

ANÁLISE DO POTENCIAL DE REGENERAÇÃO DE ENERGIA PELO FREIO DINÂMICO EM LOCOMOTIVAS DIESEL-ELÉTRICAS

Daniel Champoski^{1,2}, Vinicius dos Santos Sanches³, Milton Evangelista de Oliveira Filho¹, Antônio de Assis Brito Neto¹

¹Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Centro Tecnológico de Joinville, Joinville, Brasil (e-mail do autor principal: dan.champoski@gmail.com)

²Universidade de Caxias do Sul (UCS), Caxias do Sul, Brasil

³Rumo Logística, Curitiba, Brasil

Resumo: A redução do consumo de combustíveis fósseis e dos custos operacionais no transporte ferroviário motiva a busca por soluções de eficiência energética aplicáveis a locomotivas diesel-elétricas. Este trabalho avalia o potencial de aproveitamento da energia gerada durante a frenagem dinâmica, usualmente dissipada, por meio de sua regeneração e armazenamento. Utilizaram-se dados de registrador de eventos de nove locomotivas Wabtec AC44i operando no corredor Rondonópolis–MT–Santos–SP.

Palavras-chave: locomotiva diesel-elétrica; frenagem dinâmica; regeneração de energia; armazenamento de energia; baterias.

INTRODUÇÃO

O setor de transportes responde por parcela significativa do consumo energético global e, consequentemente, das emissões associadas a combustíveis fósseis. No contexto ferroviário, embora a tração sobre trilhos seja, em geral, mais eficiente do que alternativas rodoviárias para cargas de grande volume, há demanda crescente por soluções capazes de reduzir ainda mais custos e emissões em operações de longa distância e em corredores não eletrificados. Uma alternativa promissora é a regeneração de energia de frenagem, isto é, o aproveitamento da energia cinética convertida em energia elétrica durante a redução de velocidade do trem (Pan et al., 2021).

Em locomotivas diesel-elétricas, a frenagem dinâmica utiliza o princípio de reversibilidade das máquinas elétricas: os motores de tração operam como geradores durante a frenagem, produzindo energia elétrica que, na maioria das arquiteturas atuais, é dissipada na forma de calor em bancos de resistores. Estudos indicam que a energia dissipada exclusivamente nesses resistores pode representar fração relevante do balanço energético do veículo e que configurações híbridas com armazenamento embarcado podem reduzir o consumo de combustível (Moraes et al., 2021).

Apesar do uso consolidado da regeneração em sistemas ferroviários eletrificados (por exemplo, metrô conectados à catenária), a aplicação em transporte de carga com alimentação própria impõe desafios, principalmente pela necessidade de armazenamento de energia a bordo e por restrições de massa, volume, integração elétrica e controle (CTCN, 2023). Diante disso, este artigo apresenta uma avaliação, baseada em dados de campo, do potencial de regeneração de energia a partir do freio dinâmico em locomotivas diesel-elétricas, bem como uma estimativa do dimensionamento de bancos de baterias e do impacto econômico associado.

O desenvolvimento de sistemas regenerativos em locomotivas de carga é mais recente do que em sistemas urbanos eletrificados, sobretudo porque, em operações não eletrificadas, a energia precisa ser armazenada a bordo para posterior reutilização (CTCN, 2023). Mesmo assim, estudos indicam que a energia atualmente dissipada no banco de resistores durante a frenagem dinâmica pode corresponder a uma fração relevante do balanço energético do veículo, e que arquiteturas híbridas podem reduzir o consumo de combustível (Moraes et al., 2021; Mayrink et al., 2020).

Neste contexto, o objetivo deste artigo é avaliar, com base em dados de campo de nove locomotivas Wabtec AC44i, o potencial de regeneração de



energia via freio dinâmico e sua reutilização por meio de um sistema de armazenamento embarcado. A contribuição principal é a quantificação do potencial de economia sob três modos de uso da energia armazenada: (i) alimentação do circuito auxiliar, (ii) apoio à tração (motores de tração) e (iii) modo combinado. Com os parâmetros e hipóteses adotados neste estudo, obtiveram-se potenciais de economia de combustível de 2,90% (auxiliar), 12,0% (tração) e 13,44% (combinado), e economia financeira de 2,16% (auxiliar), 11,91% (tração) e 12,84% (combinado), sem contabilizar custos de conversores e controle.

Além desta introdução, o artigo apresenta uma síntese conceitual do sistema de tração diesel-elétrico e do freio dinâmico, descreve a metodologia aplicada aos dados do registrador de eventos, discute os resultados de energia dissipada e de regeneração em diferentes cenários e, por fim, consolida conclusões e recomendações para aplicações futuras.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Locomotivas diesel-elétricas convertem a energia química do combustível em energia mecânica no motor diesel e, em seguida, em energia elétrica por meio de um gerador/alternador, alimentando os motores de tração responsáveis pelo esforço trator no contato roda-trilho. Esse arranjo permite bom controle de tração e operação do motor diesel próximo a regiões de maior eficiência em diferentes regimes (Profillidis, 2006; Borba, 2011).

Em operações de carga, é comum a tração múltipla, com uma locomotiva comandante e outras comandadas e/ou remotas distribuídas ao longo da composição, além de unidades *helper* empregadas em trechos com rampas mais severas para prover esforço adicional (Borba, 2009; Spiryagin et al., 2014). Essas diferentes funções influenciam diretamente os perfis de tração e de frenagem e, portanto, o potencial de energia disponível no freio dinâmico.

O sistema de tração elétrica pode envolver retificadores, inversores e conversores CC-CC, dependendo da topologia (CC-CC, CA-CC ou CA-CA). Em locomotivas modernas com tração em corrente alternada, o uso de eletrônica de potência (por exemplo, IGBT e modulação PWM) é central para ajustar tensão e frequência aplicadas aos motores e viabilizar fluxos bidirecionais de potência, condição necessária para frenagem regenerativa (Rashid, 2014; Moraes, 2020).

O freio dinâmico é um sistema complementar ao freio pneumático no qual os motores de tração operam como geradores, convertendo parte da energia cinética do trem em energia elétrica. Em locomotivas diesel-elétricas convencionais, essa energia é tipicamente dissipada no banco de

resistores (grade), na forma de calor (Borba, 2011). A potência dissipada pode ser expressa, de forma simplificada, por uma relação do tipo:

$$P_{FD} = R_{FD} I_{FD}^2 [W] \quad (1)$$

Quando a energia gerada no freio dinâmico é reaproveitada (em vez de dissipada), o sistema é tratado como frenagem regenerativa. Em sistemas eletrificados, a energia pode retornar à rede; em locomotivas autoalimentadas, em geral, é necessário armazenamento embarcado (baterias e/ou supercapacitores) e conversores adequados para compatibilizar níveis de tensão/corrente e controlar a carga/descarga (Kapetanović et al., 2021; Spiryagin et al., 2022).

Entre as opções de armazenamento, baterias de íons de lítio se destacam pela densidade energética e maturidade industrial. O dimensionamento requer considerar capacidade (kWh), limites de corrente (C-rate), vida útil em ciclos e faixa operacional de estado de carga (SoC), uma vez que usualmente não se utiliza 100% da capacidade nominal para preservar a integridade do sistema (Moraes, 2020; Buchmann, 2019). Neste trabalho, são discutidas e comparadas três tecnologias: LTO, NMC e LiFePO₄, adotando-se preços e parâmetros de mercado conforme levantamento realizado durante a pesquisa.

MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa seguiu uma abordagem quantitativa baseada em dados do registrador de eventos, complementada por parâmetros técnicos de locomotivas e referências da literatura. Foram analisados dados cedidos pela Rumo Logística referentes a nove locomotivas Wabtec AC44i operando no corredor Rondonópolis–MT–Santos–SP (Rumo, 2023), abrangendo movimentos de exportação (composições tipicamente carregadas) e importação (composições tipicamente mais leves), além de diferentes posições no trem: comandante, comandada, remota e *helper*.

Os arquivos do registrador de eventos foram tratados em planilhas, com resolução temporal de 1 s, e filtraram-se as variáveis essenciais: aplicação do freio dinâmico (DB), ponto de operação do acelerador/marcha (*throttle*: Idle, T1–T8 e DB), velocidade (km/h) e esforço trator TE (kN). Para reduzir ruídos e focar no período efetivo de viagem, delimitaram-se janelas de início/fim por atividade e descartaram-se trechos fora do percurso de interesse, conforme os critérios adotados na pesquisa.

O corredor analisado inclui a malha norte e paulista, com marcos operacionais como TRO (Terminal de Rondonópolis), ZAR (pátio de Araraquara), ZPT (Zona Portuária de Santos) e ZEV (pátio de Evangelista de Souza). Para análise consolidada, os

dados foram organizados de modo a formar “viagens completas” (ida e volta), distinguindo também subtrechos com comportamentos distintos (por exemplo, ZPT–ZAR e ZAR–TRO no retorno).

Tabela 1. Dados sobre os trens analisados.

ID	Tipo	Peso (TB)	L (m)	Trecho
1	Comandante	14582	2256	TRO-ZPT
2	Comandada	14288	2206	TRO-ZPT
3	Remota	14288	2206	TRO-ZPT
4	Helper	14107	2181	ZAR-ZEV
5	Comandante	2736	1517	ZPT-ZAR
6	Comandante	2723	1490	ZPT-ZAR
7	Comandada	2937	1526	ZPT-ZAR
8	Comandante	2365	1458	ZAR-TRO
9	Comandada	2365	1458	ZAR-TRO

Tabela 2. Dados de consumo da locomotiva Wabtec AC44i

Ponto	P (tração, kW)	P (aux., kW)	Consumo (L/h)
Idle	0	7	15
DB	0	Tabela 3	28
T1	142	7	44
T2	360	13	101
T3	739	37	206
T4	1118	39	298
T5	1602	54	415
T6	2137	56	530
T7	2671	59	643
T8	3281	76	792

Tabela 3. Dados de potência auxiliar durante o uso do freio dinâmico da locomotiva Wabtec AC44i

Ponto	Faixa de Aplicação (%)	P (aux., kW)
DB1	$0 < x \leq 12,5$	14,2
DB2	$12,5 < x \leq 25$	20,1
DB3	$25 < x \leq 37,5$	43,3
DB4	$37,5 < x \leq 50$	43,3
DB5	$50 < x \leq 62,5$	55,1

DB6	$62,5 < x \leq 75$	55,1
DB7	$75 < x \leq 87,5$	61,1
DB8	$87,5 < x \leq 100$	80,5

A energia associada à tração foi obtida a partir do esforço trator e da velocidade, calculando-se a potência equivalente, (com F_T em kN e v em km/h) e integrando-se ao longo do tempo para obter energia em kWh.

$$P_T = \frac{F_T v}{3,6} [kW] \quad (2)$$

O consumo do circuito auxiliar foi estimado por mapeamento do ponto de operação (Idle, T1–T8 e DB1–DB8) para potências auxiliares tabeladas. O consumo de combustível foi obtido por mapeamento do ponto de operação para vazão (L/h), acumulando-se ao longo do tempo.

Com as energias de tração e auxiliar e o volume de diesel consumido, estimou-se a eficiência global do ciclo de tração η_T como a razão entre energia útil (tração + auxiliares) e energia química do diesel. Adotou-se o poder calorífico inferior e densidade do diesel para converter L em MJ e, em seguida, para kWh como 35,7 MJ/L e 0,835 kg/L, respectivamente (Henschel Jr., 2018; Petrobrás, 2021).

$$\eta_T = \frac{(P_T P_{aux})/3600s}{9,8113V} [kW] \quad (3)$$

A energia disponível no freio dinâmico (E_{FD}) foi estimada a partir da potência dissipada no banco de resistores como função da velocidade e da faixa de aplicação do freio dinâmico (DB1–DB8), conforme curva/tabela adotada na pesquisa (Rumo, 2023). Para cada segundo em que o veículo estava em DB, determinou-se a potência correspondente e realizou-se o somatório para obter energia em kWh.

$$E_{FD} = \sum_{i=0}^n \frac{P_i(DB, notch)}{3600} [kWh] \quad (4)$$

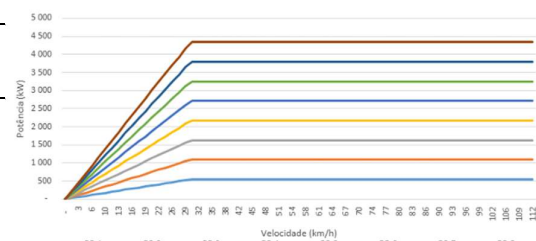


Figura 1.

Variação de potência dissipada de acordo com a % de utilização do freio dinâmico.

A dinâmica de carga do armazenamento foi modelada por balanço energético discreto, atualizando a energia no banco a cada segundo, obtendo-se a equação 5, onde: E_{bi} é a energia útil total no banco de baterias no instante i , que varia entre 0 e o tamanho máximo do sistema de armazenamento de energia, E_{bi-1} é a energia total no banco de baterias no instante imediatamente anterior, E_{FDi} é a energia gerada pelo freio dinâmico no instante i , E_{CAi} é a energia consumida pelo circuito auxiliar naquele instante i , η_b e η_c são eficiências de bateria e conversão, respectivamente (Omar et al., 2012; Wai et al., 2014).

$$E_{bi} = E_{bi-1} + (E_{FD} \eta_b \eta_c) - \left(\frac{E_{CAi}}{\eta_c}\right) [kWh] \quad (5)$$

No modo “auxiliar”, considerou-se que o banco supre a demanda do circuito auxiliar ao longo do tempo. No modo “tração”, a energia regenerada é direcionada para apoiar os motores de tração durante períodos em aceleração/tração. No modo “combinado”, o sistema prioriza o suprimento do circuito auxiliar e aplica o excedente à tração, adotando um nível de reserva (energia mínima) a partir do qual a alimentação à tração via banco é cortada, preservando a continuidade operacional do circuito auxiliar.

Para dimensionamento preliminar, definiram-se capacidades-alvo de banco (energia líquida e bruta) por modo de consumo e avaliaram-se módulos de bateria LTO, NMC e LiFePO4 com parâmetros de tensão nominal, capacidade, custo e vida em ciclos, além de limitações de taxa de carga/descarga (C-rate). A análise econômica distribuiu o custo de aquisição ao longo do ciclo de vida (em viagens) e comparou com a economia de diesel equivalente e economia financeira projetada (Champoski, 2024).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir do tratamento dos registros, observou-se que a utilização dos modos de operação (Idle, tração e DB) varia significativamente com o sentido da viagem e com a função da locomotiva no trem. No sentido exportação, típico de composição carregada, verificou-se maior solicitação de tração e também ocorrência relevante de frenagem dinâmica ao longo do percurso, inclusive para controle de velocidade em trechos com restrições operacionais. Já no sentido importação, o perfil se segmenta em subtrechos com características distintas (por exemplo, a região de serra com velocidades mais baixas e o trecho de planalto com maiores velocidades), refletindo-se na intensidade e frequência de aplicação do freio dinâmico.

Na análise do trecho exportação, a aplicação de DB alcançou aproximadamente 26% do tempo total

analisado, enquanto para a locomotiva *helper* esse percentual caiu para cerca de 3%, coerente com sua função de fornecer esforço adicional em rampas (Champoski, 2024). No trecho importação, observou-se aplicação de DB em torno de 10% no subtrecho ZPT–ZAR e de 25% no subtrecho ZAR–TRO (Champoski, 2024).

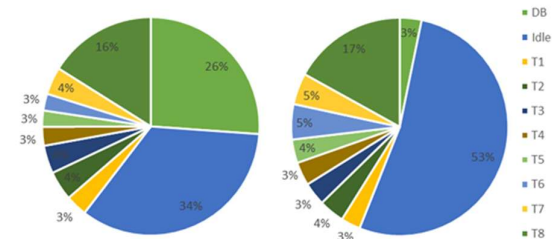


Figura 2. Utilização de cada ponto no trecho exportação (esquerda: global; direita: helper).

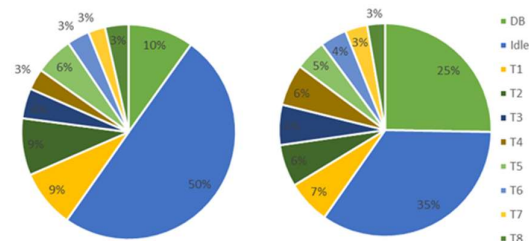


Figura 3. Utilização de cada ponto no trecho importação (esquerda: ZPT–ZAR; direita: ZAR–TRO).

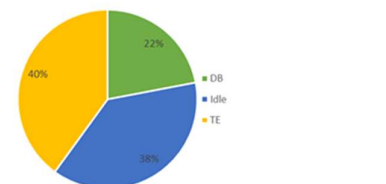


Figura 4. Ocorrência de cada modo de tração nos dados analisados.

A distribuição de aplicação do freio dinâmico concentrou-se em faixas baixas a moderadas de DB (DB1–DB4), e com maior recorrência em velocidades intermediárias, compatível com a característica de maior efetividade do freio dinâmico em velocidades mais elevadas e com restrições operacionais típicas de corredores de carga. Em particular, a concentração de uso em DB1 e DB2 no subtrecho ZAR–TRO sugere frenagens mais suaves e progressivas, o que afeta a potência instantânea disponível para armazenamento e impõe requisitos sobre a taxa de carga admissível do banco.

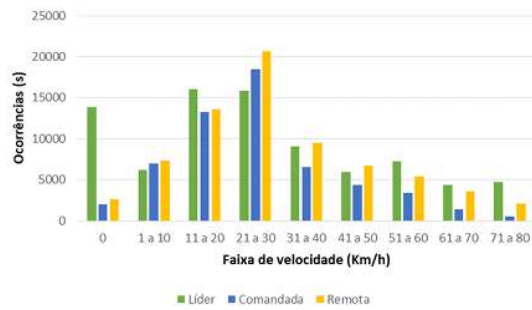


Figura 5. Faixas de velocidade da utilização do freio dinâmico no sentido exportação.

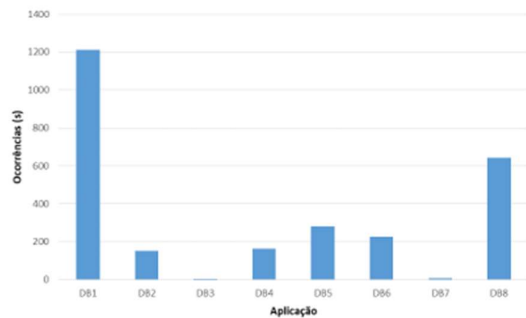


Figura 6. Potência de aplicação do freio dinâmico pela locomotiva Helper.

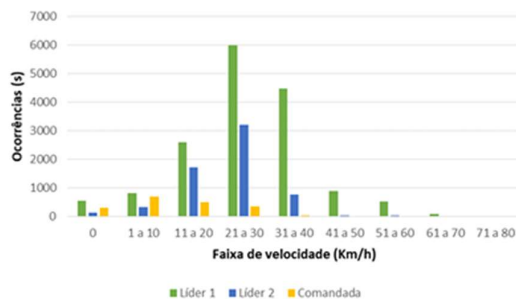


Figura 7. Faixas de velocidade da utilização do freio dinâmico no trecho ZPT-ZAR.

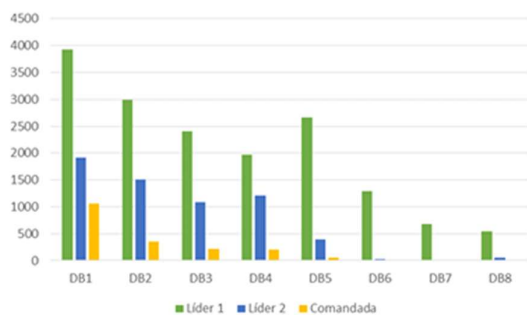


Figura 8. Faixas de velocidade da utilização do freio dinâmico no trecho ZPT-ZAR.

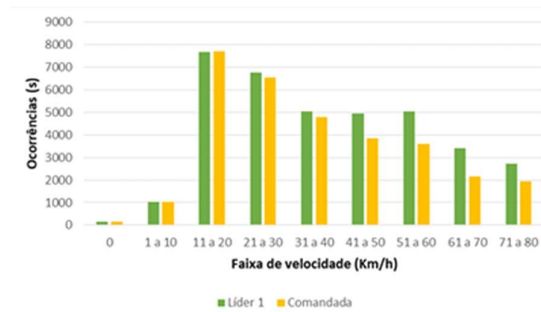


Figura 9. Faixas de velocidade da utilização do freio dinâmico no trecho ZAR-TRO.

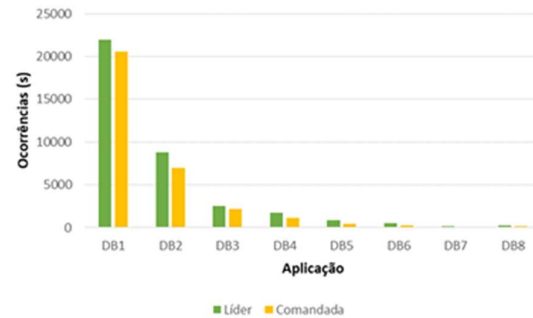


Figura 10. Faixas de velocidade da utilização do freio dinâmico no trecho ZAR-TRO.

A energia total dissipada no banco de resistores (E_{FD}) apresentou valores expressivos nas locomotivas de linha (comandante/comandadas), indicando potencial teórico de recuperação. Na amostra analisada, a referência “comandante” do sentido exportação apresentou E_{FD} na ordem de 26.371 kWh, enquanto a *helper* apresentou apenas 1.293 kWh, reforçando a menor atratividade para instalação de armazenamento dedicado nessa função.

Tabela 4. Energia dissipada pelo freio dinâmico nas locomotivas analisadas.

ID	Tipo	$E_{FD} [kWh]$
1	Comandante	26.371
2	Comandada	19.049
3	Remota	24.491
4	Helper	1.273
5	Comandante	6.900
6	Comandante	1.667
7	Comandada	146
8	Comandante	8.049
9	Comandada	5.947

Para tornar a análise mais tangível, a energia dissipada foi convertida em volume equivalente de diesel e custo, ponderando-se pela eficiência do ciclo

de tração e por eficiências adicionais de conversão e tração. Adotaram-se valores típicos para eficiência do motor de tração, eficiência do circuito de conversão e eficiência do circuito de transformação, além de se estimar η_T a partir dos próprios dados de campo (Wai et al., 2014).

Tabela 5. Conversão de valores da energia dissipada [MJ], Volume [L] e custo [R\$].

ID	E_{FD} [MJ]	V_{eq} (L)	Custo [R\$]
1	94.935	4.244	25.463,97
2	68.57	3.103	18.620,64
3	88.167	3.847	23.083,28
4	4.581	206	1.239,42
5	24.840	1.200	7.199,48
6	6.003	306	1.833,42
7	525	33,4	200,33
8	28.978	1.418	8.508,53
9	21.408	1.144	6.862,66

A análise do consumo em tração (energia associada ao esforço trator) e do consumo auxiliar permitiu estimar a eficiência global do ciclo de tração. Na amostra analisada, a eficiência variou aproximadamente entre 28,58% e 34%, com média de 31,6% e desvio padrão de 3,7%, sendo mais alta e consistente no sentido exportação do que no sentido importação.

Tabela 6. Energia relacionada ao esforço trator e consumo de cada locomotiva.

ID	E_T [kWh]	E_{CA} [kWh]	$E_T + E_{CA}$ [kWh]	Consumo (L)
1	54.160	2.793	56.952	16.992
2	36.491	1.857	38.348	11.582
3	63.214	2.765	65.978	19.214
4	17.540	661	18.201	5.477
5	15.397	833	16.230	5.232
6	6.071	358	6.427	2.184
7	3.120	222	3.342	1.417
8	18.178	990	19.168	6.260
9	10.763	699	11.463	4.087

Tabela 7. Eficiência do ciclo de tração.

ID	E_D [kWh]	η_T [%]
1	138.207	34,16
2	94.207	33,75
3	156.282	35,00
4	44.549	33,87
5	42.559	31,62
6	17.761	30,00
7	11.528	24,03
8	50.918	31,21
9	33.244	28,58

Modo 1 – Consumo via circuito auxiliar: ao comparar E_{FD} e a energia consumida no circuito auxiliar (E_{CA}), observou-se que, em muitos casos, a energia dissipada no freio dinâmico é suficiente para suprir o consumo auxiliar ao longo de uma viagem completa, desde que haja armazenamento e uma carga inicial mínima para cobrir o intervalo até o início da primeira regeneração.

Tabela 8. Energia dissipada nos resistores vs. energia consumida no circuito auxiliar.

ID	E_{FD} [kWh]	E_{CA} [kWh]
1	26.371	2.793
2	19.049	1.858
3	24.491	2.765
4	1.272	661
5	6.900	833
6	1.667	358
7	146	222
8	8.049	990
9	5.947	699

Com a atualização discreta do banco, estimaram-se: (i) carga inicial mínima (E_0) necessária para evitar descarregamento completo antes da primeira ocorrência de DB; (ii) capacidade mínima útil ($E_{b,min}$) para garantir suprimento contínuo; e (iii) energia total regenerada (E_R) no modo auxiliar.

Tabela 9. Dados relativos à regeneração.

ID	E_R [kWh]	$E_{b,min}$ [kWh]	E_R [kWh]	Potencial Regen. (%)
1	7,35	149	3.170	12,03
2	40,21	86,3	2.061	10,82

3	38,46	179	3.142	11,84
4	30,79	424	688	54,06
5	124,97	132	913	13,23
6	85,71	144	437	26,22
7	110,97	137	130	89,37
8	42,40	51,9	1.082	13,44
9	41,39	46,0	762	12,82
1-5-8	7,35	149	5.156	12,48
1-6-8	7,35	149	4.639	12,86
2-7-9	40,21	173	3.151	12,53

Esses resultados indicam que o modo auxiliar, embora operacionalmente interessante por atender cargas de baixa potência, tende a produzir economias percentuais menores por representar fração limitada do balanço energético total do trem.

Modo 2 – Consumo via motores de tração: a energia regenerada foi direcionada para apoiar a tração nos períodos de aceleração/tração, elevando o potencial de substituição de energia proveniente do diesel. Compara-se E_{FD} com a energia associada ao esforço trator (E_{MT}), mostrando que, apesar de E_{MT} ser geralmente maior do que E_{FD} , a razão DB/Tração pode ser relevante em várias referências.

Tabela 10. Comparação entre energia dissipada e energia do esforço trator.

ID	E_{FD} [kWh]	Db/Tração [%]
1	54.160	48,69
2	36.491	52,20
3	63.214	38,74
4	17.540	7,26
5	15.397	44,81
6	6.071	27,47
7	3.120	4,68
8	18.178	44,28
9	10.764	55,25
1-5-8	87.735	47,10
1-6-8	78.408	46,03
2-7-9	50.375	49,91

Como a potência instantânea e o acúmulo de energia dependem do tamanho do banco e do perfil de alternância entre tração e frenagem, simulou-se a

porcentagem de energia absorvida do freio dinâmico em função da capacidade do banco, evidenciando comportamento de convergência (tendência logarítmica) para o limite teórico imposto por eficiências.

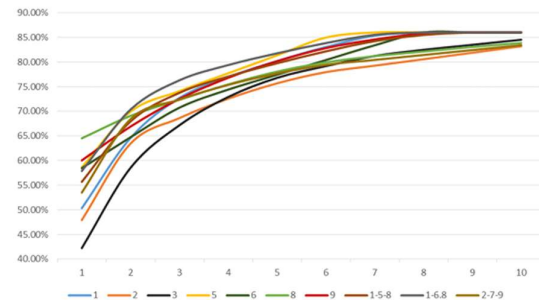


Figura 10. Progressão do total percentual regenerado via motor de tração para as referências.

Para a figura 10, os valores de 1 a 10 são os múltiplos do menor valor considerado para o tamanho do banco de baterias em cada iteração. Para as referências 1, 2, 3, 5, 1-5-8, 1-6-8 e 2-7-9, o múltiplo é 250 kWh. Para 6 e 9, o valor é $150 + 50 \cdot (1-x)$ kWh, com o máximo sendo 600 kWh. E para a 8, o valor é $125 + 25 \cdot (1-x)$ kWh, com o máximo valor sendo 350 kWh.

Tabela 10. Linha de tendência e R^2 da regeneração para as referências.

ID	Linha de tendência	R^2
1	$-0,0029 x^2 + 11,5x + 11.430$	0,975
2	$-0,0016 x^2 + 6,941x + 8.324,6$	0,951
3	$-0,0028 x^2 + 11,723x + 8.561,4$	0,971
5	$-0,0006 x^2 + 2,2841x + 3.656,6$	0,983
6	$-0,0024 x^2 + 2,8313x + 609,3$	0,997
8	$-0,0301 x^2 + 20,945x + 3.077,2$	0,998
9	$-0,0101 x^2 + 10,906x + 2.192$	0,999
1-5-8	$-0,0033 x^2 + 13,913x + 20.949$	0,972
1-6-8	$-0,0031 x^2 + 12,406x + 19.119$	0,963
2-7-9	$-0,0019x^2 + 7,9213x + 12.723$	0,927

Modo 3 – Consumo combinado (auxiliar + tração): neste modo, a energia regenerada é utilizada para suprir o circuito auxiliar e apoiar a tração, com uma política de corte para preservar uma reserva mínima no banco, assegurando o fornecimento ao circuito auxiliar ao longo do trajeto. O comportamento de recuperação em função do tamanho do banco também converge para o limite teórico de eficiência, porém com convergência mais lenta do que no modo exclusivamente tração devido à restrição de reserva.

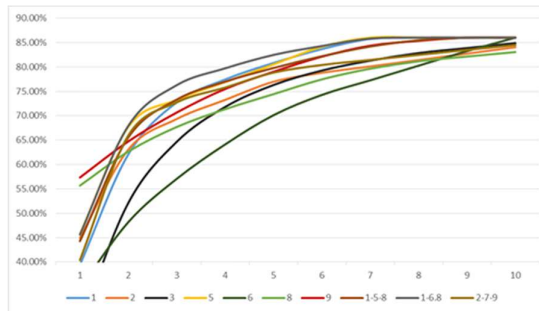


Figura 10. Progressão do total percentual regenerado no modo combinado para as referências.

Tabela 11. Linha de tendência e R^2 da regeneração para as referências.

ID	Linha de tendência	R^2
1	$-0,0041 x^2 + 15,668x + 8.397,1$	0,943
2	$-0,0019 x^2 + 7,9903x + 7.686,9$	0,94
3	$-0,0042 x^2 + 16,701x + 4.419,6$	0,954
5	$-0,0009 x^2 + 3,3793x + 2.783$	0,933
6	$-0,0038 x^2 + 4.6395x + 6.4804$	0,992
8	$-0,0426 x^2 + 29.572x + 1.518,2$	0,997
9	$-0,0107 x^2 + 11,68x + 1.926,1$	0,999
1-5-8	$-0,0051 x^2 + 20,184x + 16.182$	0,972
1-6-8	$-0,005x^2 + 18,613x + 14.572$	0,963
2-7-9	$-0,0033x^2 + 12,61x + 9.322,8$	0,879

Tabela 12. Tamanho dos bancos avaliados e reserva necessária.

ID	Q_{min} [kWh]	$Q_{0,min}$ [kWh]	Q_{max} [kWh]	$Q_{0,max}$ [kWh]
1	250	145	2000	120
2	250	84	2500	84,4
3	250	180	2500	1623
5	250	126	1750	127
6	150	125	600	123
8	125	53,4	350	51,9
9	150	46,7	600	45,1

1-5-8	250	145	2250	132
1-6-8	250	145	2000	120
2-7-9	250	159	2500	84,4

Dimensionamento e avaliação econômica das baterias: para viabilizar o armazenamento embarcado, foram avaliadas baterias LTO, NMC e LiFePO₄ quanto a parâmetros elétricos e econômicos. Definiram-se tamanhos de banco (energia líquida e bruta) por modo de consumo (tração, auxiliar e combinado), avaliou-se a capacidade de absorção de potência de pico via fator C (C-rate), estimou-se a quantidade de células/módulos, dimensões e massa, e calculou-se o custo de aquisição para cada cenário.

Tabela 13. Comparação técnica das tecnologias de bateria avaliadas.

Tipo	C-rate admissível	Vida útil (ciclos)	Robustez operacional
LTO	Alta	Muito alta	Muito elevada
NMC	Média	Média	Média
LiFePO ₄	Média	Alta	Elevada

A Tabela 13 apresenta uma síntese dos principais aspectos técnicos e operacionais das tecnologias de bateria avaliadas neste estudo, priorizando parâmetros diretamente relacionados ao comportamento do armazenamento sob o regime imposto pela frenagem regenerativa. Ao longo da análise, esses critérios foram avaliados de forma detalhada, considerando limites de potência, capacidade de absorção de energia, vida útil em ciclos e robustez frente às variações operacionais típicas da aplicação ferroviária.

No contexto do artigo, optou-se por consolidar essas informações em uma forma comparativa e qualitativa, suficiente para evidenciar as diferenças fundamentais entre as tecnologias e sustentar a discussão técnica subsequente. Essa abordagem permite manter o foco nos critérios que efetivamente condicionam a viabilidade técnica do armazenamento embarcado, sem sobrecarregar o texto com níveis de detalhamento que não são essenciais para a compreensão dos resultados apresentados.

Assim, embora a tecnologia LTO apresente maior robustez elétrica, sua aplicação implica maior massa e custo, o que afeta a viabilidade embarcada e econômica.

Tabela 14. Comparação física e econômica das tecnologias avaliadas.

Tipo	Densidade energética	Massa relativa	Custo relativo
LTO	Baixa	Alta	Alto
NMC	Alta	Baixa	Médio
LiFePO ₄	Média	Alta	Baixo

A Tabela 14 complementa a análise técnica ao sintetizar os impactos físicos e econômicos associados às tecnologias de bateria avaliadas. Esses aspectos são particularmente relevantes em aplicações embarcadas, nas quais restrições de massa, volume e custo influenciam de forma direta a possibilidade de implementação prática, independentemente do desempenho elétrico do sistema.

Os dados foram organizados de forma agregada, destacando relações relativas entre densidade energética, massa e custo, de modo a facilitar a comparação entre tecnologias sob a ótica da integração ao sistema da locomotiva. Essa síntese reflete a lógica adotada ao longo do estudo, na qual o desempenho técnico é analisado em conjunto com limitações físicas e econômicas, permitindo uma avaliação equilibrada das alternativas consideradas.

Na etapa de resultados, a energia recuperada (E_R) foi convertida em volume equivalente de diesel e economia financeira por viagem, considerando vida útil em ciclos e custo de aquisição distribuído ao longo das viagens até troca. Em média, obtiveram-se economias de combustível de 2,90% no modo auxiliar, 12,0% no modo tração e 13,44% no modo combinado; e economias financeiras de 2,16%, 11,91% e 12,84%, respectivamente.

Tabela 15. Síntese dos ganhos energéticos por modo de operação.

Modo de operação	Energia regenerada	Economia de combustível
Auxiliar	Baixa	2,90%
Tração	Média	12,0%
Combinado	Alta	13,44%

A Tabela 15 apresenta uma consolidação dos ganhos energéticos obtidos nos diferentes modos de utilização da energia regenerada avaliados neste estudo. A análise original considerou a evolução temporal da energia regenerada, o perfil de operação das locomotivas e as interações entre tração, frenagem dinâmica e consumo auxiliar, resultando em um conjunto amplo de dados intermediários.

Para fins de apresentação no artigo, esses resultados foram sintetizados de forma a evidenciar as tendências globais e a ordem de grandeza dos ganhos associados a cada modo de operação. Essa escolha

permite ao leitor identificar de maneira direta o impacto relativo das estratégias de uso da energia regenerada, mantendo a coerência com a análise detalhada realizada e preservando a clareza da exposição.

Tabela 16. Síntese dos ganhos energéticos por modo de operação.

Modo de operação	Economia financeira	Tecnologia mais atrativa
Auxiliar	2,16%	LiFePO ₄
Tração	11,91%	LiFePO ₄
Combinado	12,84%	LiFePO ₄

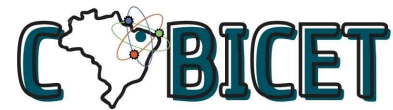
A Tabela 16 reúne os resultados econômicos finais associados aos modos de operação analisados, relacionando as economias financeiras estimadas às tecnologias de bateria consideradas mais atrativas em cada cenário. A avaliação econômica foi construída a partir da integração entre ganhos energéticos, consumo de combustível evitado e vida útil do sistema de armazenamento, permitindo comparar os diferentes modos sob uma ótica diretamente relacionada à tomada de decisão.

Do ponto de vista de implementação, os resultados dependem de hipóteses e simplificações: perdas adicionais em conversores e cabos, estratégia de controle de potência (incluindo limites de corrente e proteção), variações térmicas e degradação das baterias, além de restrições de massa e volume. Por exemplo, a tecnologia LTO tende a favorecer maior taxa de carga/descarga e absorção de picos, porém pode implicar maior massa/volume e investimento inicial; NMC e LiFePO₄ oferecem maior densidade energética, com destaque para LiFePO₄ por apresentar melhor atratividade econômica no cenário avaliado. Em aplicações futuras, recomenda-se aprofundar a modelagem eletrotérmica e o projeto dos conversores e do gerenciamento de energia.

Os resultados devem ser interpretados considerando simplificações inerentes ao modelo: o desempenho real depende de estratégias de controle, limites de potência/corrente, variações térmicas das baterias, perdas em conversores e integração com a arquitetura elétrica e eletrônica existentes. Assim, recomenda-se que estudos futuros detalhem o projeto dos conversores e do gerenciamento de energia (por exemplo, lógica de corte para preservação do SoC mínimo), bem como análises de sensibilidade para diferentes perfis de rota, sazonalidade operacional e degradação das baterias ao longo do tempo.

CONCLUSÃO

Este artigo apresentou uma avaliação do potencial de regeneração de energia a partir da frenagem dinâmica em locomotivas diesel-elétricas, com base em dados



de registrador de eventos de operações reais no corredor Rondonópolis–MT–Santos–SP. Verificou-se que há energia significativa atualmente dissipada em resistores, sobretudo em locomotivas de linha, com variações relevantes conforme o sentido da viagem, o perfil do trecho e a função do veículo no trem (comandante, comandada, remota e *helper*).

Nos cenários analisados, o modo de reaproveitamento via motores de tração e o modo combinado apresentaram os maiores potenciais de redução de consumo, com economias médias de combustível de 12,0% e 13,44%, respectivamente, enquanto o modo via circuito auxiliar atingiu 2,90%. Na ótica financeira (distribuindo o custo das baterias ao longo da vida útil), os potenciais médios foram 11,91% (tração), 12,84% (combinado) e 2,16% (auxiliar). Entre as tecnologias avaliadas, LiFePO₄ mostrou melhor equilíbrio entre custo inicial, integração e retorno no cenário estudado, embora a seleção final dependa de requisitos de potência, massa/volume e estratégia de controle.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Rumo Logística e seus colaboradores pelo suporte e pela disponibilização de dados operacionais utilizados na pesquisa.

REFERÊNCIAS

CTCN. **Regenerative braking in trains**. Climate Technology Centre and Network, 2023.

MORAES, C. G. S.; et al. **Power Conversion Technologies for a Hybrid Energy Storage System in Diesel-Electric Locomotives**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 68, n. 10, p. 9081–9091, 2021.

BORBA, J. L. **Dinâmica Ferroviária**. Belo Horizonte: Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2009.

BORBA, J. L. **Mecânica de Locomotivas**. Belo Horizonte: Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2011.

BUCHMANN, I. **BU-1003: Electric Vehicle (EV)**. Battery University, 2019.

CHAMPOSKI, D. **Análise do potencial de regeneração de energia através do freio dinâmico em locomotivas diesel-elétricas**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ferroviária e Metroviária) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville, 2024.

HENSCHER JR., J. A. **Análise da injeção de combustível nos parâmetros de operação de um motor diesel tipo ferroviário**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Santa Catarina, 2018.

KAPETANOVIĆ, M.; et al. **Reducing fuel consumption and related emissions through optimal sizing of energy storage systems for diesel-electric trains**. Applied Energy, v. 294, 117018, 2021.

MAYRINK, S. Jr.; et al. **Regenerative braking for energy recovering in diesel-electric freight trains: A technical and economic evaluation**. Energies, v. 13, 963, 2020.

OMAR, N.; et al. **Rechargeable energy storage systems for plug-in hybrid electric vehicles—Assessment of electrical characteristics**. Energies, v. 5, p. 2952–2988, 2012.

PETROBRÁS. **Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico (FISPQ) – Óleo Diesel**. 2021.

PROFILLIDIS, V. A. **Railway Management and Engineering**. 3. ed. Farnham: Ashgate, 2006.

RASHID, M. H. **Eletrônica de Potência**. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2014.

RUMO. **Dados internos**. 2023.

SPIRYAGIN, M.; et al. **Design and Simulation of Rail Vehicles**. Boca Raton: CRC Press, 2014.

SPIRYAGIN, M.; et al. **Rail Vehicle Mechatronics**. Boca Raton: CRC Press, 2022.

WAI, R.; et al. **High-efficiency bidirectional single-input multiple-output power converter**. IET Power Electronics, v. 7, n. 5, p. 1278–1293, 2014.

PAN, L.; et al. **Kinetic energy harvesting technologies for applications in land transportation: A comprehensive review**. Applied Energy, v. 286, 116518, 2021.