

DENILSON MENDES DE MORAIS
LUIS ALEXANDRE DA CRUZ
RODRIGO COURA OLIVEIRA

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE ARMAZENADOR CAPACITIVO,
VOLANTE DE INÉRCIA E INVERSOR**

Trabalho de conclusão apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo, curso
de Especialização “lato-sensu” em Tecnologia
Metro-Ferroviária desenvolvido no âmbito do
Programa de Educação Continuada em
Engenharia - PECE

Orientador: Prof. Dr. Clovis Goldemberg

São Paulo
2007

ESP/TMF

2007

M791e

DEDALUS - Acervo - EPEL



31500019016

FICHA CATALOGRÁFICA

M2007CH

Morais, Denilson Mendes; Cruz, Luis Alexandre da; Oliveira, Rodrigo
Coura

Estudo comparativo entre armazenador capacitivo, volante de inércia e
inversor, 2007.

57p.

Monografia – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1. Tração Elétrica. 2. Recuperação de Energia 3. Frenagem Regenerativa.
I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de
Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1794278

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Clovis Goldemberg, pela atenção e apoio durante o processo de definição e orientação.

Ao Dr. Cassiano Lobo Pires, pela atenção e apoio durante a elaboração do trabalho.

A Companhia do Metropolitano de São Paulo - METRÔ e à Secretaria dos Transportes Metropolitanos – STM que nos propiciaram a realização deste curso.

A Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, através de seu Programa de Educação Continuada em Engenharia - PECE.

Aos colegas de curso e colaboradores neste trabalho – Antonio Márcio Barros Silva, Frederico Braga e Marcus Vinícius Romeiro Leal.

Aos nossos familiares, pelo apoio e compreensão em todos os momentos.

As pessoas que direta ou indiretamente nos auxiliaram no decorrer do nosso trabalho:

- Gerência de Concepção de Sistemas – Adalberto de Paula Ramos, Albert Haga, Carlos Eduardo Paixão de Almeida, David Turbuk, Hyao Yamamoto, Marco Polo Marmo, Massaru Saito, Mohamed Choucair, Nelson de Carvalho Scaglione, Paulo Sérgio Amalfi Meca, Romeu Mantovani Junior, Sérgio Tadashi Matsumura e Walter Costa Teixeira Pinto.
- Gerência de Concepção Civil – Ricardo Luiz Leonardo Leite.
- Gerência de Manutenção – Atilio Henrique Laudanna, Eduardo Orfale, Edivaldo Wagner Martins, Jorge Martins Secall, Mário Alberto Martin, Roberto Oliveira dos Reis e Wilmar Fratini.

RESUMO

Este trabalho apresenta as características técnicas de três tipos de equipamentos destinados ao reaproveitamento da energia disponibilizada na frenagem dos trens quando a linha não está receptiva. O armazenador capacitivo, o volante de inércia e o inversor absorvem parte da energia cinética que eventualmente seria dissipada através da frenagem reostática ou mecânica. Portanto, a utilização destes equipamentos pode resultar em redução de custo e maior eficiência operacional.

A avaliação da quantidade de energia disponível para a recuperação é a etapa básica, que pode ser realizada através de simulações ou medidas de campo. Tal etapa fornece os elementos que permitem julgar a relação custo-benefício destes equipamentos de recuperação/armazenamento de energia (ressalta-se que a viabilidade econômica para implantação dos equipamentos não é abordada neste trabalho).

Medições experimentais na Linha 3 - Vermelha do Metrô de São Paulo indicam que aproximadamente 13 MWh/dia é dissipada nos bancos reostáticos dos trens, representando 2,8 % da energia total consumida em toda operação comercial diária nesta linha.

O inversor, que é um conversor CC-CA (não armazena energia), possui dimensões menores e maior densidade de potência quando comparado ao armazenador capacitivo e ao volante de inércia. Entretanto, a utilização deste equipamento ocasiona interferências na rede de média tensão, o que não se verifica nos outros equipamentos.

Além de permitirem o reaproveitamento de energia, o armazenador capacitivo e o volante de inércia também contribuem para a estabilização da tensão CC em trechos que apresentam quedas de tensão significativas, evitando-se desta forma a desenergização de trens devido à subtensões.

ABSTRACT

This work presents the technical characteristics of three different energy regeneration equipments that can handle the kinetic energy available during the train braking. The capacitor, the flywheel storage systems and the DC/AC inverter can absorb some of the energy that would eventually be dissipated in the rheostatic or mechanical braking systems. This could reduce costs and produce operational benefits.

The evaluation of the energy available for the recovery process is a preliminary study that can be done by simulation or experimental measurements. These studies provide the information to judge the cost-benefit ratio of these energy storage/recovery devices (this work doesn't mention economics aspects of equipments' installation).

Experimental measurements taken in Line 3 - Red of São Paulo Subway indicate that approximately 13 MWh/day is wasted in the train rheostatic banks, which represents 2.8 % of the daily energy consumption of this line.

The DC/AC inverter (which doesn't store energy) has smaller dimensions and greater power density when compared with the ultracapacitor and flywheel storage systems. But, these inverters can distort the medium voltage supply, an effect that doesn't exist in these other alternatives.

Beside the energy recovery, the ultracapacitor and flywheel storage systems can be used to stabilize the DC voltage, avoiding undesired train sub-tension faults.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama esquemático do armazenador capacitivo	29
Figura 2. Vista frontal interna do volante Vycon 500 kW - dimensões 2m x 2m x 0,8 m	33
Figura 3. Diagrama esquemático do sistema de armazenamento a volante de inércia.	35
Figura 4. Estrutura PNPN e símbolo do SCR	38
Figura 5. Inversor básico	38
Figura 6. Equipamento inversor	40

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Comparação entre dispositivos - densidade de energia e potência	14
Gráfico 2. Quantidade de trens em circulação na Linha 3 no dia 01/03/2007	20
Gráfico 3. Variação da tensão CC, corrente no banco reostático e velocidade	22
Gráfico 4. Forma de tensão da saída do inversor básico	39
Gráfico 5. Forma de tensão da saída com modulação PWM	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resultados das medidas realizadas em 01/03/2007 na Linha 3	23
Tabela 2. Funcionamento do inversor básico	38
Tabela 3. Dimensões dos equipamentos	44
Tabela 4. Densidade de energia dos equipamentos	45
Tabela 5. Densidade de potência dos equipamentos	46
Tabela 6. Influência entre tensão aplicada e temperatura de operação na vida útil dos ultracapacitores	49
Tabela 7. Resumo comparativo entre equipamentos	52

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS PARA RECUPERAÇÃO DE ENERGIA	12
3. GENERALIDADES SOBRE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA.....	15
4. MEDIDAS EXPERIMENTAIS.....	18
4.1 ASPECTOS GERAIS	18
4.2 METODOLOGIA.....	19
4.3 RESULTADOS OBTIDOS.....	19
5. DETALHES DOS EQUIPAMENTOS	24
5.1 ARMAZENADOR CAPACITIVO	24
5.1.1 ULTRACAPACITOR	24
5.1.2 COMPOSIÇÃO DO EQUIPAMENTO E APLICAÇÃO NA TRAÇÃO ELÉTRICA.....	26
5.2 VOLANTE DE INÉRCIA	29
5.2.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	29
5.2.2 COMPOSIÇÃO DO EQUIPAMENTO	30
5.2.3 APLICAÇÃO NA TRAÇÃO ELÉTRICA.....	35
5.3 INVERSOR.....	37
5.3.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	37
5.3.2 COMPOSIÇÃO DO EQUIPAMENTO	40
5.3.3 APLICAÇÃO NA TRAÇÃO ELÉTRICA.....	42
5.4 COMPARAÇÃO ENTRE EQUIPAMENTOS.....	44
5.4.1 DIMENSÕES	44
5.4.2 EFICIÊNCIA.....	44
5.4.3 DENSIDADE DE ENERGIA.....	45
5.4.4 DENSIDADE DE POTÊNCIA.....	46
5.4.5 SEGURANÇA.....	46
5.4.6 MATURIDADE TECNOLÓGICA.....	47

5.4.7 IMPACTO NA REDE ELÉTRICA.....	48
5.4.8 VIDA ÚTIL	49
5.4.9 MANUTENÇÃO	50
5.4.10 CONSIDERAÇÕES GERAIS	51
6. CONCLUSÃO.....	53
REFERÊNCIAS	54
APÊNDICE A – Oferta de trens na Linha 3 em 01/03/2007.	
APÊNDICE B – Consumo de energia elétrica na Linha 3 em 01/03/2007.	

1. INTRODUÇÃO

O consumo de energia elétrica pelo sistema metroviário (propulsão dos trens, iluminação, escadas rolantes, ventilação, etc.) é, obrigatoriamente, um fator importante nos custos operacionais deste meio de transporte. Atualmente, a energia elétrica é o segundo maior gasto do Metrô de São Paulo, sendo que 80% da mesma é destinada à propulsão dos trens. No passado, houve um período no qual a energia elétrica do Metrô era fortemente subsidiada. A partir da década de 90, a diminuição do consumo de energia elétrica tornou-se extremamente importante para o Metrô.

Sabe-se que os trens possuem a capacidade de converter a energia cinética em energia elétrica durante o processo de frenagem, quando as máquinas elétricas são reconfiguradas para operarem como geradores. Tal energia elétrica pode, eventualmente, ser utilizada por algum outro trem que também esteja naquele trecho (e que esteja “receptivo”). Caso isto não ocorra, a energia elétrica é dissipada na forma de calor nos resistores de frenagem, acarretando em desconforto aos usuários, além de solicitar um desempenho maior do sistema de ventilação em trechos subterrâneos.

Este estudo avalia as diferentes tecnologias que permitem o armazenamento/recuperação de energia, tornando a linha CC sempre receptiva, independentemente da presença de outros trens nas proximidades. Dentre os possíveis benefícios, podem ser mencionados:

- Redução dos custos operacionais do Metrô em virtude da utilização da energia elétrica de forma mais racional;
- Menor solicitação do sistema de ventilação principal em trechos subterrâneos;
- Redução de gastos com manutenção referentes aos discos e pastilhas de freios.

2. TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS PARA RECUPERAÇÃO DE ENERGIA

Diferentes tecnologias e equipamentos podem ser utilizados para aproveitamento da energia disponibilizada na frenagem regenerativa quando a linha não está receptiva. Tais tecnologias de armazenamento/recuperação devem ser avaliadas através de dois critérios: a energia e a potência. Dentre as tecnologias disponíveis citam-se: armazenador magnético, bateria, armazenador capacitivo, volante de inércia e inversor.

O armazenador magnético consiste numa bobina supercondutora que opera em baixíssimas temperaturas, em tanques refrigerados por hélio ou nitrogênio líquido. A energia é armazenada no campo magnético gerado pela corrente que circula através da bobina. A indutância, tensão e corrente da bobina determinam a energia e potência do sistema. Existem estudos que procuram viabilizar a utilização dos chamados “supercondutores de alta temperatura”. Apesar da alta eficiência e pequeno tempo de resposta, o custo para aplicação deste equipamento é elevado. O estudo desta tecnologia não será aprofundado neste trabalho.

A bateria, que é um armazenador eletroquímico, possui características de armazenamento comprovadas e seguras. Há diversos tipos de baterias que podem ser utilizadas para esta função, como por exemplo, bateria chumbo-ácido (Pb - Ácido), íons de lítio (Li - Ion) e hidreto metálico de níquel (Ni - MH).

A bateria Pb - Ácido apresenta baixo custo, além de ser uma tecnologia madura. Apresenta como desvantagem ciclo de vida limitado e baixa densidade energética quando comparada a outros tipos de baterias.

A bateria Li - Íon possui alta eficiência e densidade energética elevada, porém não é ideal para altas taxas de carga e descarga, além de apresentar custo elevado.

A bateria Ni - MH apresenta excelente ciclo de vida e possibilidade de carga rápida, porém apresenta custo relativamente elevado e baixa densidade energética.

De forma geral, as baterias apresentam alta densidade de energia (Wh/kg) mas uma densidade de potência (W/kg) insuficiente para as aplicação na frenagem regenerativa, que disponibiliza valores elevados de corrente em períodos curtos de tempo. Como as baterias não suportam ciclos de carga/descarga rápidas também não serão incluídas neste trabalho.

Em contrapartida, o armazenador capacitivo, o volante de inércia e o inversor apresentam características adequadas ao regime apresentado na tração elétrica metroferroviária, entre elas excelente densidade de potência (W/kg).

O armazenador capacitivo possui ultracapacitores como elementos principais, que armazenam a energia da frenagem no campo elétrico gerado entre os eletrodos. Há exemplos de aplicação no metrô de Madri (Espanha) e Colônia (Alemanha) [4].

O volante de inércia é um equipamento que armazena energia cinética numa massa que gira a grande velocidade. A energia cinética armazenada no volante pode ser facilmente reconvertida em energia elétrica. Há informações que volantes de inércia foram instalados em Nova Iorque (Estados Unidos da América), em Colônia e Londres (Inglaterra) para testes. Companhias operadoras metroviárias de Manila (Filipinas) e Nova Iorque estão em fases finais de estudos para implantação de outras unidades de volantes de inércia [13] [14].

Tanto o armazenador capacitivo quanto o volante de inércia devem ser utilizados para a estabilização da tensão do barramento CC, transferindo parte da energia acumulada sempre que esta tensão atingir um limiar inferior pré-determinado. A operação de descarga destes armazenadores é fundamental, pois os prepara para uma condição de receptividade futura, quando deverão absorver a energia dos trens. O efeito deste processo de descarga sobre a rede elétrica CA (22 kV no caso do Metrô) é indireto, aliviando o ciclo de trabalho dos retificadores.

O inversor possui tiristores como elementos principais. A utilização deste equipamento, que é responsável pela conversão de energia CC em energia CA, permite que a

energia de frenagem seja transferida à rede de média tensão. Tal energia poderá ser reaproveitada por outros trens que estejam solicitando energia (independentemente da distância) ou mesmo cargas dos sistemas auxiliares (iluminação, ventilação, escadas rolantes, elevadores, bombas). Existem equipamentos instalados em Kobe (Japão) Cidade de Cingapura (Cingapura), Oslo (Noruega) e Ancara (Turquia), além do mesmo estar especificado para a Linha 4 do Metrô de São Paulo [10] [11]. Os equipamentos deste tipo que o Metrô e a FEPASA tiveram na década de 1980 foram desativados por problemas técnicos [8] [9].

Os armazenadores (capacitivo/volante de inércia) e o inversor (recuperador) serão denominados genericamente de reaproveitadores neste trabalho. As principais diferenças entre estes dois grupos são:

- Nos armazenadores o fluxo de energia fica restrito ao sistema de tração (rede CC), enquanto que no inversor a energia é recuperada para a rede CA;
- Nos armazenadores a energia pode ser utilizada em instante futuro, enquanto que no inversor esta deve ser utilizada no mesmo instante em que é gerada.

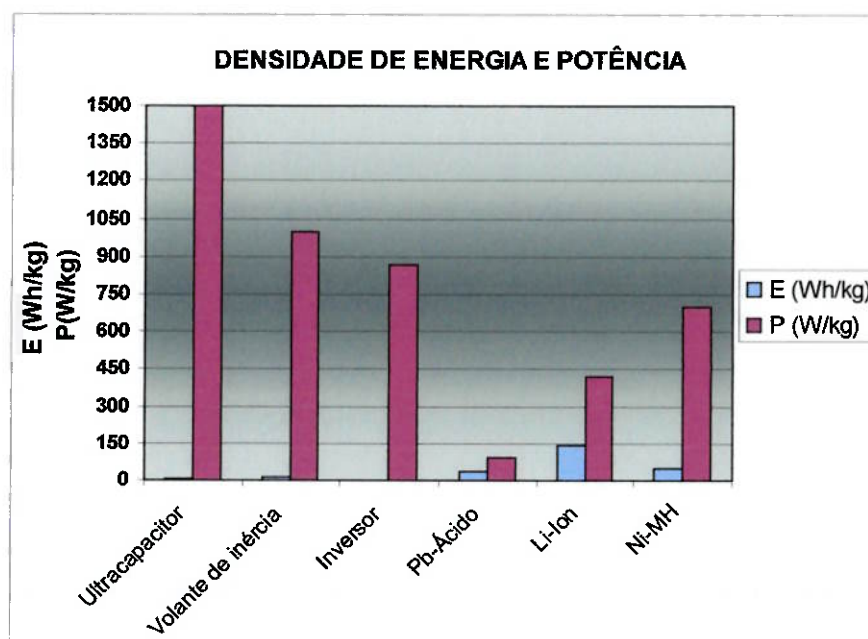


Gráfico 1. Comparação entre dispositivos - densidade de energia e potência [11] [15].

3. GENERALIDADES SOBRE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA

Os fatores que influenciam o fluxo de energia e que são importantes para determinação do desempenho de um sistema de reaproveitamento de energia são:

- Topologia da via: gradiente e distância entre estações;
- Diagrama horário: *headway* e restrição de velocidade devido ao traçado da via e condições meteorológicas;
- Equipamentos elétricos: características dos motores dos trens, localização e regulação das subestações retificadoras, tensão máxima na sapata coletora ou pantógrafo (coletor), resistência dos condutores, características intrínsecas dos equipamentos utilizados para reaproveitamento de energia.

Para o cálculo do fluxo de energia entre retificadora, trem e reaproveitador, faz-se necessário a utilização de sistema computacional devido ao número de variáveis envolvidas.

A complexidade que envolve o cálculo é evidenciada devido aos seguintes fatores:

- Variação contínua do fluxo de energia devido às constantes mudanças no posicionamento das cargas (trens), bem como no seu modo de operação (aceleração, frenagem, marcha a deriva);
- Tamanho da rede e quantidade de subestações retificadoras existentes;
- Fortes interações entre trens devido a acelerações e frenagens simultâneas em posições adjacentes;
- Não-linearidades do sistema (características dos motores, tensão máxima no coletor).

A inerente receptividade do sistema é melhor utilizada quando há um dimensionamento adequado levando em consideração a localização e quantidade de equipamentos reaproveitadores a serem utilizados.

A utilização de reaproveitadores em todas as estações, provavelmente, não apresentará custo x benefício tão significativo, se comparado ao posicionamento adequado de apenas alguns equipamentos em determinadas estações estratégicas.

Estudo apresentado em [6], que se refere a uma simulação com inversores, mas que pode ser utilizada como referência para os demais reaproveitadores, indica que eventual transferência de energia que poderia ocorrer diretamente entre trens pode ser afetada pela atuação intermediária do reaproveitador.

A economia inicial obtida pela aquisição de uma quantidade menor de reaproveitadores provavelmente sobreporia ao montante que seria economizado usando-se reaproveitadores em todas as estações [6].

Reaproveitamento na faixa de 12 a 40 % da energia utilizada para tração tem sido relatada [6], e teoricamente até 50% da energia solicitada pode ser devolvida ao sistema através da utilização de reaproveitadores [4] [6].

Entretanto, a simulação realizada em [6] indica economia média de 4% para *headways* de 120 segundos e 8% para *headways* de 600 segundos. Percebe-se que quanto maior for o *headway* existente na circulação dos trens, maior a porcentagem de energia utilizada pelos reaproveitadores em relação à demanda total do sistema.

Deve-se ficar claro que, para determinação da quantidade de energia a ser reaproveitada, é necessário haver um estudo detalhado levando em consideração todas as variáveis e especificidades envolvidas na linha em que o (s) equipamento (s) será instalado. Da mesma forma, todas as características relacionadas às subestações retificadoras, trens, reaproveitadores e rede de suprimento de energia em CA devem ser conhecidas, ou seja, é imprescindível a realização de simulação de marcha, simulação de tráfego e simulação elétrica anteriormente à aquisição dos equipamentos.

Uma característica peculiar ao regime de tração elétrica, em particular aos sistemas metroviários de grande capacidade, é a existência de diferenças significativas entre a demanda média e a demanda máxima no consumo de energia durante um dia de operação comercial (isto é decorrente da existência de períodos de vale e períodos de “pico”/horários de “rush”). Este fato resulta num baixo fator de carga, que é um fator negativo do regime em questão.

A maioria das concessionárias de energia elétrica penaliza empresas operadoras de sistemas metroviários, através da cobrança de multas, pela ultrapassagem do valor de demanda máxima contratada.

A utilização de equipamentos reaproveitadores de energia contribui para redução do valor da demanda de pico.

Sabe-se, também, que alguns fatores podem contribuir para ocorrência de subtensão em alguns trechos de alimentação CC. São eles:

- Dificuldade em manter-se um ciclo contínuo entre os trens conforme programação pré-estabelecida, que pode resultar em regiões com alta densidade de carga em determinados momentos;
- Aumento na quantidade de trens presentes em determinada linha;
- Extensão de linhas sem aumento proporcional da oferta de energia para tração;
- Alteração em características de equipamentos embarcados nos trens.

A utilização de equipamentos armazenadores no modo estabilização da tensão contribui para não ocorrência do problema de subtensão.

Pelo exposto nesta seção, verifica-se que a utilização dos reaproveitadores, desde que devidamente dimensionados, resulta em ganhos econômicos obtidos através de um menor consumo e redução dos picos de demanda solicitados à concessionária.

4. MEDIDAS EXPERIMENTAIS

4.1 Aspectos Gerais

Com o intuito de obter-se valores reais da energia dissipada nos bancos reostáticos dos trens, algumas medições foram realizadas na Linha 3 do Metrô de São Paulo.

Esta linha, com aproximadamente 22 quilômetros de extensão, é composta por 18 estações. Possui também um pátio de manobras e manutenção em seu extremo leste.

O sistema elétrico é constituído por 4 subestações primárias: Barra Funda (comum à Linha 2 – Verde), Pedro II, Tatuapé e Vila Esperança.

As subestações primárias recebem 88 kV da concessionária de energia, transformam em 22 kV e alimentam a rede formada por 19 subestações retificadoras (responsáveis pela conversão 22 kVca/825 Vcc para alimentação dos trens) e 19 subestações auxiliares (22 kVca/460 vca).

Em operação normal, cada primária alimenta um setor elétrico independente conforme descrição abaixo:

- Primária Barra Funda (YBF) – Responsável pela alimentação do trecho localizado entre as estações Barra Funda (BFU) e Marechal Deodoro (DEO);
- Primária Pedro II (YPS) – Responsável pela alimentação do trecho localizado entre as estações Santa Cecília (CEC) e Bresser (BRE);
- Primária Tatuapé (YTA) – Responsável pela alimentação do trecho localizado entre as estações Belém (BEL) e Vila Matilde (VTD);
- Primária Vila Esperança (YVP) – Responsável pela alimentação do trecho localizado entre as estações Guilhermina-Esperança (VPA) e Pátio Itaquerá (PIT).

Cada primária possui potência nominal de 40 MVA.

4.2 Metodologia

A escolha da Linha 3 para realização dos testes é decorrente de fatores operacionais como, facilidade de acesso aos instrumentos utilizados para medição e apoio técnico dos funcionários responsáveis para medições desta natureza.

As medições foram efetuadas em trens da frota Cobrasma (a linha 3 possui 25 trens Cobrasma e 22 Mafersa).

Foram monitorados os valores de tensão e corrente que circulam no banco reostático durante a operação comercial através de amostragens no período de “pico” e no período correspondente ao “vale”.

Os dados coletados foram obtidos através da instrumentação de apenas um dos seis carros que formam a composição completa. Este fato decorre da inexistência de instrumentos para monitoração em toda composição, bem como das interferências que seriam geradas durante a operação comercial nos carros intermediários devido à presença de usuários.

Este fato é válido, pois o desempenho dos carros e trens de toda frota deve ser idêntico para valores relativos a taxas de aceleração e frenagem conforme especificações técnicas.

Os dados obtidos para um trem foram posteriormente extrapolados para todos os outros que operam na Linha 3.

Para realização das medições foi utilizado um notebook padrão IBM-PC com software aquisitor de dados desenvolvido através da ferramenta *Labview* (*National Instruments*), cartão *PCMCIA* (Associação Internacional de Cartão de Memória para Computador Pessoal) e adaptador para caixa de lógicas.

4.3 Resultados obtidos

Todo o cálculo efetuado para determinação da energia consumida pelos trens durante um dia útil, teve como referência o dia 01/03/2007.

Tendo em vista a oferta de trens disponibilizada neste dia para operação (Apêndice A), cujo perfil é representado através do gráfico 2, verifica-se que há dois períodos de pico: das 06:45 às 08:30 hs (pico manhã) e das 17:15 às 18:15 hs (pico tarde).

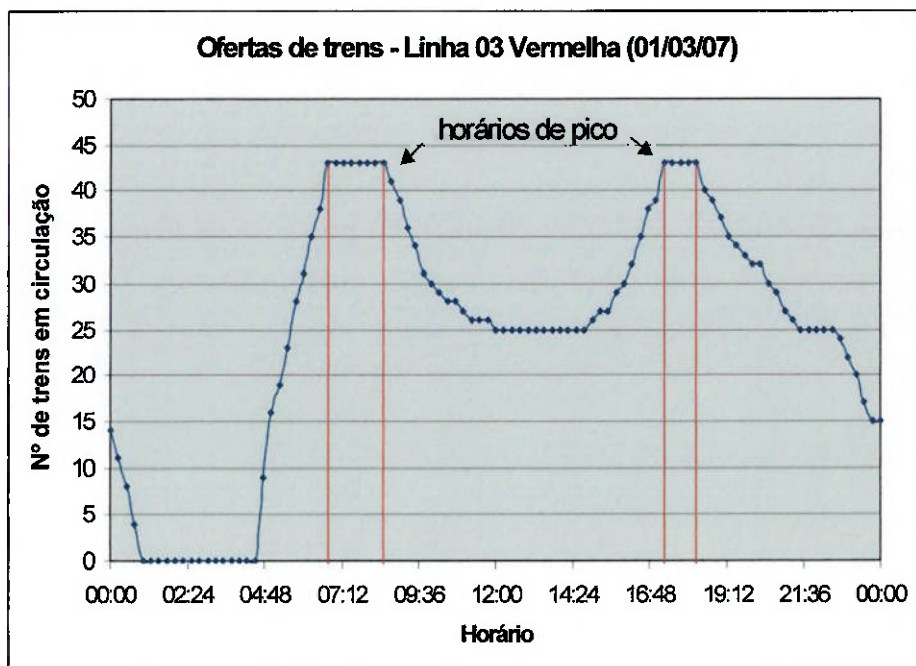


Gráfico 2. Quantidade de trens em circulação na Linha 3 no dia 01/03/2007.

Por sua vez, o período de vale totaliza 17:45 hs diárias, sendo que em média 27 trens circulam durante este período.

As medições durante o horário de pico foram realizadas no período da manhã do dia 01/03. Não houve interferências operacionais, como condições meteorológicas adversas e falhas no sistema durante a medição, podendo-se afirmar que o comportamento operacional do sistema de tração foi típico.

Foi monitorada uma volta completa de uma composição, ou seja, o trem partiu da estação Itaquera (ITQ) para Barra Funda (BFU) pela via 1 e retornou pela via 2.

O tempo gasto foi de 73,54 minutos. Dividindo o valor referente ao período total de pico (165 minutos) por 73,54, obtém-se o valor multiplicativo de aproximadamente 2,24, que

corresponde a quantidade de voltas executadas por um trem somando-se o pico da manhã e o pico da tarde.

A energia total consumida no banco reostático para um trem completo em uma volta equivale a 5,13 kWh.

Multiplicando-se então este valor por 2,24 e por 43 (quantidade de trens em circulação durante o pico), obtém-se 494,99 kWh, que é a energia total dissipada durante as 2:45 horas de pico.

O gráfico 3 apresenta uma amostra de 30 segundos de frenagem. A circulação de corrente no banco reostático ocorre sempre que a tensão atinge 850 V no modo frenagem.

As medições no horário de vale foram realizadas em 28/04/2007 (sábado). Esta escolha se deve ao fato de haver 27 trens em circulação no período compreendido entre 10:00 e 19:00 hs aos sábados.

Assim como no período de pico, foi monitorada uma volta (sem interferências operacionais) totalizando 68,71 minutos. Consumiu-se 29,94 kWh para o trem.

Dividindo-se 1065 minutos (17:45 hs) por 68,71, obtém-se valor igual a 15,5, que multiplicado por 27 e pelo consumo em uma volta resulta em 12.529,39 kWh. Esta é a energia total estimada para o vale.

Somando-se os valores obtidos para o pico e para o vale, obtém-se 13.024,38 kWh, que é o total dissipado durante às 20:30 hs de operação comercial em um dia útil. A máxima potência instantânea verificada durante as medições foi 1.374 kW.

Sabendo-se que o consumo total de energia no dia 01/03/2007 foi 588.587,04 kWh (Apêndice B), e que 80% deste valor foi destinado ao sistema de tração, tem-se que 2,77 % da energia consumida pelos trens é dissipada no banco de resistores.

Este é um valor baixo e pode-se afirmar que provavelmente o custo x benefício para instalação de reaproveitadores nesta linha não é atrativo.

Ressalta-se que a Linha 3 apresenta baixo *headway* operacional, sendo esperado portanto que outras linhas apresentem valores percentuais maiores.

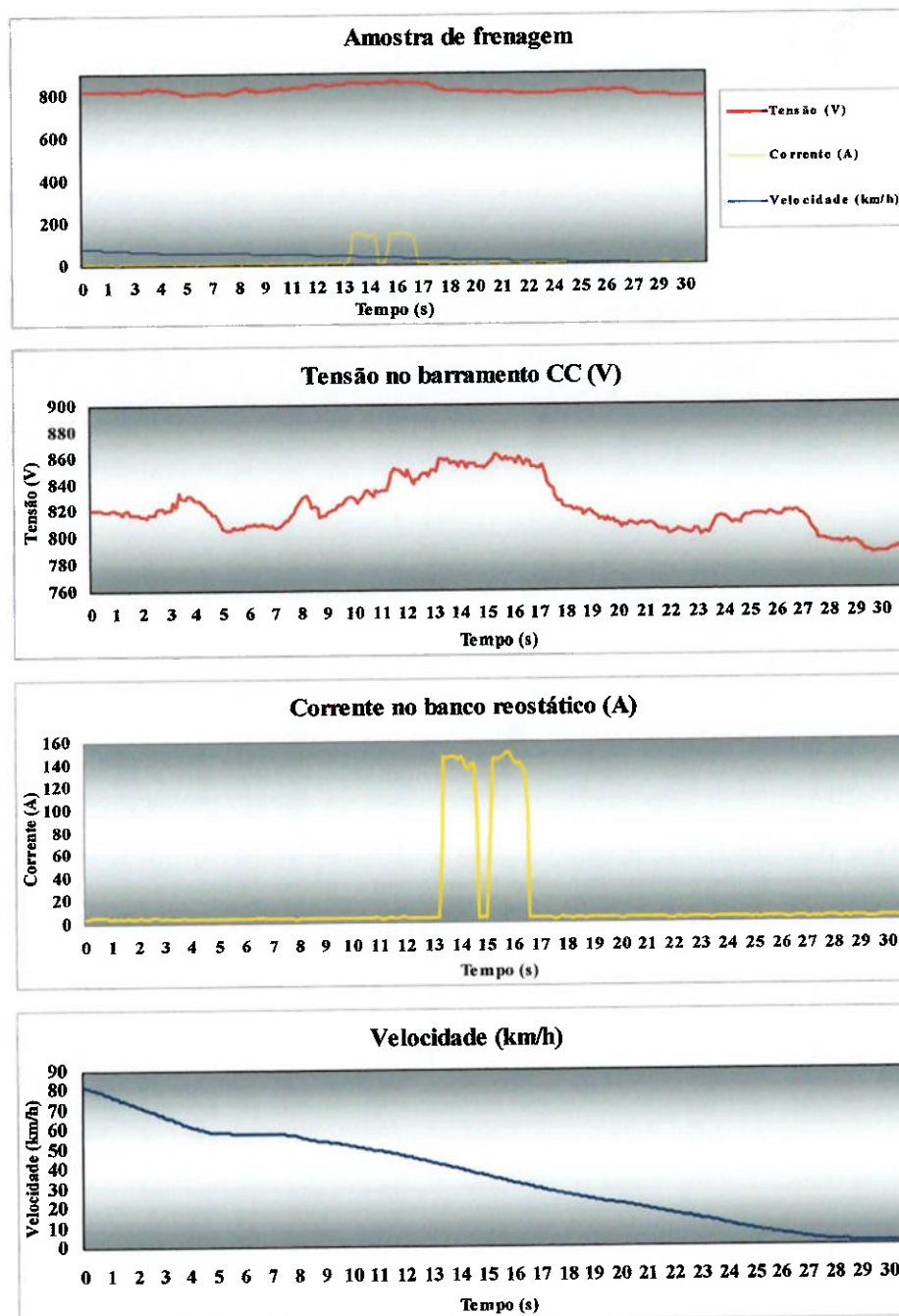


Gráfico 3. Variação da tensão no barramento CC, corrente no banco reostático e velocidade.

A tabela 1 resume as medições descritas acima.

Descrição	Período	
	Pico	Vale
Quantidade de trens (unidades)	43	27
Intervalo total (minutos)	165	1.065
Tempo por volta (minutos)	73,7	68,7
Quantidade de voltas por trem	2,24	15,50
Consumo reostático por trem em uma volta (kWh)	5,13	29,94
Consumo reostático no período (MWh)	0,5	12,5
Consumo total na Linha 3 (MWh)	589	
Consumo total na tração elétrica (MWh)	471	
Consumo reostático total (MWh)	13	
Consumo reostático percentual (%)	2,77	

Tabela 1. Resultados das medidas realizadas em 01/03/2007 na Linha 3.

5. DETALHES DOS EQUIPAMENTOS

5.1 Armazenador capacitivo

5.1.1 Ultracapacitor

O ultracapacitor também é conhecido como supercapacitor ou capacitor eletroquímico de dupla camada (EDLC).

O ultracapacitor armazena energia eletrostaticamente através da polarização da solução eletrolítica existente em sua composição.

Apesar de ser classificado como dispositivo eletroquímico, não há reações químicas em seu princípio de armazenamento de energia.

O componente é formado por duas placas porosas imersas em um eletrólito composto por material orgânico. O potencial existente na placa positiva atrai os íons negativos existentes no eletrólito, enquanto o potencial negativo atrai os íons positivos. Este fato cria efetivamente duas camadas de armazenamento capacitivo, uma na placa positiva e outra na placa negativa.

O ultracapacitor aumenta sua área através da utilização de um material a base de carbono poroso em suas placas (nanotubo de carbono). Consegue-se através desta estrutura porosa áreas elevadas nas superfícies das placas. Além disso, a separação existente entre as placas é extremamente baixa se comparada a qualquer outro tipo de capacitor.

A combinação de uma enorme área superficial e uma espessura de separação entre as placas extremamente baixa, garante aos ultracapacitores valores de capacitância extremamente elevados se comparados a qualquer outro tipo de capacitor.

Os ultracapacitores são constituídos de eletrodo positivo, eletrodo negativo, um separador entre estes dois eletrodos e um eletrólito preenchendo as porosidades existentes entre os dois eletrodos e o separador. Os ultracapacitores com formato cilíndrico são constituídos por diversas camadas concêntricas

Os ultracapacitores são idealmente apropriados para o regime de tração (picos de consumo na aceleração e frenagem). Possuem um comportamento eficiente para vários ciclos de carga e descarga.

Tendo em vista que o funcionamento do componente não é baseado em reações químicas internas, as taxas para carregamento e descarregamentos são iguais, podendo-se afirmar que a eficiência é a mesma nas duas situações (boa reversibilidade). O componente pode ser carregado e descarregado centenas de milhares de vezes, e em alguns casos até milhões de vezes.

Os ultracapacitores apresentam diminuição em sua capacitância específica e aumento na resistividade no decorrer de sua vida útil, sendo esta a degradação maior. Não é verificada diminuição em sua vida útil quando o componente é armazenado descarregado.

Há na atualidade ultracapacitores com capacitância (C) de até 3.000 F e tensão nominal (V) de 2,7 V disponíveis comercialmente [3]. A energia armazenada (E) é determinada por:

$$E = \frac{1}{2} C \cdot V^2$$

Verifica-se portanto que a energia armazenada neste único elemento equivale a 10.935 J, o que equivale a 3,04 Wh.

Sabendo-se que o mesmo possui massa de 0,55 kg, sua densidade equivale a 5,53 Wh/kg. O volume aproximado deste componente é aproximadamente 0,450 litros [3].

Em resumo, comparando-se aos diversos tipos de baterias existentes, que utilizam reações químicas em seu princípio de funcionamento, os ultracapacitores permitem maior capacidade de carga e descarga, ciclos de carga e descarga virtualmente infinitos, além de baixa perda elétrica. Apesar de apresentarem capacidade de armazenamento menor se comparado à alguns tipos de baterias, são mais adequados ao regime apresentado na tração

elétrica, ou seja, taxa de transferência de energia extremamente rápida, o que equivale a pico de potência extremamente elevado.

5.1.2 Composição do equipamento e aplicação na tração elétrica

O sistema funciona de forma bidirecional, permitindo o fluxo de corrente da linha para o armazenador capacitivo (absorção da energia frenante disponível na linha) e também do armazenador para a linha (devolução da energia armazenada quando houver aceleração de algum trem nas proximidades do equipamento).

O armazenador capacitivo de energia possui, além do banco de capacitores, outras unidades, que são: unidade de conexão e unidade conversora.

A unidade de conexão é constituída basicamente de chaves seccionadoras, fusíveis principais, disjuntor CC, resistência de pré-carga e contator de pré-carga.

A chave seccionadora (S0) é utilizada para isolar o equipamento da linha, provendo isolamento facilmente identificável para atividades de manutenção.

O disjuntor extra-rápido CC (S1) garante a proteção em casos de sobrecorrente, permitindo o desligamento do sistema durante estas ocorrências.

Os fusíveis principais (F0) atuam na ocorrência de curto-circuito, sendo uma proteção de retaguarda ao disjuntor S1.

Paralelamente ao disjuntor S1, encontram-se o resistor de pré-carga (R1) e o contator de pré-carga (K1), que são responsáveis por um pré-carregamento suave dos capacitores de linha (C1) da unidade conversora.

A unidade conversora é composta por reator de linha (L1), capacitor da linha (C1), chave eletrônica, usualmente *IGBT's* (transistor bipolar de porta isolada), fusíveis secundários (F2) e reator do conversor (L2).

O filtro LC é instalado para atenuar o componente de chaveamento do conversor, ou seja, consegue-se uma corrente com comportamento linear.

O sistema de controle do conversor permite o chaveamento das chaves eletrônicas quando a tensão da linha tornar-se maior que o valor pré-estabelecido (limiar superior), iniciando desta forma o carregamento do banco capacitivo.

Da mesma forma, o controle adequado permite o descarregamento dos capacitores quando algum trem estiver solicitando energia no processo de aceleração. Tal ação acontece quando a tensão cair abaixo do limiar inferior pré-estabelecido, valor este vinculado à tensão nominal do sistema e a regulação do grupo transformador-retificador.

Caso a tensão esteja entre os dois limiares, o armazenador encontra-se no modo “*standby*”, que mantém a tensão existente no banco de capacitores.

Desta forma, percebe-se que a unidade conversora regula a quantidade de energia e o fluxo de corrente entre o banco de capacitores e a linha.

Os fusíveis secundários (F2) são utilizados para isolação da unidade conversora e do banco de capacitores (*Cbank*).

O banco de capacitores, que é constituído por ultracapacitores, possui a unidade de descarga (V2, R2) conectada em seus terminais. Esta unidade é utilizada em casos de emergência e manutenção, permitindo a descarga da energia acumulada no resistor R2 através do acionamento do tiristor V2.

Deve-se ressaltar que toda a energia acumulada deve ser descarregada anteriormente às atividades de manutenção, sendo que o tempo necessário para isto depende da constante de tempo, a qual está intimamente relacionada aos valores de resistência e capacitância do circuito. De qualquer forma, o equipamento só permitirá a abertura das portas dos painéis quando o sistema de controle garantir que não há mais tensão residual no banco capacitivo.

Normalmente utiliza-se ventilação forçada na unidade conversora e no banco de capacitores.

Os painéis contendo a unidade de conexão e a unidade conversora devem ser posicionados lado a lado, sendo desejável haver um espaçamento entre os mesmos e o painel que contém o banco capacitivo.

O sistema pode ser fornecido para instalação em cubículos integrados às subestações retificadoras e também em containeres dedicados a esta aplicação, permitindo que o equipamento de armazenamento seja instalado em locais não adjacentes ao retificador.

Para um sistema de armazenamento capacitivo com potência nominal de 500 kW, é necessário um container com as seguintes dimensões: largura = 3,2 metros, profundidade = 2,9 metros e altura = 3,2 metros. A massa aproximada é de 5,5 toneladas [5].

Há aproximadamente 1.300 capacitores e a capacitância total é próxima a 64 F [5].

Pelo exposto nos parágrafos anteriores, e levando em consideração que o ultracapacitor utilizado possui capacitância nominal de 2.600 F, com tensão nominal de 2,5 V [4], pode-se conseguir um valor próximo à capacitância total citada através da associação em paralelo de 6 “braços” de capacitores, sendo que cada “braço” contém 230 capacitores dispostos em série.

De fato esta associação apresenta um valor de capacitância ligeiramente superior a 64 F (aproximadamente 68 F), bem como um valor superior de capacitores citados (1380 ao invés de 1300).

Neste caso, a tensão de armazenamento verificada nos terminais do banco capacitivo equivale a 575 V, ou seja, aproximadamente 77% da tensão nominal (750 V) do barramento CC (a unidade conversora é responsável pela conversão CC-CC). Desta forma, os *IGBT's* a serem utilizados não serão “tão robustos” caso a tensão no banco capacitivo fosse 750 V.

Esta configuração sugerida é utilizada para cálculo da densidade de energia.

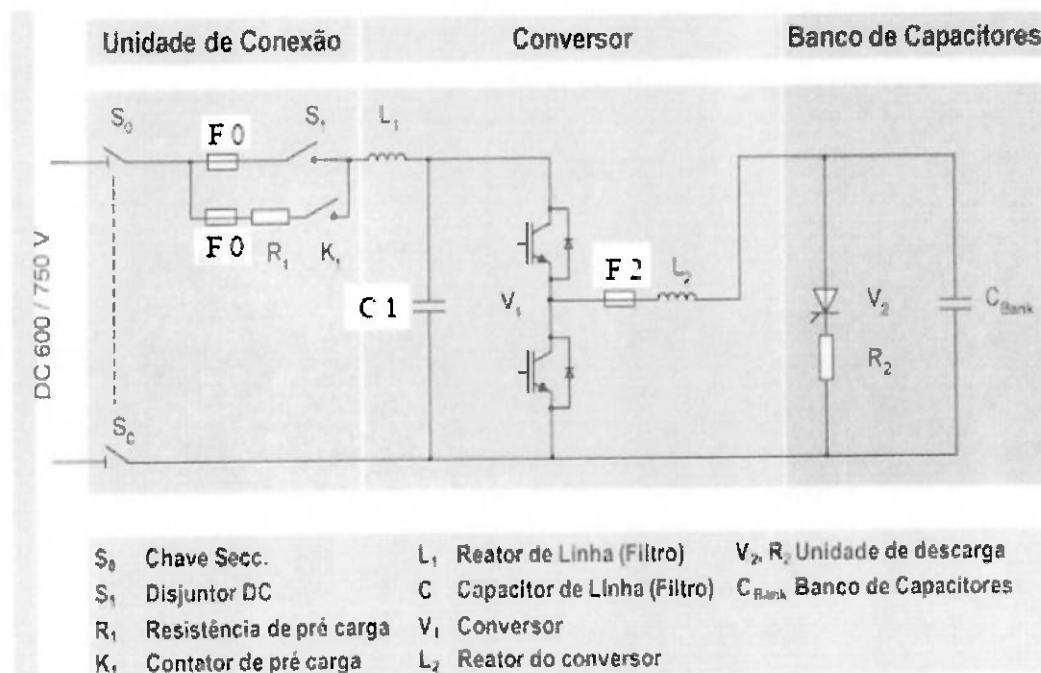


Figura 1. Diagrama esquemático do armazenador capacitivo [5].

5.2 Volante de inércia

5.2.1 Princípio de funcionamento

O volante de inércia, também conhecido como “bateria mecânica”, armazena energia sob a forma cinética numa massa rotacional integrada a um rotor acoplado a uma máquina elétrica (motor-gerador).

A energia é acumulada através do aumento da velocidade angular do rotor. Para reaproveitamento da energia armazenada, utiliza-se o gerador, que é responsável pela conversão da energia mecânica em energia elétrica através da desaceleração do rotor.

A energia (E) acumulada depende do momento de inércia (I) do rotor e do quadrado da velocidade angular (w):

$$E = \frac{1}{2} I * w^2$$

Por sua vez, o momento de inércia depende do raio (r), massa (m) e da altura (h) do rotor:

$$I = \frac{1}{2} r^2 * m * h$$

Verifica-se que, a potencialidade do armazenamento da energia do volante pode ser melhorada, aumentando o momento de inércia do volante, ou girando-o em velocidades rotacionais mais elevadas (ambas as soluções podem ser utilizadas simultaneamente). Os projetos atualmente utilizam cilindros ocos para confecção dos rotores, permitindo que a massa fique concentrada no raio externo do eixo do volante, aumentando desta forma a potencialidade de armazenamento [1].

Para aplicações em potência, duas estratégias têm sido verificadas. A primeira delas, utiliza disco de aço de grande diâmetro, aumentando-se o momento de inércia (velocidades de até 10.000 rpm são relatadas). Esta concepção resulta em volantes pesados e com dimensões relativamente grandes. A segunda obtém equipamentos mais compactos através da utilização de rotores mais leves submetidos a velocidades rotacionais maiores (até 100.000 rpm). É possível conectar estes volantes em paralelo para obter-se potência nominal e capacidade de armazenamento maior [1].

5.2.2 Composição do equipamento

Assim como o armazenador capacitivo, 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 rotor, o motor-gerador e os mancais são mantidos sob vácuo inseridos num vaso de contenção especialmente projetado para segurança do sistema. Todo este conjunto, que pode ser encarado como a principal parte do equipamento, pois é o local em que a energia é

efetivamente armazenada, é referenciado como volante de inércia [2] [13]. Deve-se portanto fazer distinção entre este termo e o equipamento/sistema completo, no qual os demais elementos citados fazem parte. O equipamento como um todo é referenciado como sistema de armazenamento de energia a volante de inércia ou armazenador cinético.

Diferentes materiais podem ser empregados na composição do rotor: sílica fundida, fibra de carbono e aço. Em termos de densidade energética, obtém-se 870 Wh/kg para a sílica fundida, 215 Wh/kg para a fibra de carbono e 48 Wh/kg para o aço. Verifica-se na prática a adoção de materiais compostos por sílica e carbono em alguns equipamentos. Entretanto, equipamentos que utilizam aço não são tão afetados pelas altas temperaturas existentes no volante como os demais [2].

De forma geral, empregam-se motores-geradores com alta confiabilidade e densidade de potência no equipamento.

São utilizados mancais magnéticos na produção de volantes modernos. Pode-se afirmar que este é o fator principal para aumento da vida útil, eficiência e confiabilidade registrada nos equipamentos atualmente.

O rolamento magnético é uma tecnologia relativamente recente responsável por manter o rotor flutuando no campo magnético [12].

Como benefícios da utilização deste dispositivo citam-se: maior vida útil quando comparado ao rolamento mecânico; mínima manutenção; inexistência de caixa de engrenagens; não necessidade de lubrificação; inexistência de ruído, calor e vibração em sua operação; possibilidade de operação em altas temperaturas.

Os benefícios acima citados são obtidos por não haver contato entre o rotor e o mancal (levitação).

Duas tecnologias de mancais magnéticos estão disponíveis atualmente: rolamento ativo e passivo [12]. Os rolamentos passivos são similares aos rolamentos mecânicos, ou seja,

nenhum controle ativo é necessário para sua operação. Este tipo não é usualmente utilizado nos volantes e portanto não será abordado.

Em sistemas ativos, os sensores de posição monitoram a posição do eixo do rotor e enviam esta informação ao sistema de controle. O sistema de controle emite corrente elétrica ao atuador, o qual converte energia elétrica em forças magnéticas que atuam no rotor para ajustá-lo na posição correta [12].

O sistema de controle varia continuamente com a corrente que circula através das suas bobinas, as quais modulam o campo magnético para manter o rotor na sua posição correta.

O sistema de controle possui alarmes audio-visuais para sinalizar um possível desengate do rotor ou a desenergização do volante [12].

A caixa de controle do rolamento magnético contém todos os elementos necessários para operar o sistema magnético do rolamento.

Esta caixa interage com os atuadores do rolamento e os sensores de posição magnéticos do eixo, que estão situados na máquina. A caixa de controle recebe sinais da posição do eixo através do sensor posicionado com os atuadores magnéticos do rolamento. Esta informação é modulada no cartão do sensor e processada na placa DSP [12].

A saída do DSP é um sinal de comando para os amplificadores de força, os quais comandam a corrente requerida de controle através das bobinas do atuador. [12].

A placa de controle possui o programa do controle magnético do rolamento. A função principal do programa é produzir o sinal de controle dos rolamentos magnéticos, e executar também uma comunicação/diagnóstico das funções de monitoração [12].

Tendo em vista o princípio de funcionamento do volante, em que partes móveis são mantidas a elevadas rotações, materiais com alta resistência mecânica são empregados na confecção da estrutura do vaso de contenção do armazenador cinético.

O sistema de armazenamento a volante de inércia utiliza bomba de alta qualidade para produzir vácuo no compartimento interno do volante, eliminado desta forma a resistência do ar e aumentando consequentemente a eficiência do sistema.

O conversor eletrônico é responsável pela conversão de potência CA utilizada/gerada pelo motor-gerador e o barramento CC do sistema de tração. É constituído basicamente por *IGBT*'s de alta performance e utiliza modulação *PWM* (modulação por largura de pulso).

A unidade de controle é utilizada para monitorar a demanda de energia e controlar os vários subsistemas do volante. É responsável pela interface com os sensores de tensão; controla portanto o funcionamento do conversor eletrônico, ou seja, carga e descarga do armazenador conforme o nível de tensão CC (o controlador mantém o equipamento em “*stand-by*” caso a tensão esteja entre os limites superior e inferior pré-definidos).

É possível verificar através da figura abaixo os principais componentes, de um modelo comercialmente disponível para tração elétrica, que constituem o equipamento.

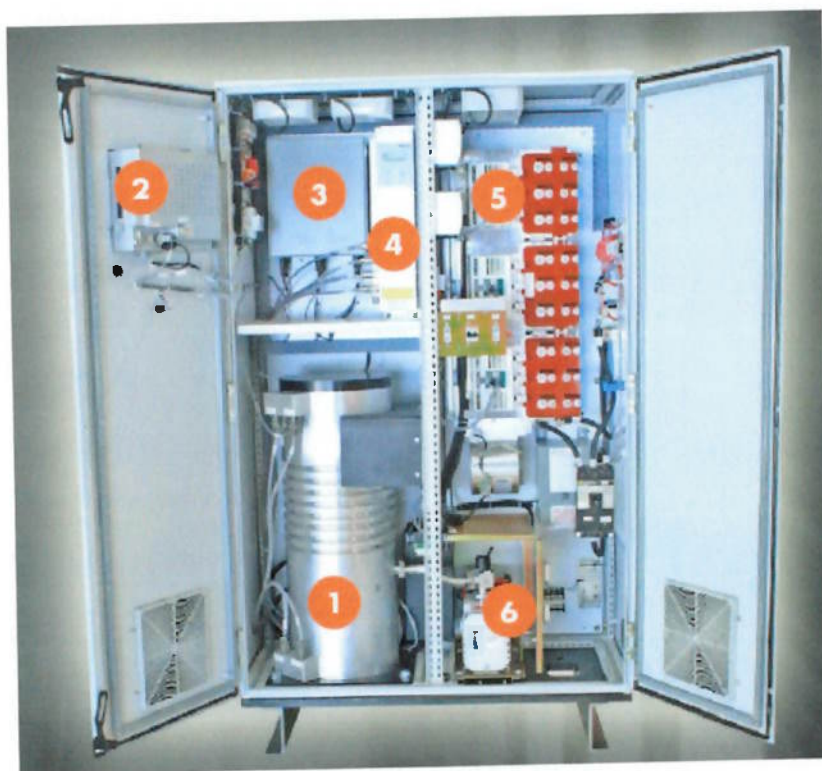


Figura 2. Vista frontal interna do volante Vycon 500 kW - dimensões 2m x 2m x 0,8 m [13].

1. Volante de inércia;
2. Interface gráfica do volante – responsável pelo comando e interface com o usuário;
3. Controlador principal - monitora a demanda de entrada e saída da energia e controla os vários subsistemas, incluindo carga e descarga do volante de inércia;
4. Controlador do mancal magnético – controla a posição do rotor através de um sistema ativo de mancal magnético de cinco eixos;
5. Conversor eletrônico;
6. Bomba de vácuo.

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.

Além dos componentes acima descritos, o equipamento incorpora resistor e contator de pré-carga para proteção do conversor eletrônico, além de fusíveis e chave seccionadora para isolamento do equipamento.

Recomenda-se a inserção de disjuntor extra-rápido CC para proteção do sistema.

A figura 3 apresenta o diagrama esquemático do sistema de armazenamento a volante de inércia.

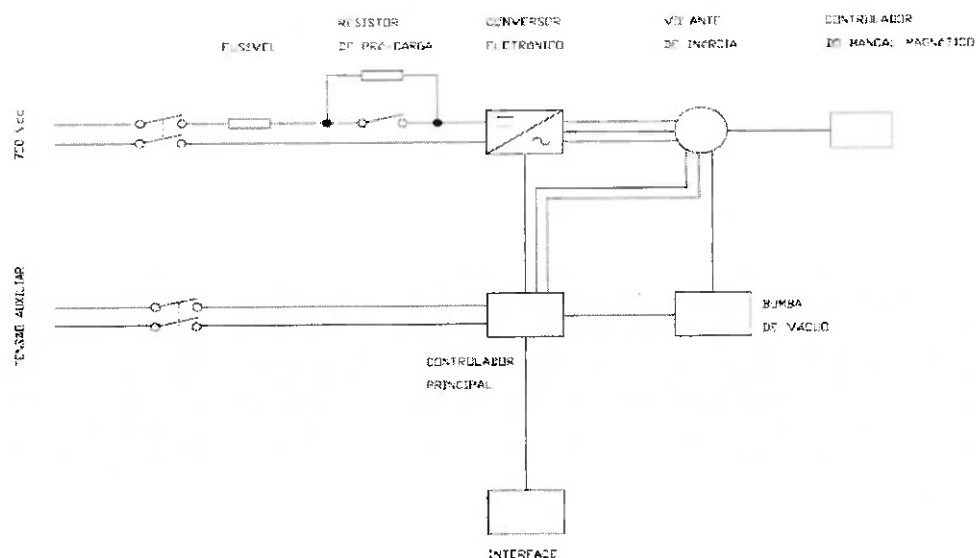


Figura 3. Diagrama esquemático do sistema de armazenamento a volante de inércia.

5.2.3 Aplicação na tração elétrica

O sistema pode ser instalado no trem (embarcado) ou em salas técnicas específicas. Tendo em vista a dificuldade com relação ao espaço necessário para instalação e às dificuldades físicas existentes quando o equipamento está em funcionamento num veículo em movimento (força de reação giroscópica), a utilização do armazenador cinético embarcado mostra-se menos atrativa se comparada à instalação em salas técnicas. Desta forma, o presente estudo só leva em consideração a segunda opção.

A potência nominal do armazenador e a sua capacidade de armazenamento devem ser suficientes para suportar os picos de potência e capturar toda energia disponibilizada pelo trem. Além disso, deve-se considerar a possibilidade de não somente um único trem estar solicitando ou disponibilizando energia na região em que o sistema de armazenamento estiver instalado.

Testes bem sucedidos foram executados em Londres utilizando-se três unidades de 100 kW de potência [14]. A associação em paralelo destas unidades resultou numa potência total de 300 kW.

Sabe-se da existência de sistema de armazenamento com potência nominal de 1 MW através da associação de dez equipamentos com 100 kW de potência individual em Nova Iorque [14].

Para estudo comparativo, utiliza-se um modelo de 500 kW de potência nominal (fabricante Vycon). Este equipamento pode ser associado a mais sete , totalizando portanto 4MW de potência [13].

Apresentam-se as características (que serão utilizadas posteriormente para cálculo da densidade energética e densidade de potência) pertencentes a este armazenador.

- Potência nominal: 500 kW;
- Duração da carga ou descarga: 12 segundos;
- Energia armazenada disponível: 6000 kW_s;
- Velocidade de rotação: 7.000 a 9.000 rpm;
- Tensão de entrada: 450 – 1000 VDC;
- Tempo de recarga: 12 segundos;
- Tensão de saída: 400 – 980 VDC;
- Regulação da voltagem: +/- 1 %;
- Ripple CC: menos de 2 %;
- Temperatura de operação: -20 °C até 40 °C;
- Nível de ruído: 66 dbA a 1m;
- Dimensões (mm): 2007 (altura) x 1981 (largura) x 864 (profundidade);
- Massa: 3.402 kg.

5.3 Inversor

5.3.1 Princípio de funcionamento

O equipamento denominado inversor tem por função converter à rede CA o excedente de energia CC presente na barra de alimentação.

Os principais elementos do equipamento são os tiristores *SCR* (retificador controlado de silício), os quais quando convenientemente agrupados formam um circuito denominado ponte inversora, que por sua vez produz em seus terminais de saída (quando os *SCR's* são adequadamente chaveados) uma forma de onda periódica que com uma boa aproximação pode ser considerada senoidal. Para isto, o equipamento utiliza-se de uma técnica de modulação denominada *SPWM* (modulação por largura de pulso senoidal).

Tiristores são dispositivos semicondutores de potência com quatro camadas, PNPN, usados como chaves eletrônicas. Com ele é possível converter e controlar grandes quantidades de energia tanto em sistemas CA quanto CC, utilizando-se de uma pequena energia de controle.

A figura 4 mostra a estrutura e o símbolo de um *SCR*. Este possui três terminais, sendo dois de potência, o anodo (A) e o catodo(K), e um de controle, a porta (G).

O *SCR* passa do estado desligado para o estado ligado quando o anodo é positivo em relação ao catodo e uma tensão positiva em relação ao catodo é aplicada à porta. O desligamento do dispositivo se dá quando se interrompe a corrente de anodo. O *SCR* bloqueia a corrente na direção inversa [7].

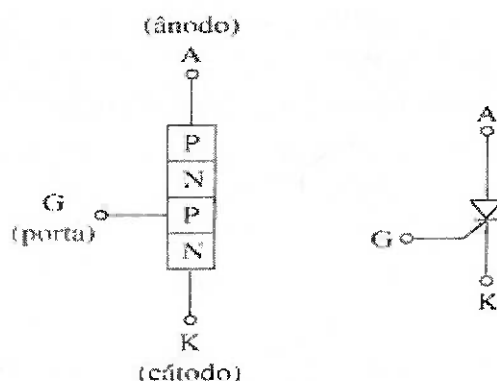


Figura 4. Estrutura PNPN e símbolo do SCR [7].

Para se ter uma vaga idéia de funcionamento, um inversor básico é apresentado a seguir. Este circuito gera uma tensão alternada monofásica a partir de uma alimentação de potência CC.

É conhecido como inversor de meia-ponte por utilizar duas chaves semicondutoras, este é apresentado na figura 5. As chaves S1 e S2 ligam e desligam a fonte CC à carga de modo alternado (ilustrado na tabela 2), produzindo uma forma de onda retangular de tensão CA, como ilustrado no gráfico 4 [7].

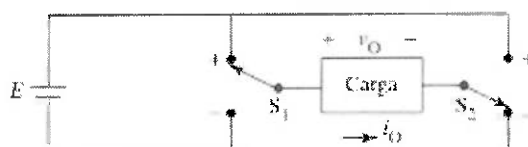


Figura 5. Inversor básico.

Estado	S1	S2	Tensão de saída
1	+	-	+E
2	-	-	0
3	-	+	-E
4	+	+	0

Tabela 2. Funcionamento do inversor básico.

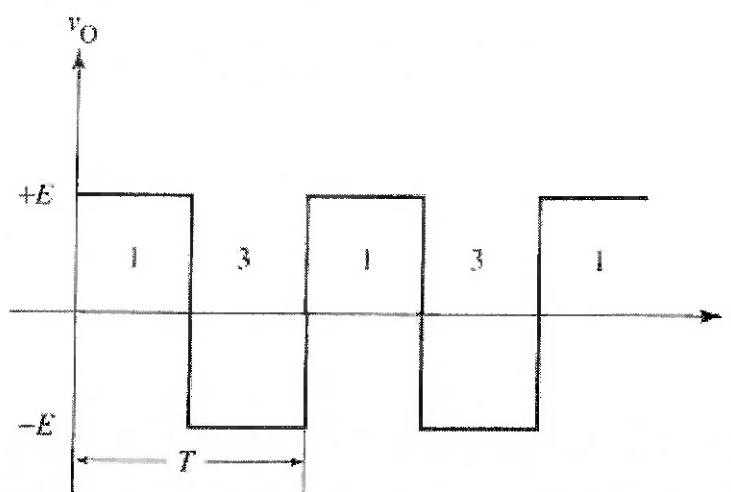


Gráfico 4. Forma de tensão da saída do inversor básico

Para obter-se uma forma de onda de tensão de saída o mais próximo possível de uma onda senoidal utiliza-se uma técnica de controle de tensão de saída do inversor conhecida como *SPWM* ou modulação por largura de pulso senoidal. Esta modulação consiste em controlar a variação dos períodos nos estados ligado e desligado, de modo que os períodos ligados (largura do pulso) sejam mais longos no pico da onda, conforme ilustrado no gráfico 5 [7].

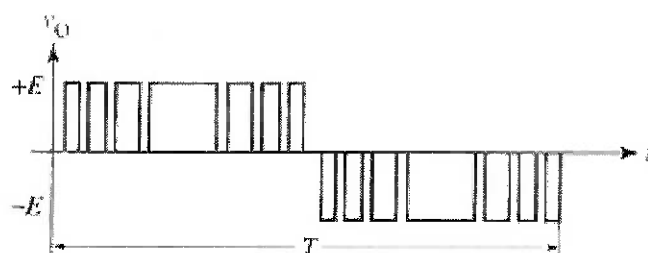


Gráfico 5. Forma de tensão da saída com modulação *PWM*.

5.3.2 Composição do equipamento

Existe atualmente retificador e inversor integrados no mercado para tração elétrica. Este conjunto constitui o conversor dual. Entretanto, as considerações citadas neste trabalho referem-se ao equipamento inversor isolado.

A figura 6 abaixo mostra a configuração de um tipo de inversor [11].

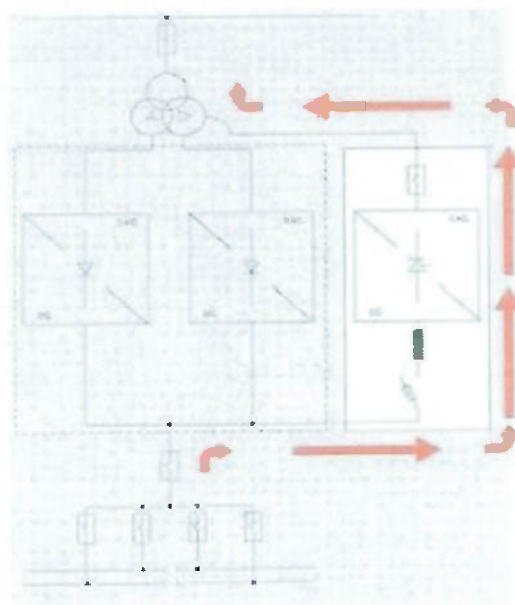


Figura 6. Equipamento inversor.

O equipamento pode ser constituído por:

- Transformador de média tensão ou autotransformador;
- Disjuntor ou seccionadora CA;
- Disjuntor extra-rápido CC ou seccionadora CC;
- Fusíveis CC;
- Reator CC;
- Ponte inversora;
- Unidade eletrônica de controle.

Para interface com o sistema de média tensão, faz-se necessário haver um transformador.

O inversor pode possuir o seu próprio transformador ou compartilhar o transformador utilizado para retificação. Para tanto, no segundo caso, o inversor deve possuir um autotransformador para equalização dos valores de tensão de saída do mesmo com o valor de tensão do (s) secundário (s) do transformador-retificador.

O autotransformador é alocado em um cubículo próprio.

Para proteção no lado CA, pode-se utilizar disjuntor ou seccionadora com abertura sob carga.

É utilizado disjuntor extra-rápido ou seccionadora CC na interface do equipamento com o barramento. Enquanto o primeiro é utilizado para proteção contra sobrecorrentes e isolamento do inversor, a seccionadora tem como função apenas prover isolamento

Quando da utilização de seccionadora, faz-se necessário inserir fusíveis ultra rápidos CC [9].

O reator em série tem por função fornecer uma fonte de corrente CC constante ao elemento inversor.

A ponte inversora é o elemento principal do equipamento. Normalmente o inversor é composto por uma ou duas pontes. No primeiro caso, tem-se um conversor de seis pulsos, enquanto no segundo forma-se um conversor de doze pulsos.

Valendo-se de várias opções, com relação à unidade de controle das pontes inversoras, tem-se segundo Alouche P. [8]

“A unidade de controle dos tiristores do inversor compreende os seguintes elementos básicos:

- gerador de sinal senoidal que produz as tensões senoidais para controlar e limitar os impulsos;
- O gerador de impulsos que produz os impulsos de 5° de largura para comando dos tiristores. Esse dispositivo contém uma chave transistorizada que bloqueia os impulsos e os reajusta para a operação inversora, quando o sinal de controle o pede;

- O elemento distribuidor dos impulsos que os amplifica, para o caso de se ter diversos tiristores em série ou em paralelo, como também torna os impulsos mais verticais, evitando que um tiristor atrase na sua condução;

- Fontes estabilizadas de tensões para a alimentação dos diferentes circuitos.

Para se comandar as duas fontes trifásicas completas do inversor, alimentadas uma pelo Δ , outra pelo Y do transformador, são necessários 2 unidades completas de controle, defasadas de 30° elétricos.

Cada unidade de controle produz 6 impulsos principais para cada ramo da ponte e 6 impulsos secundários defasados dos primeiros de 60° elétricos, necessários para o início da condução.

O sinal de controle que defasa o ângulo é um sinal de tensão contínua que ao se tornar mais negativo, desloca os impulsos na direção da operação em retificação, e ao se tornar mais positivo, desloca os impulsos na direção do espaço de inversão.

Ressalta-se que o controle é uma parte crítica do equipamento. Tendo em vista a reatância de comutação, por questões de segurança, o ângulo máximo de disparo nas fases é no máximo 150° .

O fato da tensão normalmente não ser uma senóide pura, pode comprometer o sincronismo entre a rede CA e a unidade de controle e disparo dos elementos condutores. Esta situação é determinante para o correto funcionamento do equipamento.

5.3.3 Aplicação na tração elétrica

O grau de complexidade envolvido para controlar todas as variáveis presentes faz com que o inversor não seja um sistema largamente utilizado.

A FEPASA, Ferrovia Paulista S.A, e o Metrô de São Paulo já testaram este equipamento em alguma de suas subestações.

No caso da Fepasa chegou-se a conclusão de que a maior parte da energia regenerada pela frenagem dos trens era aproveitada por outros trens, principalmente nos horários de pico, e que os inversores eram vulneráveis às oscilações de tensão da concessionária.

Já no caso do Metrô de São Paulo não se tem dados definitivos sobre os resultados práticos, porém algumas sugestões para a melhoria da inversão foram sugeridas:

- Aumento do valor da tensão do chopper;
- Otimização do número e localização das subestações com inversor instalado;
- *Headway* constante a 90 segundos;
- Desempenho máximo dos trens;
- Trens com peso constante máximo;
- Diminuição da impedância do 3º trilho;
- Aumento da tensão de regeneração;
- Abaixamento da tensão das retificadoras e introdução nelas, de reguladores série;
- Otimização da programação da situação dos trens na linha, para se conseguir máxima regeneração possível.

Atualmente, nenhuma destas duas companhias faz uso dos inversores testados.

Alguns Metrô do mundo os utilizam atualmente, dentre eles podemos citar: Ancara, Colônia e Seishin Line of the Kobe [10] [11].

Não há informações sobre a quantidade de energia recuperada, e nem sobre as condições de serviço tanto no Metrô de Ancara quanto do Metrô de Colônia, mesmo porque se tratam de aplicações recentes.

Já no caso da Seishin Line (equipamento instalado em 1977) citam-se vantagens na utilização dos inversores como: redução da energia consumida e estabilidade do serviço de frenagem entre outras, porém valores destes não são apresentados [10].

Para estudo comparativo, será utilizado um inversor de 6 pulsos com autotransformador, disjuntor CA e seccionadora CC [11].

5.4 Comparação entre equipamentos

Apesar dos três equipamentos em estudo serem utilizados para reaproveitamento da energia disponibilizada na frenagem dos trens, sabe-se que os princípios de funcionamento são diferentes, sendo esperado portanto que cada um deles apresente vantagens e desvantagens quando comparado aos demais.

Disponibilizam-se nesta seção as particularidades de cada equipamento relacionadas às características como eficiência, densidade energética, densidade de potência, entre outras. Desta forma, os aspectos positivos e negativos de cada equipamento ficam evidenciados.

5.4.1 Dimensões

A tabela 3 apresenta as dimensões de três equipamentos comercialmente disponíveis.

Equipamentos	Potência (MW)	Largura (m)	Profundidade (m)	Altura (m)	Volume (m³)
Armazenador capacitivo [5]	0,50	3,2	2,9	3,2	29,7
Armazenador cinético [13]	0,50	2,0	0,8	2,0	3,2
Inversor [11]	2,25	1,8	1,0	2,3	4,1

Tabela 3. Dimensões dos equipamentos.

5.4.2 Eficiência

A eficiência do banco de capacitores do armazenador capacitivo é de 95%. O valor global do equipamento é ligeiramente inferior [3].

A eficiência do volante de inércia é 95%. O sistema completo apresenta eficiência acima de 90% [13].

O valor aproximado de eficiência do inversor é 96% [11].

5.4.3 Densidade de energia

Tendo em vista que $C = 68 \text{ F}$, $V = 575 \text{ V}$ e que a massa total do armazenador capacitivo é de 5.500 kg, estima-se que a densidade máxima de energia é de 0,57 Wh/kg. Entretanto, a utilização de toda energia armazenada nos ultracapacitores em um processo de aceleração depende da constante de tempo do circuito.

O sistema de armazenamento a volante de inércia apresenta densidade de energia de 0,49 Wh/Kg. Na realidade, a densidade de energia armazenada no equipamento é maior, porém a energia disponibilizada no regime de tração torna-se menor, pois a faixa de rotação utilizada no carregamento e descarregamento está situada acima de 7.000 rpm.

Como o inversor não armazena energia, não é possível compará-lo aos demais equipamentos.

A tabela 4 apresenta um quadro comparativo da densidade energética .

Equipamentos	Potência (MW)	Massa (kg)	Densidade de energia (Wh/kg)
Armazenador capacitivo [5]	0,50	5.500	0,57
Armazenador cinético [13]	0,50	3.402	0,49
Inversor [11]	2,25	2.601	-

Tabela 4. Densidade de energia dos equipamentos.

5.4.4 Densidade de potência

A tabela 5 apresenta um quadro comparativo da densidade de potência .

Equipamentos	Potência (MW)	Massa (kg)	Densidade de potência (W/kg)
Armazenador capacitivo [5]	0,50	5.500	91
Armazenador cinético [13]	0,50	3.402	147
Inversor [11]	2,25	2.601	865

Tabela 5. Densidade de potência dos equipamentos.

Ressalta-se que o armazenador capacitivo utilizado na comparação corresponde ao modelo instalado em container. Desta forma, é evidente que os valores de densidade de energia e potência tornam-se maiores quando o equipamento é instalado em subestações, pois a massa estrutural do container é desconsiderada.

5.4.5 Segurança

Os ultracapacitores são componentes de baixa tensão nominal capazes de conduzir valores de corrente extremamente elevados, especialmente em situações de curto-circuito. Por isso, o manuseio destes componentes só pode ser efetuado quando o banco capacitivo estiver completamente descarregado. Dispositivos e circuitos de segurança garantem que só haja acesso aos terminais do banco quando o mesmo encontrar-se desenergizado.

O ultracapacitor não contém metais pesados ou materiais tóxicos em sua composição, entretanto o eletrólito é inflamável. O componente não pode ser submetido à sobretensões

elevadas, pois isto ocasiona decomposição do eletrólito. Consequentemente há risco de explosão no banco capacitivo.

Com relação ao volante, sabe-se que quando a tensão limite do material do rotor é excedida o mesmo rompe-se, liberando toda a energia armazenada de uma só vez. Conseqüentemente, o volante requer invólucro/estrutura de contenção especial instalado em área sem a ocupação de pessoas, assim no caso de explosão todo o material ficará confinado.

Recomenda-se portanto, que o armazenador capacitivo e o volante de inércia sejam instalados em salas específicas.

Eventuais falhas no sistema de controle de disparo dos tiristores pode ocasionar a queima do inversor com liberação de grande quantidade de energia térmica.

Não há necessidade de instalação do inversor em sala exclusiva; o equipamento pode ser instalado ao lado do grupo retificador.

5.4.6 Maturidade tecnológica

A General Electronics foi responsável pelo desenvolvimento do primeiro capacitor de dupla camada em 1957.

Entretanto, a utilização do armazenador capacitivo em tração metroferroviária foi iniciada em março de 2001 com a instalação do primeiro protótipo em Colônia (Alemanha). O equipamento está sendo utilizado em Madri (Espanha) desde abril de 2002 [4]. Não obteve-se detalhes do comportamento operacional do equipamento nestas aplicações.

Volantes de inércia são utilizados para sistemas UPS desde o começo do século.

Para instalação em sistema de tração elétrica, sabe-se que foram instaladas algumas unidades para testes em Londres e Nova Iorque no começo desta década. Também fora instalado em Colônia um protótipo do volante em 2001. Sabe-se que há estudos avançados para instalação deste equipamento novamente em Nova Iorque, bem como na Linha 1 de Manila (Filipinas) [4] [13] [14]. Não há informações sobre o desempenho dos volantes.

Com relação ao inversor, sabe-se que a eletrônica de potência envolvida possui maturidade tecnológica, porém, devido a todas as variáveis do sistema metroviário, já citadas anteriormente, resultados práticos precisam ser analisados. Este equipamento está sendo utilizado em Colônia desde 2000 e Ancara desde 2005 [11].

5.4.7 Impacto na rede elétrica

O armazenador capacitivo e o armazenador cinético não acarretam impactos na rede de suprimento CA (rede de 22 KV), pois o fluxo de potência existente nas operações de absorção e fornecimento de energia está restrito ao sistema CC.

Entretanto, por utilizarem conversores CC-CC em seu princípio de atuação, podem gerar ruídos indesejáveis e conseqüentemente interferências em sistemas de sinalização, controle e telecomunicações. Desta forma, deve-se analisar com cuidado o conteúdo de harmônicas geradas e os meios para mitigá-las caso afetem algum outro sistema instalado.

De forma geral, sistemas equipados com dispositivos que fazem vários chaveamentos em períodos curtos de tempo poluem a rede elétrica na qual estão conectados. Este é o caso de do inversor.

No lado CC, o inversor (assim como os armazenadores) pode gerar harmônicas que venha afetar o sistema de sinalização, controle e telecomunicações.

Já no lado CA, as harmônicas geradas podem influenciar qualquer equipamento que esteja conectado a rede, prejudicando seu funcionamento e até diminuindo sua vida útil. Como exemplo de degradação causado pelas harmônicas cita-se o aquecimento anormal de motores e de condutores das instalações.

Da mesma forma, as harmônicas existentes na rede CA podem prejudicar o funcionamento da unidade de controle do inversor

Sugere-se realizar um estudo detalhado para verificação do nível e ordem das harmônicas mais significativas no sistema, e eventualmente instalar filtros para mitigá-las.

O inversor precisa de potência reativa do lado CA para conseguir fazer a comutação e controle de fase. Isto acarreta na diminuição do fator de potência na subestação [10].

5.4.8 Vida útil

O aspecto crítico com relação à vida útil do armazenador capacitivo é o banco de capacitores.

Teoricamente, um ultracapacitor suporta mais de um milhão de ciclos de carga e descarga. Apresenta também vida ilimitada quando conservado descarregado. Entretanto, sua vida útil é dependente, predominantemente, da tensão a qual é submetido e da temperatura de operação.

A tabela 6 evidencia este comportamento.

Tensão aplicada (V)	Redução na capacitância (%)	Incremento na resistência interna (%)	Tempo (horas)	Temperatura (°C)
2,7 (nominal)	30	140	5.500	65
			11.000	55
			22.000	45
			44.000	35
			88.000	25
2,5	15	40	5.500	65
			11.000	55
			22.000	45
			44.000	35
			88.000	25

Tabela 6. Influência entre tensão aplicada e temperatura de operação na vida útil dos ultracapacitores [3].

Verifica-se portanto que, em dez anos, há uma redução em 30% da capacitância nominal e um incremento de 140% no valor da resistência interna quando o componente é submetido à tensão nominal (2,7 V) sob 25 °C.

É possível obter uma vida útil maior através da inserção de mais capacitores em série, fato este que acarreta numa menor tensão aplicada em cada componente. Em contrapartida, isto acarreta num incremento de volume e custo.

Pelo exposto, o efeito mais dramático observado é o aumento da resistência interna do componente e consequentemente maiores perdas térmicas e diminuição na eficiência.

A vida útil operacional do volante de inércia é de aproximadamente 20 anos, e a vida útil do rotor é estimada em 50.000 ciclos de carga e descarga atuando com rendimento máximo. Entretanto, a bomba de vácuo pertencente ao sistema deve ser substituída a cada quatro anos.

Tendo em vista que o inversor é constituído basicamente por dispositivos semicondutores, e que os mesmos tem como característica vida útil elevada desde que não sejam submetidos a valores de sobrecorrente e sobretensão acima dos especificados, pode-se esperar um longo tempo de operação.

5.4.9 Manutenção

Com relação à manutenção do armazenador capacitivo, verifica-se que, além das atividades de limpeza periódica e inspeção visual, deve haver substituição de dispositivos móveis pertencentes ao equipamento. Este fato se resume a substituição dos mancais dos ventiladores existentes na unidade conversora e no banco capacitivo (aproximadamente a cada 4 anos) e substituição do contator de pré-carga (vida útil de aproximadamente 8 anos).

Não há atividades de manutenção no banco capacitivo, excetuando-se limpeza periódica. Os capacitores devem ser substituídos após o término da vida útil, sendo que este fato está relacionado às condições de uso durante a operação (conforme descrito no item anterior).

Ressalta-se novamente que, antes da realização de qualquer atividade de manutenção, é necessário que o banco capacitivo esteja descarregado.

A bomba de vácuo do armazenador cinético é o aspecto mais crítico com relação à manutenção. Recomenda-se efetuar inspeções periódicas anualmente, sendo que a estimativa é que a mesma seja substituída a cada quatro anos. Assim como no armazenador capacitivo, deve haver substituição dos mancais dos ventiladores periodicamente (aproximadamente a cada 4 anos) e substituição do contator de pré-carga (vida útil de aproximadamente 8 anos). O equipamento garante, através de circuitos de segurança, que o acesso interno só seja permitido quando o rotor não estiver em movimento.

Por tratar-se de equipamento constituído basicamente por chaves estáticas, circuitos eletrônicos para disparo dos tiristores, reator e disjuntor e/ou seccionadora, não há desgastes significativos que requeiram troca de dispositivos durante a vida útil dos inversores. Vale lembrar que há dificuldades para predição de problemas em dispositivos eletrônicos.

5.4.10 Considerações gerais

A tabela 7 resume as vantagens e desvantagens de cada equipamento perante às características citadas nos itens anteriores.

Características	Armazenador capacitivo	Armazenador cinético	Inversor
Dimensões	Maior	Intermediário	Menor
Eficiência	90 – 95%	90 – 95%	96%
Densidade de energia	Média	Média	-
Densidade de potência	Média	Média	Alta
Segurança	Média	Média	Média/Alta
Maturidade tecnológica	Média	Média	Média/Alta
Geração de harmônicas na rede CA	Não	Não	Sim
Geração de harmônicas na rede CC	Sim	Sim	Sim
Influência no fator de potência da rede CA	Não	Não	Sim
Vida útil	Baixa	Média	Alta
Requisitos de Manutenção	Médio	Médio	Baixo
Utilização para estabilização da tensão CC	Sim	Sim	Não
Necessidade de sala exclusiva para instalação	Sim	Sim	Não

Tabela 7. Resumo comparativo entre equipamentos.

6. CONCLUSÃO

A utilização de equipamentos reaproveitadores da energia disponibilizada pela frenagem dos trens é uma alternativa a ser considerada pelas empresas metroferroviárias, permitindo redução de custos operacionais e economia de energia.

A realização de simulações e/ou medições experimentais é um requisito prévio para qualquer iniciativa relacionada com o uso de equipamentos reaproveitadores. Medidas na Linha 3 do Metrô indicam que apenas 2,8 % da energia consumida pelo sistema de tração em um dia útil é dissipada nos bancos reostáticos dos trens. Sugere-se que novas medições sejam realizadas nas Linhas 2 e 5, pois o *headway* operacional verificado nas mesmas é maior, sendo esperado portanto que o valor percentual seja mais expressivo.

Os equipamentos reaproveitadores (armazenadores capacitivo/cinético e inversores) possuem características específicas apresentadas ao longo deste trabalho.

Os inversores possuem dimensões menores e maior densidade de potência quando comparados aos armazenadores capacitivo/cinético. Entretanto, a utilização de inversores provoca interferências indesejadas na rede de média tensão, o que não ocorre com os armazenadores.

Os armazenadores são utilizados também para estabilização da tensão CC em trechos com quedas de tensão significativas, evitando-se desta forma desenergização de trens devido à subtensões.

A possibilidade de obtenção de maiores informações sobre o desempenho operacional destes equipamentos, já instalados em algumas linhas metroviárias de outras cidades, justifica a continuidade dos estudos pelo Metrô.

REFERÊNCIAS

- [1] RIBEIRO, P. F.; JOHNSON, B. K.; CROW, M. L.; ARSOY, A.; LIU, Y. et al **Energy Storage System for Advanced Power Applications**. 2001. p. 1745-1749
- [2] ROMO, L.; TURNER D.; BRIAN L. S. Cutting Traction Power Costs with Wayside Energy Systems in Rail Transit Systems. In: JOINT RAIL CONFERENCE, 2005 Pueblo, Colorado. p. 187-192.
- [3] MC POWER SERIES BOOSTCAP ULTRACAPACITORS. Disponível em <<http://www.maxwell.com>> Acesso em: 10 fev. 2007.
- [4] GODBERSEN, C.; GUNSELMANN, W. Static Energy Storage Systems Based on Double Layer Capacitor Technology. In: UIC RAILWAY ENERGY EFFICIENCY CONFERENCE, 2, 2004, Paris. p. 9-11.
- [5] MISSAWA, M.; VIO, R. P. Sistema Estático de Armazenamento de Energia para Sistemas Metroferroviários. In: SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA, 9, 2003, São Paulo. p. 2-22.
- [6] GOODMAN, C.J.; MELLITT, B; MOUNEIMNE Z.S. Simulation study of DC transit systems with inverting substations. University of Birmingham, 1983. P38-50.
- [7] AHMED, A. **Eletrônica de Potência**. 1. São Paulo: Prentice Hall, 2000. 479 p.
- [8] ALOUCHE, P. A Regeneração e a Recuperação de Energia por Onduladores no Metrô de São Paulo. In: SEMINÁRIO SOBRE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA DE TRAÇÃO ELÉTRICA POR ONDULADORES – ANTP – FEPASA – METRÔ SP, 1986, São Paulo. p. 1-37.
- [9] FEPASA, FERROVIA PAULISTA S.A. A recuperação de Energia da Tração Elétrica por Onduladores na Fepasa. In: SEMINÁRIO SOBRE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA DE TRAÇÃO ELÉTRICA POR ONDULADORES – ANTP – FEPASA – METRÔ SP, 1986, São Paulo. p 1-7.
- [10] SUZUKI, T. **DC Power-supply System with Inverting Substations for Traction Systems Using Regenerative Brakes**. IEEE PROC., Vol. 129, Pt. B. No. 1, 1982.
- [11] SIEMENS. CATÁLOGO TÉCNICO, SITRAS TCI, 2006.
- [12] CALNETIX, INC. FONTE DE CATÁLOGOS ELETRÔNICOS: ADVANCED MOTOR TECHNOLOGIES (AMT) AND MAGNETIC BEARING. Disponível em: <<http://www.calnetix.com/company.cfm>> Acesso em: 10 de dezembro de 2006.
- [13] VYCON – RAIL REGEN SYSTEM. Disponível em: <[http:// vycoenergy.com](http://vycoenergy.com)> Acesso em: 10 de dezembro de 2006.
- [14] RICHARDSON, M. B. **Flywheel Energy Storage System for Traction Applications**

[15] COQUERY, P.; PARENT , P.; JEUNESSE, A.; CHABAS, J. Electrical energy saving for urban and suburban guided transport systems. In: UIC RAILWAY ENERGY EFFICIENCY CONFERENCE, 2., 2004, Paris.

APÊNDICE A – Oferta de trens na Linha 3 em 01/03/2007.

Horário	Quantidade de trens em circulação
00:00	14
00:15	11
00:30	8
00:45	4
01:00	0
01:15	0
01:30	0
01:45	0
02:00	0
02:15	0
02:30	0
02:45	0
03:00	0
03:15	0
03:30	0
03:45	0
04:00	0
04:15	0
04:30	0
04:45	9
05:00	16
05:15	19
05:30	23
05:45	28
06:00	31
06:15	35
06:30	38
06:45	43
07:00	43
07:15	43
07:30	43
07:45	43
08:00	43
08:15	43
08:30	43
08:45	41
09:00	39
09:15	36
09:30	34
09:45	31
10:00	30
10:15	29
10:30	28
10:45	28
11:00	27
11:15	26
11:30	26
11:45	26
12:00	25

Horário	Quantidade de trens em circulação
12:15	25
12:30	25
12:45	25
13:00	25
13:15	25
13:30	25
13:45	25
14:00	25
14:15	25
14:30	25
14:45	25
15:00	26
15:15	27
15:30	27
15:45	29
16:00	30
16:15	32
16:30	35
16:45	38
17:00	39
17:15	43
17:30	43
17:45	43
18:00	43
18:15	43
18:30	40
18:45	39
19:00	37
19:15	35
19:30	34
19:45	33
20:00	32
20:15	32
20:30	30
20:45	29
21:00	27
21:15	26
21:30	25
21:45	25
22:00	25
22:15	25
22:30	25
22:45	24
23:00	22
23:15	20
23:30	17
23:45	15
23:59	15

APÊNDICE B – Consumo de energia elétrica na Linha 3 em 01/03/2007.

INTERVALO HORÁRIO	YPS (kWh)	YTA (kWh)	YVP (kWh)	YBF (kWh)
00:00 a 00:01 h	2.736,00	3.211,20	6.336,00	2.162,16
01:00 a 02:00 hs	1.396,80	1.008,00	3.960,00	928,80
02:00 a 03:00 hs	1.382,40	979,20	3.902,40	928,80
03:00 a 04:00 hs	1.396,80	964,80	4.060,80	1.274,40
04:00 a 05:00 hs	2.606,40	1.872,00	5.112,00	1.432,08
05:00 a 06:00 hs	5.155,20	5.356,80	7.473,60	2.771,28
06:00 a 07:00 hs	9.979,20	8.337,60	9.633,60	3.944,16
07:00 a 08:00 hs	12.686,40	11.433,60	10.152,00	5.039,28
08:00 a 09:00 hs	12.168,00	11.030,40	9.432,00	5.136,48
09:00 a 10:00 hs	8.496,00	8.337,60	8.913,60	4.659,12
10:00 a 11:00 hs	8.251,20	6.897,60	8.654,40	3.721,68
11:00 a 12:00 hs	7.430,40	6.681,60	7.804,80	3.475,44
12:00 a 13:00 hs	6.624,00	6.552,00	7.329,60	3.713,04
13:00 a 14:00 hs	7.502,40	6.753,60	7.848,00	3.667,68
14:00 a 15:00 hs	7.185,60	6.393,60	7.502,40	3.672,00
15:00 a 16:00 hs	7.185,60	6.307,20	7.732,80	3.710,88
16:00 a 17:00 hs	8.380,80	7.113,60	8.395,20	3.916,08
17:00 a 18:00 hs	10.828,80	9.144,00	9.460,80	4.972,32
18:00 a 19:00 hs	10.094,40	9.648,00	9.748,80	5.134,32
19:00 a 20:00 hs	8.510,40	8.740,80	9.086,40	4.782,24
20:00 a 21:00 hs	7.200,00	7.387,20	8.539,20	3.594,24
21:00 a 22:00 hs	6.753,60	7.041,60	8.294,40	3.384,72
22:00 a 23:00 hs	7.099,20	7.344,00	8.049,60	3.436,56
23:00 a 24:00 hs	5.054,40	5.788,80	8.366,40	2.911,68
Total	166.104,00	154.324,80	185.788,80	82.369,44

Consumo total de energia – 588.587,04 kWh.

Consumo referente ao sistema de tração elétrica (80% do total) – 470.869,63 kWh.