

Aplicação de Baterias de Íons de LiFePO₄ em Sistemas Fotovoltaicos Isolados para Sinalização Ferroviária

Rafael M. Carvalho^{1*}, Sérgio C. de A. Rossignoli²

¹Departamento do Centro de Inteligência da Manutenção RUMO, Av. Maria Antonia Camargo de Oliveira, s/n, 14801-260, Araraquara-SP

²RSBC Consultoria Ltda, Rua Santo Antonio, 1495, Apto 902, 36016-211, Juiz de Fora-MG

E-mail: ¹rafael.m.carvalho@rumolog.com, ²sergirossignoli@rsbc.com.br

Resumo: A sinalização ferroviária é composta por sistemas eletroeletrônicos e representa o conjunto de equipamentos, meios, métodos e procedimentos que se propõe a garantir a circulação de trens com segurança, rapidez, regularidade e economia. Para isto, o sistema deve: garantir a segurança na circulação de trens (permitindo o aumento de velocidade das composições), eliminar ou reduzir procedimentos operacionais baseados unicamente em atuações humanas, aumentar a confiabilidade do transporte ferroviário como um todo, melhorar o planejamento da circulação e reduzir custos da operação. Vista a importância destes ativos, garantir a confiabilidade dos mesmos resulta em uma ampliação direta da capacidade produtiva da ferrovia. Analisando este impacto constatou-se que falhas de baterias constituem o gargalo da confiabilidade dos ativos em nossa operação, representando ~30% das paradas de trens em nossos sistemas de sinalização. Para buscar solucionar esta questão, propôs-se o estudo da aplicação de baterias de íons de LiFePO₄ em sistemas fotovoltaicos. Esta tecnologia tem sido amplamente utilizada em veículos elétricos, condição que se assemelha à aplicação em questão devido ao alto número de ciclos ao qual a bateria é submetida e à alta profundidade de descarga que pode ocorrer em determinados momentos. O objetivo deste artigo é demonstrar a viabilidade de aplicação desta tecnologia, ainda não utilizada no setor ferroviário, em sistemas onde não é possível a utilização de alimentação através da concessionária e torna-se necessária a geração local da energia a ser consumida pelo ativo.

Palavras-Chaves: Sinalização Ferroviária; Sistemas Fotovoltaicos Isolados; Baterias; LiFePO₄.

1. INTRODUÇÃO

A sinalização ferroviária é composta por sistemas eletroeletrônicos e representa o conjunto de equipamentos, meios, métodos e procedimentos que se propõe a garantir a circulação de trens com segurança, rapidez, regularidade e economia. Dentre estes sistemas eletroeletrônicos pode-se citar por exemplo: a própria sinalização (leds e estrutura semafórica em campo), sistema de intertravamento (sendo composto por lógicas que podem tanto ser embarcadas em CLPs, ou ainda baseadas em relés de diferentes modelos, proporcionando ou não uma vitalidade ao sistema, ou até, em sistemas mais modernos, esse intertravamento pode ocorrer de forma remota através de sensoriamento e comunicação a distância das composições e chaves em campo), sistemas de sensoriamento em campo (caso por

exemplo dos circuitos de via – CDVs – utilizados para detecção de trens em campo), além das máquinas de chave, que são as responsáveis pelo posicionamento dos AMVs (aparelhos de mudança de via) em campo. Desta forma percebe-se a complexidade intrínseca no assunto quando se aborda a sinalização ferroviária, porém também percebe-se a capacidade que estes sistemas têm de viabilizar a circulação segura e eficiente de trens, garantindo a segurança (eliminando ou reduzindo ao máximo procedimentos operacionais baseados unicamente em atuações humanas, que por si só podem inserir falhas no processo), aumentando a confiabilidade do transporte ferroviário como um todo (reduzindo as falhas e perdas do processo), permitindo o aumento de velocidade dos trens (a partir da redução no risco de acidentes), melhorando o processo de

planejamento da circulação e reduzindo custos da operação.

Desta forma percebe-se a importância destes ativos e garantir a confiabilidade dos mesmos torna-se uma tarefa importante na rotina das áreas de manutenção. Esta confiabilidade pode levar a uma ampliação direta da capacidade produtiva da ferrovia. Dentro desta abordagem, buscando iniciativas para se ampliar a confiabilidade dos ativos de sinalização ferroviária na Operação Norte da Rumo, notou-se o grande impacto das falhas relacionadas às baterias atualmente utilizadas em nossos sistemas fotovoltaicos isolados. Hoje, este tipo de falha representa em torno de 30% das paradas de trens em nossos sistemas de sinalização (dados de 2020). Esta condição será melhor abordada no item 3.1 deste artigo, porém tendo este impacto em vista buscou-se alternativas à tecnologia que é utilizada atualmente.

Dentro deste contexto este artigo propõe demonstrar a viabilidade de aplicação das baterias de LiFePO₄ (que serão melhores detalhadas na seção 3.1.3 deste artigo), ainda não utilizadas no setor ferroviário, confrontando esta nova tecnologia com a atualmente utilizada na Operação Norte da Rumo que são, quase exclusivamente, baterias de chumbo-ácido e também com outra tecnologia que é difundida dentro do mercado metroferroviário que são as baterias alcalinas de NiCd.

Ao final da pesquisa, o artigo demonstra um estudo técnico e econômico sobre a utilização das Baterias de LiFePO₄ em aplicações do setor ferroviário em sistemas de geração fotovoltaica em detrimento das baterias de chumbo-ácido e alcalinas (Ni-Cd), mais comumente utilizadas.

2. METODOLOGIA

A abordagem deste trabalho será realizada através de uma pesquisa de natureza teórica, exploratória e explicativa quanto aos objetivos, e bibliográfica quanto aos procedimentos técnicos. As técnicas de análise de dados serão qualitativas e quantitativas.

Esta pesquisa, como já dito anteriormente, tem por objetivo a realização de um estudo técnico e econômico sobre a utilização das Baterias de LiFePO₄ em aplicações do setor ferroviário em sistemas isolados de geração fotovoltaica. Sendo assim, será realizado o levantamento de

pesquisas realizadas na área além de uma análise comparativa utilizando-se de dados obtidos em estudos internos realizados pela área de engenharia de manutenção da Rumo. Com esta visão, serão apresentadas algumas vantagens e desvantagens tanto técnicas como econômicas da utilização de baterias de LiFePO₄ em detrimento da utilização de baterias chumbo-ácido (mais utilizadas nos ativos da Operação Norte da Rumo atualmente) e alcalinas de NiCd (que possuem utilização mais difundida em sistemas de sinalização metroferroviários).

Por fim, será realizada uma avaliação do estudo como um todo, com a finalidade de mostrar para o leitor os principais cenários nos quais a utilização de baterias de LiFePO₄ mostra-se mais vantajosa em detrimento das demais tecnologias abordadas.

3. DESENVOLVIMENTO

3.1. Modelos de Baterias

Para o estudo proposto neste artigo serão trabalhados 3 tipos diferentes de baterias aplicadas aos sistemas de sinalização ferroviária, serão eles: Baterias Chumbo-Ácido, Baterias Alcalinas (NiCd) e as baterias que intitulam este trabalho que são as Baterias de LiFePO₄. A seguir, serão exploradas as características de cada um destes 3 tipos de baterias que farão parte do estudo.

3.1.1. Baterias Chumbo-Ácido

As baterias de chumbo-ácido foram inventadas em 1860 pelo francês Gastón Planté e sofreu poucas alterações em seu padrão construtivo desde que seu uso se difundiu no início do século XX, sendo constituída, basicamente, por placas de chumbo (Pb) imersas em ácido sulfúrico (H₂SO₄) [1].

Em baterias recarregáveis o processo de carga e descarga da mesma afeta diretamente em seu desempenho. No caso das baterias de chumbo-ácido o processo de carga e descarga pode ser repetido algumas centenas de vezes, sendo esse número variável de acordo com a profundidade de descarga a qual a bateria é submetida. A profundidade de descarga representa o quanto a bateria é descarregada antes que seja novamente recarregada. Para as baterias de chumbo-ácido quanto maior a profundidade de descarga a qual ela é

submetida, menor se torna o número de ciclos de carga e descarga os quais esta bateria irá suportar [1], conforme mostrado na Fig. 1.

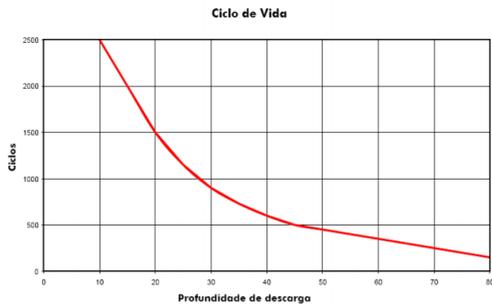


Fig. 1 Número de ciclos de carga das baterias chumbo-ácido x profundidade de descarga [4]

Outra condição que afeta diretamente na vida útil de baterias chumbo-ácido, é a temperatura de trabalho das mesmas. Esta é a situação de trabalho mais danosa para a vida útil deste tipo de baterias, quanto maior a temperatura sob a qual a bateria opera menor será a vida útil da bateria chumbo-ácido, conforme mostrado na Fig. 2.

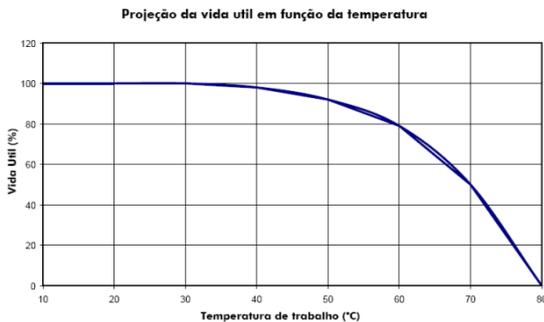


Fig. 2 Vida útil x temperatura de trabalho [4]

Hoje na Operação Norte da Rumo, a maioria dos sistemas de sinalização ferroviária implantados utilizam as baterias chumbo-ácido estacionárias da linha Freedom da fabricante Heliar (Fig. 3), instaladas em caixas de locação expostas a luz solar constante, o que resulta em temperaturas de trabalho acima dos 60 °C, principalmente no período do verão, o que acaba prejudicando muito a vida útil das mesmas.



Fig. 3 Bateria selada DF2500 Freedom Heliar

Desta forma, justifica-se o alto índice de falhas identificado nos nossos sistemas de sinalização devido a falhas das baterias chumbo-ácido, uma vez que a temperatura de trabalho a qual elas são submetidas em campo reduz a vida útil das mesmas levando a falhas mais frequentes nos sistemas de sinalização.

3.1.2. Baterias Alcalinas (NiCd)

As baterias de níquel-cádmio (NiCd) são as mais populares baterias alcalinas do mercado e estão disponíveis em vários modelos de células e em uma ampla gama de tamanhos. Este tipo de baterias têm como grande trunfo de mercado seus longos períodos de vida útil, além da baixa exigência de manutenção, guardada a exceção da reposição periódica de eletrólito. Este tipo de bateria é amplamente aplicado em sistemas de sinalização metroferroviária sendo também usado em outras aplicações industriais pesadas, como caminhões, veículos de mineração, energia de emergência e etc [2].

A vida útil projetada para as baterias de NiCd consideradas neste estudo, fornecida pelo fabricante SAFT, é de 20 anos a 25°C (5x a mais que a vida útil projetada para uma bateria de chumbo-ácido nessas mesmas condições) [7]. Assumindo-se a condição mais crítica (temperaturas acima dos 40°C) a redução na vida útil das baterias de NiCd passa a ser cerca de 30% menor, o que resultaria em uma vida útil de aproximadamente 14 anos [6], enquanto nas baterias de chumbo-ácido esta estimativa já cai para valores em torno de 3 anos [4]. Na fig. 4 temos estes dados conforme fornecidos pelo fabricante.

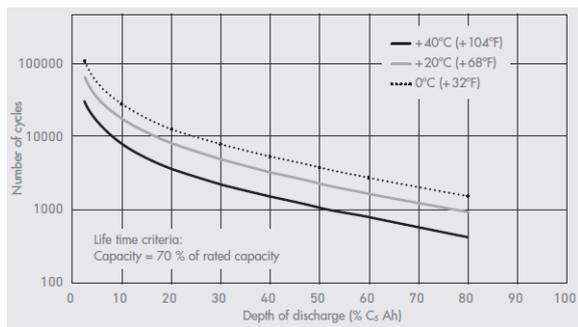


Fig. 4 Valores típicos de ciclo de vida para baterias de NiCd para diferentes temperaturas [6]

Desta forma, olhando-se apenas aspectos técnicos e de vida útil do equipamento, as baterias de NiCd se demonstram mais vantajosas que as baterias de chumbo-ácido, porém o custo para aquisição dessas baterias acaba inviabilizando a substituição em alguns casos. Enquanto a aquisição de uma bateria de chumbo-ácido de 60 Ah custa em média cerca de R\$ 330,00, a aquisição de uma bateria alcalina de NiCd de mesma capacidade custaria em torno de R\$ 4.500,00 (13x a mais que o custo estimado para uma bateria de chumbo-ácido).

3.1.3. Baterias de LiFePO4

Desta forma, para buscar solucionar esta questão, buscou-se alternativas no mercado a essas duas tecnologias que já possuem utilização mais difundida. Neste contexto é que se propõe o estudo da utilização de baterias de íons de LiFePO₄ em sistemas fotovoltaicos isolados aplicados à sistemas de sinalização ferroviária. Esta tecnologia tem sido amplamente utilizada em veículos elétricos, condição que se assemelha à aplicação em questão devido ao alto número de ciclos ao qual a bateria é submetida e à alta profundidade de descarga que pode ocorrer em determinados momentos.

As baterias de lítio foram criadas inicialmente por Gilbert Newton Lewis em 1912, porém apenas na década de 70 ela passou a ser utilizada em aplicações militares bem específicas. A utilização em maior escala era inviável devido a instabilidade do lítio metálico presente nessas baterias principalmente na fase de carregamento. Nesse contexto a segurança dessas baterias se tornava o principal empecilho para a sua utilização, levando assim ao desenvolvimento de aplicações utilizando baterias não-metálicas de

lítio, ou seja, utilizando íons de lítio, que foi comercializada pela Sony pela primeira vez em 1991 [2].

Por ser a tecnologia mais recente dentre as desenvolvidas no mercado de baterias, as baterias de íons de lítio ainda encontram-se em franco desenvolvimento. Assim, houve uma redução significativas de custo para estas baterias, que anteriormente eram utilizadas apenas em dispositivos móveis como celulares, tablets e computadores, possibilitando a utilização em alguns veículos elétricos / híbridos e também em aplicações como baterias estacionárias em sistemas fotovoltaicos residenciais, principalmente pelo aumento em sua densidade energética e também na sua vida útil [2].

A proposta desse artigo é a análise comparativa de baterias que utilizam fosfato de ferro-lítio (LiFePO₄) como material catódico da bateria. Este tipo de bateria foi descoberta na Universidade do Texas em 1996 por John B. Goodenough (em conjunto com outros pesquisadores) e é um dos tipos de baterias de íon-lítio com maior potencial de aplicação, por possuírem as melhores características de segurança combinadas com a longa vida útil, sendo ainda a mais adequada para aplicações com alta taxa de descarga, como é o caso dos sistemas de sinalização ferroviária, assim como de outras aplicações como demandas militares, veículos elétricos, ferramentas elétricas, dentre outras. A utilização de material natural à base de fosfato (com disponibilidade substancial) proporciona um combinação de desempenho, segurança, custo, confiabilidade e características ambientais que torna este o tipo de bateria de íon-lítio mais promissor do mercado [2].



Fig. 5 Exemplo de banco de baterias de LiFePO₄ da fabricante Dyness

Em testes realizados pelo fabricante, a bateria de LiFePO₄ atingiu um número de 3.121 ciclos

de recarga sustentando uma capacidade de armazenamento de carga de cerca de 88% (fig. 6). Este valor representa uma vida útil, para aplicações similares a abordada, de mais de 8 anos, praticamente o dobro do que consegue-se atingir com as baterias de chumbo-ácido.

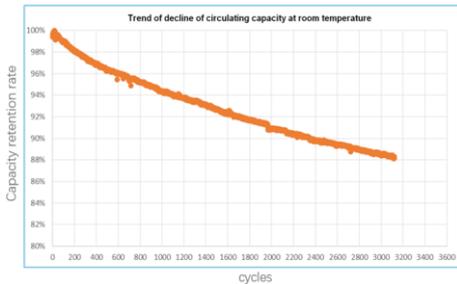


Fig. 6 Teste nº ciclos - bateria LiFePO4 Dyness [3]

3.2. Impacto das Falhas de Bateria em Sistemas de Sinalização Ferroviária

Dentro de todo este contexto é importante se explorar o tipo de sistema de sinalização a ser abordado neste artigo.

Na Operação Norte da Rumo, a maior parte dos ativos de sinalização são utilizados para sinalizar o que é chamado de AMV (Aparelho de Mudança de Via) com Chave de Mola. Que nada mais é que um AMV, inicialmente manual, equipado com um pistão hidráulico juntamente de uma mola (fig. 7A) sendo capaz de se deslocar na passagem do trem transpondo a chave no sentido contrário e retornar à posição de repouso após a passagem do mesmo.



Fig. 7 Pistão AMV com chave de mola

A posição da chave é monitorada através de um dispositivo de contato mecânico denominado controlador de circuito (fig. 7B), que envia para o sinal a informação da posição da agulha do AMV garantindo a segurança para que os trens que se aproximam do AMV possam transpô-lo sem risco de descarrilamento.

Para o funcionamento de todo esse sistema, a alimentação é realizada através de um sistema de geração fotovoltaica isolado (sem conexão com a rede de energia da concessionária) composto pelo painel fotovoltaico, controlador de carga e bateria, conectados aos leds da sinalização e controlados através do sinal proveniente do controlador de circuito (fig. 8).

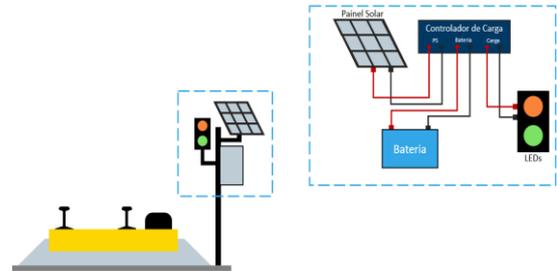


Fig. 8 Ilustração sinalização AMV c/ chave mola [5]



Fig. 9 Sinalização de AMV com chave mola Rumo

Analisando o impacto das falhas nestes ativos à circulação de trens constatou-se que, em 2020, 45% das paradas (521 de um total de 1169) com causa relacionada à TO (Tecnologia Operacional) ocorreram nestes ativos (fig. 10).

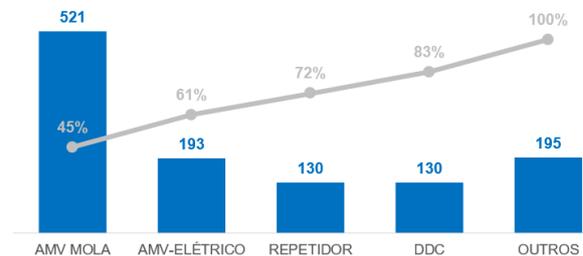


Fig. 10 Total de paradas de trens com causa TO por tipo de ativo em 2020

Dentre estas paradas, em AMV com chave de mola, as falhas provocadas por descarga das baterias representam 32% do total das paradas (168 do total de 521) (fig. 11).

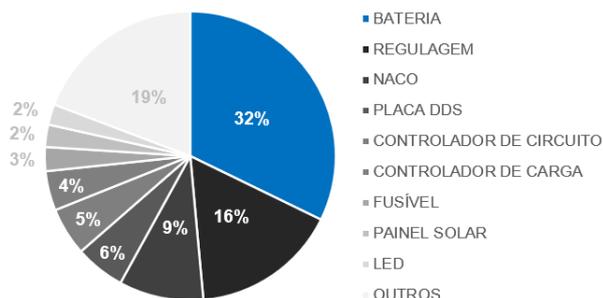


Fig. 11 Total de paradas de trens em AMV com chave de mola relacionadas à TO por causa em 2020

Neste sentido sedimenta-se a necessidade de avaliação de novas tecnologias para utilização nesses sistemas.

3.3. Análise técnico-econômica

3.3.1. Fatores Técnicos

Do ponto de vista técnico, a tabela 1 resume bem a comparação entre os três tipos de baterias abordados nesse artigo.

Tabela 1. Características dos tipos de baterias utilizados no estudo [1]

	Pb - ácido	NiCd	Li - ion
Segurança	Boa	Boa	Boa
Impacto Ambiental	Alto	Alto	Médio
Ciclos	1.500	7.200	3.121
Densidade de Energia	35 Wh/Kg	41 Wh/Kg	120 Wh/Kg
Densidade de Energia Vol.	80 Wh/m ²	120 Wh/m ²	280 Wh/m ²
Auto descarga	< 5% a.m.	< 10% a.m.	< 5% a.m.
Efeito Memória	Não	Sim	Não
Temperatura de Operação	Máx. 40°C	Máx. 50°C	Máx. 60°C
Peso	Alto	Médio	Baixo
Tempo de carga	Longo	Médio	Curto

O nível de segurança apresentado por todos os modelos é satisfatório, não levando riscos pessoais aos mantenedores. A bateria de chumbo-ácido se iguala à de Li-íon nos parâmetros de Auto Descarga e Efeito Memória, porém é tecnicamente pior em todos os outros aspectos. Quanto ao efeito memória, segundo [1], as baterias de NiCd apresentam

esse efeito, porém segundo o fabricante, as baterias fabricadas atualmente não têm este tipo de comportamento [6].

Já a bateria de NiCd apresenta vantagem com relação às demais no aspecto do número de ciclos de carga suportados durante sua vida útil. Porém o impacto ambiental possível no manuseio, descarte, ou até mesmo na reposição de eletrólito é um fator prejudicial à essa tecnologia. As baterias de chumbo-ácido também apresentam risco ambiental caso descartadas incorretamente, porém como sua utilização é mais difundida no mercado, a maior oferta de locais, ou até empresas, específicos para realização desse descarte facilita a logística.

Em todos os demais aspectos técnicos as baterias de Li-íon apresentam vantagens. Vale destacar a vantagem no fator da densidade de energia (tanto pela massa como volumétrica). Este fator faz com que as baterias de Li-íon sejam mais compactas (volume 46,2% menor, em relação às baterias de NiCd) e mais leves (o peso total do banco é 81% menor, também em relação às baterias de NiCd) que os dois outros modelos considerando uma mesma capacidade. Isto facilita o manuseio na manutenção e transporte das mesmas, facilitando diretamente no dia-a-dia das equipes de manutenção. Além disso, a maior resistência ao trabalho em altas temperaturas também é uma vantagem técnica observando-se as condições de trabalho encontradas nos ativos de sinalização abordados neste estudo.

Do ponto de vista da manutenibilidade, as baterias de LiFePO₄ demandam apenas um teste de capacidade a cada 4 anos, enquanto as baterias de chumbo-ácido, nas condições em que estão aplicadas nos ativos da Operação Norte da Rumo têm gerado em média uma troca de bateria por ano. Por fim, as baterias de NiCd, exigem uma reposição periódica de eletrólito, aproximadamente a cada 6 meses. Desta forma, percebe-se que as baterias de LiFePO₄ ainda poupam a necessidade de manutenção para as equipes.

3.3.2. Fatores Econômicos

Para a análise do aspecto econômico foram assumidos alguns fatores como base para o estudo. Conforme mostrado na tabela 2, assumiu-se os valores de homem-hora (h.h.), parque de ativos e cotações respectivas do

Euro e do Dólar. Assumiu-se também os seguintes modelos de baterias: bateria de chumbo-ácido Freedom de 150 Ah, bateria alcalina de NiCd SAFT também de 150 Ah e a bateria de LiFePO4 da fabricante Dyness de 200 Ah. Todas em bancos de aproximadamente 12V.

Tabela 2 Valores assumidos para o estudo

Valor do h.h.	R\$ 20,25
Parque Total de Ativos	375
Cotação do Euro	R\$ 6,03
Cotação do Dólar	R\$ 5,11

Dentro dos custos para manutenção do sistema (Opex) também assumiu-se algumas premissas. No aspecto das corretivas considerou-se a taxa de falhas para as baterias alcalinas e de LiFePO4 fornecidas pelos fabricantes que foi de 1%. Assumiu-se também a premissa de redução no número de falhas no sistema (80%) e ainda considerou-se o custo inerente da recarga das baterias que eventualmente falhassem (uma vez que, diferente das baterias de chumbo-ácido, as baterias alcalinas e de Li-íon não perdem sua capacidade de armazenamento após uma descarga profunda). Os demais dados utilizados no cálculo foram conforme a realidade encontrada hoje em nossa operação. Já no aspecto dos custos inerentes a casos de vandalismo, assumiu-se uma premissa de redução substancial no número de casos de vandalismo (90%) uma vez que as baterias alcalinas e as baterias de Li-íon tem menor atratividade para furto devido terem menor facilidade de mercado comparadas às de chumbo-ácido. Em benchmark com outra ferrovia, levantou-se que os casos de vandalismo em baterias alcalinas foram nulos nos últimos 3 anos de operação. Por fim no aspecto de preventivas levou-se em conta os ciclos mencionados anteriormente na seção 3.3.1 deste artigo.

Com estas premissas chegou-se aos resultados apresentados na tabela 3 para a redução de custos de manutenção (Opex).

Tabela 3 Comparação econômica entre os modelos de baterias

Opex	Chumbo-Ácido	Alcalina (NiCd)	LiFePO4
Custo Total de Corretivas (a.a) (R\$)	R\$ 40.245,98	R\$ 5.856,95	R\$ 4.651,36
Custo total para Reparo de Vandalismos (R\$)	R\$ 392.407,34	R\$ 122.798,32	R\$ 76.412,04
Custo Total de Preventivas (a.a) (R\$)	R\$ 131.845,35	R\$ 26.737,50	R\$ 19.237,50
Custo Total de Manutenção (a.a) (R\$)	R\$ 564.498,67	R\$ 155.392,78	R\$ 100.300,91
Redução de Custo de Manutenção a.a. (R\$)	R\$ -	-R\$ 409.105,89	-R\$ 464.197,76
	Diferença % NiCd	Diferença % LiFePO4	
Custo Total de Corretivas (a.a) (R\$)	-85%	-88%	
Custo total para Reparo de Vandalismos (R\$)	-69%	-81%	
Custo Total de Preventivas (a.a) (R\$)	-80%	-85%	
Custo Total de Manutenção (a.a) (R\$)	-72%	-82%	

Dentro desses resultados é possível observar uma redução percentual significativa em todos os parâmetros utilizados no cálculo do custo de manutenção, totalizando no geral uma redução anual de 72% com as baterias de NiCd e 82% considerando a utilização das baterias de LiFePO4.

Os resultados comparativos demonstram as vantagens econômicas da aplicação de ambos os modelos de baterias (NiCd e LiFePO4) analisando no contexto anual. Porém o investimento para substituição do parque atual de ativos é considerável e também deve ser levado em conta. Para o cálculo desse investimento foi considerada apenas a aquisição das baterias, sem levar em conta a adequação da infraestrutura dos sistemas de sinalização.

Tabela 4 Investimento total para substituição do parque de baterias por modelos de NiCd e LiFePO4

Capex	Alcalina (NiCd)	LiFePO4
Custo TOTAL de Implantação (R\$)	R\$ 4.509.271,69	R\$ 1.610.129,06

Este investimento vai retornar ano a ano como economia no orçamento de manutenção, conforme mostrado na tabela 3. Porém para cada tipo de bateria, o prazo para este retorno será diferente conforme a vida útil (14 anos para NiCd e 8 anos para LiFePO4). Sendo assim, pode-se calcular os indicadores de retorno econômico (VPL, TIR, ROI e Payback) para cada um dos cenários, os resultados desses indicadores estão apresentados na tabela 5. Para o cálculo desses indicadores foi considerada uma taxa de retorno de 4,15% a.a. (100% do CDI em 15/07/2021).

Tabela 5 Indicadores de retorno econômicos referente aos cenários de investimento para substituição do parque de baterias

	VPL	TIR	ROI	Payback
Bateria NiCd	-R\$ 230.316,86	3,36%	0,95	-
Bateria LiFePO4	R\$ 1.495.928,63	23,50%	1,93	3 anos e 10 meses

Esse indicador demonstra a viabilidade da substituição pelos bancos de Bateria LiFePO4. Apresentando um valor presente líquido (VPL) de R\$ 1.495.928,63, indicando que o projeto se “paga” com o retorno e ainda gera um saldo que poderia ser investido em outras frentes da manutenção. Além disso ainda tem-se uma taxa interna de retorno (TIR) de 23,5%, que indica a taxa de retorno máxima a ser assumida para que o projeto ainda apresente um VPL positivo, e um retorno sobre

investimento (ROI) de 1,93, que indica que cada R\$1 investido retorna para a empresa R\$1,93, e por fim um tempo de retorno (payback) do investimento de 3 anos e 10 meses.

Percebe-se que o retorno financeiro no cenário para a bateria alcalina de NiCd não é satisfatório (ROI de 0,95). Para que o investimento se pague, neste contexto, a taxa de retorno deveria ser de no máximo 3,36% (0,79% abaixo do utilizado).

Aprofundando a análise é possível verificar que para se viabilizar a utilização das baterias de NiCd é necessário que se zere os casos de vandalismo de baterias (um cenário ainda mais ousado que o apresentado). Neste novo cenário os indicadores de retorno econômico ficariam conforme tabela 6.

Tabela 6 Indicadores de retorno econômicos referente ao cenário com **zero** casos de vandalismo para as baterias de NiCd

	VPL	TIR	ROI	Payback
Bateria NiCd	R\$ 1.054.065,69	7,52%	1,23	10 anos e 9 meses

Este cenário viabilizaria a utilização das baterias de NiCd, porém os 4 indicadores apresentam índices inferiores aos apresentados no cenário observado para as baterias de LiFePO4 (mesmo considerando os vandalismos).

4. CONCLUSÕES

Apresentados todos esses resultados, para os diferentes cenários, percebe-se a viabilidade tanto técnica como econômica para a utilização das baterias de LiFePO4. Os resultados desta utilização tendem a trazer vantagens no desempenho dos equipamentos que se desdobrariam em resultados positivos em redução de impactos à circulação de trens. Além disso o resultado também se desdobra em vantagens financeiras na manutenção que viabilizam o investimento inicial dada a vida útil ampliada destes modelos de baterias.

Para as baterias de NiCd, a substituição também traz benefícios econômicos, porém para que estes benefícios viabilizem o projeto os casos de vandalismo devem ser zerados, premissa que acaba sendo muito ousada observando a condição de operação apresentada.

Para trabalhos futuros, é importante que essa avaliação seja realizada por meio da aquisição de uma amostra de baterias para teste, e

validação da redução de falhas e vandalismos que são assumidas como premissas neste trabalho.

5. AGRADECIMENTOS

Importante agradecer ao time de engenharia de manutenção de TO da Rumo, em nome do Leonardo Roque, pelo apoio nas análises técnicas e levantamento dos dados da manutenção, aos representantes das fabricantes SAFT e Dyness, nas pessoas do André Migliani e do Allen Lei respectivamente, e por fim, ao co-autor Sergio Rossignoli pelo apoio na concepção da ideia central do trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Bastos, R. F., Sistema de Gerenciamento para Carga e Descarga de Baterias (Chumbo-Ácido) e para Busca do Ponto de Máxima Potência Gerada em Painéis Fotovoltaicos Empregados em Sistemas de Geração Distribuída, EESC/USP, janeiro (2013), pág. 7-16.
- [2] Brasil, C. F., Análise Técnico-Econômica e de Eficiência dos principais tipos de Baterias utilizadas em Sistemas Fotovoltaicos Isolados, Escola Superior de Tecnologia – Universidade do Estado do Amazonas, junho (2018), pág. 40-76
- [3] Dyness, Battery performance and safety test report, Dezembro 2019
- [4] FREEDOM, Manual Técnico Bateria estacionária, www.neosolar.com.br/media/pdf/manuais/Freedom_Baterias_Estacionarias_manual_tecnico_pt.pdf, Julho 2008
- [5] Roque, L. G. dos S., Redução de falhas causa inoperância por falta de alimentação de energia nos ativos da T.O. – Tecnologia Operacional, Eng. TO Rumo, novembro (2020)
- [6] SAFT, Sunica.Plus Technical Manual, Abril 2014
- [7] SAFT, Workshop Rumo 2019, Dezembro 2019