



Frenagem Regenerativa em Motores Elétricos

Bruno Henrique de Almeida, Gabriel Augusto Arantes Borges, Leonardo Lopes Martins, Marcos Vinícius de Miranda Assunção, Rayan Abel Cavalcante Silva Melo

bruno.henriq.almeida@gmail.com, gabri25augusto@gmail.com, leolopes1090@gmail.com,
marcos_assuncao13@hotmail.com, rayancsmelo@gmail.com

Professora orientadora: Silvana Julia da Silveira Diniz

Coordenação de curso de Engenharia Elétrica

Resumo

O presente estudo aborda a aplicação da frenagem regenerativa em motores elétricos, com foco em sistemas de elevadores, visando avaliar seu impacto na eficiência energética e na redução do consumo de energia elétrica. A pesquisa baseou-se em revisão teórica e modelagem computacional no software PSIM, simulando diferentes condições de carga e operação com e sem frenagem regenerativa. O método consistiu na análise comparativa dos resultados obtidos, considerando parâmetros elétricos como tensão, corrente e energia recuperada, além da eficiência total do sistema. Verificou-se que o sistema regenerativo apresenta desempenho superior, com aproveitamento médio de 73% da energia potencial convertida em energia elétrica, representando uma economia estimada entre 30% e 35% no consumo global. Conclui-se que a frenagem regenerativa é uma solução técnica e economicamente viável para sistemas de transporte vertical, reduzindo perdas energéticas, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e atendendo aos requisitos normativos de eficiência e qualidade da energia elétrica.

Palavras-chave: Eficiência energética. Frenagem regenerativa. Motores elétricos. Energias renováveis. Sustentabilidade

1. INTRODUÇÃO

O panorama energético contemporâneo é marcado pela crescente demanda por otimização econômica e redução do consumo de recursos não renováveis, fatores que impulsionam a busca por um melhor uso dos recursos renováveis. A melhoria da eficiência dos sistemas de acionamento tem se tornado uma preocupação central nas últimas décadas, motivada tanto pelo aumento dos custos energéticos quanto pelo interesse em marketing e na diminuição do impacto socioambiental. Aumentar a eficiência desses sistemas contribui diretamente para a diminuição das demandas crescentes de energia elétrica, além de reduzir o consumo de energia não renovável que possui efeitos nocivos ao meio ambiente. Nesse cenário, o setor industrial, que faz uso extensivo do Motor de Indução Trifásico (MIT), destaca-se como o maior consumidor de energia elétrica no Brasil. Adicionalmente, os sistemas de elevadores representam uma das cargas mais significativas em instalações prediais, sendo um exemplo de sistema que possui um grande potencial energético pouco aproveitado.

O presente trabalho abordará o tema Frenagem Regenerativa em Motores Elétricos. A frenagem regenerativa se define como o processo em que ocorre a devolução de energia para o sistema de alimentação durante a frenagem eletromagnética de um motor elétrico (Fitzgerald

& Kingsley's, 2014). Essa abordagem se fundamenta na conversão eletromecânica de energia, permitindo que o motor atue como gerador e devolva parte da energia à rede elétrica. Fora considerado um estudo de caso aplicado em elevadores, focando na análise das principais tecnologias de frenagem regenerativa. O estudo envolve a modelagem de um retificador regenerativo trifásico, a análise da eficiência energética de aplicações com sistema regenerativo e a elaboração de um modelo matemático para estimar o retorno econômico.

A pesquisa foi motivada pela busca por soluções que otimizem os sistemas e preencham lacunas de conhecimento. Especificamente no Brasil, há uma carência de publicações e de projetos que se beneficiam da aplicação de tecnologias de armazenamento de energia (*ESSs - Energy Storage Systems*). Diante da necessidade de maximizar a eficiência energética em sistemas de elevada demanda, como elevadores, o problema de pesquisa central deste trabalho pode ser formulado da seguinte forma:

Qual a viabilidade técnica e econômica da aplicação da tecnologia de frenagem regenerativa com devolução para a rede CA em sistemas de elevadores, e como mensurar a eficiência energética obtida em comparação com outras estratégias de frenagem?

O trabalho tem como meta principal responder ao problema de pesquisa por meio dos seguintes objetivos:

Objetivo Geral Investigar de maneira estruturada a aplicação da frenagem regenerativa em elevadores, buscando não apenas compreender seu funcionamento por meio de modelos didáticos, mas também mensurar a eficiência energética obtida (Giorgio Rizzoni 2009) e compará-la com outras estratégias de frenagem.

Objetivos Específicos:

a) Compreender e analisar a aplicação da frenagem regenerativa em elevadores por meio de demonstrações em modelos didáticos, permitindo comparar a performance de sistemas com e sem a utilização da frenagem regenerativa.

b) Calcular a porcentagem média de energia efetivamente recuperada durante o processo de frenagem, considerando diferentes regimes de operação.

c) Confrontar a frenagem regenerativa com outros métodos de frenagem, como a frenagem resistiva e a frenagem por injeção de corrente contínua.

d) Ponderar ganhos ou perdas diretas e/ou indiretas da integração tecnológica, considerando a economia energética, o retorno financeiro e os benefícios ambientais e operacionais, como a redução de perdas térmicas e a contribuição para práticas mais sustentáveis.

Este estudo se justifica pela sua relevância prática e social ao endereçar a necessidade de uso eficiente da energia. A finalidade da pesquisa é prover uma análise técnica e econômica robusta que comprove a viabilidade da Frenagem Regenerativa como uma solução essencial para a eficiência energética em elevadores, contribuindo com a redução dos custos operacionais e a diminuição da emissão de poluentes, como o CO₂ na atmosfera. O avanço dessas tecnologias contribui para a conformidade com as exigências de eficiência energética.

Em termos de relevância acadêmica, o trabalho se justifica pela busca em otimizar e preencher as lacunas de conhecimento, sendo proposto o estudo da tecnologia de devolução para a rede CA, que se conclui ser a mais adequada para MITs conectados à rede. O desenvolvimento deste trabalho visa servir como uma referência didática em nível de graduação.

A fundamentação teórica será construída a partir dos princípios da conversão eletromecânica de energia e das características operacionais do MIT. Serão abordadas as tecnologias centrais de inversores de frequência (VFD), com especial atenção às arquiteturas *Direct Front End (DFE)* e *Active Front End (AFE)*, sendo esta última responsável por viabilizar o fluxo bidirecional de potência e a frenagem regenerativa. Além disso, serão considerados os impactos do fluxo reverso na Qualidade da Energia e as normas de segurança

e eficiência aplicáveis.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

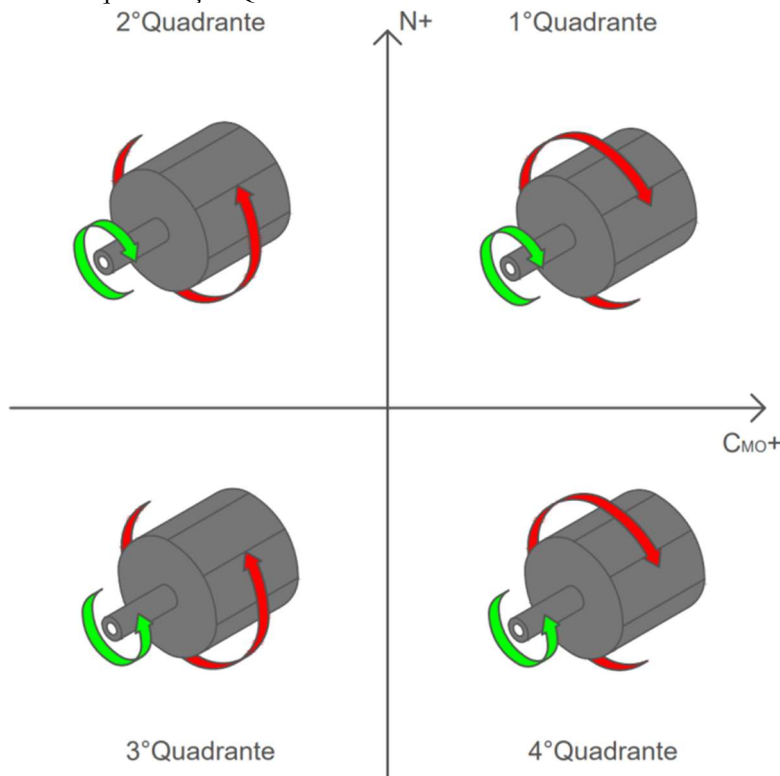
O avanço das tecnologias de automação e eficiência energética tem impulsionado o desenvolvimento de sistemas capazes de otimizar o consumo de energia elétrica em diversos setores. Entre essas inovações, destaca-se a aplicação da energia regenerativa em elevadores, que permite o reaproveitamento da energia gerada durante o processo de frenagem. Essa abordagem se fundamenta nos princípios da conversão eletromecânica de energia, nos quais o motor elétrico pode atuar como gerador ao inverter seu sentido de operação, devolvendo parte da energia à rede elétrica ou a outros subsistemas.

2.1. Fundamentos:

Frenagem regenerativa é o fenômeno/sistema em que reaproveita a energia potencial cinética armazenada no rotor para gerar energia elétrica. É um momento em que ocorre a inversão de polos do estator, provocada pela velocidade síncrona maior que a velocidade do campo girante, pode ser ilustrado os momentos de trabalho conforme Figura 1 – Representação Quadrantes.

Se o motor estiver girando para trás em relação ao sentido dos campos magnéticos, então o conjugado induzido na máquina freará a máquina muito rapidamente e tentará fazer com que ela gire no sentido oposto. Como a inversão do sentido de rotação do campo magnético é simplesmente uma questão de chaveamento de duas fases quaisquer do estator, esse fato pode ser usado para frear muito rapidamente um motor de indução. O ato de permutar duas fases por chaveamento, para frear o motor muito rapidamente, é denominado frenagem por inversão de fases. (Chapman., 2013)

Figura 1 – Representação Quadrantes



FONTE: Os Autores, Adaptado de Chapman (2025)

A expressão matemática que promove esse fenômeno são expressadas por meio das equações 1 e 2:

$$\eta_s = \frac{120 \times f}{P} \quad (1)$$

$$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_v} \quad (2)$$

Nesse contexto entende-se:

$\eta_s(N)$ = Velocidade síncrona

f = Frequência Nominal

P = Número de Polos

$\tau_{ind}(CMO)$ = Conjugado do motor

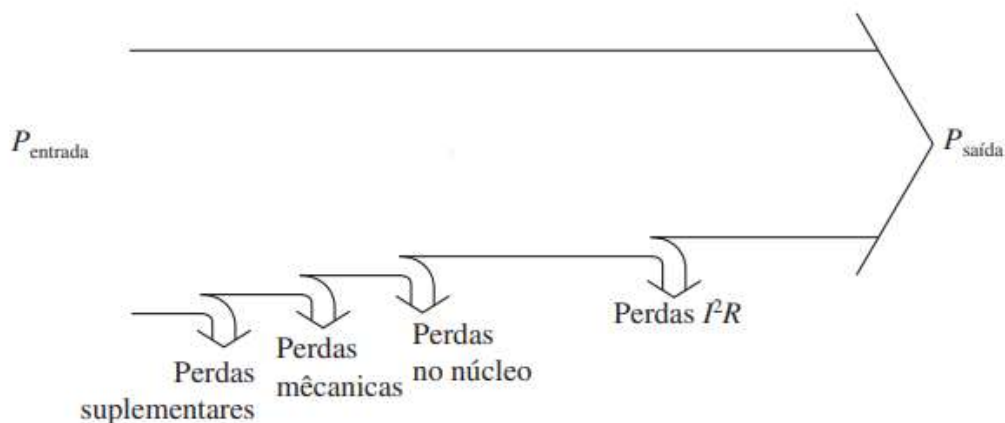
P_{conv} = Conjugado Induzido

ω_m = Velocidade angular mecânica do rotor

No quadrante 2° e 4° quadrante, onde são regiões onde ocorre a frenagem, seu comportamento passa a trabalhar como um gerador, portanto é possível fazer analogia a esse caso e entender seu comportamento.

Nem toda a potência mecânica que entra em um gerador síncrono torna-se potência elétrica na saída da máquina. A diferença entre a potência de entrada e a de saída representa as perdas da máquina. (Chapman., 2013), modelado na Figura 2 – Modelagem Perdas.

Figura 2 - Modelagem Perdas



Fonte: Fundamentos de Máquinas Elétricas (2013) Adaptado de Chapman, 2023

A análise das perdas nas máquinas é importante por três razões: As perdas determinam o rendimento da máquina e influenciam consideravelmente o custo de seu funcionamento; as perdas aquecem a máquina e a elevação de temperatura correspondente determina a potência máxima de saída que pode ser obtida sem deterioração indevida do isolamento; e em uma representação da máquina, devemos incluir de forma adequada as quedas de tensão e as correntes associadas às perdas. (Umans et al., 2014)

A frenagem regenerativa pode se destacar não só pelo efeito eletrodinâmicos, como reaproveitamento para frear do motor. Também é possível reaproveitar o fenômeno para

devolver a energia a rede, por breve momento atuando como gerador, podendo ser reaproveitadas para alimentar subsistemas. Portanto existe uma diferença de como se aplica a tecnologia e reaproveitamento para cada tipo de sistema.

2.2. Tecnologia de regeneração:

O núcleo funcional de um inversor de frequência *VFD* (*Variable Frequency Drive* — Drive de Frequência Variável) está em sua arquitetura de conversão de potência, iniciada pelo retificador, também denominado *front end*, responsável por converter a energia alternada proveniente da rede elétrica em corrente contínua, que posteriormente alimenta o inversor responsável pela síntese da frequência de saída aplicada ao motor (Fitzgerald; Kingsley; Umans, 2013). O desempenho global do sistema de acionamento depende diretamente da tecnologia empregada nessa etapa de retificação (Mohan; Undeland; Robbins, 2003).

Entre as principais arquiteturas utilizadas destacam-se o *Direct Front End (DFE)* e o *Active Front End (AFE)* (Rashid, 2013). O DFE é uma solução passiva baseada em diodos, caracterizada por sua simplicidade construtiva e baixo custo, permitindo apenas o fluxo unidirecional de potência da rede para o motor (Siemens, 2020). Embora amplamente utilizado em aplicações convencionais, como bombas e ventiladores, o *DFE* apresenta elevada distorção harmônica na corrente de entrada, exigindo em muitos casos transformadores defasadores e topologias multipulso (12, 18 ou 24 pulsos) para atenuar esses efeitos (IEEE, 2014; Mohan; Undeland; Robbins, 2003).

O *Active Front End (AFE)*, por sua vez, representa uma tecnologia mais avançada, substituindo os diodos por transistores bipolares de porta isolada (*IGBTs*) controlados por modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation – PWM*) (Rashid, 2013). Essa configuração ativa permite moldar a forma de onda da corrente, reduzindo significativamente a distorção harmônica e possibilitando o fluxo bidirecional de potência (IEEE, 2014; WEG, 2019).

Dessa forma, o *AFE* viabiliza a frenagem regenerativa, na qual a energia cinética dissipada durante a desaceleração do motor é convertida novamente em energia elétrica e devolvida à rede, aumentando a eficiência energética global do sistema (Weg, 2019; Schindler, 2014). Esse princípio é amplamente aplicado em elevadores, guindastes e sistemas de transporte vertical, nos quais há ciclos frequentes de aceleração e frenagem, tornando a regeneração uma alternativa eficiente e sustentável (Abnt, 2016; Schindler, 2014).

2.3. Comparação entre Tecnologias de Regeneração de Energia por Frenagem:

Com a crescente demanda por eficiência energética e sustentabilidade nos sistemas de acionamento elétrico, o estudo das arquiteturas de conversores de frequência torna-se cada vez mais relevante. Entre as topologias mais difundidas destacam-se o *Direct Front End (DFE)* e o *Active Front End (AFE)*, que representam diferentes filosofias de projeto e refletem estágios distintos da evolução dos sistemas de controle de motores. A escolha entre uma e outra não se limita a parâmetros técnicos, mas envolve a análise do contexto de aplicação, das demandas energéticas e do equilíbrio entre eficiência, custo e confiabilidade (Boldea; Nasar, 2016).

Nos sistemas baseados em *DFE*, a simplicidade constitui seu principal atrativo. Esse tipo de conversor realiza a retificação direta da energia, mas não permite regeneração durante a frenagem, a menos que seja utilizado um módulo externo. Assim, quando o motor atua como gerador, como ocorre em desacelerações ou descidas de carga, a energia produzida precisa ser dissipada em resistores, caso o sistema não disponha do módulo regenerativo (Abb, 2020). Esse processo, embora funcional, resulta em perdas térmicas e requer ventilação adicional

para preservar a segurança e a durabilidade do equipamento. Trata-se, portanto, de uma solução que privilegia a robustez e o baixo custo, mas que sacrifica a eficiência energética global.

Em contrapartida, a tecnologia *AFE* apresenta uma abordagem mais moderna e dinâmica. Por meio do uso de transistores *IGBTs* controlados ativamente, o conversor *AFE* permite que a energia gerada durante a frenagem seja devolvida à rede elétrica, reduzindo o desperdício e aumentando a eficiência do sistema (Lipo, 2017). Essa capacidade regenerativa traduz-se em menor consumo global, redução do calor dissipado e maior sustentabilidade, aspectos alinhados às exigências de eficiência energética descritas na norma ISO 50001 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018).

Outro ponto importante de distinção entre as duas topologias é a qualidade da energia. O *DFE* tende a gerar níveis elevados de distorção harmônica total (*THD*), frequentemente superiores a 25%, enquanto o *AFE* mantém esses valores abaixo de 5%, atendendo plenamente às recomendações da norma IEEE 519-2022 (IEEE, 2022). Isso se traduz em menor interferência na rede elétrica e maior compatibilidade com equipamentos sensíveis, o que é particularmente relevante em instalações complexas, como hospitais e edifícios comerciais.

O fator de potência também difere significativamente entre as tecnologias. O *DFE* opera tipicamente com fator de potência de aproximadamente 0,95 indutivo, o que implica certo consumo de energia reativa. Já o *AFE* oferece controle ativo, permitindo operar com fator de potência unitário (1,0) e até ajustar-se conforme as necessidades do sistema, podendo trabalhar levemente indutivo ou capacitivo (Abb, 2020). Essa flexibilidade melhora o desempenho elétrico e contribui para a redução de penalidades tarifárias impostas por concessionárias.

Em termos de robustez, os sistemas *DFE* podem ser mais suscetíveis a falhas quando submetidos a redes instáveis ou com desequilíbrio de tensão. Nessas condições, podem ocorrer disparos indesejados ou interrupções de operação. O *AFE*, por sua vez, apresenta maior capacidade de compensar assimetrias, operando de forma estável mesmo em redes fracas ou alimentadas por geradores, o que garante maior confiabilidade e continuidade operacional (Lipo, 2017).

A aplicação prática de cada tecnologia reflete suas características intrínsecas. O *DFE* é ideal para cargas unidirecionais e de torque constante, como ventiladores e bombas centrífugas, operando em redes estáveis e onde a regeneração não é necessária. O *AFE*, em contrapartida, é amplamente utilizado em sistemas que exigem frenagem regenerativa e baixa distorção harmônica, como elevadores, guindastes e esteiras transportadoras (Boldea; Nasar, 2016). Nessas situações, sua eficiência e estabilidade justificam o investimento inicial mais elevado.

Em síntese, a escolha entre *DFE* e *AFE* não deve ser tratada como mera decisão técnica, mas como um processo de balanceamento entre custo, desempenho e propósito. O *DFE* continua sendo uma solução econômica e confiável para aplicações convencionais, enquanto o *AFE* simboliza o avanço tecnológico, promovendo sistemas mais eficientes, inteligentes e sustentáveis. A decisão, quando baseada em uma análise criteriosa do perfil de carga, das condições de rede e dos objetivos de eficiência energética, contribui não apenas para o desempenho do sistema, mas também para um futuro energético mais racional e equilibrado.

2.4. Principais impactos do fluxo reverso na qualidade da energia:

A Qualidade da Energia é a medida de quão próxima a tensão e a corrente estão de seus parâmetros ideais (frequência, amplitude e forma de onda senoidal), garantindo a operação confiável e sem distúrbios dos equipamentos conectados à rede. Sob essa

perspectiva, o foco principal dos impactos do fluxo reverso em redes elétricas reside justamente na degradação dessa qualidade da energia, manifestada principalmente pela geração de harmônicas de corrente e tensão (Bayer et al., 2018).

2.4.1. Geração de Distorções Harmônicas (DHT)

Os conversores estáticos de potência são a fonte mais significativa de harmônicas, cuja circulação na rede pode afetar o fator de potência geral. Em conversores regenerativos sem a tecnologia *Active Front End (AFE)* e sem filtros, é possível notar diferenças no nível total de harmônicas (*Total Harmonic Distortion – THD*) entre a operação motorizando e a regenerando. Embora as formas de onda sejam consideradas satisfatórias para algumas aplicações industriais, a distorção harmônica é evidente.

2.4.2. Aumento das Perdas e Sobreaquecimento em Equipamentos

A presença de correntes harmônicas resulta em uma sobrelevação térmica mais pronunciada nos transformadores e motores, devido ao aumento de perdas que se manifestam de duas formas principais:

- Perdas por Histerese: Estas perdas no ferro (materiais ferromagnéticos) aumentam proporcionalmente com o aumento da frequência das correntes circulantes devido à presença de campos magnéticos variáveis no tempo (Chapman, Stephen J.2013).
- Perdas por Correntes Parasitas de Foucault: Essas correntes são induzidas pela variação do fluxo magnético (Lei de Faraday), que circulam internamente no material condutor é a principal causa de perdas por Efeito Joule nos núcleos de máquinas elétricas. É relevante notar que estas perdas são proporcionais ao quadrado da frequência das correntes circulantes.

2.4.3. Impacto do Fluxo Reverso Excessivo e Sobrecarga de Transformadores

A regeneração, embora seja um recurso de eficiência valioso, pode levar ao aumento das perdas elétricas, em vez da redução pretendida, quando a potência injetada pela Geração Distribuída (GD) ou pela frenagem regenerativa é superior ao consumo no ramo da rede ou excede a capacidade nominal do transformador, resultando no fluxo inverso de corrente. Os principais impactos desse fluxo reverso e de um sistema regenerativo mal dimensionado são detalhados a seguir, com base nas características operacionais e nominais dos transformadores:

2.5. Normatização da Energia Regenerativa:

A normatização da energia regenerativa integra o conjunto de normas e legislações relacionadas à eficiência energética e à qualidade da energia elétrica no Brasil. Esse tema envolve três eixos principais: segurança (Abnt), eficiência energética (legislação federal) e qualidade da energia elétrica (Aneel/Prodist).

2.5.1. Requisitos de Segurança – ABNT

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (Abnt) regulamenta os requisitos de projeto, instalação e operação em equipamentos, assegurando padrões mínimos de segurança,

acessibilidade e desempenho. Essas normas também orientam a incorporação de tecnologias regenerativas, garantindo que a eficiência energética não comprometa a integridade e a confiabilidade dos sistemas.

2.5.2. Eficiência Energética – Legislação Federal

A utilização de sistemas regenerativos está alinhada à Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, instituída pela Lei nº 10.295/2001, e às diretrizes do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel). Tais instrumentos legais visam promover o uso eficiente da energia e reduzir desperdícios.

Nesse contexto, a tecnologia regenerativa em elevadores contribui diretamente para os objetivos da legislação ao reaproveitar a energia dissipada durante a frenagem, devolvendo-a à rede elétrica ou armazenando-a para uso posterior.

2.5.3. Qualidade da Energia Elétrica – ANEEL/PRODIST

A Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), por meio do Prodinst (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica), define os parâmetros de qualidade da energia elétrica (Qee). O Módulo 8 do documento estabelece limites de tensão, continuidade e distorções harmônicas que devem ser observados pelos sistemas consumidores e geradores.

O uso de inversores bidirecionais regenerativos auxilia na manutenção do fator de potência dentro dos limites normativos (entre 0,92 e 1,00), além de reduzir as distorções harmônicas, favorecendo a estabilidade e a qualidade da rede. Dessa forma, a aplicação da regeneração em elevadores não apenas aumenta a eficiência do sistema, como também assegura conformidade com os padrões técnicos e regulatórios nacionais.

3. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho foi estruturada com base nos princípios do método científico, que compreende observação sistemática, formulação de hipóteses, coleta e organização de dados, análise crítica e interpretação objetiva dos resultados. A pesquisa caracteriza-se como bibliográfica e experimental-simulada, combinando revisão teórica e modelagem computacional para compreender e comparar o desempenho da frenagem regenerativa aplicada a sistemas de tração elétrica, especialmente em elevadores.

Como instrumentos de pesquisa, utilizam-se:

- (a) fontes bibliográficas (artigos, livros, teses e normas técnicas), que fundamentam o referencial teórico;
- (b) o software PSIM Demo, empregado para simulações de circuitos de acionamento e regeneração;
- (c) registros numéricos gerados pelas simulações, que constituem a base para a análise quantitativa.

Os dados obtidos são organizados em quadros, tabelas e gráficos produzidos a partir das simulações, permitindo correlacionar regimes de operação, fluxos de energia, perdas e eficiência global. A análise dos dados segue abordagem dedutiva, comparando diferentes regimes e verificando a coerência entre os resultados e a literatura. Por fim, os resultados são interpretados para determinar a viabilidade energética da frenagem regenerativa.

3.1. Regime de Geração de Energia (Regeneração / Frenagem)

A investigação deste regime fundamenta-se na coleta de dados bibliográficos

referentes ao comportamento do motor elétrico quando submetido a condições em que forças gravitacionais ou inerciais promovem movimento favorável. A partir das obras de Bau Filho (2011) e Quevedo e Numata (2018), organiza-se o conhecimento sobre a conversão de energia cinética e potencial em energia elétrica, caracterizando o processo regenerativo em elevadores.

A análise desses dados consiste em identificar situações operacionais que favorecem a regeneração — subida com carga reduzida, descida com carga elevada e desaceleração — e comparar seus efeitos energéticos. Em seguida, os dados teóricos são interpretados para compreender como a energia elétrica recuperada pode ser conduzida, armazenada ou devolvida à rede, destacando a eficiência do processo.

A interpretação global demonstra que, conforme a literatura, o aproveitamento energético pode alcançar reduções de até 30% no consumo total, reforçando a relevância do estudo para aplicações práticas em edificações.

3.1.1. Regime de Repouso (Standby)

Neste item, a coleta de dados ocorre principalmente em fontes bibliográficas (Troller, 2015), que descrevem os consumos elétricos associados ao elevador parado. Os dados levantados são organizados descrevendo os sistemas permanentes ativos — iluminação, controle e circuitos auxiliares.

A análise desses dados permite estimar o impacto energético do período de inatividade, especialmente em edifícios com baixo número de viagens diárias. A interpretação dos resultados destaca que o consumo em standby representa parcela relevante do gasto total, demandando estratégias de otimização.

3.1.2. Regimes Transitórios (Partida e Parada)

Os dados para este item são coletados em literatura técnica especializada (Bau Filho, 2011), detalhando os comportamentos de corrente e torque em regimes transitórios. Em seguida, são organizados segundo as tecnologias de controle analisadas (VVVF e AC2), evidenciando diferenças de desempenho.

A análise dos dados compreende a comparação entre técnicas de frenagem — dinâmica, por fluxo, por corrente contínua, contracorrente e regenerativa — e seus efeitos sobre perdas energéticas. A interpretação final evidencia que a frenagem regenerativa é o método mais eficiente, pois transforma parte da energia mecânica em elétrica em vez de dissipá-la como calor.

3.1.3. Frenagem Regenerativa Aplicada a Elevadores

A coleta de dados inclui artigos, relatórios técnicos e obras especializadas sobre inversores bidirecionais e controle VVVF, conforme Quevedo e Numata (2018). Esses dados são organizados para demonstrar o fluxo bidirecional de energia e a conversão no barramento CC durante a regeneração.

A análise envolve comparar as perdas inerentes aos componentes eletrônicos e mecânicos, estimando o ganho energético proporcionado pela tecnologia. A interpretação dos resultados indica que a frenagem regenerativa pode reduzir o consumo total em aproximadamente 30% a 35%, além de diminuir perdas térmicas e impactos ambientais.

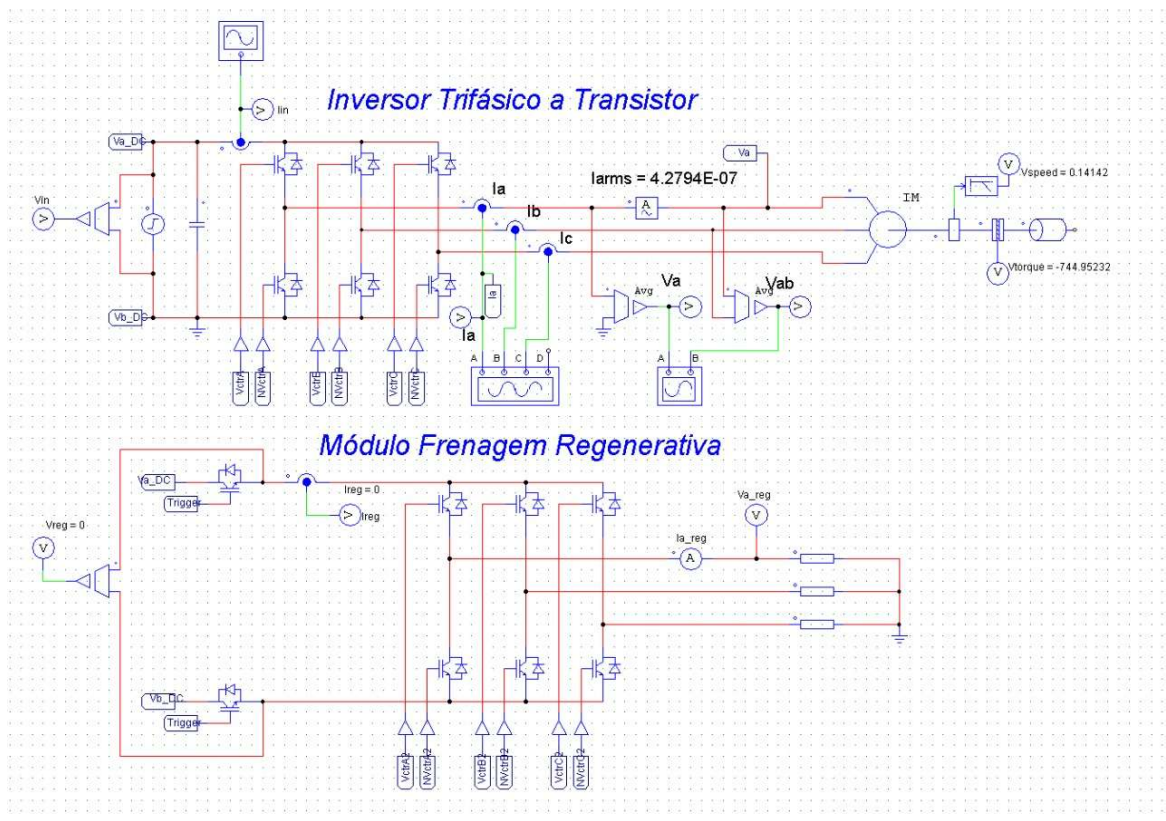
3.2. Modelagem experimental de elevador

Como material de estudo, fora modelado um circuito com elementos similares de

forma a representar um inversor e um motor, pelo software PSIM demo, realiza-se a coleta de dados experimentais por simulação, é possível registrar oscilografia e comportamento elétrico do inversor e motor. Junto ao memorial de cálculo pode-se estimar aproximação dos casos, na Figura 3 - Modelagem Circuito Inversor e Motor, ilustrado o modelo equivalente de um estudo de caso aplicavel um elevador que compõe, inversor, motor e um chopper regenerativo.

O PSIM é capaz de realizar cálculos rápidos de perdas em conversores de potência, cálculos de eficiência de acionamentos de motores, análise de EMI conduzida e controle analógico/digital. (Altair, 2025).

Figura 3 - Modelagem Circuito Inversor e Motor



Fonte: Os Autores (2025)

A Quadro 1- Parametros de modelagem do inversor e motor, apresentam os parametros do circuito representado na Figura 3 - Modelagem Circuito Inversor e Motor, para o inversor e motor fora utilizados na simulação:

Quadro 1 - Parametros de modelagem do inversor e motor

Inversor de Frequência	Unidade	Motor	Unidade
Vin:	220V	Vin:	180V
Vout:	180V	Freq.:	50Hz
Freq.Chave:	50Hz	η:	50%
Freq.Modulante:	2kHz	Carga Aplicada:	6500kg
Vmodulante:	0,56V	Velocidade Nominal:	400RPM

Fonte: Os Autores (2025)

3.3. Modelo matemático da frenagem.

3.3.1. Metodologia: Cálculo de Recuperação

O cálculo da recuperação de energia é uma etapa fundamental para quantificar a energia elétrica aproveitada durante a frenagem regenerativa e determinar a viabilidade e a eficiência do sistema, seja ele aplicado em elevadores ou trens metropolitanos (Chapman., 2013)

3.3.2. Balanço Energético Geral

A energia elétrica efetivamente consumida no sistema de tração (E_{TR}) é dada pela diferença entre a energia consumida durante a tração ($E_{TR}(+)$) e a energia recuperada durante a frenagem ($E_{TR}(-)$) (Chapman., 2013)

$$E_{TR} = E_{TR}(+) - E_{TR}(-) \quad (3)$$

A energia regenerada ($E_{TR}(-)$) por um carro (vagão) em movimento é calculada através da integração do produto da tensão de linha pela corrente de frenagem ao longo do tempo (Chapman., 2013)

$$E_{TR}(-) = \int V_{LINHA} \cdot (-1) \cdot I_{TR}(-) \cdot dt [W.s] \quad (4)$$

A energia total recuperada pelo trem é o somatório da energia recuperada de cada carro (Chapman., 2013). Durante o processo de frenagem regenerativa, a corrente reversa gerada pode ser expressa pela relação entre a força eletromotriz induzida, a tensão de linha e a impedância total da malha, conforme a Equação (5):

$$I_{FRENAGEM} = \frac{e_{IND} - V_{LINHA}}{ZT} \quad (5)$$

Onde:

- $E_{TR} (+)$ = Energia de Tração
- $E_{TR} (-)$ = Energia de Tração em fluxo reverso
- V_{LINHA} = Tensão de entrada
- $I_{FRENAGEM}$ = Corrente reversa, onde ocorre o fluxo reverso
- t = Período
- e_{IND} = Força eletromotriz induzida
- ZT = Impedância total da malha

3.3.3. Eficiência na Conversão de Energia

No caso de elevadores, a energia potencial (E_{POT}) é o ponto de partida para a recuperação, calculada pela massa (m), gravidade (g) e diferença de altura (Δh) A análise da eficiência é crítica, pois a energia potencial deve ser convertida em energia elétrica através de um sistema que considera perdas em componentes como o retificador ($\eta_R = 0,95$), o inversor ($\eta_L = 0,95$), a máquina elétrica ($\eta_M = 0,9$) e o sistema mecânico ($\eta_J = 0,9$), resultando em uma eficiência total (η_T) de aproximadamente 0,73 (ou 73%).

A energia elétrica útil máxima aproveitada é dada pelo produto da energia potencial pela eficiência total (Chapman., 2013):

$$E_{\text{RECUPERADA}} = E_{\text{POT}} \cdot \eta_T \quad (6)$$

Devido às perdas, o rendimento da conversão completa (elétrica → potencial → elétrica) é dado pelo produto dos rendimentos totais ($\eta_T \cdot \eta_T$), sendo que cerca da metade (aproximadamente 0,5 ou 50%) neste caso as perdas são as mesmas em ambos os oques é denominado como eficiência round-trip.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A simulação computacional, realizada no software PSIM, teve como objetivo analisar o comportamento dinâmico de um sistema de elevador operando sob diferentes condições de carga, com e sem a aplicação da frenagem regenerativa (F.R.). A modelagem do circuito incluiu o motor, o inversor de frequência e um chopper regenerativo, conforme os parâmetros apresentados em Quadro 2 – Comparativos Variação de carga, com e sem Frenagem Regenerativa, que serviu de base para a comparação dos resultados.

Quadro 2 – Comparativos Variação de carga, com e sem Frenagem Regenerativa

Tipo de sistemas	Sistema com F.R. em capacidade máxima	Sistema com F.R. em capacidade mínima	Sistema sem F.R. em capacidade máxima	Sistema sem F.R. em capacidade mínima
Massa total	$M=600+\Delta 600\text{kg}$	$M=600+\Delta 0\text{kg}$	$M=600+\Delta 600\text{kg}$	$M=600+\Delta 0\text{kg}$
Desnível durante a frenagem	$\Delta h= 6,5 \text{ m}$	$\Delta h= 6,5 \text{ m}$	$\Delta h= 6,5 \text{ m}$	$\Delta h= 6,5 \text{ m}$
Tensão de entrada	$180 \cdot \sqrt{2}$	$180 \cdot \sqrt{2}$	$180 \cdot \sqrt{2}$	$180 \cdot \sqrt{2}$
Corrente de frenagem	281,45	281,45	-	-
T(total simulação)	4s	4s	4s	4s
T(Aceleração+regime)	1s	1s	1s	1s
T(Frenagem)	0,1s	0,1s	0,1s	0,1s
Eficiência do retificador	1	1	1	1
Eficiência do inversor	1	1	1	1
Eficiência da máquina elétrica	0,82	0,82	0,82	0,82
Eficiência mecânica	1	1	1	1
Eficiência total	0,82	0,82	0,82	0,82
Energia recuperada ($E_{\text{POT}} \cdot \eta_T$)				
Tensão regenerada	146,45Vrms	146,45Vrms	-	-
Energia convertida ($V \cdot I \cdot t$)	4,12kVA	4,12kVA	-	-

Fonte: Os Autores (2025)

De acordo com os dados obtidos, o sistema com F.R. apresentou uma corrente média de frenagem de 281,45 A, tensão regenerada de 146,45 Vrms e energia convertida equivalente a 4,12 kVA durante o intervalo de 0,1 s de frenagem. Esses resultados evidenciam o processo de recuperação de energia que, no sistema convencional, seria dissipada sob forma de calor em resistores de frenagem.

Comparando os cenários, nota-se que o sistema regenerativo apresentou maior eficiência global, com rendimento médio de 82%, enquanto o sistema sem regeneração não apresentou aproveitamento energético, resultando em perdas térmicas elevadas e menor estabilidade operacional. A eficiência total (η_T) foi calculada considerando o produto dos

rendimentos individuais dos componentes (retificador, inversor, máquina elétrica e sistema mecânico), resultando em um aproveitamento energético significativo.

Os resultados confirmam o comportamento teórico previsto: durante o processo de frenagem, o motor de indução passa a operar como gerador, devolvendo parte da energia cinética ao sistema elétrico. Essa energia pode ser reinjetada na rede CA ou armazenada em dispositivos de energia, como capacitores ou supercapacitores, conforme proposto por Quevedo e Numata (2018).

Além da eficiência energética, a frenagem regenerativa contribui para a melhoria da qualidade da energia elétrica, reduzindo distorções harmônicas (*THD*) e mantendo o fator de potência próximo de 1,0, conforme exigido pela IEEE 519-2022 e pelo PRODIST (Aneel, 2020). Observou-se ainda que o uso de inversores bidirecionais (topologia *Active Front End* – *AFE*) reduz significativamente o aquecimento dos componentes e aumenta a vida útil do sistema.

Em termos ambientais e econômicos, os ganhos são expressivos: a redução de consumo energético implica diminuição direta das emissões de CO₂, reforçando o compromisso com práticas sustentáveis e com a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia (Lei nº 10.295/2001). Embora a tecnologia *AFE* apresente custo inicial mais elevado, o retorno é obtido a médio prazo pela economia operacional e redução da demanda de energia da rede.

Portanto, os resultados demonstram que a aplicação da frenagem regenerativa em elevadores é tecnicamente eficaz, energeticamente eficiente e ambientalmente vantajosa, consolidando-se como uma solução moderna e sustentável para sistemas de acionamento elétrico.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho de conclusão de curso investigou a aplicação da frenagem regenerativa em motores elétricos, com foco específico em sistemas de elevadores, com o objetivo de mensurar o impacto na eficiência e na redução do consumo energético. Para atingir esse propósito, a pesquisa foi estruturada em uma revisão teórica detalhada sobre as tecnologias de regeneração (como o *Active Front End* – *AFE*) e em um modelo de simulação computacional desenvolvido no software PSIM. O método baseou-se na análise comparativa dos resultados obtidos em cenários com e sem frenagem regenerativa, confrontando o desempenho em termos de aproveitamento energético, distorções harmônicas e qualidade da energia.

Os resultados demonstram de forma conclusiva que a frenagem regenerativa é uma solução técnica e economicamente viável para sistemas de transporte vertical. A modelagem e simulação comprovaram que o sistema regenerativo apresenta desempenho superior, com aproveitamento médio de 73% da energia potencial convertida em elétrica, o que pode representar uma economia estimada entre 30% e 35% no consumo global de energia. Constatou-se que a adoção de inversores com a tecnologia *AFE* é crucial, pois ela não apenas permite o fluxo bidirecional de potência e a regeneração, mas também assegura o controle do fator de potência e a mitigação das distorções harmônicas (*THD*), alinhando o sistema às exigências das normas ABNT, IEEE 519-2022 e ISO 50001:2018. Em essência, o estudo confirma que essa tecnologia é fundamental para a modernização, estabilidade, eficiência energética e sustentabilidade dos sistemas elétricos contemporâneos.

No entanto, o estudo encontrou limitações inerentes à sua natureza devido o foco na modelagem computacional que limitou a validação em um ambiente prático real.

Para a continuidade deste trabalho, sugere-se que as investigações futuras sigam algumas frentes importantes. A primeira é a exploração da viabilidade de armazenamento da

energia recuperada em capacitores ou supercapacitores, em vez de apenas reinjetá-la na rede CA, visando otimizar o uso e reduzir a dependência da injeção direta. É fundamental também focar no dimensionamento adequado e prático do sistema regenerativo, considerando o risco de o fluxo reverso excessivo exceder a capacidade nominal do transformador e, conseqüentemente, gerar perdas elétricas indesejadas. Por fim, propõe-se o desenvolvimento de um modelo didático de referência a partir deste estudo, visando preencher as lacunas de conhecimento técnico e servir como recurso de aprendizado em nível de graduação, conforme motivado inicialmente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Professora Silvana Julia da Silveira Diniz pela orientação, incentivo e acompanhamento durante o desenvolvimento do trabalho, bem como à Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica pelo apoio institucional e pela disponibilização dos recursos necessários à execução deste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6022**: informação e documentação - artigo em publicação periódica técnica e/ou científica - apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14724**: informação e documentação - trabalhos acadêmicos - apresentação. 3. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14724**: informação e documentação - trabalhos acadêmicos - apresentação. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2005

DALLAMUTA, João. **Engenharia Elétrica: O Mundo Sob Perspectivas Avançadas**. Ponta Grossa - Paraná - Brasil: Atena, 2021.

Eletrobrás / PROCEL EDUCAÇÃO. **Eficiência Energética**. 1. ed.: Universidade Federal e Itajubá – UNIFEI:FUPAI, 2007

UMANS, Stephen D. Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7. ed.: Porto Alegre: AMGH, Bookman, 2014

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed.: Porto Alegre: AMGH, Bookman, 2013

RIZZONI, Giorgio. Fundamentals of Electrical Engineering. McGraw-Hill Companies, 2009

De PAIVA, Marcus Vinícius. Supercapacitores Como Opção No Controle de Tensão e Reaproveitamento de Energia Proveniente da Frenagem Regenerativa de Trens Metropolitanos. São João del-Rei-MG-Brasil, julho de 2019. Disponível em: <<https://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppgel/208-2019-07-15-DissertacaoMarcusVinicius.pdf>>

FILHO, Plínio Carlos Baú. Projeto de Diplomação: Frenagem Regenerativa. Porto Alegre, dezembro de 2011. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/65616>>

BRASIL. Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 out. 2001. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/110295.htm. Acesso em: 27/09/2025.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica. 11.^a rev. Brasília, 2020. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/prodist>. Acesso em: 27/09/2025

SANTOS, Bruno Allan Galvão dos. Controle Digital de um Retificador Trifásico Híbrido com Elevado Fator de Potência e Regeneração de Energia. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Eletrônica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2016, 93 p..

SOUZA JUNIOR, Paulo Antonio de. Frenagem Dinâmica e Regenerativa da Máquina de

Corrente Contínua. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia, Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2019. (O trabalho cita outras referências em seu corpo, como A. J. J. REZEK et al., 1996, e BROWN, Mark, 2005, em relação a figuras e conceitos específicos).

ABB. Technical guide No. 31: Power quality – harmonics and filtering handbook. Zurich: ABB, 2020.

IEEE. IEEE Standard 519-2022: IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. New York: IEEE, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 50001:2018 — Sistemas de gestão de energia: Requisitos com orientação para uso. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

BOLDEA, I.; NASAR, S. A. Electric Drives. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.