 2a, o aumento do momento de inércia implica em volantes maiores e mais pesados, com a massa concentrada em região afastada do eixo de rotação. Desta forma, atualmente os volantes comercialmente disponíveis, são compactos e funcionam a altas velocidades rotacionais. Os avanços tecnológicos em materiais nos últimos anos e principalmente a utilização de rolamentos magnéticos (ausência de atrito do rotor), foram fundamentais para o desenvolvimento de volantes de alto desempenho e eficiência.

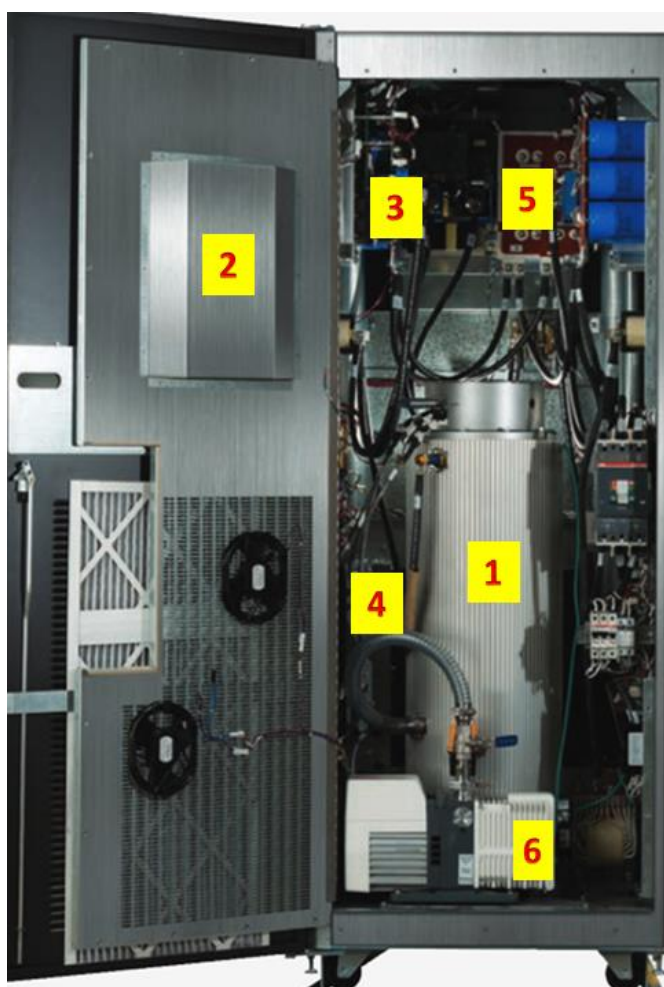
### **3.1.2 Descrição de um equipamento de Armazenamento de Energia com Flywheel**

O volante de inércia funciona de forma bidirecional, ou seja, permite o fluxo de potência da carga para o equipamento e do equipamento para a carga. O equipamento, tipicamente, é constituído por: massa girante acoplada a um rotor, motor-gerador integrado, mancais

mecânicos ou magnéticos com o respectivo controlador, bomba de vácuo, conversor eletrônico e equipamentos dedicados ao controle, comando, sinalização/monitoração e proteção do sistema. O volante de inércia necessita de energia auxiliar para funcionamento de ventiladores, controladores, bomba de vácuo, entre outros. No caso da falta da energia elétrica externa, o rotor mantém-se suspenso através de uma fonte de energia “back-up” exclusiva. Todos os demais componentes (painel de comando, bomba de vácuo, etc.) são desligados. Com a falta de alimentação “back-up”, o equipamento consome sua própria energia gerada, mantendo os rolamentos magnéticos ativos até os mesmos atingirem gradativamente rotação zero (Morais,2007,p.35).

A figura 5 mostra os principais componentes de um modelo comercialmente disponível.

Figura 5 - Vista interna do volante Vycon (300 KW, 705 Kg)

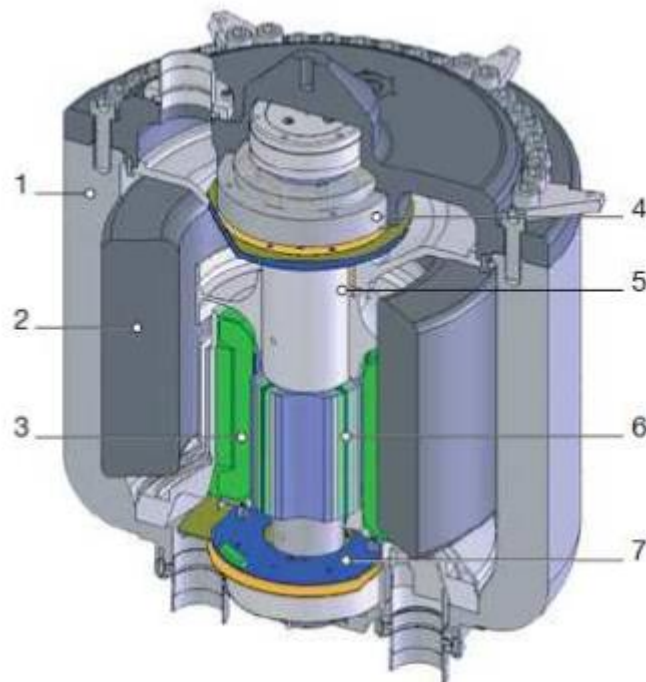


1. Volante de inércia;
2. Interface gráfica do volante
3. Controlador principal
4. Controlador do mancal magnético
5. Conversor eletrônico
6. Bomba de vácuo

Fonte: Vycon (2015)

A figura 6 mostra os elementos constituintes do interior do invólucro do volante de inércia.

Figura 6 - Corte do conjunto do volante de inércia.



- 1. Invólucro.
- 2. Volante de inércia em carbono e fibra de vidro.
- 3. Estator.
- 4. Rolamento magnético superior.
- 5. Sistema de vácuo.
- 6. Rotor.
- 7. Rolamento magnético inferior.

Fonte: Socomec (2015)

O involucro deve ser capaz de suportar os impactos dos fragmentos no caso do volante se colapsar em virtude do descontrole de velocidade. Esta é uma preocupação constante, já que o volante, dependendo da sua capacidade, pode-se tornar um verdadeiro explosivo. A adoção de rolamentos magnéticos, fazendo com que o rotor não sofra desgastes e interferências, é considerada fundamental para o aumento de vida útil e eficiência do volante de inércia.

Rolamento magnético é um rolamento que suporta uma carga usando levitação magnética sem contato físico, por exemplo, eles podem levar um eixo de rotação e permitir o movimento rotativo sem atrito ou desgaste. Eles estão em serviço em aplicações industriais como a produção de energia elétrica, refinação de petróleo, operação de máquinas-ferramentas e gasodutos. Existem três tipos de rolamentos: os rolamentos passivos, os ativos e os híbridos. Os apoios magnéticos passivos (PMB) são os de abordagem mais simples e baseiam-se em um ímã permanente. Este ímã permanente é concebido de modo a apoiar e a levar um objeto, tornando-o liberto do contato com o resto da estrutura. Os apoios magnéticos ativos (AMB) são constituídos por uma bobina que ao ser alimentado por uma corrente produz uma força magnética que provoca a levitação o objeto. No tipo de apoios AMB, as bobinas podem ser de condutor simples, mas nos protótipos desenvolvidos recentes são utilizados supercondutores de alta temperatura (HTSC). Os rolamentos magnéticos híbridos (HMB) combinam os méritos do PMB e do AMB. Este tipo de rolamento usa um ímã permanente para compensar a gravidade e a força resultante da velocidade excessiva, usando uma bobina magnética para compensar as instabilidades (Covão, 2008, p. 9).

### **3.1.3 Utilização no Transporte Metro Ferroviário**

Muitos estudos vêm sendo realizados para a utilização do volante de inércia no sistema de tração metro ferroviário. O sistema pode ser instalado no trem (embarcado) ou em salas técnicas específicas, entretanto, em virtude dos perigos recorrentes de falhas catastróficas, os fabricantes têm em sua maioria aplicações do volante de inércia em locais específicos ao longo da via.

Como exemplo, pode-se citar a instalação do sistema Vycon Regen kinetic energy recycling da empresa Calnetix Technologies no Metrô de Los Angeles em 2014 (Railwayage 2016). Este sistema implementado em uma subestação tem capacidade de 2 MW, sendo constituído de 4 módulos, sendo que cada módulo contém 4 unidades de flywheel, totalizando 16 unidades ligadas em paralelo, com capacidade de 125 KW por 15s por unidade. Com base nos dados obtidos até o momento, estima-se uma economia anual de 541 MWh, resultando em uma diminuição de 100 mil dólares nos gastos com

energia. Vale ressaltar que o custo do sistema ficou em torno de 1 milhão de dólares, ou seja, o retorno do investimento será em 10 anos. A figura 7 mostra os 4 módulos do sistema.

Figura 7 – Sistema Flywheel do Metro de Los Angeles



Fonte: Railwayage (2016)



#### **4. Sistemas de armazenamento de energia (ESS)**

Os avanços notáveis na eletrônica de potência e tecnologias de armazenamento de energia permitiram que ESSs se apresentassem com uma opção muito promissora para gerenciar a energia de frenagem regenerativa no transporte metro ferroviário. ESSs podem ser instalados tanto a bordo de veículos ou em pontos específicos ao longo da via (Sistema Estacionário). A primeira opção permite que veículos ferroviários possam armazenar temporariamente a sua própria energia de frenagem e reutilizá-la para a aceleração subsequente.

Por sua vez, ESSs estacionárias armazenam energia a partir de qualquer trem em frenagem e podem liberá-la quando uma demanda de energia é detectada. A seleção das tecnologias de armazenamento de energia para ESSs depende das necessidades particulares de cada caso, mas, em aplicações metro ferroviárias exigirá as seguintes características:

- Grande número de ciclos de carga;
- Capacidades de alta potência;
- Capacidade do armazenamento de energia;
- Peso e volume (especialmente para sistemas de bordo).

##### **4.1. Sistemas de armazenamento de energia de bordo (BESS)**

BESSs sem dúvida oferecem um alto potencial de economia de energia para o transporte metro ferroviário. Neste sentido, alguns estudos científicos demonstraram que o consumo de energia de tração pode ser reduzido em aproximadamente 15% a 35% em sistemas existentes, como citado em Barreiro (2010), Dominguez (2011) e Chymera (2008). BESSs podem ajudar a minimizar os picos de potência durante a aceleração dos veículos, o que resulta redução de custos de energia e menos perdas resistivas na linha de distribuição.

Além disso, eles podem ser projetados para ajudar a estabilizar a tensão de rede como citado por Cicarelli (2012) ou também para proporcionar certo

grau de autonomia para regiões livre de sistemas de alimentação, por exemplo, em linhas que percorrem centros históricos de acordo com Allègre (2010).

Quando comparado com os sistemas estacionários, BESSs apresentam uma maior eficiência devido à ausência de perdas da linha. A gestão da energia recuperada é mais simples e o controle é independente das condições de tráfego. No entanto, dispositivos de armazenamento móveis normalmente exigem grandes espaços no veículo e introduzem um aumento considerável de peso. Por estas razões, a instalação de BESSs é o preferido para projetos totalmente novos ao invés de instalação em frotas que já estão em operação.

A Tabela 2 mostra BESSs desenvolvidos pelos principais fabricantes ferroviários, juntamente com algumas de suas principais características e exemplos de aplicação no transporte metro ferroviários. Como se pode ver, a maioria dos sistemas baseiam-se na tecnologia EDLC, o que parece ser uma opção muito adequada para esse tipo de sistemas, devido à sua resposta de carga rápida / descarga, de alta densidade de energia e de custos relativamente baixos.

No entanto, a baixa capacidade de energia oferecida pelos EDLCs dificulta sua utilização em sistemas projetados principalmente para fornecer um elevado grau de autonomia. Nestes casos, as baterias de alta potência, tais como Li-ion ou NiMH, podem ser uma opção melhor. Volantes de inércia apresentam ciclo de vida e densidade de potência satisfatória, oferecendo respostas rápidas, no entanto o seu potencial risco de ruptura explosiva no caso de uma falha catastrófica tem dificultado a sua aplicação no transporte metro ferroviário, conforme citado por Thompson (2005).

Curiosamente, a Alstom está atualmente colaborando com uma empresa alemã em uma nova tentativa de adaptar esta tecnologia (Railway Gazette News, 2015). Por último, a combinação de baterias de alta potência e EDLCs parece ser uma solução promissora para aplicações em regiões livre de sistemas de alimentação. Nesta solução EDLCs podem absorver os picos de energia de frenagem regenerada e entregar a potência necessária para aceleração, enquanto que as baterias podem absorver a energia de frenagem restante e liberá-lo quando necessário, aumentando o desempenho do sistema.

Tabela 2 - ESSs de bordo desenvolvidas por fabricantes internacionais

Produto	Companhia	Tecnologia	Características Principais*	Aplicação no transporte Metrô ferroviário urbano
MITRAC (21)	Bombardier	EDLC	PT: 200 kW C: 1 kWh P: 400 kg	Bonde na cidade de Edingen-Neckarhausen, Alemanha em 2013
Sitras (22)	Siemens	EDLC	PT: 300 kW C: 0.85 kWh P: 820 kg	Bonde na Austria em 2010.
ACR (23)	CAF	EDLC	PT: N/A C: 0.8 kWh P: 800 kg	Bonde de Seville e Saragossa 2012
STEEM (24)	Alstom	EDLC	PT: N/A C: 0.8 kWh P: 800 kg	Protótipo testado em 2010 no serviço de Bonde em Paris.
Citadis (25)	Alstom e CCM	Flywheel	PT: 325 kW C: 4 kWh P: 1600 kg	Protótipo testado em Roterdã em 2004
LRV (26)	Kawasaki	NiMH	PT: 250 kW C: 120 kWh P: 3200 kg	Protótipo testado em Sapporo, 2007 – 2008.
LFX-300 (27)	Kinki Shayro	Li-ion	PT: N/A C: 40 kWh P: 3200 kg	Protótipo testado em Charlotte, 2010.
Sitras (22)	Siemens	EDLC + NiMH	PT: 288 + 105 kW C: 0.85 + 18 kWh P: 820 + 826 kg	Serviço de bonde de Lisboa em 2008.

(\*) PT = Potencia, C = Capacidade de armazenamento, P= Peso,

## 4.2. Sistemas de Armazenamento de Energia Estacionário (EESS)

ESSs estacionários armazenam a energia da frenagem regenerativa que não pode ser consumido instantaneamente no sistema, fornecendo-a quando necessário novamente para o sistema de alimentação de tração. Portanto, estes tipos de sistemas podem ser utilizados para reduzir o consumo de energia de tração do sistema, sendo de acordo com a literatura, alcançando economias de energia de 15% a 30%, de acordo com Barrero (2010) e Teymourfar (2012), mas também para estabilizar a rede conforme citado por Iannuzzi (2012).

Além disso, eles contribuem para minimizar os picos de energia durante acelerações e pode oferecer certo grau de autonomia para que trens cheguem à estação mais próxima em caso de falha do sistema de alimentação. Em comparação com BESS, eles têm menos restrições de instalação, espaço e peso normalmente não é um grande problema nas instalações da via e sua manutenção não afeta o serviço.

Entretanto, EESSs envolvem perdas de transmissão mais elevadas na linha, o qual exige um estudo cuidadoso para determinar a posição ideal dos dispositivos de armazenamento na rede (Iannuzzi, 2012). A gama de tecnologias de armazenamento de energia para sistemas estacionários é maior do que para sistemas a bordo.

Como mostrado na Tabela 3, os sistemas baseados em EDLC são as mais comercializadas hoje em dia. Não obstante, as menores restrições de peso e volume fazem baterias de alta potência uma opção válida também. Como as preocupações de segurança com volantes de inércia são menos limitantes em aplicações de via, uma vez que o volante pode ser confinado em recipientes pesados ou ainda no subsolo, vários fabricantes estão estudando e disponibilizando esta tecnologia. Desta forma, temos uma gama maior de tecnologias EESS sendo desenvolvidas e testadas no transporte metro ferroviárias ao redor do mundo.

Tabela 3 - ESSs Estacionários desenvolvidos por fabricantes internacionais

Produto	Companhia	Tecnologia	Características Principais*	Aplicação no transporte Metrô ferroviário
Sitras (22)	Siemens	EDLC	V: 500-750 V C: 800 kW S: 2.5 kWh	Metrô de Madrid em 2003; Metrô de Pequim em 2007
NeoGreen (28)	Adetel	EDLC	V: 750 V C: 300–1000 kW S: 1–4 kWh	Projeto piloto no Metrô de Lyon em 2011.
Envistore (29)	ABB	EDLC	V: 500–1850 V C: 750–4500 kW S: 0.8–16.5 kWh	Projeto piloto Metrô da Philadelphia em 2012
Capapost (30)	Meidensha	EDLC	V: N/A C: 2000kW max S: N/A	Metrô de Hong Kong em 2014
Powerbridge (31)	Piller Power	Flywheel	V: 400, 1000 V C: 1000 kW S: 5 kWh	Metrô de Rennes em 2010
GTR system (32)	Kinetic Traction	Flywheel	V: 570–900 V C: 200 kW S: 1.5 kWh	Projeto piloto Metrô de Nova York em 2002.
Regen system (5)	Vycon	Flywheel	V: N/A C: 500 kW S: N/A	Metrô de Los Angeles em 2014
GigacellBPS (26)	Kawasaki	NiMH	V: 600, 1500 V C: N/A S: 150–400 kWh	Metrô de Tóquio em 2007.
B-CHOP (33)	Hitachi	Li-ion	V: 600/750, 1500 V C: 500–2000 kW S: N/A	Metrô de Kobe em 2007.
Intensium (34)	Saft	Li-ion	V: 700 V C: 900–1500 kW S: 600–400 kWh	Projeto piloto no Metrô da Philadelphia em 2012.

(\*) V: Tensão de trabalho, PT = Potencia, C = Capacidade de armazenamento

## **5. Conclusão**

A crescente relevância que o papel da mobilidade urbana tem ocupado no desenvolvimento dos grandes centros motiva estudiosos do assunto a procurarem soluções cada vez mais viáveis e otimizadas para garantir a fluidez da circulação de veículos e pedestres nas cidades.

O sistema metropolitano de transporte de passageiros sobre trilhos é fundamental para garantir esta fluidez desejada, uma vez que possui capacidade de transporte de grandes contingentes, permitindo que as vias rodoviárias operem com menos veículos tanto de transporte coletivo como particulares. Se a população tem acesso a um transporte de massa de qualidade, rapidez e baixo custo, a tendência é que se opte por este meio de transporte.

A utilização de sistemas de armazenamento de energia para reaproveitar em sua totalidade a energia proveniente da frenagem elétrica dos trens é uma alternativa a ser considerada pelas empresas metro ferroviárias, permitindo a redução de custos operacionais e economia de energia.

## Referências

- [1] METRÔ-SP - Relatório de Sustentabilidade 2014. Disponível em <http://www.Metrô.sp.gov.br/Metrô/sustentabilidade/pdf/relatorio-sustentabilidade-2014.pdf>. Acesso em: ago. 2015.
- [2] PIRES, L. C.; Engenharia Elétrica Ferroviária e Metroviária: Do trólebus ao trem de alta velocidade. Rio De Janeiro: LTC; 2013; 432p.
- [3] DIAS, C.B.; “Dimensionamento de um Sistema Ups flywheel”, Dissertação submetida para obtenção do grau de Mestre Engenharia Eletrotécnica , 2013
- [4] FISKE O.J. , RICCI M.R.; Third Generation Flywheels For High Power Electricity Storage , 2006.
- [5] VYCON – RAIL REGEN SYSTEM. Disponível em: <http://www.calnetix.com/regen-kinetic-energy-storage-system>. Acesso em: ago. 2015.
- [6] SOCOMEC, “SOCOMEC - Flywheel Energy Storage Systems. Disponível em : <http://www.tehnounion.rs/pdf/Socomec%20UPS/Generalni%20katalog.pdf> . Acesso em: dez. 2015.
- [9] BARRERO R., TACKOEN X., VAN MIERLO J. Stationary or onboard energy storage systems for energy consumption reduction in a Metrô network, 2010.
- [10] DOMÍNGUEZ M., CUCALA A.P., FERNÁNDEZ A., PECHARROMÁN R.R, BLANQUER J. . Energy efficiency on train control – design of Metrô ATO driving and impact of energy accumulation devices. France, 2011.
- [11] CHYMER M., RENFREW A., BARNES M. Analyzing the potential of energy storage on electrified transit systems. South Korea. 2008.
- [12] IANNUZZI D., TRICOLI P. Metrô trains equipped onboard with supercapacitors: a control technique for energy saving. Pisa, Italy, 2010.
- [14] ALLÈGRE A.L., BOUSCAYROL A., DELARUE P., BARRADE P., CHATTOT E., EL-FASSI S. . Energy storage system with supercapacitor for an innovative subway. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010.
- [15] THOMPSON R., KRAMER J., HAYES R. Response of an urban bus flywheel battery to a rapid loss-of-vacuum event.,2005.
- [16] TEYMOURFAR R., ASAEI B., IMAN-EINI H., NEJATI FARD R. Stationary super-capacitor energy storage system to save regenerative braking energy in a Metrô line., 2012.
- [17] IANNUZZI D., CICCARELLI F., LAURIA D. Stationary ultracapacitors storage device for improving energy saving and voltage profile of light transportation networks.,2012.

- [18] MORAIS, D. M. , CRUZ, L. A. (2007). Estudo comparativo entre armazenador capacitivo, volante de inercia e inversor. Escola Politécnica de São Paulo . São Paulo, SP, Brasil.
- [19] ALSTOM, Treinamento de tração - frota G do Metro-SP, Apostila, São Paulo, 2007.
- [20] COVÃO, L. A.; Preliminary Approach Designing an Electromagnetic Bearing for Flywheel Energy Systems, Dissertação submetida para obtenção do grau de Mestre Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, 2008.
- [21] BOMBARDIER. Disponível em: [http://www.bombardier.com/content/dam/Websites/bombardiercom/supporting-documents/BT/Bombardier-Transport-ECO4-MITRAC\\_Energy\\_Saver-EN.pdf](http://www.bombardier.com/content/dam/Websites/bombardiercom/supporting-documents/BT/Bombardier-Transport-ECO4-MITRAC_Energy_Saver-EN.pdf). Acesso em: set. 2015.
- [22] SIEMENS. Disponível em: [http://www.siemens.com.au/files/Mobility/RI/Documents/mob\\_dc\\_traction\\_power\\_supply.pdf](http://www.siemens.com.au/files/Mobility/RI/Documents/mob_dc_traction_power_supply.pdf). Acesso em: out. 2015.
- [23] CAF. Disponível em: <http://www.caf.net/en/ecocaf/nuevas-soluciones/tranvia-acr.php>. Acesso em: jan. 2016.
- [24] RAILWAY G. Disponível em: <http://www.railwaygazette.com/news/single-view/view/supercapacitors-to-be-tested-on-paris-steem-tram.html> . Acesso em: out. 2015.
- [25] ALSTOM. Disponível em: <http://www.alstom.com/products-services/product-catalogue/rail-systems/trains/products/citadis/> . Acesso em: out. 2015.
- [26] TICKET TO KYOTO. Disponível em: [http://www.tickettokyoto.eu/sites/default/files/downloads/T2K\\_ER\\_overview\\_technologies\\_web.pdf](http://www.tickettokyoto.eu/sites/default/files/downloads/T2K_ER_overview_technologies_web.pdf). Acesso em: out. 2015.
- [27] RAILWAY G. – Disponível em: <http://www.railwaygazette.com/news/urban/single-view/view/hybrid-streetcar-unveiled-in-charlotte.html> .Acesso em: out. 2015.
- [28] NEOGREEN. Disponível em: [http://www.i-trans.org/mediatheque/pdf/Rencontres2010\\_PWP/AT3\\_Thiebault.pdf](http://www.i-trans.org/mediatheque/pdf/Rencontres2010_PWP/AT3_Thiebault.pdf) . Acesso em: out. 2015.
- [29] ABB. Disponível em: <http://www.abb.com/cawp/seitp202/84e9f73743b3b3f8c1257a39004aab33.aspx> . Acesso em: out. 2015.
- [30] CAPAPOST. Disponível em: <http://www.meidensha.com/catalog/LC54-2894.pdf>. Acesso em: out. 2015.



- [31] POWERBRIDGE. Disponível em: <http://www.balmex.hu/termekeink/pdf/Railway.pdf> . Acesso em: set. 2015.
- [32] GTR. Disponível em: <http://kinetictraction.com/flywheel-energy-storage-applications/>. Acesso em: set. 2015.
- [33] HITACHI. Disponível em: [http://www.hitachi-rail.com/products/power\\_supply/equipment/feature03.html](http://www.hitachi-rail.com/products/power_supply/equipment/feature03.html). Acesso em: jan. 2016.
- [34] INTENSIVUM. Disponível em: [www.saftbatteries.com/force\\_download/Septa.pdf](http://www.saftbatteries.com/force_download/Septa.pdf) . Acesso em: jan.2016.
- [35] Railwayage -Sistema Flywheel do Metro de Los Angeles. Disponível em : <http://www.railwayage.com/index.php/passenger/rapid-transit/la-metro-vycon-wess-system-saving-energy.html?channel=46>. Acesso em: fev. 2016.