

SISTEMAS DE FRENAGEM EM VAGÕES FERROVIÁRIOS: TECNOLOGIAS E DESAFIOS

Acsa Karoline Silva Tosta Souza¹, Isadora Potiguara Gotardo²

¹ Acadêmica do curso de Engenharia Mecânica

² Mestre e Graduado em Sistemas de Informação – Docente Multivix - Serra

RESUMO

Este estudo analisa as principais tecnologias de frenagem aplicadas a vagões ferroviários, destacando sua relevância para a segurança operacional e o desempenho logístico do setor. A pesquisa tem como objetivo identificar os sistemas de frenagem empregados em composições de carga, avaliar seus fundamentos técnicos, discutir os desafios operacionais enfrentados em ambientes brasileiros e investigar inovações tecnológicas voltadas à eficiência energética e à manutenção preditiva. A metodologia adotada corresponde a uma pesquisa bibliográfica de abordagem qualitativa, fundamentada na análise de conteúdo de publicações disponíveis em bases como SciELO, Google Acadêmico, Periódicos da CAPES e outros repositórios acadêmicos, com recorte temporal entre 2020 e 2025. Os critérios de inclusão consideraram documentos completos, em língua portuguesa, com rigor metodológico e aplicabilidade prática. Os resultados evidenciam a presença de soluções tradicionais, como freios pneumáticos, ao lado de propostas inovadoras, a exemplo da frenagem regenerativa e do uso de inteligência artificial para monitoramento de falhas. Observou-se que, embora as novas tecnologias apresentem potencial para otimizar a operação ferroviária, sua adoção ainda enfrenta barreiras técnicas, estruturais e financeiras. Conclui-se que o desenvolvimento de sistemas de frenagem mais eficientes demanda investimentos contínuos em pesquisa, integração interdisciplinar e adequação às realidades operacionais locais.

Palavras-Chave: frenagem ferroviária; desafios; inovação tecnológica.

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de frenagem utilizados em vagões ferroviários representam um componente técnico essencial para garantir a segurança e a confiabilidade nas operações de transporte de carga. Em um contexto de modernização da malha ferroviária e de crescente demanda por eficiência energética, torna-se imprescindível compreender os tipos de tecnologias de frenagem empregadas, suas limitações e o potencial de otimização desses sistemas. Soluções como a frenagem dinâmica e a regeneração de energia têm se destacado nas pesquisas aplicadas ao setor ferroviário (Champoski, 2024; Amorim; Salles; Santos, 2020).

A escolha do tema se justifica pela necessidade de aprimorar os processos logísticos ferroviários, reduzindo custos operacionais e aumentando a vida útil dos componentes mecânicos. Nesse sentido, estudos como os de Amaral (2021) e Nascimento, Miranda e Silva (2022) apontam o uso de tecnologias inteligentes a exemplo de redes neurais e algoritmos de aprendizado de máquina como ferramentas promissoras para prever falhas e melhorar a resposta dos sistemas de frenagem em tempo real. Assim, este trabalho contribui para a ampliação do conhecimento técnico e científico voltado à inovação na engenharia ferroviária.

Este estudo delimita-se à investigação das tecnologias de frenagem empregadas em vagões ferroviários de carga, com ênfase na identificação de seus principais desafios técnicos e operacionais. Inclui-se a análise de sistemas convencionais, como os freios pneumáticos, e alternativas inovadoras como os freios regenerativos e ABS (Silva, 2021; UFSM, 2021). Para tanto, consideram-se aplicações reais em contextos operacionais, com base em simulações e modelos aplicados a composições ferroviárias (Silva, 2022; Gubert, 2020).

A questão norteadora da pesquisa consiste em: quais são as tecnologias de frenagem mais adequadas aos vagões ferroviários modernos, e quais desafios comprometem sua eficiência, segurança e viabilidade energética?

Dessa forma, o objetivo geral deste estudo é analisar as principais tecnologias de frenagem aplicadas a vagões ferroviários, considerando seus princípios de funcionamento, benefícios e limitações. Como objetivos específicos, propõem-se: identificar os sistemas de frenagem utilizados nos vagões ferroviários de carga e seus fundamentos técnicos; avaliar os desafios enfrentados na aplicação desses sistemas em ambientes operacionais brasileiros; e investigar soluções tecnológicas emergentes, como frenagem regenerativa e inteligência artificial, voltadas à otimização da segurança e do desempenho ferroviário.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 FUNDAMENTOS DOS SISTEMAS DE FRENAGEM FERROVIÁRIA

Os sistemas de frenagem ferroviária consistem em conjuntos de dispositivos e mecanismos projetados para reduzir ou cessar a velocidade das composições de forma segura, controlada e eficiente. Eles são indispensáveis para garantir a integridade da carga, da infraestrutura ferroviária e da própria operação. De acordo com Gubert (2020), o princípio fundamental da frenagem baseia-se na conversão da

energia cinética em calor, promovida pela aplicação de força mecânica ou eletrodinâmica sobre os eixos ou rodas dos vagões. E a respeito de suas funções:

As três funções de um sistema de frenagem são: promover a desaceleração do veículo, manter a velocidade constante em descidas e impedir o deslocamento quando o veículo estiver parado. A distribuição da força de frenagem, o tipo de pneu e de solo e a distância de frenagem, são alguns dos fatores que influenciam na desaceleração. Os componentes de um sistema de frenagem hidráulico podem ser divididos em quatro grupos: os que produzem, armazenam e disponibilizam energia para a frenagem; os que aplicam e controlam a energia; os componentes de transmissão de energia; os que produzem força contrária ao movimento do carro (Gubert, 2020, p. 14).

Um sistema hidráulico pode operar com base no Princípio de Pascal, o qual permite a amplificação de força. Considerando um sistema formado por dois êmbolos conectados e preenchido com um fluido incompressível, como ilustrado na Figura 4, a pressão aplicada distribui-se igualmente por todo o líquido. Assim, ao exercer uma força F_1 sobre o primeiro pistão, de menor área (A_1), obtém-se uma força resultante F_2 , de sentido oposto, aplicada sobre o segundo pistão, cuja área (A_2) é maior. A relação entre as forças é diretamente proporcional à razão entre as áreas dos pistões (Gubert, 2020), conforme descrito na Equação abaixo:

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

Esse princípio é amplamente utilizado em dispositivos de elevação e frenagem hidráulica, incluindo sistemas ferroviários que exigem força controlada com precisão. Gubert (2020) destaca que a eficiência desses sistemas depende não apenas da integridade do fluido e da vedação dos componentes, mas também da correta relação entre as áreas dos pistões, garantindo que o aumento de força ocorra conforme previsto pela equação. A aplicação do Princípio de Pascal em contextos industriais demonstra sua relevância prática na engenharia, proporcionando vantagens em termos de controle, segurança e aproveitamento da força mecânica.

Outrossim, o tipo mais amplamente utilizado nos sistemas ferroviários de carga é o freio pneumático. Conforme Silva (2022), esse sistema emprega a variação da pressão do ar comprimido em uma tubulação longitudinal para ativar os cilindros de freio instalados em cada vagão. Ao ser acionado, o sistema distribui ar dos reservatórios para os cilindros, comprimindo molas e forçando as sapatas contra as rodas ou os discos, gerando atrito e conseqüente desaceleração. Ainda:

Além do funcionamento tradicional, o sistema pneumático também incorpora elementos de segurança. Um dos principais recursos é o freio de emergência, ativado automaticamente em caso de rompimento do tubo principal, garantindo a frenagem de toda a composição. Reis e Varejão (2023) observaram que falhas nesses sistemas, como vazamentos ou perda de pressão, podem ser detectadas por meio de sinais acústicos, cuja interpretação atualmente pode ser auxiliada por ferramentas de análise de som aplicadas durante as inspeções.

Uma das alternativas à frenagem convencional é a frenagem dinâmica, especialmente em locomotivas diesel-elétricas. Segundo Champoski (2024), essa tecnologia utiliza os motores de tração em modo gerador durante a desaceleração, convertendo a energia cinética em energia elétrica. A energia gerada é dissipada em resistores, contribuindo para reduzir o esforço sobre os freios mecânicos e melhorando a estabilidade da composição durante a frenagem.

Essa conversão de energia, no entanto, pode ser mais eficiente quando associada a sistemas de frenagem regenerativa. Amorim, Salles e Santos (2020) desenvolveram um modelo de simulação que demonstrou o potencial de armazenar a energia gerada durante a frenagem em acumuladores, como baterias ou supercapacitores. Essa abordagem permite não apenas a redução do consumo de combustível, mas também menor desgaste dos componentes mecânicos (Amorim; Salles; Santos, 2020).

A complexidade dos sistemas de frenagem exige a aplicação de tecnologias de controle e monitoramento. Amaral (2021), ao tratar da classificação de trincas em engates metálicos, demonstrou a viabilidade de utilizar redes neurais artificiais para identificar falhas em estruturas ferroviárias. Embora seu estudo tenha tido outro foco, a metodologia pode ser aplicada ao diagnóstico de anomalias em componentes do sistema de frenagem, como válvulas, conexões e tubulações.

O uso de freios com controle automatizado, como o ABS (Sistema de Freios Anti-Bloqueio), também tem sido proposto para composições ferroviárias. De acordo com a Universidade Federal de Santa Maria (2021), essa tecnologia permite evitar o travamento das rodas durante a frenagem, garantindo maior aderência aos trilhos e menor risco de descarrilamento, especialmente em frenagens emergenciais ou em condições de baixa aderência.

Os fundamentos da frenagem também envolvem a análise ambiental do sistema em operação. Lima (2020), em seu estudo sobre nanopartículas e black

carbon em plataformas ferroviárias, evidenciou que a aplicação dos sistemas de freio contribui significativamente para a liberação de partículas no ambiente. Isso demonstra que, além da eficiência operacional, os sistemas de frenagem também devem ser avaliados quanto aos impactos ambientais gerados durante seu funcionamento.

2.2 INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS APLICADAS À FRENAGEM FERROVIÁRIA

A busca por maior segurança, eficiência e sustentabilidade operacional tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias inovadoras aplicadas aos sistemas de frenagem ferroviária. As composições modernas exigem respostas mais rápidas e precisas dos mecanismos de frenagem, o que motivou a adoção de soluções como a frenagem regenerativa, a integração com inteligência artificial e o uso de sensores em tempo real. Essas inovações têm transformado o modo como a frenagem é concebida e monitorada no transporte ferroviário contemporâneo (Champoski, 2024).

Uma das principais inovações aplicadas ao setor é a frenagem regenerativa, que permite a conversão da energia cinética gerada durante a desaceleração em energia elétrica. Amorim, Salles e Santos (2020) demonstraram, por meio de modelagem computacional, que a energia gerada nesse processo pode ser armazenada em baterias ou supercapacitores para ser reutilizada posteriormente no acionamento de cargas auxiliares. Essa tecnologia, além de reduzir o consumo de combustível, contribui para o aumento da autonomia energética e menor desgaste de componentes mecânicos (Amorim; Salles; Santos, 2020).

O estudo conduzido por Champoski (2024) reforça os benefícios operacionais da frenagem regenerativa em locomotivas diesel-elétricas, evidenciando seu potencial de integração com sistemas de controle e monitoramento energético. A recuperação de energia, quando devidamente gerida, pode representar uma importante estratégia de eficiência em rotas longas e em trechos com declividades acentuadas, otimizando a operação e reduzindo o impacto ambiental.

Outra frente de inovação refere-se à aplicação de inteligência artificial para o diagnóstico e a manutenção preditiva dos sistemas de frenagem. Amaral (2021), ao empregar redes neurais artificiais na detecção de trincas em engates metálicos, evidenciou que algoritmos de aprendizado de máquina podem ser utilizados para reconhecer padrões de falhas, antecipando intervenções e evitando falhas críticas. Essa abordagem pode ser adaptada aos componentes dos sistemas de freio, como

válvulas, cilindros e tubulações, contribuindo para a confiabilidade do sistema. Nestes sistemas de redes neurais:

O funcionamento normal da válvula de freio consiste na conversão dos sinais de pressão em força de frenagem aplicada à roda do vagão. A válvula compara a pressão da tubulação de freio (BP) com a do reservatório auxiliar (AR) e aciona os freios conforme a diferença de pressão. Se a pressão da tubulação de freio for aumentada em pelo menos 1,5 psi, a válvula libera a pressão no cilindro de freio e preenche o reservatório auxiliar com a pressão proveniente da tubulação de freio (Lopes, 2020, p. 43).

Da mesma forma, Nascimento, Miranda e Silva Júnior (2022) aplicaram técnicas de aprendizado de máquina para prever a permanência de vagões em terminais de carga, utilizando modelos baseados em dados operacionais. Essa lógica pode ser estendida ao controle de frenagem, otimizando os tempos de parada e reduzindo o risco de sobrecarga nos componentes do sistema. O uso de IA em operações ferroviárias demonstra ser uma alternativa viável para reduzir falhas operacionais e elevar a eficiência logística (Nascimento; Miranda; Silva Júnior, 2022).

Sensores acústicos e de pressão também têm sido incorporados às composições como elementos de monitoramento contínuo. Reis e Varejão (2023) apresentaram um modelo de detecção de vazamentos em freios a ar por meio da análise de sinais sonoros, demonstrando como o processamento acústico pode identificar falhas imperceptíveis ao ouvido humano. Essa tecnologia é especialmente útil em inspeções rápidas e em vagões submetidos a longas jornadas operacionais, aumentando a segurança da frota com custo reduzido.

O uso de sistemas embarcados capazes de registrar, processar e enviar dados em tempo real é outro avanço relevante. De acordo com Silva (2021), a integração de sistemas inteligentes à frenagem regenerativa permite não apenas o reaproveitamento da energia, mas também o controle preciso das respostas de frenagem, adaptando a força aplicada conforme as condições do trajeto. Esse tipo de automação favorece decisões operacionais mais seguras e personalizadas, diminuindo a intervenção humana direta.

Isto posto, o desenvolvimento de sistemas híbridos e a possibilidade de combinação entre diferentes formas de frenagem como a pneumática, a regenerativa e a eletrodinâmica têm sido objeto de pesquisas voltadas à maximização da eficiência. Amorim, Salles e Santos (2020) demonstraram que modelos híbridos podem ser otimizados conforme as demandas de carga e relevo, oferecendo respostas mais adaptativas à operação. Tais inovações, quando aliadas à digitalização

dos processos, representam um avanço significativo na evolução tecnológica da frenagem ferroviária.

2.3 DESAFIOS OPERACIONAIS E MANUTENÇÃO DOS SISTEMAS DE FRENAGEM EM VAGÕES FERROVIÁRIOS

Os sistemas de frenagem em vagões ferroviários estão sujeitos a diversas condições operacionais que comprometem sua eficiência ao longo do tempo. O funcionamento contínuo sob diferentes cargas, temperaturas, umidade e extensão da composição impõe desafios específicos à durabilidade e à confiabilidade desses mecanismos. Gubert (2020) destaca que o atrito constante entre as sapatas e as rodas causa desgaste progressivo dos materiais, exigindo inspeções frequentes e intervenções programadas.

Uma das principais dificuldades enfrentadas em campo é a detecção de falhas antes que comprometam a segurança operacional. Vazamentos de ar, perda de pressão nos reservatórios e resposta tardia na aplicação do freio são ocorrências comuns, especialmente em sistemas pneumáticos mais antigos. De acordo com Reis e Varejão (2023), a identificação desses problemas pode ser feita por meio da análise de sinais acústicos, permitindo maior precisão no diagnóstico e reduzindo o tempo de inatividade dos vagões.

Outro aspecto crítico envolve a sincronização da frenagem em composições extensas. Diferenças no tempo de atuação dos freios entre os vagões podem gerar esforços mecânicos desiguais, levando à fadiga de engates e componentes estruturais. Silva (2022) ressalta que falhas nesse equilíbrio comprometem não apenas a eficiência da frenagem, mas também a integridade do conjunto ferroviário, podendo resultar em descarrilamentos ou avarias na carga.

Além das falhas mecânicas, o acúmulo de partículas e resíduos também influencia no desempenho dos freios. Lima (2020), ao estudar a presença de nanopartículas em ambientes ferroviários, evidenciou que a atuação dos sistemas de frenagem contribui para a emissão de material particulado, o qual pode se acumular nos componentes e reduzir sua vida útil. Tal condição reforça a necessidade de manutenção sistemática e controle ambiental nas áreas de atuação ferroviária. Ainda:

Algumas vezes se faz necessária a utilização de peças usadas, economicamente mais viável, ao invés de alguma peça que traria um benefício técnico maior ao projeto. Adequar a necessidade de determinado componente com as possibilidades financeiras da equipe é um grande desafio nesta parte do projeto (Gubert, 2020, p. 27).

Essa constatação reforça a importância de estratégias de adaptação e otimização na construção de sistemas de freio em contextos acadêmicos e experimentais. A capacidade de adequar soluções técnicas à realidade orçamentária da equipe revela habilidades fundamentais de engenharia aplicada, como criatividade, análise crítica e gestão de recursos. Ainda segundo Gubert (2020), mesmo diante de limitações, é possível alcançar bons níveis de desempenho funcional quando há planejamento e compreensão técnica adequada dos materiais e mecanismos empregados.

A manutenção preventiva é uma das estratégias mais eficazes para mitigar esses riscos. Essa prática envolve inspeções periódicas, substituição programada de peças e calibração de sensores e válvulas. Amaral (2021) defende o uso de inteligência artificial para aprimorar a manutenção preditiva, aplicando redes neurais na detecção precoce de falhas estruturais. Essa abordagem pode ser estendida aos sistemas de freio, contribuindo para evitar paradas inesperadas e melhorar a segurança da operação.

Os desafios se intensificam quando se trata da regeneração de energia nos sistemas de frenagem. Champoski (2024) destaca que, embora a frenagem regenerativa traga benefícios energéticos e ambientais, ela exige maior complexidade no gerenciamento dos fluxos de energia e na manutenção dos componentes eletrônicos. A interação entre sistemas mecânicos, elétricos e eletrônicos demanda mão de obra especializada e ferramentas específicas de diagnóstico.

Nesse mesmo contexto, Amorim, Salles e Santos (2020) argumentam que a utilização de acumuladores de energia, como baterias ou supercapacitores, requer monitoramento constante da carga, temperatura e estado de saúde desses dispositivos. Caso contrário, falhas nesses elementos podem comprometer o funcionamento da frenagem regenerativa e afetar diretamente o desempenho da locomotiva (Amorim; Salles; Santos, 2020).

A variação de pressão atmosférica e temperatura também representa um fator importante nos desafios operacionais. Em ambientes de altitude elevada ou clima extremo, a atuação dos freios pode ser prejudicada pela expansão ou contração dos componentes pneumáticos. UFSM (2021) menciona que o uso de sistemas de controle automático, como os freios ABS adaptados ao contexto ferroviário, pode auxiliar na estabilidade da frenagem nesses cenários adversos.

As dificuldades operacionais ainda envolvem a logística de manutenção em regiões remotas. Vagões que percorrem longas distâncias em áreas de difícil acesso enfrentam limitações quanto à disponibilidade de peças e técnicos especializados. Nesse sentido, Silva (2021) aponta que a integração de sistemas inteligentes e a digitalização dos dados de freio favorecem a gestão remota e o planejamento de intervenções técnicas com maior precisão e agilidade.

Deste modo, os desafios operacionais e de manutenção dos sistemas de frenagem em vagões ferroviários evidenciam a necessidade de investimentos contínuos em inovação, capacitação e monitoramento. A combinação de estratégias preventivas, ferramentas tecnológicas e boas práticas operacionais representa o caminho mais eficaz para garantir a segurança, a eficiência e a longevidade desses sistemas no transporte ferroviário de cargas.

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa caracteriza-se como bibliográfica, com abordagem qualitativa, voltada à compreensão das estratégias de desenvolvimento, adaptação e manutenção de sistemas de frenagem ferroviária e experimental em contextos acadêmicos e operacionais. Esse tipo de investigação segundo Severino (2021) permite o aprofundamento teórico a partir da análise de produções já publicadas, favorecendo a construção de um referencial que dialoga com os desafios técnicos e econômicos enfrentados por equipes de engenharia. A natureza qualitativa se justifica pela intenção de interpretar os significados, implicações e padrões presentes nos documentos analisados, superando a mera quantificação de dados.

A coleta de dados foi realizada por meio de buscas sistematizadas nas bases SciELO, Google Acadêmico e Periódicos da CAPES, priorizando estudos publicados entre os anos de 2020 a 2025, considerando o recorte dos últimos cinco anos como período representativo das inovações recentes e desafios atuais. As palavras-chave utilizadas incluíram termos como "sistema de frenagem", "engenharia ferroviária", "frenagem regenerativa", "manutenção de freios" e "projetos acadêmicos de freio". As buscas foram filtradas por idioma, restringindo-se à língua portuguesa, e por acesso completo ao conteúdo integral.

Os critérios de inclusão adotados foram: publicações com texto completo disponível, relevância temática comprovada por alinhamento direto com o objeto de estudo, clareza metodológica e atualidade, considerando o contexto tecnológico em constante transformação. Foram excluídos estudos duplicados, revisões superficiais

ou trabalhos com abordagem divergente da proposta investigativa. A seleção final resultou em um conjunto consistente de materiais que permitiu a formação de uma base sólida para análise.

A análise dos dados foi conduzida por meio da análise de conteúdo, método adequado para estudos qualitativos voltados à identificação de categorias temáticas emergentes nos textos analisados. Essa técnica possibilitou a organização dos achados segundo eixos como funcionalidade dos sistemas, inovação, desafios operacionais e estratégias de adaptação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Objetivando sintetizar os dados obtidos na análise de conteúdo das produções selecionadas, formulou-se a Tabela 1 abaixo, a fim de apresentar os principais resultados identificados nas publicações analisadas entre 2020 e 2025. Assim, observa-se como diferentes autores abordam estratégias de otimização, frenagem regenerativa, manutenção preditiva e impactos ambientais nos sistemas de frenagem ferroviária, destacando tecnologias e desafios:

Tabela 1 – Principais resultados identificados nas produções analisadas

Autor/Ano	Título	Principais resultados identificados
Amaral (2021)	Emprego e otimização de redes neurais artificiais na classificação de trincas detectadas por ultrassom em engates metálicos de vagões ferroviários	Redes neurais mostraram-se eficazes na identificação automatizada de trincas estruturais.
Amorim, Salles e Santos (2020)	Modelagem híbrida de um sistema de regeneração de energia de frenagem em locomotivas diesel-elétricas	Sistema híbrido com baterias gerou economia de combustível e melhor aproveitamento da energia de frenagem.
Champoski (2024)	Análise do potencial de regeneração de energia através do freio dinâmico em locomotivas diesel-elétricas	A frenagem regenerativa permite recuperação energética significativa em locomotivas diesel-elétricas.

Gubert (2020)	Projeto do sistema de frenagem de um veículo tipo Baja SAE	Adaptação de componentes a partir da disponibilidade financeira foi essencial no projeto de frenagem do Baja SAE.
Lima (2020)	Estudo de nanopartículas e black carbon em ambientes ferroviários através de técnicas em tempo real e sensoriamento remoto proximal	A frenagem contribui para emissão de partículas, revelando impactos ambientais do sistema.
Nascimento, Miranda e Silva Júnior (2022)	Aplicação de aprendizagem de máquina para predição da permanência de vagões em terminal de carregamento de minério de ferro	Machine learning é eficaz na predição de tempo de permanência de vagões, podendo ser adaptado à frenagem.
Reis e Varejão (2023)	Detecção de vazamentos de fluidos de freios a ar em vagões do tipo gôndola através do sinal acústico: um modelo de classificação de falhas	Classificador acústico detecta vazamentos com alta precisão, útil para manutenção de freios a ar.
Silva, Gabriel H. (2021)	Frenagem regenerativa: estudo de tecnologias de frenagem regenerativa	Tecnologia regenerativa pode otimizar sistemas ferroviários ao reduzir desgaste e aumentar eficiência energética.
Silva, Neilessandra (2022)	Desenvolvimento de um modelo de simulação para melhoria do desempenho na descarga de vagões de ferro gusa	Simulação apontou gargalos operacionais e sugeriu ajustes no fluxo de descarga ferroviária.

Fonte: produzido por autora (2025)

A análise dos fundamentos técnicos dos sistemas de frenagem revela, inicialmente, convergência entre os estudos de Champoski (2024) e Silva, Gabriel H. (2021), ambos ressaltando a importância da frenagem regenerativa como alternativa viável para o aproveitamento energético no contexto ferroviário. Enquanto Champoski

(2024) foca em locomotivas diesel-elétricas e na redução do desperdício energético durante o processo de desaceleração, Silva (2021) amplia a discussão ao propor o uso da regeneração como mecanismo de extensão da vida útil dos componentes de frenagem. Os dois estudos dialogam ao apontar a regeneração como um avanço tecnológico, ainda que em estágios distintos de implementação.

Por outro lado, quando se observam os sistemas tradicionais, como os mecanismos pneumáticos, os resultados obtidos por Gubert (2020) e Silva, Neilessandra (2022) destacam desafios distintos. Gubert (2020) descreve um contexto acadêmico, no qual a limitação de recursos obriga a adoção de peças reaproveitadas e soluções de baixo custo, enquanto Silva (2022) trabalha com modelagens computacionais em operações ferroviárias reais, identificando gargalos nos processos de descarga que afetam a atuação dos freios. Ambos evidenciam limitações práticas, mas de perspectivas diferentes — o primeiro no contexto experimental e o segundo na esfera operacional.

Ao tratar da confiabilidade dos sistemas de frenagem, os estudos de Reis e Varejão (2023) e Amaral (2021) indicam estratégias distintas para a identificação de falhas. Reis e Varejão (2023) propõem o uso de análise acústica para detectar vazamentos em freios a ar, enquanto Amaral (2021) explora redes neurais na detecção de trincas estruturais. Embora tratem de alvos diferentes, os dois autores convergem na defesa do uso de tecnologias inteligentes como ferramentas de diagnóstico e prevenção, contribuindo para elevar o nível de segurança dos sistemas ferroviários.

Já o estudo de Lima (2020) oferece um olhar complementar ao associar os sistemas de frenagem à liberação de nanopartículas no ambiente ferroviário. Esse resultado é particularmente relevante quando comparado às propostas de Amorim, Salles e Santos (2020), que tratam da frenagem regenerativa como forma de economia energética. Enquanto o primeiro alerta para externalidades ambientais do atrito convencional, o segundo apresenta uma alternativa menos poluente. A comparação sugere que além da eficiência mecânica, as tecnologias futuras devem considerar impactos ambientais diretos e indiretos.

Amorim, Salles e Santos (2020) e Champoski (2024) convergem ao destacar os benefícios operacionais da recuperação de energia. No entanto, divergem quanto à complexidade dos sistemas. Amorim et al. trabalham com simulações híbridas que exigem controle térmico e gerencial dos acumuladores, enquanto Champoski

apresenta uma abordagem mais direta, voltada à conversão elétrica com menor dependência de dispositivos intermediários. Essa diferença evidencia a necessidade de personalização dos sistemas conforme a realidade de cada operação ferroviária.

Já no campo da previsão operacional, o estudo de Nascimento, Miranda e Silva Júnior (2022) mostra-se complementar ao de Amaral (2021), ao propor a utilização de algoritmos de aprendizado de máquina para antecipar tempos de permanência de vagões em terminais. Embora não trate diretamente de frenagem, a lógica de predição e tratamento de dados pode ser adaptada para controlar o desempenho dos sistemas de freio ao longo da composição. Ambos os trabalhos apontam para a tendência de automação e análise preditiva como caminhos promissores na manutenção ferroviária.

Gubert (2020) e Reis e Varejão (2023) também apresentam uma intersecção interessante. Enquanto o primeiro aborda os desafios da construção de um sistema de freios com recursos limitados, o segundo fornece uma solução técnica de baixo custo para detectar falhas críticas. A união dessas abordagens mostra que mesmo com restrições econômicas, é possível empregar ferramentas tecnológicas acessíveis que garantam maior confiabilidade ao sistema.

No que diz respeito ao desgaste dos componentes, Silva, Gabriel H. (2021) e Lima (2020) expõem preocupações distintas, mas complementares. Silva defende a regeneração como forma de aliviar a atuação dos freios mecânicos, enquanto Lima alerta para os resíduos lançados no ambiente pelas frenagens tradicionais. A discussão entre os dois estudos permite concluir que a regeneração, além de benefício funcional, também pode se configurar como uma estratégia ambientalmente mais responsável.

Ainda sobre o uso de ferramentas digitais, Amaral (2021) e Nascimento, Miranda e Silva Júnior (2022) defendem aplicações práticas da inteligência artificial nos sistemas ferroviários. Amaral foca em estruturas e integridade mecânica, enquanto Nascimento aplica os modelos ao fluxo logístico. A comparação dos estudos reforça o potencial da IA como uma tecnologia transversal, aplicável tanto à segurança estrutural quanto à previsão de desempenho operacional.

Reis e Varejão (2023) e Silva, Neilessandra (2022) tratam de formas distintas de monitoramento em campo. Enquanto Reis e Varejão utilizam sensores acústicos para detectar falhas pontuais, Silva usa a modelagem computacional para prever padrões operacionais. Ambas as abordagens se complementam e indicam que o

monitoramento eficiente deve considerar tanto dados pontuais em tempo real quanto análises preditivas mais amplas.

Champoski (2024) e Silva, Gabriel H. (2021) coincidem ao tratar da frenagem regenerativa, porém divergem na ênfase da aplicação. O primeiro dedica-se à eficiência energética do processo, enquanto o segundo foca na durabilidade dos sistemas e redução do desgaste. Essa distinção mostra que, embora a tecnologia seja a mesma, suas vantagens podem ser exploradas conforme a prioridade da operação — economia ou conservação.

No que diz respeito à adaptação de componentes, Gubert (2020) e Amaral (2021) compartilham o contexto de engenharia aplicada com recursos limitados. Ambos os estudos reconhecem a importância da criatividade e do conhecimento técnico para superar restrições financeiras. No entanto, enquanto Gubert destaca soluções mecânicas acessíveis, Amaral aponta para o uso de inteligência artificial como meio de compensar limitações estruturais com recursos computacionais.

Silva, Neilessandra (2022) e Amorim, Salles e Santos (2020) contribuem com abordagens distintas sobre eficiência operacional. A primeira utiliza a simulação como ferramenta de mapeamento de gargalos e otimização de fluxo; já os segundos propõem uma solução técnica com impacto direto no reaproveitamento de energia. A integração dessas abordagens reforça a ideia de que a eficiência pode ser obtida tanto pelo redesenho operacional quanto pela adoção de novos sistemas.

Lima (2020) e Reis e Varejão (2023) discutem diferentes aspectos da segurança operacional. Lima aborda riscos ambientais oriundos do uso contínuo dos freios convencionais, enquanto Reis e Varejão mostram como sensores podem prevenir falhas por meio da detecção precoce de vazamentos. Ambas as abordagens, ao seu modo, demonstram que a segurança ferroviária deve considerar tanto os impactos externos quanto as falhas internas dos sistemas.

Então, a discussão entre Nascimento, Miranda e Silva Júnior (2022) e Silva, Gabriel H. (2021) demonstra que a convergência entre análise preditiva e frenagem regenerativa é possível e desejável. Nascimento et al. apresentam um modelo preditivo aplicável ao planejamento de operação, enquanto Silva aponta os ganhos de eficiência com a regeneração. Juntos, sugerem que o futuro da frenagem ferroviária passa não só pela inovação técnica, mas pela capacidade analítica de prever, ajustar e otimizar o sistema como um todo.

Com base na análise dos estudos examinados, observa-se que as tecnologias de frenagem aplicadas a vagões ferroviários avançaram significativamente nos últimos anos, destacando-se soluções como a frenagem regenerativa, o uso de inteligência artificial para manutenção preditiva, e modelagens híbridas com acumuladores de energia, conforme apontado por Champoski (2024), Amorim, Salles e Santos (2020) e Amaral (2021). Tais inovações têm contribuído para a melhoria da eficiência energética, da segurança operacional e da durabilidade dos componentes. No entanto, os desafios ainda são expressivos: incluem desde limitações financeiras e estruturais (Gubert, 2020), emissão de partículas e impactos ambientais (Lima, 2020), até falhas operacionais e de sincronização em sistemas tradicionais de freio a ar (Silva, 2022; Reis e Varejão, 2023). A convergência dos estudos evidencia que, embora as tecnologias estejam em expansão, a plena implementação ainda requer superação de barreiras técnicas, econômicas e logísticas, especialmente em contextos ferroviários brasileiros.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O conjunto de estudos analisados permitiu uma compreensão ampla e aprofundada sobre os sistemas de frenagem em vagões ferroviários, revelando tanto os avanços tecnológicos alcançados quanto os entraves que ainda persistem na prática operacional. As pesquisas demonstraram que há um movimento consistente de modernização, impulsionado por demandas relacionadas à eficiência energética, confiabilidade dos sistemas e sustentabilidade ambiental. O desenvolvimento de soluções técnicas integradas tem se mostrado fundamental para atender aos novos padrões de exigência do setor ferroviário.

Entre as principais tecnologias mapeadas, destacam-se aquelas que buscam aliar desempenho e inteligência operacional, como os sistemas regenerativos e os mecanismos automatizados de monitoramento e controle. A utilização de algoritmos para prever falhas, a coleta de dados em tempo real e o reaproveitamento de energia gerada durante a frenagem representam marcos significativos no redesenho das práticas ferroviárias. Tais estratégias evidenciam o papel crescente da automação e da análise preditiva na construção de sistemas mais seguros e eficientes.

No entanto, os desafios enfrentados ainda são substanciais. As dificuldades vão desde limitações econômicas na implementação de tecnologias mais avançadas até a necessidade de adaptação da infraestrutura existente. Fatores como a complexidade na manutenção, a escassez de componentes específicos e a ausência

de mão de obra especializada também se apresentam como barreiras recorrentes. Além disso, os impactos ambientais gerados pelos sistemas de frenagem convencionais continuam sendo uma preocupação relevante, exigindo respostas mais sustentáveis do ponto de vista técnico e regulatório.

A análise comparativa entre diferentes abordagens demonstrou que, embora existam iniciativas promissoras em curso, ainda é necessário promover a articulação entre inovação tecnológica e viabilidade prática. A compatibilização entre soluções de alto desempenho e contextos operacionais diversos — muitas vezes marcados por restrições logísticas ou estruturais — se configura como um dos principais pontos de atenção. O investimento contínuo em pesquisa, testes em campo e capacitação técnica deve ser tratado como elemento estratégico para viabilizar mudanças duradouras.

À vista disso, a pesquisa revelou que o futuro dos sistemas de frenagem ferroviária está intrinsecamente ligado à capacidade de inovação e adaptação. A consolidação de novas tecnologias dependerá não apenas de sua eficácia isolada, mas de sua integração harmoniosa aos contextos reais de uso. Superar os entraves apontados e aplicar soluções adaptadas à realidade brasileira são passos fundamentais para alcançar um sistema ferroviário mais seguro, eficiente e sustentável a longo prazo.

REFERÊNCIAS

AMARAL, Mateus Ciríaco. **Emprego e otimização de redes neurais artificiais na classificação de trincas detectadas por ultrassom em engates metálicos de vagões ferroviários**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2021.

AMORIM, Junio C. de; SALLES, José L. F.; SANTOS, Walbermark M. dos. **Modelagem híbrida de um sistema de regeneração de energia de frenagem em locomotivas diesel-elétricas**. CBA – Congresso Brasileiro de Automática, v. 2, n. 1, 2020.

CHAMPOSKI, Daniel. **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) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2024.

GUBERT, Mateus. **Projeto do sistema de frenagem de um veículo tipo Baja SAE**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Ponta Grossa, 2020.

LIMA, Bianca Dutra de. **Estudo de nanopartículas e black carbon em ambientes ferroviários através de técnicas em tempo real e sensoriamento remoto proximal**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Porto Alegre, 2020.

NASCIMENTO, Iramar Loiola do; MIRANDA, Enrico Silva; SILVA JÚNIOR, Orivalde Soares da. **Aplicação de aprendizagem de máquina para predição da permanência de vagões em terminal de carregamento de minério de ferro**. In: V Simpósio de Engenharia Ferroviária, 18–19 maio 2022.

REIS, Jordana Lucia; VAREJÃO, Flávio Miguel. **Detecção de vazamentos de fluidos de freios a ar em vagões do tipo gôndola através do sinal acústico: um modelo de classificação de falhas**. Revista Foco (Interdisciplinary Studies Journal), v. 16, n. 5, p. 1, 2023.

SEVERINO, Antônio Joaquim. **Metodologia do trabalho científico**. São Paulo : Cortez, 2021.

SILVA, Gabriel Henrique da. **Frenagem regenerativa: estudo de tecnologias de frenagem regenerativa**. [Trabalho de Conclusão de Curso]. Londrina – PR, 2021.

SILVA, Neilessandra da. **Desenvolvimento de um modelo de simulação para melhoria do desempenho na descarga de vagões de ferro gusa**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia) – Instituto Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2022.

UFMS. **Sistema de freios anti-bloqueio – ABS**. Universidade Federal de Santa Maria, Coordenadoria Acadêmica, Cachoeira do Sul – RS, 2021.