



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS TIC TRENS

32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

CATEGORIA 3

**PROJETO COULOMB - VIDA ÚTIL REMANESCENTE DOS
SUPERCAPACITORES DO VLT CARIOCA**

1. INTRODUÇÃO

O sistema de Veículo Leve sobre Trilhos (VLT) do Rio de Janeiro representa uma solução moderna de mobilidade urbana, utilizando múltiplas fontes de energia para garantir suprimento de energia para o sistema de tração do Material Rodante, entre elas os supercapacitores, responsáveis pelo armazenamento e fornecimento de energia em trechos críticos.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS
TIC TRENS

32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

O Material Rodante, modelo CITADIS 402, é dotado de 7 módulos, dois quais 4 possuem truques, e 3 são do tipo carrocerias suspensas. A motorização adotada é de 75%, sendo 3 truques motores (2 motores de tração por truque) e 1 truque reboque.

Existem 3 modos de promover o suprimento de energia de tração para o trem: APS, LAC e Ecopack.

- i. **APS – Alimentação pelo Solo:** Através de um sistema de terceiro trilho na infraestrutura e Sapata coletora no Material Rodante é possível coletar a corrente elétrica e alimentar o circuito de tração e auxiliares do trem. Em torno de 95% do traçado operacional é equipado com o sistema APS.
- ii. **LAC – Rede área:** sistema de alimentação convencional por catenária. O trem é dotado de um pantógrafo capaz de ser utilizado em trechos onde existe rede aérea. No VLT Carioca somente o pátio de manutenção é equipado com rede aérea.
- iii. **Ecopack:** Sistema OESS (*Onboard Energy Storage System*). Trata-se do Sistema de energia embarcada no próprio trem, capaz de garantir autonomia limitada independente de energia externa. Em torno de 5% do traçado no VLT Carioca precisa ser superado por meio de autonomia embarcada.



Informação Geral	
Velocidade máxima	50 km/h
Comprimento (m)	43,97
Largura (m)	2,65
Altura (m)	3,80
Massa (kg)	57.619
Potência Tração (KW)	6 x 120
Capacidade (pax)	420

Energia de Tração

APS – Alimentação pelo Solo
750VDC

LAC – Rede Aérea
750VDC

Ecopack
Supercapacitores 900VDC

Figura 1 - Informações gerais: Sistema de Tração Citadis 402 VLT Carioca



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

O sistema de energia – *Ecopack* – é formado a partir da conjugação de 12 elementos (módulos) de armazenamento de energia a partir da tecnologia de Supercapacitores, que possuem a característica de baixa densidade de energia, garantindo rápida carga, com autonomia reduzida.



Blue Solutions M65V385F-T-MnT

✓ Mecânico	Dimensões: 630 x 412 x 218,4 (mm) Massa: 53 kg
✓ Elétrico	Capacitância: 385 F Tensão: 65 V ESR (25°C, 125A): 1,9 mΩ Constante tempo (25°C, 125A): < 0,8 s Corrente RMS típica: 325 A Corrente de pico: 600 – 1000 A Energia específica (2,7 Vpc, 25°C): 4,3 Wh/kg Potência Ragone 10s, DOD 50%: 1 kW/kg
✓ Térmico	Temperatura de trabalho: -35 to +70 °C Temperatura de armazenamento: -35 to +70 °C
✓ Conformidade	IP 65 IEC 60529 Proteção Fogo: DIN 5510-2 and NF F161/102 (cat. A1, A2, B) Choque e vibração EN 61373 (1 B), EN 60068 Isolação elétrica 3,5KV AC 60s IEC 61287-1, EN 50124-1 EMC EN 50121-3

Figura 2 - Módulo de Supercapacitores

Com o avanço da operação e o envelhecimento dos ativos, surgiu um desafio relevante: a gestão da vida útil dos supercapacitores, componentes estratégicos para a continuidade operacional da frota.

O Projeto Coulomb foi concebido como uma solução inovadora para enfrentar esse desafio, propondo uma abordagem baseada em engenharia aplicada, diagnóstico avançado e manutenção por condição, com foco em eficiência operacional, sustentabilidade e otimização de custos.



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

2. DIAGNÓSTICO

A frota do VLT Carioca, composta por 32 trens, atingiu mais de 10 anos de operação, ultrapassando a vida útil projetada dos supercapacitores, originalmente estimada em 8,5 anos.

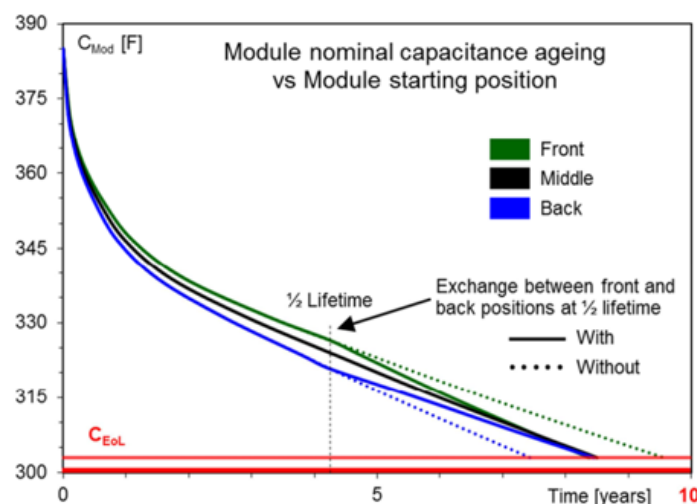


Figura 3 - Curva de vida dos Supercapacitores

Embora o fabricante do Material Rodante sugira vida útil estimada em 8,5 anos, a vida real é determinada a partir da degradação dos parâmetros elétricos dos módulos de Supercapacitores, por sua vez indicada por grandezas elétricas: Capacitância e ESR (Resistência Serial Equivalente), onde os limites de fim de vida são: 80% da Capacitância Nominal do módulo e/ou 200% da ESR nominal do módulo.

Como agravante, os componentes foram descontinuados pelo fabricante, inviabilizando a reposição direta, e não havia no mercado nacional ferramentas capazes de avaliar a vida útil remanescente desses dispositivos.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Diante desse cenário, identificou-se os seguintes riscos:

- Redução da disponibilidade da frota;
- Impactos diretos na oferta de transporte à população;
- Aumento de falhas e impacto operacional;
- Elevação de custos com substituição integral de sistemas;
- Geração de resíduos industriais de alta complexidade ambiental.

O diagnóstico evidenciou a necessidade de uma solução alternativa, baseada em inovação tecnológica e autonomia técnica, capaz de avaliar a condição real dos equipamentos, substituindo a estratégia de manutenção com troca obrigatória em base tempo por uma estratégia de troca sob condição, a partir da medição dos parâmetros elétricos dos módulos de Supercapacitores.

3. METODOLOGIA

Cada trem do VLT Carioca é equipado com um sistema de armazenamento de energia embarcado (*OESS – Onboard Energy Storage System*) composto por 12 módulos de supercapacitores, organizados em 2 bandas de 6 módulos conectados em série. Cada módulo, de 65 V e 385 F, é constituído por 24 células de 9.250 F associadas em série, dotadas de circuitos de balanceamento ativo e passivo em nível de célula.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

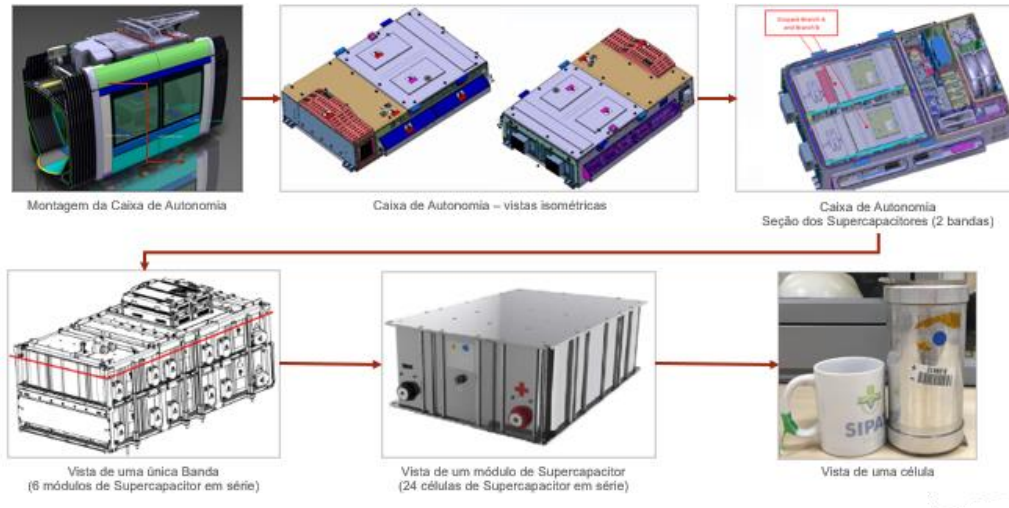


Figura 4 - Breakdown da Caixa de Autonomia

Após cerca de 10 anos de operação, observou-se um modo de falha característico: módulos de uma mesma banda passaram a apresentar níveis distintos de degradação, com aumento da resistência série equivalente (ESR) e redução da capacitância em proporções diferentes. Em uma associação em série, a mesma carga elétrica (Q) circula por todos os módulos; como $V = Q/C$, o módulo de menor capacitância assume tensão proporcionalmente maior — mecanismo autoagravante, pois a sobretensão acelera o envelhecimento justamente do módulo mais degradado. A referência à carga elétrica deu nome ao projeto, em homenagem à unidade *coulomb*.

Em operação, esse desbalanceamento gerava diferenças de tensão de até 5 V entre módulos durante o carregamento, levando o sistema de controle do trem a isolar a



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

banda por proteção, com impacto direto na disponibilidade da frota e no desempenho do ativo em operação comercial.

Como referência técnica, adotou-se o critério de fim de vida definido pelo fabricante do módulo de supercapacitor: capacitância inferior a 80% do valor nominal ou ESR superior a 200% do valor nominal. A metodologia consiste em reagrupar os módulos com base na vida remanescente, determinada pela capacitância medida de cada módulo e classificada em “famílias” percentuais do valor nominal: 95%, 90%, 85% e 80%.

O procedimento é executado – periodicamente - nas seguintes etapas:

- Desmontagem das duas bandas de supercapacitores do teto do trem (12 módulos);
- Ensaio individual em laboratório, com equipamento adquirido para este fim – Testador de Supercapacitores - e dedicado a aplicação de ciclos de carga e descarga, possibilitando medição e cálculo automático da capacitância real e da ESR de cada módulo;



Figura 5 - Testador de Módulos de Supercapacitores



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

- Classificação dos módulos em famílias de capacitância (95% a 80% do nominal) e destinação controlada dos módulos abaixo do critério de fim de vida;
- Remontagem de novos conjuntos de 12 módulos de mesma família e reinstalação das bandas em outro trem, reiniciando o ciclo.

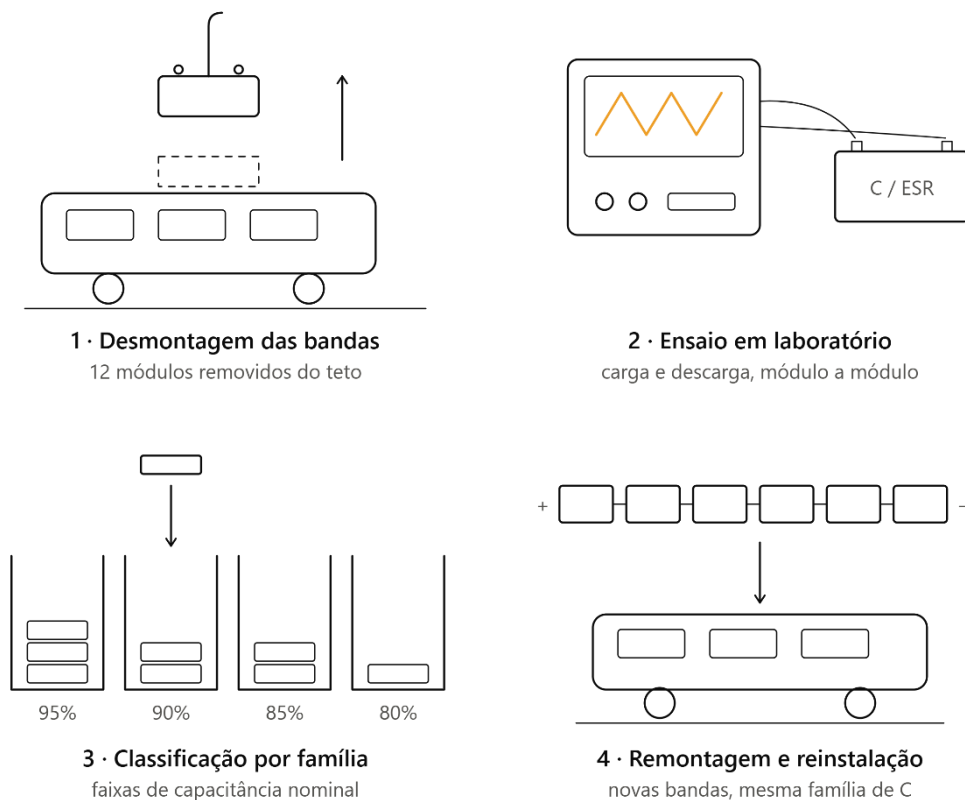


Figura 6 - Resumo do Projeto Coulomb – Sequência de atividades

O reagrupamento por família equaliza a distribuição de tensão ao longo da banda, elimina os isolamentos por desbalanceamento e permite ampliar, de forma segura e monitorada, a vida útil remanescente de cada módulo.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A partir da implementação do Projeto Coulomb, foram obtidos os seguintes resultados:

1. Resultados operacionais e técnicos

- a. 360 módulos de supercapacitores testados em 45 dias;
- b. Diagnóstico técnico individualizado dos módulos;
- c. Identificação de 63 módulos inaptos para operação;
- d. Reaproveitamento de 84 módulos, reagrupados e reinstalados;
- e. Recuperação funcional de 7 trens da frota;
- f. Formação de estoque técnico com os demais módulos aptos, já classificados por família de capacitância para as próximas remontagens.

2. Resultados econômicos

- a. Postergação de investimento estimada em **R\$ 15,4 milhões**;
- b. Otimização do ciclo de vida dos ativos;
- c. Redução da necessidade de CAPEX imediato;
- d. Melhoria de desempenho e mitigação de falhas com impacto operacional.

3. Resultados estratégicos

- a. Implementação de manutenção baseada em condição (CBM);
- b. Introdução de tecnologia inédita no setor ferroviário brasileiro;
- c. Aumento da autonomia técnica da equipe de engenharia.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

4. Resultados ambientais

- a. Redução significativa na geração de resíduos industriais;
- b. Destinação adequada apenas de módulos efetivamente inservíveis;
- c. Alinhamento com práticas de sustentabilidade e economia circular.

5. CONCLUSÕES

O Projeto Coulomb demonstrou que desafios relacionados à obsolescência tecnológica podem ser transformados em oportunidades de inovação no setor metroferroviário.

A adoção de uma abordagem baseada em diagnóstico técnico e manutenção por condição permitiu não apenas garantir a continuidade operacional da frota do VLT Carioca, mas também gerar benefícios expressivos em termos econômicos, ambientais e operacionais.

A solução implementada estabelece um novo paradigma na gestão de ativos críticos, reduzindo a dependência de fornecedores e ampliando a capacidade interna de engenharia e de manutenção.

Além de seus resultados diretos, o projeto apresenta potencial de replicabilidade em outros sistemas ferroviários, especialmente em Material Rodante com *OESS* equipado por Supercapacitores, consolidando-se como uma referência em inovação aplicada à mobilidade urbana.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

O Projeto Coulomb evidencia que a engenharia, aliada à inovação, é capaz de prolongar a vida útil de ativos estratégicos, gerar valor e assegurar a sustentabilidade dos sistemas de transporte.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BLUE SOLUTIONS. Módulo Supercapacitor M65V385F-T-MnT – Manual de Instalação e do Usuário (D2-01-NU). Quimper, França, 2014.
- ALSTOM TRANSPORT. Manual de manutenção do sistema ECOPACK2 – Anexo 5: Recomendações de manutenção do módulo M65V385F-T-MnT (AY00000301160 – 1590MI, D2-02-NU).
- Dados operacionais e relatórios internos de engenharia – VLT Carioca.
- Normas e diretrizes de gestão de ativos (ISO 55000).