

**ALBERTO FRANCISCO DOS SANTOS FILHO**

**Uso de simulação para análise de estratégias que visam economia de energia em sistemas Metro Ferroviários e tecnologias disponíveis de armazenamento – Baterias e Supercapacitores**

**São Paulo  
2016**

**ALBERTO FRANCISCO DOS SANTOS FILHO**

**Uso de simulação para análise de estratégias que visam economia de energia em sistemas Metro Ferroviários e tecnologias disponíveis de armazenamento – Baterias e Supercapacitores**

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

v.1

São Paulo  
2016

Santos Fº, Alberto Francisco dos

Uso de simulação para análise de estratégias que visam economia de energia em sistemas Metro Ferroviários e tecnologias disponíveis de armazenamento: Baterias e Supercapacitores / A. F. Santos Fº -- São Paulo, 2016.  
29 p.

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

1.Baterias 2.Supercapacitores. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.  
PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia II.t.

## FOLHA DE APROVAÇÃO

ALBERTO FRANCISCO DOS SANTOS FILHO

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, pelas correções, pelo entusiasmo e pelo 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, nas figuras 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 amigadas que germinaram durante essa experiência.

E a minha família pelo apoio, compreensão, incentivo e companheirismo sempre presente.

## RESUMO

O setor energético enfrenta momentos de crise. As usinas hidrelétricas mostram-se insuficientes para suprir a demanda do país, tornando necessário o uso de termoelétricas.

Isso encarece o valor da energia elétrica, além de torná-la “poluente”.

Diante desse contexto, os consumidores, incluindo o Metrô de São Paulo, devem buscar a melhoria da eficiência na sua utilização.

Essa condição motivou a elaboração do trabalho “Uso de simulação para análise de estratégias que visam economia de energia em sistemas Metro Ferroviários e tecnologias disponíveis de armazenamento”, voltado para o desenvolvimento de simulador que mostre o consumo de energia durante a tração e a “queima reostática” durante a frenagem.

A proposta é armazenar parte da energia queimada nos bancos de resistores, para uso durante a tração do próprio trem ou de outros que estejam em momento de consumo.

Nessa parte do trabalho, serão abordados dois recursos para armazenamento: Baterias e Supercapacitores.

**Palavras-chave:** setor energético, crise, eficiência, Baterias, Supercapacitores.

## ABSTRACT

The energy sector has faced a crisis. Hydropower plants has proved insufficient to meet the demand of the country, requiring the use of thermoelectric making it necessary.

This increases the cost price of electricity, and makes it "pollutant".

In this context, consumers should, including the São Paulo Metro, look for efficient use of electrical energy.

This condition led to development work "Using simulation for analysis of strategies aimed at energy saving systems Metro Rail and available storage technologies" focused on the development of simulator that shows the power consumption during traction and "rheostatic burning of energy " during braking.

The proposal is to store part of the energy that would be burned on the banks of resistors for use during the traction of the train itself or others who are at the moment of consumption.

In this part of the work will be addressed two features for storage: Batteries and Supercapacitors.

**Keywords:** energy sector, crisis, efficiency, Batteries, Supercapacitors.

## LISTA DE FIGURAS

1	Figura 1: Comparação de densidade de potência e energia para várias tecnologias de Baterias.....	14
2	Figura 2: Bateria Chumbo-ácido.....	14
3	Figura 3: Esquemático de operação de uma bateria Lítio-íon.....	16
4	Figura 4: Esquemático de operação de uma Bateria Níquel-metal hidreto.....	17
5	Figura 5: Esquemático interno da Bateria SCiB.....	19
6	Figura 6: Aspecto Construtivo da Bateria SCiB.....	20
7	Figura 7: Proposta do fabricante para aplicação de Bateria SCiB.	20
8	Figura 8: Topologia do sistema aplicado à SEPTA.....	21
9	Figura 9: Composição interna de uma EDLC.....	22
10	Figura 10: Módulos SITRAS refrigerados a ar (a) e a água (b).....	24
11	Figura 11: Módulo STEEM – ALSTOM.....	24
12	Figura 12: Módulo MITRAC – BOMBARDIER.....	25

## LISTA DE TABELAS

1	Tabela 1 – Aplicação de Baterias em Sistemas Metroferroviarios.....	13
2	Tabela 2 – Tecnologias empregadas a EDLC.....	23
3	Tabela 3 - Comparativo entre Bateria e Supercapacitor.....	26

## SUMÁRIO

1	Introdução.....	11
2	Características de Baterias e Supercapacitores.....	12
2.1	Baterias.....	12
2.1.1	Bateria Chumbo-ácido.....	14
2.1.2	Bateria Litio-ion.....	15
2.1.3	Bateria Níquel-metal.....	17
2.2	Supercapacitores – capacitores eletrolíticos e dupla-camada.....	21
2.2.1	Princípio de funcionamento.....	22
2.2.2	Exemplos Comerciais de Supercapacitores para Sistemas de Tração.....	23
3	Comparativo.....	26
4	Conclusão.....	28
	Referências.....	29

## 1. Introdução

A situação do setor energético do país nos motivou a elaborar o trabalho “Uso de simulação para análise de estratégias que visam economia de energia em sistemas Metro Ferroviários e tecnologias disponíveis de armazenamento”.

Os trens são responsáveis por 70% do consumo de energia do Metrô de São Paulo.

Parte dessa energia, aproximadamente 10%, é dissipada durante o processo de frenagem em bancos de resistores.

Diante disso, nos propusemos a buscar alternativas, para acumular essa energia, temporariamente, e utilizá-la novamente para tração.

Basicamente, existem duas condições para utilização de dispositivos para reaproveitamento de energia em sistemas de tração para trens: estáticos ou estacionários, e embarcados.

No sistema estático ou estacionário, o quesito tamanho não é tão relevante e por isso pode ser configurado de modo a permitir maior fluxo de energia e com maior flexibilidade de distribuição.

O sistema embarcado atende apenas ao próprio veículo, porque faz parte do próprio trem.

No presente trabalho, vamos apresentar duas tecnologias: Baterias e Supercapacitores.

Para essas tecnologias procuraremos abordar suas características, vantagens e desvantagens, ganhos e desempenho.

## **2 Características de Baterias e de Supercapacitores**

### **2.1 Baterias**

Essa tecnologia é utilizada para armazenamento de energia em sistemas de tração há muito tempo. Estudos de sua aplicação tanto embarcada como estacionária são muitos, os quais concluem que a aplicação desse tipo de armazenador de energia, além de reduzir o consumo final do sistema, ajuda a regular a flutuação da tensão no condutor de tração, na compensação da queda de tensão no condutor de tração proveniente do distanciamento das fontes e possibilita que veículos circulem sem a necessidade de contato constante com algum alimentador (situação necessária, principalmente, por trainways que percorrem centros históricos) [1].

No Japão, por exemplo, a primeira aplicação de baterias chumbo-ácido em paralelo a subestações foi em 1912. O banco instalado tinha capacidade de descarga de 1332 Ah e foi aplicado com o intuito de reduzir a demanda de energia e ajudar na alimentação do sistema em caso de falta por um curto intervalo de tempo, sendo utilizado por 15 anos antes de ser substituído [1]. Ao longo do tempo, a utilização de baterias chumbo-ácido foi decrescendo, dando lugar as baterias de lítio-íon e níquel metal hidreto, devido, principalmente, a densidade de energia das últimas duas ser maior quando comparada a primeira, as dificuldades de manutenção e possibilidade de morte súbita da bateria chumbo-ácido. A partir de 2005 as baterias de lítio-íon e níquel metal hidreto começaram a ser aplicadas, proporcionando, em 2007, um decréscimo de 300MWh no consumo anual da subestação de Itayado [1].

Sua utilização para propiciar a operação de composições sem a presença constante de condutor alimentador, ainda em forma de testes, teve início em 2003, com um sistema projetado para operar trens até 40 km/h, em um trecho de 17,4 km, com capacidade nominal de 33kWh e 168 células em série [1].

A Tabelas 1 ilustra algumas aplicações de baterias no sistema metroferroviário.

Tabela 1 – Aplicação de baterias em sistemas metroferroviários.

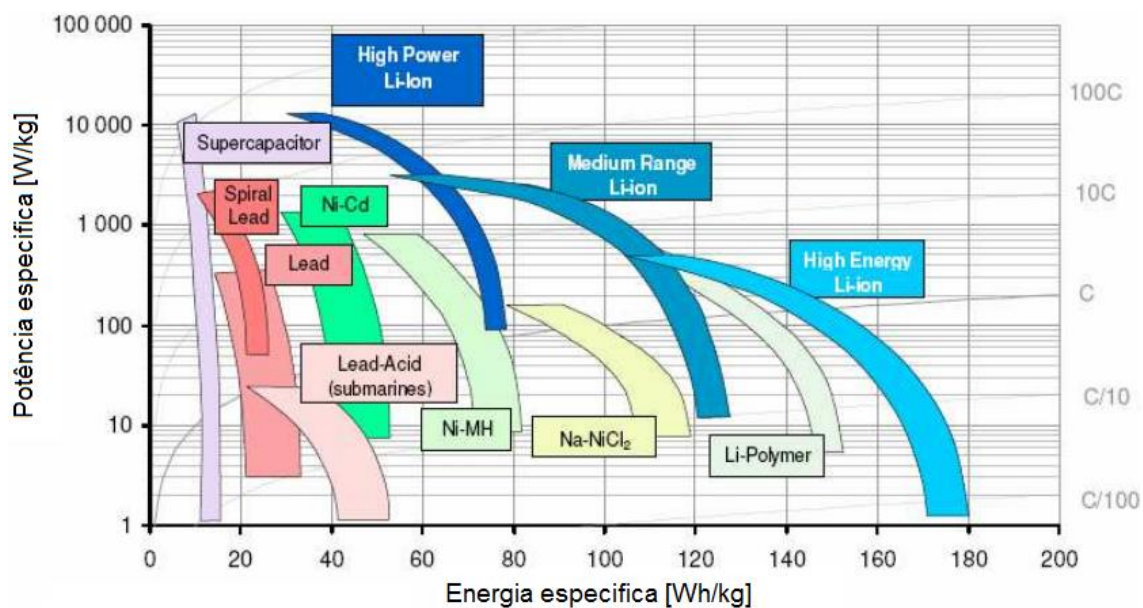
OPERAÇÃO ESTACIONÁRIA COMO ARMAZENADOR DE ENERGIA					
Companhia		Tipo de Bateria	Potência Nominal [kW]	Energia Nominal [kwh]	
Kobe Municipal Transportation Bureau		Lítio-íon (operacional)	1000	37,4	
West japan railway Company		Lítio-íon (operacional)	1050	140	
Kagoshima City Transport Bureau		Lítio-íon (operacional)	250	18,1	
Nagoya Railroad Co. Ltd		Lítio-íon (teste)	500	18,7	
Osaka Municipal Transportation Bureau		Ni-MH (teste)	5600	576	
INSTALAÇÃO EMBARCADA PARA OPERAÇÃO SEM CATENÁRIA					
Veículo	Tipo de Bateria	Potência nominal [kW]	Energia nominal [kWh]	Tensão nominal [V]	Peso [kg]
Lithey-Tramy	Lítio-íon	300	33	605	1160
Hi-tram	Lítio-íon	600	72	605	2000
SWIMO	Ni-MH	250	120	750	3200

Fonte:[1]

O princípio de funcionamento de baterias instaladas em sistemas de tração metroferroviários é o mesmo de uma bateria utilizada em eletrodomésticos. Seu diferencial está no aspecto construtivo, ou seja, nos materiais empregados aos polos positivo e negativo, no tipo de solução eletrolítica adotada, no espaçamento entre placas, no material isolante, etc.

A Figura 1 mostra um quadro comparativo entre algumas tecnologias de fabricação de baterias [2].

Figura 1 - Comparação de densidade de potência e energia para várias tecnologias de baterias.

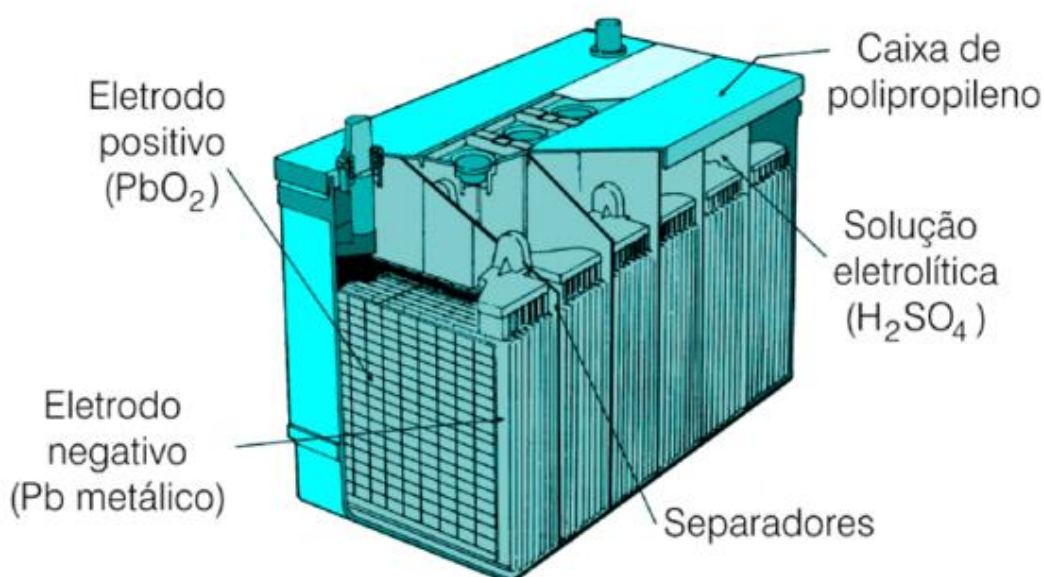


Fonte: [2]

### 2.1.1 Bateria chumbo-ácido

A construção de uma bateria chumbo-ácido esta explicitada na Figura 2.

Figura 2 - Esquemático da construção interna de uma bateria chumbo-ácido.



Fonte: [3]

As reações que ocorrem nesse tipo de bateria podem ser observadas na eq. 4, com o processo de descarga da esquerda para a direita e de carga da direita para a esquerda.

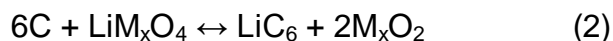


Quando esse tipo de bateria se encontra carregada, suas placas positivas são compostas de dióxido de chumbo ( $\text{PbO}_2$ ) e suas placas negativas compostas de chumbo ( $\text{Pb}$ ) metálico na forma porosa, tendo como meio aquoso onde estão mergulhadas uma solução de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}$ ). No processo de descarga, os materiais ativos das placas positivas e negativas reagem com os íons  $\text{SO}_4$  provenientes da solução de ácido sulfúrico formando sulfato de chumbo ( $\text{PbSO}_4$ ) reduzindo desta maneira a densidade do eletrólito. Já no processo de carga, o sulfato de chumbo presente nas placas transforma-se em  $\text{PbO}_2$  na placa positiva e  $\text{Pb}$  metálico na placa negativa, liberando assim íons  $\text{SO}_4$ , que aumentam a densidade do eletrólito.

Apesar de sua manutenção ser complexa e perigosa e seus materiais tóxicos, sua aplicação ainda se justifica devido seu baixo custo de aquisição.

### 2.1.2 Bateria lítio-íon

O esquemático de operação de uma bateria lítio-ion pode ser observado na Figura 3, com as reações que ocorrem em suas placas explicitadas pela eq. 5. O processo de carga ocorre da esquerda para a direita e o de descarga da direita para a esquerda [4].

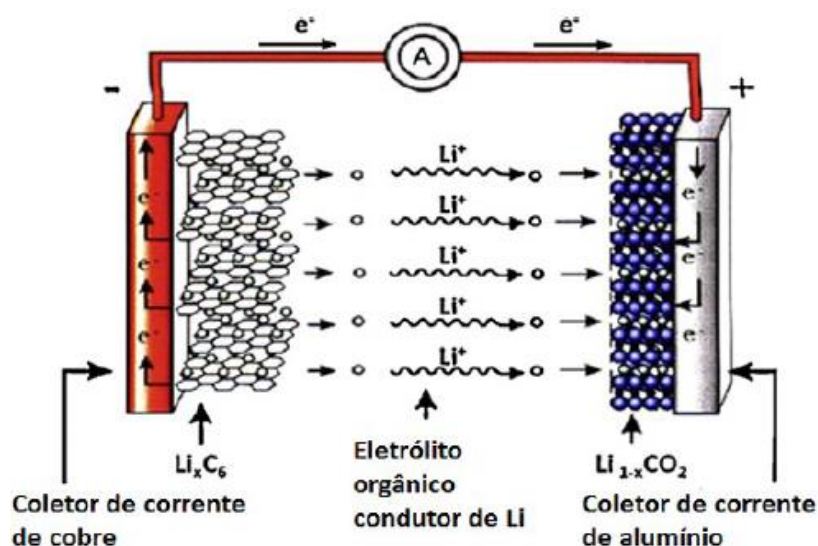


Observando a eq. 2, a representação  $\text{M}_x$  descreve possíveis materiais que podem ser empregados aos polos positivo e negativo. Esses materiais ativos podem ser grafite, cobalto, manganês, ferrofostato, entre outros e são eles que sofrem o processo de oxidação ou redução, ou seja, os íons de lítio permanecem inalterados, sendo inseridos ou extraídos entre os eletrodos de maneira reversível.

Os materiais geralmente empregados nessa bateria são: grafite para o polo negativo, materiais à base de óxidos metálicos de lítio para o polo positivo e sal de lítio diluído em solvente orgânico para o eletrólito [4].

Ao longo da operação de carregamento da bateria, os íons de lítio se deslocam do polo positivo ao negativo, fazendo com que o material desse polo se oxide e ceda elétrons, os quais se deslocam pelo circuito externo à bateria. No momento em que os elétrons chegam ao polo negativo, os íons de lítio se “aderem” a esse eletrodo e o material ativo é reduzido. Durante o processo de descarga, as reações descritas são inversas, fazendo com que o estado inicial seja recomposto. Ou seja, para esse tipo de bateria os íons de lítio são apenas transportados entre os polos, conforme dito anteriormente.

Figura 3 - Esquemático de operação de uma bateria litio-ion.



Fonte: [4]

Algumas características desse tipo de bateria podem ser vantajosas [4]:

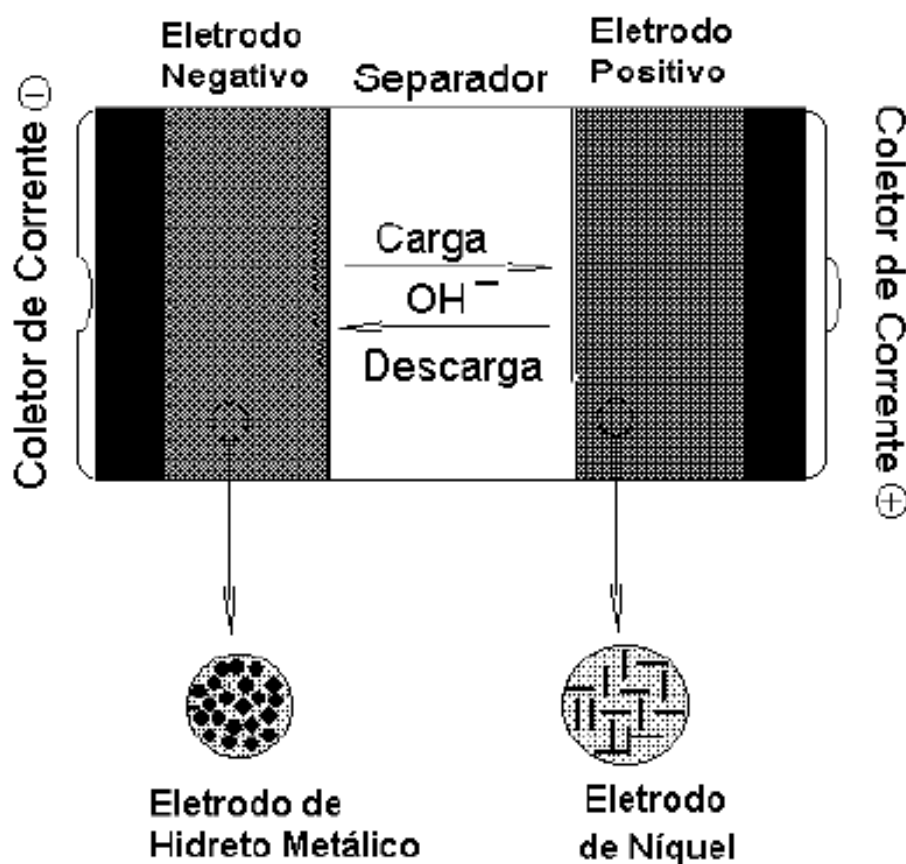
- tensão nominal da célula maior (3 a 4Vcc) em comparação a bateria chumbo-ácido (2Vcc) e níquel metal hidreto (1,2Vcc);
- elevada densidade de energia, conforme apresentado na Figura 4;
- elevado numero de ciclos de carga e descarga, atingindo 80% de sua capacidade após 1000 ciclos;
- por não possuir metais tóxicos, como chumbo, cádmio e mercúrio, seu impacto ambiental pode ser considerado de baixo a moderado.

### 2.1.3 Bateria níquel metal

Para as baterias níquel metal hidreto, seu esquemático de operação está exposto na Figura 4 e suas reações internas ocorrem conforme a eq. 3, sendo que o processo de descarga ocorre da esquerda para a direita e o de carga da direita para a esquerda [5].



Figura 4 - Esquemático de operação de baterias níquel metal hidreto.



Fonte: [5]

O material que compõe o polo positivo dessa bateria é o mesmo utilizado em uma bateria de níquel cádmio, o oxi-hidróxido de níquel III, porém o material componente do polo negativo é o hidrogênio na forma de uma liga de hidreto, sendo capaz de cedê-lo ou armazená-lo durante o processo de descarga ou carga, fato que nomeia esse tipo de armazenador.

Seu eletrólito aquoso é composto de hidróxido de potássio aditivado, porém seu volume é pequeno e quase todo absorvido pelas placas separadoras e pelos próprios eletrodos [5]. Essa característica facilita o transporte do oxigênio para o polo negativo durante o processo de carga, de tal forma que pode ser transformado, como subproduto, em íon hidroxila, fato que minimiza a geração de hidrogênio gasoso e facilita a recombinação dos elementos no processo de descarga.

Ao longo da descarga, o oxi-hidróxido de níquel III componente do polo positivo é reduzido a hidróxido de níquel II, enquanto que no eletrodo negativo, o hidreto metálico MH é oxidado e regenera a liga metálica. No processo de carga, o descrito acima ocorre inversamente. É possível concluir, através da observação da eq. 3 que não há formação ou consumo tanto de hidroxila como água ao longo do processo de carga ou descarga.

Algumas características desse tipo de bateria podem ser vantajosas [5]:

- capacidade de armazenamento de carga relativamente alto;
- manutenção virtualmente inexistente;
- por não possuir metais tóxicos, como chumbo, cádmio e mercúrio, seu impacto ambiental pode ser considerado de baixo a moderado;
- rápida capacidade de recarga;
- alto ciclo de vida;
- vida longa em qualquer estado de carga.

Contudo, outras características podem ser desvantajosas [5]:

- desempenho de descarga relativamente baixo;
- capacidade de retenção de carga reduzida por sofrer processo de auto descarga diário;
- efeito memória moderado.
- Exemplos comerciais de baterias para sistema de tração

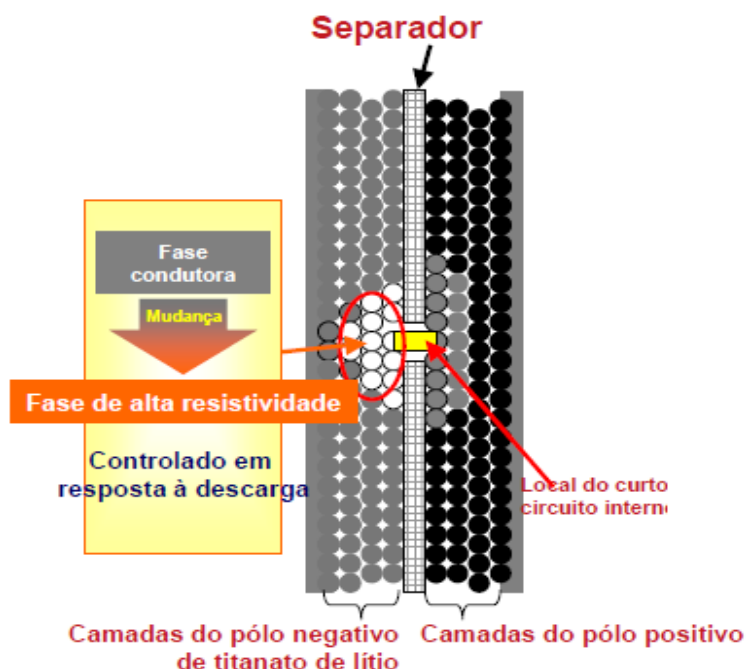
Como exemplo de dispositivos comerciais, a empresa Toshiba Corp. possui um tipo de bateria de lítio-íon recarregável chamada SCiB. Sua diferença básica quando comparada à baterias tradicionais é a presença de titanato de lítio em seu polo negativo, conforme ilustrado na Figura 5.

Suas vantagens compreendem a possibilidade de grande capacidade de uso, ou seja, ciclos de carga e descarga seguidos, pois não há precipitação do lítio metálico, alta potência de entrada e saída, desempenho em baixas temperaturas (até  $-30^{\circ}\text{C}$ ), longa vida útil (em torno de 10.000 ciclos) e carregamento em alta velocidade, armazenando 80% de sua capacidade em aproximadamente 6 minutos [6].

Esse tipo de bateria é disponibilizada em células de 20Ah arranjadas conforme a necessidade da aplicação de tal modo que possa ser instalada na forma de painéis dentro de salas apropriadas ou inseridas em contêineres. Seu aspecto construtivo pode ser observado na Figura 6.

Segundo o fabricante, uma possível forma de utilização dessa bateria em um sistema metroferroviário pode ser observada na Figura 7. Infelizmente ainda não há uma aplicação dessa tecnologia, somente simulações, onde o fabricante apresenta a potencialidade da solução tanto em termos de economia de energia como em redução da tensão necessária no condutor de tração.

Figura 5 – Esquemático interno da bateria SCiB [6].



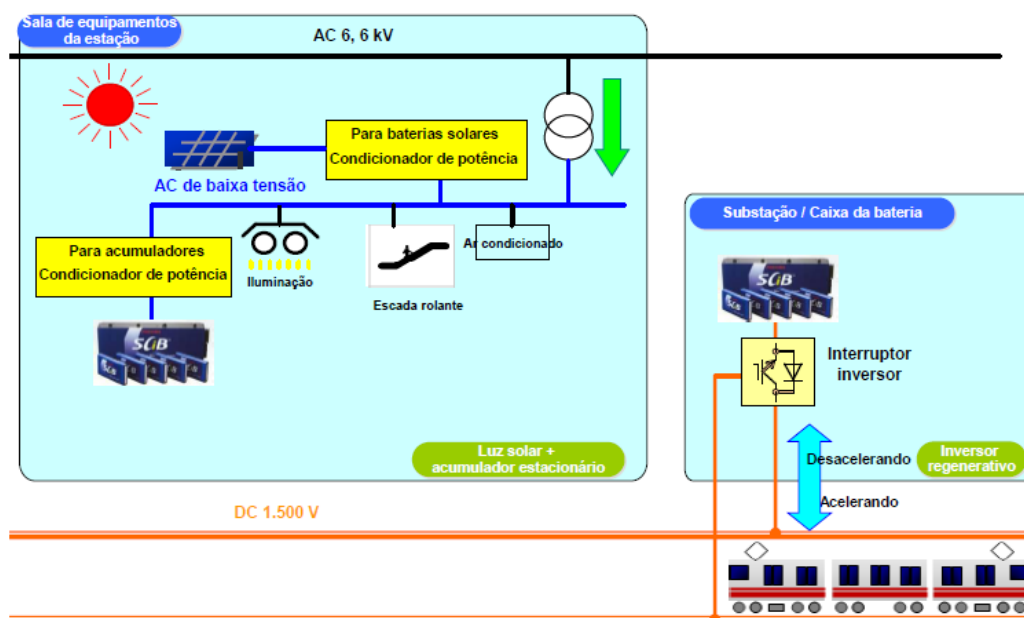
Fonte: [6]

Figura 6 - Aspecto construtivo da bateria SCiB [6].



Fonte: [6]

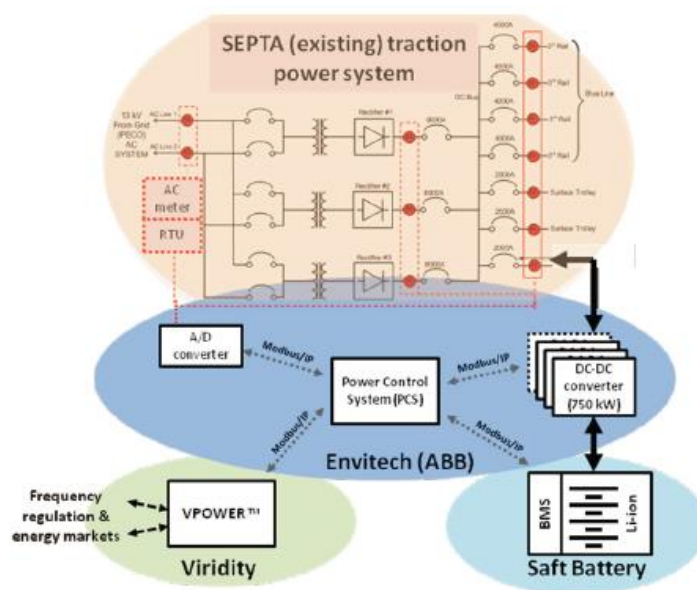
Figura 7 - Proposta do fabricante para aplicação de bateria SCiB [6].



Fonte: [6]

Outro exemplo comercializado é apresentado pela Empresa ABB em parceria com a fabricante de baterias SAFT. No ano de 2012, no estado estadunidense da Pennsylvania, foi instalado juntamente a subestação de um sistema de transporte de trens metropolitanos (SEPTA) um container de baterias alcalinas da empresa SAFT do modelo MAX 20P - Intensium Lithium-ion Battery [7]. Nessa linha (Market Frankford Line), cerca de 80% da energia consumida anualmente (500GWh) é utilizada no sistema de tração. O banco de baterias utilizado tem capacidade de armazenamento até 420kWh e pode oferecer até 1600A de corrente de descarga. A Figura 8 ilustra a topologia utilizada no sistema.

Figura 8 - Topologia do sistema aplicado à SEPTA.



Fonte: [7]

Como resultado da aplicação do sistema, a quantidade de energia armazenada teve uma média de 1284kWh durante os finais de semana e 900kWh em dias úteis. Esse armazenamento de energia possibilitou a regulação no consumo do sistema, devolvendo energia a distribuidora de tal forma a ajudar a regulação de frequência do sistema elétrico. Devido a regulamentação estadunidense, essa ajuda na regulação da frequência da rede gerou uma receita de \$100k à SEPTA em seis meses de operação do sistema de armazenamento de energia.

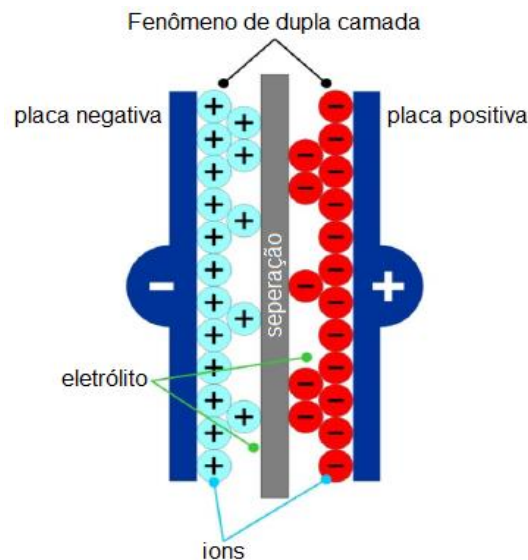
## 2.2 Supercapacitores - Capacitores eletrolíticos de dupla camada

O conceito dessa tecnologia não é novo. A primeira patente foi feita em 1957 pela General Electric [8], porém sua aplicação em altas potências pode ser considerada recente. Essa tecnologia é capaz de armazenar de 10 a 100 vezes mais energia comparada a capacitores convencionais e disponibilizar aproximadamente 10 vezes mais potência quando comparada a baterias [9].

### 2.2.1 Princípio de funcionamento

A diferença entre um Capacitor Eletrolítico de Dupla Camada, ou EDLC, e um capacitor comum está basicamente na composição de seus materiais (eletrodos, eletrólito, etc) e em suas características de funcionamento. Nos capacitores convencionais, o processo de carga se dá com a movimentação dos elétrons de uma placa a outra através do eletrólito, fato que aumenta a diferença de potencial entre as placas positiva e negativa do dispositivo. Já nos EDLC, durante essa movimentação de elétrons entre as placas, os íons no eletrólito são atraídos pelas placas de polaridade oposta, criando a característica de dupla camada na região entre eletrodo e eletrólito, conforme é ilustrado pela Figura 9. A separação de carga num EDLC acontece em “duas camadas” entre os eletrodos e o eletrólito, onde a energia é armazenada. A separação é composta de um isolante elétrico, porém permite a passagem dos íons [10].

Figura 9 - Composição interna de um EDLC.



Fonte: [10]

Atualmente existe o emprego de diferentes materiais aos EDLC, conforme pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2 - Tecnologias empregadas a EDLC.

Tecnologia	Material do eletrodo	Mecanismo de armazenamento de energia	Tensão da célula [V]	Densidade de energia [Wh/kg]	Densidade de potência [kW/kg]
Dupla camada elétrica	carbono ativado	separação de carga	2,5 - 3	5 - 7	1 - 3
Carbono Avançado	carbono grafite	transferência de carga ou intercalação	3 - 3,5	8 - 12	1 - 2
Carbono Avançado	concentração de nanotubos	separação de carga	2,5 - 3	---	---
Pseudo-capacitores	óxido de metal	Transferência de carga Redox	2 - 3,5	10 - 15	1 - 2
Híbrido	carbono/óxido de metal	Dupla camada /transferência de carga	2 - 3,3	10 - 15	1 - 2
Híbrido	carbono/óxido de chumbo	Dupla camada/faraday	1,5 - 2,2	10 - 12	1 - 2

Fonte: [11]

A maioria dos EDLS comerciais é de dupla camada elétrica e possuem microporos de carbono ativado como eletrodos e eletrólitos aquosos (ácidos ou básicos com tensão nominal limitada a 1V) ou orgânicos (acetonas com tensão nominal até 3V) [12].

### 2.2.2 Exemplos comerciais de supercapacitores para sistema de tração

Comercialmente, os supercapacitores são disponibilizados em arranjos modulares. Seus modos de aplicação são variados, como, armazenamento de energia de frenagem, estabilização da tensão de tração, uso como buffer temporário de energia e operação de trainways sem contato permanente com cabos trolley [13].

Como exemplo, o fabricante Siemens comercializado um sistema de supercapacitores chamado SITRAS, que possui módulos de tensão nominal 1,1V refrigerados tanto a ar como a água, com grau de proteção IP65, aprovados de acordo com IEC61373 (choque e vibração), a prova de curto circuito e projetado para suportar distúrbios eletromagnéticos. A Figura 10 ilustra esse módulo refrigerado a ar (a) e a água (b). Esse dispositivo pode ser montado tanto no trem como ao longo da via.

Figura 10 - Módulos Sitras refrigerados a ar (a) e a água (b).



Fonte: [13]

Outro exemplo é fornecido pelo fabricante Alstom, chamado STEEM, é disponibilizado em módulo embarcado [14], conforme ilustrado pela Figura 11.

Figura 11 - Módulo STEEM - Alstom.



Fonte: [14]

Com o intuito de apresentar possibilidades de aplicação, o fabricante Bombardier comercializa o sistema de armazenamento embarcado MITRAC, a exemplo do sistema STEEM. A topologia de seu módulo é semelhante, conforme pode ser observado na Figura 12.

Figura 12 - Módulo MITRAC - Bombardier.



Fonte: [15]

### 3. Comparativo entre Baterias e Supercapacitores

A Tabela 3 sintetiza uma análise comparativa entre a aplicação em sistema de tração entre Bateria Chumbo-ácido e Supercapacitor.

Tabela 3 – Comparativo entre bateria e supercapacitor.

	Bateria Chumbo-Ácido	Supercapacitor
Auto Descarga (por dia)	0,1 – 0,3 %	2 – 40 %
Energia Específica (Wh/kg)	35 - 40	0,1 – 5
Potência Específica (W/kg)	<400	50 – 10.000
Eficiência	81 – 94 %	85 – 100%
Tempo de Recarga	Alto	Baixo
Ciclos Completos	100 – 3.500	100.000 – 500.000
Confiabilidade	Moderada	Alta
Manutenção	Moderada/Alta	Moderada
Faixa de Temperatura de Operação	Estreita	Extensa
Impacto Ambiental	Nociva	Nocivo
Custo (€/kWh)	5 - 150	50.000 – 150.000

Fonte: [16]

Diferente das Baterias, um Supercapacitor pode ser carregado e descarregado muitas vezes, sem perda de desempenho. Enquanto uma bateria eletroquímica se desgasta com o passar dos anos de uso, um Supercapacitor possui vida longa.

Com 10 anos de atividade regular e contínua, um Supercapacitor perde somente 20% de seu poder de armazenamento de energia. De modo geral, as baterias suportam uma quantidade muito inferior de cargas e descargas, se comparadas aos Supercapacitores.

Pode-se dizer que os Supercapacitores são um cruzamento dos capacitores convencionais com as baterias eletroquímicas. No entanto os capacitores não exigem um circuito que detecte quando eles se encontram em carga máxima. Quando cheios, eles param de armazenar energia. Portanto, os Supercapacitores estão livres de danos causados por sobrecargas e não enfrentam problemas de “memória” como é o caso de alguns tipos de bateria.

Uma bateria de íons de lítio carregada e deixada em desuso perde aproximadamente 10% de sua energia armazenada após um período de 30 a 40 dias. Já um Supercapacitor se auto descarrega de forma mais acentuada. No mesmo período de tempo e nas mesmas condições ele perde cerca de 50% de sua energia.

#### 4. Conclusão

O objetivo principal é o reaproveitamento da energia elétrica proveniente da frenagem, de modo a diminuirmos o consumo.

A tecnologia a ser escolhida vai depender das condições físicas das linhas, dos trens e do custo de instalação.

Baterias e Supercapacitores não necessariamente estão em competição. Se entendermos que a aplicação deva ser feita no material rodante, diretamente, o melhor é o uso de Supercapacitores, pelo tamanho e peso reduzidos, uma vez que o reaproveitamento de energia se dará no próprio trem. Essa condição faz com que o reaproveitamento ocorra, sem envolver o sistema de alimentação da tração. A opção por sistema embarcado é mais fácil de ser implementada em trens novos, definida na fase de projeto.

Entretanto, se a opção for o uso em instalações fixas, como subestações retificadoras, o uso de Baterias é o mais adequado, podendo ser ligadas em paralelo a Supercapacitores, para que esses auxiliem as Baterias quando a demanda de potência for alta. Com isso, a carga pode receber uma alta corrente sem que haja redução da tensão nos terminais delas. Ou seja, Supercapacitores operando em paralelo com Baterias fazem com que o desempenho dos conjuntos sejam otimizados nos picos de demanda de potência da carga.

Trata-se de opção que pode ser aplicada com mais facilidade em linhas antigas, que, originalmente, não tinham essa tecnologia, por maior disponibilidade de espaço físico.

Desse modo, deve-se analisar a melhor maneira de combinar custos e tecnologia, de modo a conseguir o objetivo, que é a eficiência no uso da energia elétrica nos sistemas de tração.

## Referências

- [1] T. Ratniyomchai e S. a. T. P. Hillmansen, “Recent developments and application of energy storage devices in electrified railways,” *IET Electrical Systems in Transportation*, 2013.
- [2] M. Winter, “Introduction into Li-ion Battery Materials,” *Symposium Advanced Battery Technologies for Automobiles and their Electric Grid Integration*, pp. 20-21, jan 2009, Essen Germany.
- [3] N. Bocchi, L. C. Ferracin e S. R. Biaggio, “Pilhas e Baterias: Funcionamento e Impacto Ambiental,” *Quimica Nova na Escola*, pp. 3-9, maio 2000.
- [4] M. F. N. C. Rosolem, R. F. Beck, G. R. dos Santos e V. T. Arioli, “Bateria de lítio-íon: conceitos básicos e potencialidades,” *Cad. CPqD Tecnologia, Campinas*, v. 8, nº2, pp. 59-72, jul/dez 2012.
- [5] R. C. Ambrosio e E. A. Ticianelli, “Baterias de Níquel-Hidreto Metálico, uma alternativa para as baterias de Níquel-Cádmio,” *Quim. Nova*, Vol. 24, nº 2, pp. 243-246, 2001.
- [6] Toshiba, *SCiB - Application for Rolling Stock*, 2014.
- [7] ABB,  
“<http://www.abb.com/cawp/seitp202/84e9f73743b3b3f8c1257a39004aab33.aspx>,” 2015.
- [8] A. G. Pandolfo e A. F. Hollenkamp, “Carbon properties and their role in supercapacitors,” *Journal of Power Sources*, vol 157, nº 1, pp. 11-27, Junho 2006.
- [9] H. Douglas e P. Pillay, “Sizing ultracapacitors for hybrid electric vehicles,” *Industrial Electronics Society, IECON. 31st Annual Conference of IEEE, Raleigh*, pp. 1-6, 2005.
- [10] E. J. S. Company, “<http://www.elton-cap.com/products/>,” Elton Supercapacitors, 2016. [Online]. [Acesso em 26 março 2016].
- [11] A. Burke, “Ultracapacitor technologies and application in hybrid and electric vehicles,” *International Journal of Energy Research*, vol. 34, nº 2, pp. 133-151, Fevereiro 2010.
- [12] I. Hadjipaschalis, A. Poullikkas e V. Efthimiou, “Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, nº 6-7, pp. 1513-1522, Setembro 2009.
- [13] Siemens, “Sitras ESM 125 for mobile and stationary applications,” 2016. [Online]. Available: <http://www.mobility.siemens.com/mobility/global/en/rail-solutions/rail-electrification/dc-traction-power-supply/energy-storage-solutions/Pages/energy-storage-module.aspx>. [Acesso em março 2016].
- [14] J. P. Moskowitz e J. L. Cohuau, “STEEM: ALSTOM and RATP experience of supercapacitors in tramway operation,” *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, pp. 1-5, 2010.

- [15] Bombardier, "Energy Management," 2016. [Online]. Available: <http://www.bombardier.com/en/transportation/products-services/propulsion-controls/products/energy-management.html>. [Acesso em março 2016].
- [16] F. C. Campos, L. M. M. Andrade, R. A. Brochado, P. S. Leitão, V. N. Costa, M. R. Monteiro, B. G. dos Santos e M. L. Pereira, "Armazenamento de Energia," *Universidade Federal de Itajuba*, 2015.