



DIAGNÓSTICO AVANÇADO POR INDUÇÃO MAGNÉTICA: ACURÁCIA, CONFIABILIDADE E APLICAÇÕES GLOBAIS DA S-TRONIC

ADVANCED MAGNETIC INDUCTION DIAGNOSTICS: ACCURACY, RELIABILITY AND GLOBAL APPLICATIONS OF S-TRONIC

DIAGNÓSTICO AVANZADO DE INDUCCIÓN MAGNÉTICA: PRECISIÓN, FIABILIDAD Y APLICACIONES GLOBALES DE S-TRONIC



<https://doi.org/10.56238/levv16n53-140>

Data de submissão: 29/09/2025

Data de publicação: 29/10/2025

Sandro Rogério Stoco

RESUMO

O presente estudo investiga a aplicação do diagnóstico por indução magnética em injetores diesel, destacando sua acurácia, confiabilidade e potencial de internacionalização da tecnologia S-Tronic. O contexto analisado demonstra que os métodos tradicionais de verificação apresentam limitações na identificação precoce de falhas, elevando custos de manutenção, retrabalho e risco de não conformidade ambiental. A metodologia adotada consistiu em um desenho comparativo entre diagnósticos convencionais, predominantes nos Estados Unidos, e o diagnóstico avançado por indução magnética já aplicado em oficinas latino-americanas. Os resultados evidenciam que a tecnologia proporciona maior sensibilidade e especificidade, reduzindo substituições desnecessárias, tempo de indisponibilidade de frotas e dependência de peças importadas. Além disso, promove ganhos financeiros, operacionais e ambientais, reforçando sua compatibilidade com o rigor regulatório norte-americano. Conclui-se que a adoção da tecnologia representa um fator estratégico para ampliar a competitividade, a previsibilidade econômica e a sustentabilidade do setor de transporte.

Palavras-chave: Indução Magnética. Diagnóstico Automotivo. Injetores Diesel. Confiabilidade. Sustentabilidade.

ABSTRACT

This study investigates the application of magnetic induction diagnosis in diesel injectors, highlighting its accuracy, reliability, and potential for internationalization of the S-Tronic technology. The analysis shows that conventional verification methods present limitations in the early detection of failures, increasing maintenance costs, rework, and risks of environmental non-compliance. The methodology followed a comparative design between conventional diagnostics, predominant in the United States, and advanced magnetic induction diagnostics already applied in Latin American workshops. Results demonstrate that the technology provides greater sensitivity and specificity, reducing unnecessary replacements, fleet downtime, and dependence on imported parts. Moreover, it generates financial, operational, and environmental benefits, reinforcing its compatibility with strict U.S. regulatory frameworks. It is concluded that the adoption of this technology represents a strategic factor for enhancing competitiveness, economic predictability, and sustainability in the transportation sector.

Keywords: Magnetic Induction. Automotive Diagnostics. Diesel Injectors. Reliability. Sustainability.



RESUMEN

Este estudio investiga la aplicación del diagnóstico por inducción magnética en inyectores diésel, destacando su precisión, fiabilidad y potencial para la internacionalización de la tecnología S-Tronic. El contexto analizado demuestra que los métodos tradicionales de verificación presentan limitaciones en la identificación temprana de fallos, lo que incrementa los costes de mantenimiento, las repeticiones de trabajos y el riesgo de incumplimiento ambiental. La metodología adoptada consistió en un diseño comparativo entre el diagnóstico convencional, predominante en Estados Unidos, y el diagnóstico avanzado por inducción magnética, ya aplicado en talleres latinoamericanos. Los resultados muestran que la tecnología proporciona mayor sensibilidad y especificidad, reduciendo los reemplazos innecesarios, el tiempo de inactividad de la flota y la dependencia de piezas importadas. Además, promueve beneficios financieros, operativos y ambientales, reforzando su compatibilidad con el rigor regulatorio norteamericano. Se concluye que la adopción de la tecnología representa un factor estratégico para aumentar la competitividad, la previsibilidad económica y la sostenibilidad del sector del transporte.

Palabras clave: Inducción Magnética. Diagnóstico Automotriz. Inyectores Diésel. Fiabilidad. Sostenibilidad.



1 INTRODUÇÃO

O transporte rodoviário de cargas nos Estados Unidos tem relevância estrutural para o abastecimento interno e para a competitividade industrial, mas sua eficiência depende diretamente da confiabilidade técnica das frotas que movimentam bilhões de toneladas por ano em todas as regiões. Quando falhas em sistemas de injeção não são identificadas a tempo, o resultado é a elevação dos custos ocultos associados ao tempo de inatividade dos veículos, que acabam por pressionar o preço final do frete em toda a cadeia logística (American Trucking Associations, 2025).

Um dos fatores que mais agravam esse cenário é a dependência de peças e componentes importados, que atingiu valores recordes em 2024 e expõe o mercado a riscos cambiais, tarifários e de atrasos no fornecimento. Essa condição torna a manutenção ainda mais onerosa, pois decisões equivocadas de substituição baseadas em diagnósticos incompletos ampliam o custo total de propriedade e dificultam a previsibilidade orçamentária de transportadoras e oficinas (U.S. Census Bureau, 2025).

Em paralelo, a regulação ambiental tem se mostrado cada vez mais rigorosa, sobretudo no monitoramento de práticas que envolvem adulterações ou diagnósticos falhos em sistemas de emissão, impondo penalidades severas quando há descumprimento. Nesse contexto, cresce a demanda por tecnologias de diagnóstico avançado capazes de assegurar precisão técnica, reduzir a necessidade de trocas desnecessárias e garantir a conformidade com padrões ambientais, fortalecendo a confiabilidade operacional da frota como um todo (United States, 2020a).

A proposta deste estudo é examinar o método de diagnóstico por indução magnética aplicado a injetores diesel, demonstrando sua relevância para mercados internacionais e projetando os impactos que sua adoção pode trazer ao mercado norte-americano. O objetivo é evidenciar como a combinação de precisão metrológica e replicação de sinais elétricos reais pode se traduzir em ganhos financeiros, operacionais e ambientais, respondendo de maneira integrada às demandas de competitividade e conformidade regulatória nos Estados Unidos (United States, 2020b).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 FUNDAMENTOS FÍSICOS E DIAGNÓSTICOS

Os sistemas de injeção diesel evoluíram para arquiteturas altamente sofisticadas como o Common Rail, os injetores unitários e as bombas unitárias, projetadas para assegurar pressão estável, pulverização uniforme e combustão mais eficiente, mas que ao mesmo tempo elevam a complexidade de manutenção. Essas configurações, ao permitirem pressões superiores a dois mil bar, exigem níveis de diagnóstico cada vez mais precisos para manter a confiabilidade do funcionamento dos motores em operações intensivas (Kucera *et al.*, 2025).



A exposição contínua a pressões extremas e a variações de combustível provoca desgaste progressivo de componentes internos, levando a cavitação, microerosões em superfícies críticas e degradação de vedações, que alteram tanto a eficiência da pulverização quanto a resposta do sistema ao comando eletrônico. Esses fenômenos tornam o ciclo de vida dos injetores mais curto quando comparado a tecnologias anteriores, o que exige a introdução de técnicas capazes de identificar falhas desde os estágios iniciais para evitar paradas não planejadas (Kevorkijan *et al.*, 2024).

Métodos tradicionais de verificação, baseados em testes padronizados de vazão e pressão, revelam apenas falhas já manifestas, sem captar irregularidades de baixa intensidade que comprometem gradualmente o desempenho. Essa limitação significa que muitas vezes a peça é descartada ou substituída sem necessidade, ou, ao contrário, segue em uso mesmo apresentando falhas sutis que não foram detectadas nos procedimentos convencionais (Więsławski *et al.*, 2022).

Diante dessas limitações, técnicas de diagnóstico não invasivo passaram a ganhar destaque, especialmente aquelas que analisam assinaturas elétricas e magnéticas associadas ao movimento da agulha do injetor. A leitura dessas variáveis permite correlacionar em tempo real a resposta eletromecânica do sistema com seu estado físico interno, o que amplia a precisão da detecção e cria condições para que oficinas e transportadoras atuem de forma preventiva, evitando custos ocultos e prolongando a vida útil dos conjuntos (Gao *et al.*, 2022).

2.2 CONFIABILIDADE E ACURÁCIA EM MANUTENÇÃO

A confiabilidade em sistemas de injeção depende diretamente da capacidade de detectar falhas em estágios iniciais, quando os sintomas ainda não comprometem completamente o desempenho. Estudos mostram que técnicas de monitoramento precoce permitem identificar variações mínimas no funcionamento, o que possibilita correções pontuais e reduz significativamente a probabilidade de falhas críticas que impactariam a operação da frota em larga escala (Mączak *et al.*, 2023).

O avanço das metodologias de diagnóstico tem permitido estabelecer correlações cada vez mais consistentes entre sinais elétricos registrados nos circuitos de comando e os movimentos mecânicos internos do injetor. Essa associação entre grandezas distintas revela como irregularidades na resposta eletromagnética se refletem em alterações físicas, criando um quadro mais confiável para análise preditiva e prolongando o ciclo de vida dos componentes (Vrublevskyi; Wierzbicki, 2023).

A integração dessas práticas ao processo de manutenção gera impactos diretos na eficiência operacional, já que a identificação precisa de falhas reduz o retrabalho e limita substituições desnecessárias. Essa eficiência traduz-se em menores custos para oficinas e transportadoras, ao mesmo tempo em que fortalece a competitividade de quem adota tecnologias de detecção mais avançadas no mercado de manutenção automotiva (Duberg; Sundin; Tang, 2024).



A precisão diagnóstica também desempenha função estratégica no atendimento a padrões ambientais, pois falhas não identificadas em tempo podem resultar em emissões fora dos limites legais. Nesse sentido, métodos de inspeção que assegurem fidelidade na detecção se tornam indispensáveis para manter conformidade com legislações ambientais em vigor, reforçando a necessidade de tecnologias que unam confiabilidade técnica e cumprimento regulatório (United States, 2021).

2.3 ESTADO DA PRÁTICA NO BRASIL E AMÉRICA LATINA

A aplicação do diagnóstico por indução magnética em oficinas brasileiras e latino-americanas demonstrou avanços significativos na precisão de identificação de falhas, pois técnicas de leitura elétrica e magnética aumentaram a sensibilidade da detecção em comparação com procedimentos convencionais. Esse ganho de acurácia proporcionou maior segurança para os técnicos, que passaram a confiar em indicadores mais consistentes e menos sujeitos a erros de interpretação durante a manutenção (Więcławski *et al.*, 2022).

A experiência prática também mostra que a implementação de protocolos padronizados contribuiu para diminuir substancialmente o retrabalho, já que falhas sutis puderam ser corrigidas antes de se manifestarem em campo. A redução de retornos de veículos para a oficina resultou em maior eficiência operacional e em significativa economia para transportadoras, ao mesmo tempo em que fortaleceu a imagem de confiabilidade das oficinas que adotaram o método (Mączak *et al.*, 2023).

Outro aspecto relevante é a expansão da capacitação técnica no Brasil e em países vizinhos, em que milhares de profissionais foram treinados para aplicar metodologias de remanufatura e diagnóstico de alta precisão. Essa formação gerou uma base qualificada de mão de obra, permitindo que tecnologias mais sofisticadas fossem disseminadas de forma consistente e criando condições para a consolidação de um ecossistema de manutenção avançada na região (Duberg; Sundin; Tang, 2024).

Casos práticos em oficinas latino-americanas ainda demonstram a importância da detecção precoce de falhas invisíveis a olho nu, já que a antecipação das ocorrências evita substituições desnecessárias e prolonga a vida útil dos componentes. A associação entre leitura de sinais elétricos e comportamento da agulha do injetor mostrou-se decisiva para corrigir falhas incipientes, consolidando o diagnóstico não invasivo como alternativa estratégica frente às limitações dos métodos tradicionais (Gao *et al.*, 2022).

2.4 ESTADO DA PRÁTICA INTERNACIONAL

Nos mercados internacionais, entretanto, observa-se a persistência de métodos convencionais que muitas vezes subestimam falhas internas de difícil detecção, mantendo altos índices de substituições baseadas em testes incompletos. Essa realidade evidencia que, em diversas regiões, ainda



há dependência de práticas menos avançadas, o que aumenta custos e reduz a confiabilidade do processo de manutenção (Kevorkijan *et al.*, 2024).

Os custos médios de diagnóstico e substituição de componentes em oficinas norte-americanas ilustram bem essa situação, pois se somam às despesas associadas à inatividade da frota e pressionam o custo total de operação das empresas de transporte. A representatividade econômica do setor é tamanha que até pequenas variações nesses custos se refletem em impactos relevantes sobre toda a cadeia logística (American Trucking Associations, 2025).

A pressão regulatória também tem sido crescente, especialmente após medidas severas de fiscalização da EPA contra adulterações e dispositivos ilegais que alteram sistemas de emissão, exigindo padrões mais rígidos de diagnóstico. Nesse cenário, qualquer tecnologia que permita identificar falhas com precisão torna-se estratégica para assegurar conformidade ambiental e evitar sanções financeiras expressivas (United States, 2020a).

Essas condições reforçam a necessidade de diagnósticos confiáveis que consigam equilibrar performance técnica, custo e atendimento a exigências regulatórias. A literatura aponta que a confiabilidade adquirida por meio de metodologias avançadas pode ser decisiva para que empresas se mantenham competitivas em ambientes de forte regulação e alta dependência da disponibilidade de frota (Russell; Nasr, 2023).

3 METODOLOGIA

O estudo foi concebido a partir de um desenho comparativo que busca avaliar a efetividade do diagnóstico por indução magnética frente aos métodos convencionais aplicados em sistemas de injeção diesel. Essa estrutura permite observar como diferentes abordagens de análise impactam tanto a confiabilidade técnica dos resultados quanto a viabilidade econômica para oficinas e transportadoras, garantindo que a investigação mantenha consistência metodológica em todas as etapas.

Foram definidos dois cenários complementares para condução da análise: o primeiro, representando a realidade de mercado dos Estados Unidos com a utilização de diagnósticos tradicionais e substituição direta de peças novas; o segundo, projetado a partir da aplicação de procedimentos de diagnóstico avançado fora do motor, considerando o uso de recursos magnéticos e elétricos de maior precisão. A comparação entre esses cenários cria um panorama que permite avaliar a aplicabilidade do método em condições reais de operação.

As métricas estabelecidas para o estudo abrangem aspectos técnicos e econômicos, incluindo custo por injetor, custo agregado por veículo, custo por cada 100 mil milhas percorridas, tempo médio de indisponibilidade da frota, taxa de retrabalho em oficinas e impacto potencial nas emissões de poluentes. Cada métrica foi escolhida por sua relevância prática no dia a dia das empresas de transporte e por permitir mensuração objetiva dos efeitos das intervenções.



As fontes utilizadas contemplam tanto informações técnicas disponíveis em documentação especializada quanto dados de mercado referentes a preços de componentes, estatísticas de importação e relatórios sobre o desempenho do setor de transporte. A integração dessas informações possibilita estruturar a análise de forma ampla, permitindo que a comparação entre cenários seja realizada com base em parâmetros verificáveis e replicáveis em estudos futuros.

Assim, o tratamento estatístico adotado combina análises determinísticas com exercícios de sensibilidade, em que variações controladas são aplicadas a parâmetros-chave como preços de peças, prazos de reposição, tarifas de importação e oscilações cambiais. Essa abordagem garante que os resultados não refletem apenas um cenário estático, mas forneçam um leque de possibilidades que reproduz melhor a complexidade do ambiente em que oficinas e transportadoras estão inseridas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Enquanto Kucera *et al.* (2025) argumentam que ganhos de sensibilidade e especificidade em diagnósticos são fundamentais para sustentar a confiabilidade dos sistemas de injeção, os resultados obtidos no Brasil mostram que a aplicação da indução magnética replicou esse cenário na prática, revelando falhas invisíveis em testes convencionais e assegurando intervenções mais precisas que reduziram significativamente o risco de substituições desnecessárias.

Więcławski *et al.* (2022) destacam que uma das fragilidades mais comuns dos métodos tradicionais é a alta incidência de retrabalho, uma vez que falhas só se manifestam após a reinstalação do componente no motor, mas os registros coletados em oficinas brasileiras indicam que a adoção de testes avançados ex-situ com a ferramenta diminuiu de forma expressiva esse problema, permitindo maior eficiência operacional e menos retornos para correção.

De acordo com Mączak *et al.* (2023), a aprovação de injetores em bancadas de teste antes da montagem é um fator decisivo para a padronização e redução de erros, e a experiência brasileira reforça esse ponto ao mostrar que a taxa de aprovação cresceu de maneira consistente quando os procedimentos passaram a ser guiados por parâmetros elétricos e magnéticos mais refinados, o que criou um fluxo de trabalho mais previsível para oficinas e transportadoras.

Russell e Nasr (2023) enfatizam que a queda dos índices de retorno após a manutenção está diretamente associada à aplicação de diagnósticos robustos, e os resultados obtidos no campo confirmam esse entendimento, pois a combinação entre sensibilidade aprimorada e padronização dos processos reduziu o número de falhas reincidientes e fortaleceu a confiança dos clientes, tornando a manutenção avançada uma alternativa e uma vantagem competitiva real.

Duberg, Sundin e Tang (2024) ressaltam que práticas de remanufatura podem gerar economias indiretas relevantes, especialmente quando reduzem a necessidade de substituir peças de alto custo antes do fim de sua vida útil. Os resultados obtidos no Brasil e em outros países latino-americanos



reforçam essa percepção, pois mostram que a aplicação de diagnósticos mais precisos diminui significativamente os gastos ocultos associados ao ciclo de manutenção, aumentando a previsibilidade de custos e oferecendo maior estabilidade às operações.

Kim *et al.* (2024) destacam que a redução do tempo de inatividade é um dos maiores ganhos proporcionados por intervenções tecnológicas no setor de transporte, já que a ociosidade da frota representa perda direta de receita. A experiência latino-americana confirma essa visão, demonstrando que o diagnóstico realizado fora do motor encurtou os prazos de reparo e devolveu veículos à operação mais rapidamente, contribuindo para a eficiência logística e ampliando a capacidade produtiva das empresas.

Russell e Nasr (2023) observam que melhorias na previsibilidade de manutenção afetam diretamente o fluxo de caixa das empresas, ao reduzir imprevistos financeiros e otimizar o uso de capital de giro. Os resultados documentados no Brasil mostram que oficinas e transportadoras passaram a dispor de maior liquidez quando deixaram de immobilizar recursos em substituições desnecessárias, criando condições para reinvestimentos estratégicos em outras áreas da operação.

Vrublevskyi e Wierzbicki (2023) enfatizam a importância de estudos comparativos entre diagnósticos convencionais e avançados para evidenciar ganhos reais, e os casos analisados na América Latina confirmam que os custos de diagnóstico são muito menores do que os de substituição direta. Os exemplos práticos demonstram que evitar a troca de conjuntos completos quando apenas ajustes ou correções localizadas são necessários representa uma vantagem competitiva que pode ser replicada em mercados internacionais de grande escala.

Enquanto Duberg, Sundin e Tang (2024) defendem que a economia indireta obtida pela remanufatura está associada ao prolongamento do ciclo de vida dos componentes e à diminuição da dependência de peças novas, os resultados projetados para os Estados Unidos sugerem que esse benefício seria ainda mais expressivo em um mercado onde a importação de autopeças continua sendo um fator determinante no custo final de manutenção, mostrando que a substituição de peças poderia ser evitada em grande parte dos casos pela aplicação de diagnósticos mais robustos.

Kim *et al.* (2024) enfatizam que a redução do *downtime* é um dos parâmetros mais sensíveis na gestão de frotas pesadas, pois cada hora de veículo parado representa perda de receita e aumento do custo total de propriedade, e a comparação entre o cenário americano atual e a projeção com uso do diagnóstico por indução magnética mostra que a diferença de disponibilidade de frota seria suficiente para alterar margens operacionais, reforçando a ideia de que o ganho econômico vai além da peça em si e se materializa na produtividade da logística.

Russell e Nasr (2023) observam que o impacto financeiro das tecnologias de manutenção só se consolida quando há previsibilidade e redução da variabilidade nos custos, e a análise de sensibilidade aplicada ao contexto americano revela que a ferramenta teria potencial de estabilizar o fluxo de caixa

das transportadoras mesmo em cenários de tarifas mais altas ou câmbio volátil, algo particularmente relevante para empresas que trabalham com contratos de longo prazo e margens estreitas.

Vrublevskyi e Wierzbicki (2023) apontam que a validação de novas tecnologias depende de comparações estruturadas entre métodos tradicionais e alternativas mais sofisticadas, e os resultados projetados confirmam que a aplicação do diagnóstico magnético reduziria o custo por 100 mil milhas rodadas e o índice de retrabalho, aproximando os números obtidos daquilo que já se documentou em países latino-americanos, mas agora inseridos em uma escala de mercado muito maior e sob pressões regulatórias ainda mais rigorosas.

Więsławski *et al.* (2022) destacam que a credibilidade de qualquer processo de manutenção está na capacidade de oferecer diagnósticos fidedignos, já que falhas não identificadas tendem a gerar custos ocultos e comprometer a conformidade ambiental, e os resultados alcançados na América Latina indicam que o método de indução magnética reproduz esse princípio com eficiência, o que projeta uma aderência sólida ao padrão americano, onde o cumprimento regulatório é condição para a operação em larga escala.

Mączak *et al.* (2023) enfatizam que a acurácia elétrica e metrológica é determinante para que a remanufatura atinja níveis compatíveis com os de fábrica, e a replicação de sinais reais do motor em testes ex-situ demonstra que a ferramenta atende a esse requisito, criando condições para que os parâmetros técnicos exigidos pelas oficinas norte-americanas sejam alcançados com consistência, algo que reforça a viabilidade da tecnologia em um mercado de alta exigência.

Duberg, Sundin e Tang (2024) observam que a produtividade em oficinas depende de processos padronizados que reduzem retrabalho e tempo de serviço, e os dados levantados em campo mostram que o uso do diagnóstico avançado trouxe justamente essa vantagem, ao permitir ajustes mais rápidos e diminuir a reincidência de falhas, sugerindo que nos Estados Unidos o impacto seria ainda mais relevante pela escala das operações e pela pressão constante por eficiência.

Russell e Nasr (2023) argumentam que a comparação entre a experiência latino-americana e o mercado americano é reveladora, pois mostra como práticas validadas em contextos de menor escala podem ser adaptadas a ambientes mais regulados e competitivos, e os resultados projetados confirmam que a mesma tecnologia que já reduziu custos e ampliou a confiabilidade em oficinas brasileiras pode se traduzir em ganhos financeiros e operacionais ainda maiores no cenário norte-americano, onde a disponibilidade da frota é um ativo estratégico.

O U.S. Census Bureau (2025) mostra que os Estados Unidos continuam registrando volumes recordes de importações de veículos e autopeças, um dado que reforça a dependência do setor de transporte em relação a fornecedores externos e evidencia a importância de iniciativas que ampliem a capacidade de manutenção local. Os resultados projetados indicam que a incorporação de diagnósticos



avançados poderia reduzir substancialmente essa necessidade de peças novas importadas, criando maior autonomia para oficinas e transportadoras que operam em escala nacional.

United States (2020b) lembra que oscilações tarifárias e cambiais são fatores determinantes no custo final da manutenção, já que impactam diretamente o preço de componentes importados e aumentam a exposição das empresas à volatilidade do comércio internacional. Nesse sentido, a possibilidade de diagnosticar e prolongar a vida útil de injetores representa não só uma vantagem técnica, mas também uma forma de mitigar riscos macroeconômicos e assegurar previsibilidade em um setor sensível a choques externos.

Kim *et al.* (2024) argumentam que a vantagem competitiva no setor de transporte está associada à redução do custo total de propriedade da frota, pois empresas que conseguem manter veículos ativos por mais tempo e com menores custos indiretos conseguem disputar contratos de forma mais agressiva. Os resultados de modelagens comparativas sugerem que a adoção de métodos avançados de diagnóstico nos Estados Unidos poderia proporcionar essa vantagem, fortalecendo oficinas e transportadoras diante de concorrentes ainda dependentes de práticas convencionais.

Duberg, Sundin e Tang (2024) ressaltam que a disseminação de tecnologias de remanufatura cria condições para o desenvolvimento de um ecossistema de oficinas independentes, já que a padronização de processos e a capacitação técnica favorecem a expansão da rede de manutenção especializada. Essa lógica se ajusta ao mercado norte-americano, onde a capilaridade da rede de oficinas é decisiva para sustentar a disponibilidade da frota, indicando que o avanço do diagnóstico por indução magnética poderia fortalecer empresas isoladas e todo o setor de transporte em nível nacional.

Kucera *et al.* (2025) lembram que a adoção de novas tecnologias em sistemas de injeção deve estar ancorada em um *roadmap* técnico claro, que estabeleça parâmetros de calibração, registros de confiabilidade e documentação padronizada, e a experiência latino-americana mostra que esse alinhamento foi determinante para consolidar a credibilidade do método, sugerindo que nos Estados Unidos esse mesmo processo poderia servir como base para certificações e validações necessárias em um ambiente regulatório mais exigente.

American Trucking Associations (2025) evidenciam que frotistas e oficinas de grande porte são atores estratégicos para qualquer mudança estrutural no setor de transporte, e por isso a implementação de pontos-piloto aparece como passo natural para demonstrar o valor de novas tecnologias, permitindo que métricas de desempenho sejam observadas em condições reais de operação e criando confiança suficiente para expandir a aplicação em escala nacional.

Mączak *et al.* (2023) destacam que a definição de métricas de sucesso deve considerar parâmetros como tempo de serviço, índice de retrabalho e custo por 100 mil milhas, pois são esses indicadores que refletem o impacto real de uma solução em termos de confiabilidade e viabilidade



econômica, e ao projetar esses elementos para o contexto norte-americano percebe-se que o método de diagnóstico avançado pode gerar dados comparáveis e replicáveis que sustentam decisões de investimento.

Duberg, Sundin e Tang (2024) mostram que a transferência de know-how é um dos maiores determinantes para o sucesso de tecnologias baseadas em precisão, pois sem treinamento e padronização a efetividade dos procedimentos tende a se diluir, e os programas de capacitação implementados na América Latina indicam que esse processo pode ser replicado nos Estados Unidos de maneira estruturada, criando uma rede de técnicos qualificados capazes de sustentar a expansão da tecnologia.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As considerações finais reforçam que o método de diagnóstico avançado se mostra exportável e compatível com os padrões técnicos e regulatórios exigidos nos Estados Unidos, o que indica que sua adoção pode ser realizada sem comprometer a qualidade do processo e com potencial de ganhos financeiros e operacionais significativos. Essa aderência é resultado da combinação entre precisão metrológica, confiabilidade nos resultados e a capacidade de reduzir custos diretos e indiretos, consolidando uma alternativa que responde às necessidades do setor de transporte em larga escala.

Os ganhos esperados incluem a redução de *downtime* das frotas, a diminuição de substituições desnecessárias de componentes e a elevação da confiabilidade das manutenções, aspectos que repercutem diretamente na produtividade das empresas e na previsibilidade de seus fluxos financeiros. Além disso, a possibilidade de ampliar a vida útil de peças críticas representa um fator decisivo para reduzir a dependência de importações e fortalecer a competitividade interna em um mercado altamente regulado.

Os próximos passos consistem em estruturar estudos multicêntricos em parceria com frotistas e oficinas norte-americanas, de modo a validar os indicadores de desempenho em condições reais de operação e confirmar os ganhos projetados em larga escala. Esses estudos permitirão estabelecer métricas comuns com seguradoras e operadores logísticos, criando uma base sólida de evidências que sustente a expansão da tecnologia em todo o território dos Estados Unidos e fortaleça sua integração às práticas de manutenção avançada.



REFERÊNCIAS

AMERICAN TRUCKING ASSOCIATIONS. ATA American Trucking Trends 2025. Arlington, VA, 2025. Disponível em: <https://www.trucking.org/news-insights/ata-american-trucking-trends-2025>.

DUBERG, Johan Vogt; SUNDIN, Erik; TANG, Ou. Assessing the Profitability of Remanufacturing Initiation: A Literature Review. *Journal of Remanufacturing*, v. 14, p. 69-92, 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13243-023-00132-1>.

GAO, Ya; HUANG, Weidi; PRATAMA, Raditya H.; et al. Investigation of Needle Motion Profile Effect on Diesel Spray. *Micromachines*, v. 13, n. 11, p. 1944, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-666X/13/11/1944>.

KEVORKIJAN, Luka; BILUŠ, Ignacijo; TORRES-JIMÉNEZ, Eloisa; LEŠNIK, Luka. The Effect of Fuel Quality on Cavitation Phenomena in Common-Rail Diesel Injector — A Numerical Study. *Sustainability*, v. 16, n. 12, p. 5074, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/12/5074>.

KIM, D.-Y.; LEE, J.-H.; HWANG, Y.-W.; et al. Life Cycle Greenhouse Gas Reduction Effects Induced by Turbocharger Multiple Remanufacturing in South Korea. *Energies*, v. 17, n. 24, p. 6248, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/24/6248>.

KUCERA, Matej; GUTTEN, Miroslav; KORENCIAK, Daniel; PRAZENICA, Michal; KOLTUNOWICZ, Tomasz N. Using the Injection System as a Sensor to Analyze the State of the Electronic Automotive System. *Sensors*, v. 25, n. 18, p. 5814, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/18/5814>.

MĄCZAK, Jędrzej; WIĘCŁAWSKI, Krzysztof; SZCZUROWSKI, Krzysztof; FIGLUS, Tomasz. New Approach of Model-Based Detection of Early Stages of Fuel Injector Failures. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, v. 25, n. 1, p. 72-81, 2023. Disponível em: https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-06843cbc-7237-4fac-911f-da812d41752d/c/Eksplatacja_2023_1_6.pdf.

RUSSELL, J. D.; NASR, N. Value-Retained vs. Impacts Avoided: The Differentiated Contributions of Remanufacturing, Refurbishment, Repair, and Reuse within a Circular Economy. *Journal of Remanufacturing*, v. 13, p. 25-51, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13243-022-00119-4>.

U.S. CENSUS BUREAU. Annual 2024 Press Highlights. Suitland, MD, 2025. Disponível em: <https://www.census.gov/foreign-trade/statistics/highlights/AnnualPressHighlights.pdf>.

UNITED STATES. Environmental Protection Agency. *Aftermarket Defeat Devices and Tampering are Illegal and Enforceable*. Washington, D.C., 2020. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-12/documents/tamperinganddefeatdevices-enfalert.pdf>.

UNITED STATES. Environmental Protection Agency. *EPA Enforcement Policy on Vehicle and Engine Tampering and Aftermarket Defeat Devices under the Clean Air Act*. Washington, D.C., 2020. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-12/documents/epatamperingpolicy-enforcementpolicyonvehicleandenginetampering.pdf>.

UNITED STATES. Environmental Protection Agency. *EPA Tampering Policy – Overview and Discussion*. Washington, D.C., 2021. Disponível em: <https://cleanairnortheast.epa.gov/pdf/tampering/epa-tampering-policy-sema-presentation.pdf>.



VRUBLEVSKYI, Oleksii; WIERZBICKI, Sławomir. Analysis of Potential Improvements in the Performance of Solenoid Injectors in Diesel Engines. *Eksplotacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, v. 25, n. 3, p. 166493, 2023. Disponível em: <https://ein.org.pl/Analysis-of-potential-improvements-in-the-performance-of-solenoid-injectors-in-diesel%2C166493%2C0%2C2.html>.

WIĘCŁAWSKI, Krzysztof; FIGLUS, Tomasz; MĄCZAK, Jędrzej; SZCZUROWSKI, Krzysztof. Method of Fuel Injector Diagnosis Based on Analysis of Current Quantities. *Sensors*, v. 22, n. 18, p. 6735, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/18/6735>.