



INOVAÇÃO EM REMANUFATURA DE UNIDADES INJETORAS DIESEL: TECNOLOGIA DA MÁQUINA S-TRONIC E O MERCADO DOS ESTADOS UNIDOS

INNOVATION IN DIESEL UNIT INJECTOR REMANUFACTURING: S-TRONIC MACHINE TECHNOLOGY AND THE U.S. MARKET

INNOVACIÓN EN LA REMANUFACTURACIÓN DE INYECTORES UNITARIOS DIÉSEL: TECNOLOGÍA DE MÁQUINAS S-TRONIC Y EL MERCADO ESTADOUNIDENSE

 <https://doi.org/10.56238/levv16n53-037>

Data de submissão: 09/09/2025

Data de publicação: 09/10/2025

Sandro Rogério Stoco

RESUMO

O presente estudo analisa a viabilidade da adoção da tecnologia de remanufatura S-Tronic para unidades injetoras diesel no mercado norte-americano, considerando aspectos econômicos, técnicos e regulatórios. Foram realizadas análises comparativas entre os custos médios de substituição por peças novas e os processos de remanufatura de alta precisão já consolidados no Brasil e em países da América Latina, adaptados ao contexto dos Estados Unidos. A metodologia, de caráter aplicado, exploratório e quantitativo, baseou-se em dados secundários extraídos de relatórios de mercado, estatísticas de transporte e bases de comércio internacional. Os resultados evidenciaram reduções de custo superiores a 80%, aumento da confiabilidade técnica e ganhos ambientais decorrentes da diminuição do descarte de componentes. Constatou-se ainda que a remanufatura contribui para a mitigação de riscos associados à volatilidade cambial e tarifária, fortalecendo a competitividade do setor de transporte rodoviário norte-americano. Conclui-se que a tecnologia S-Tronic é compatível com os padrões regulatórios do Clean Air Act e apresenta potencial estratégico para ampliar a disponibilidade de frotas, reduzir dependência de importações e alinhar-se às políticas de sustentabilidade vigentes nos Estados Unidos.

Palavras-chave: Remanufatura. Unidades Injetoras Diesel. Transporte Rodoviário. Competitividade. Sustentabilidade.

ABSTRACT

This study analyzes the feasibility of adopting S-Tronic remanufacturing technology for diesel injector units in the North American market, considering economic, technical, and regulatory aspects. A comparative analysis was conducted between the average costs of new replacement parts and high-precision remanufacturing processes already consolidated in Brazil and other Latin American countries, adapted to the U.S. context. The applied, exploratory, and quantitative methodology relied on secondary data from market reports, transportation statistics, and international trade databases. Results showed cost reductions exceeding 80%, increased technical reliability, and environmental benefits due to reduced component disposal. Furthermore, remanufacturing proved to mitigate risks associated with exchange rate volatility and import tariffs, strengthening the competitiveness of the U.S. trucking sector. It is concluded that S-Tronic technology is compatible with Clean Air Act

standards and offers strategic potential to increase fleet availability, reduce dependence on imports, and align with current U.S. sustainability policies.

Keywords: Remanufacturing. Diesel Injector Units. Trucking Industry. Competitiveness. Sustainability.

RESUMEN

Este estudio analiza la viabilidad de adoptar la tecnología de remanufactura S-Tronic para inyectores unitarios diésel en el mercado norteamericano, considerando aspectos económicos, técnicos y regulatorios. Se realizaron análisis comparativos entre los costos promedio de reemplazo de piezas nuevas y los procesos de remanufactura de alta precisión ya establecidos en Brasil y países latinoamericanos, adaptados al contexto estadounidense. La metodología aplicada, exploratoria y cuantitativa, se basó en datos secundarios extraídos de informes de mercado, estadísticas de transporte y bases de datos de comercio internacional. Los resultados demostraron reducciones de costos superiores al 80%, mayor confiabilidad técnica y beneficios ambientales derivados de la reducción del descarte de componentes. También se observó que la remanufactura ayuda a mitigar los riesgos asociados con la volatilidad cambiaria y arancelaria, fortaleciendo la competitividad del sector del transporte terrestre norteamericano. Se concluye que la tecnología S-Tronic es compatible con los estándares regulatorios de la Ley de Aire Limpio y ofrece potencial estratégico para ampliar la disponibilidad de la flota, reducir la dependencia de las importaciones y alinearse con las políticas actuales de sostenibilidad de EE. UU.

Palabras clave: Remanufactura. Unidades de Inyección de Combustible Diésel. Transporte Terrestre. Competitividad. Sostenibilidad.

1 INTRODUÇÃO

O setor de transporte rodoviário nos Estados Unidos ocupa posição estratégica na economia nacional, movimentando 11,46 bilhões de toneladas de cargas em 2022 esses números evidenciam a magnitude da atividade logística e a dependência de uma frota diesel eficiente para assegurar a continuidade do abastecimento interno e a competitividade do mercado de fretes (American Trucking Associations, 2025). Dentro desse contexto, qualquer interrupção ou elevação nos custos de manutenção impacta diretamente o custo por milha rodada e, consequentemente, o preço final de mercadorias em todo o território norte-americano.

A manutenção de unidades injetoras diesel representa uma das parcelas mais onerosas para as transportadoras, especialmente diante do alto valor das peças novas no mercado norte-americano, além do custo intrínseco de reposição, que pode atingir milhares de dólares por conjunto de injetores, há a dependência significativa de importações de autopeças, sujeitas a tarifas de importação, variações cambiais e atrasos logísticos (United States, 2025b). Essa condição amplia o tempo de inatividade de caminhões e pressiona o custo total de propriedade das frotas, exigindo soluções alternativas que mantenham a confiabilidade dos motores ao mesmo tempo em que reduzam despesas operacionais (Duberg; Sundin; Tang, 2024).

A volatilidade do comércio internacional de autopeças também coloca em evidência a necessidade de maior autonomia técnica no setor, o aumento das importações norte-americanas de veículos e componentes, que atingiram US\$ 431,3 bilhões em 2024, sinaliza a vulnerabilidade do país em relação a cadeias de suprimento externas (United States, 2025b). Em paralelo, medidas regulatórias e pressões ambientais reforçam a exigência de qualidade nos processos de manutenção. Entre 2020 e 2023, a United States Environmental Protection Agency aplicou multas de US\$ 55,5 milhões em 172 ações civis contra adulterações em sistemas de emissão (United States, 2020). Isso demonstra que, além de reduzir custos, os métodos de manutenção precisam atender rigorosamente ao padrão de conformidade ambiental estabelecido pelo governo federal.

Nesse cenário, ganha relevância a adoção de tecnologias de remanufatura avançada capazes de diagnosticar falhas invisíveis e ajustar unidades injetoras com precisão compatível ou superior ao padrão de fábrica. Esse tipo de inovação, fundamentada em processos de calibração precisa e diagnósticos sob condições equivalentes às reais, permite reduzir custos de manutenção em até 87% e ampliar a confiabilidade das peças recondicionadas (Lee *et al.*, 2023). Mais do que uma alternativa econômica, trata-se de uma tecnologia que dialoga diretamente com o padrão regulatório e operacional dos Estados Unidos, oferecendo uma resposta às demandas de eficiência, disponibilidade de frota e sustentabilidade ambiental.

Este estudo tem como objetivo analisar a viabilidade da adoção da tecnologia de remanufatura S-Tronic no mercado norte-americano, destacando seus impactos econômicos, técnicos e regulatórios.

Busca-se demonstrar como o método desenvolvido pode superar padrões de fábrica em precisão e confiabilidade, reduzir custos de manutenção, diminuir a dependência de importações de autopeças e fortalecer a competitividade do setor de transporte rodoviário dos Estados Unidos. Além disso, pretende-se discutir como a implementação dessa solução pode contribuir para a conformidade ambiental exigida pela legislação vigente, ao mesmo tempo em que aumenta a disponibilidade operacional das frotas de carga.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 SISTEMAS DE INJEÇÃO E REMANUFATURA DE ALTA PRECISÃO

Os sistemas de injeção diesel são reconhecidos pela complexidade de sua engenharia e pela função central no controle da combustão, regulando a pulverização do combustível em alta pressão e garantindo maior eficiência energética, sendo as arquiteturas Common Rail, Unit Injector (UI) e Unit Pump (UP) as mais consolidadas em diferentes aplicações do setor automotivo (Kucera *et al.*, 2025). A sofisticação desses sistemas está associada à exposição de seus componentes a pressões superiores a dois mil bar, condição que leva a falhas relacionadas ao desgaste interno, à resposta eletromecânica dos solenóides e à degradação de vedações, aspectos que tornam indispensável o desenvolvimento de procedimentos de manutenção altamente precisos (Kevorkian *et al.*, 2024).

Pesquisas sobre o comportamento de injetores indicam que o uso prolongado e o envelhecimento resultam em processos de cavitação, erosões microscópicas e alterações nas respostas elétricas, fatores que dificultam a detecção de falhas por métodos convencionais e exigem técnicas de diagnóstico de maior sensibilidade (Więcławski *et al.*, 2022). A avaliação de grandezas elétricas vinculadas ao deslocamento da agulha injetora tem se mostrado um recurso eficaz para antecipar falhas e realizar intervenções preventivas, ampliando a confiabilidade e prolongando a vida útil dos motores (Gao *et al.*, 2022).

A remanufatura aplicada a injetores e a outros componentes automotivos é descrita como um processo sistemático que envolve desmontagem, limpeza, substituição seletiva de peças, ajustes dimensionais e testes em condições controladas, sendo amplamente reconhecida por sua capacidade de reduzir custos operacionais e minimizar impactos ambientais (Duberg; Sundin; Tang, 2024). Essa prática tem relevância particular em setores de transporte de grande escala, nos quais o custo de reposição de injetores pode representar parcela significativa do orçamento de manutenção das frotas (Lee *et al.*, 2023).

Estudos em análise de ciclo de vida demonstram que processos de remanufatura em componentes como turbocompressores e injetores reduzem emissões relacionadas à produção de novas peças e oferecem ganhos econômicos consistentes, reforçando a atratividade dessa estratégia em mercados competitivos e com alto nível de regulação ambiental (Kim *et al.*, 2024). O êxito desses

processos depende de etapas rigorosamente definidas, incluindo diagnóstico detalhado, calibração micrométrica e verificação final conforme parâmetros de fábrica, etapas que exigem o uso de instrumentos de precisão e controles metrológicos sofisticados (Mączak *et al.*, 2023).

A literatura sobre engenharia de remanufatura mostra que a combinação de diagnósticos avançados, ajustes calibrados e testes padronizados assegura repetibilidade e confiabilidade nos resultados, permitindo que peças remanufaturadas alcancem desempenho equivalente ou até superior ao de componentes novos, possibilitando sua inserção em cadeias logísticas e produtivas sem risco de comprometer a operação (Vrublevskyi *et al.*, 2023). Sob essa ótica, a remanufatura não deve ser vista como um simples reparo, mas como uma prática de engenharia reversa capaz de integrar eficiência econômica, redução de resíduos e desempenho técnico em setores de grande impacto econômico e regulatório (Russell; Nasr, 2022).

2.2 ESTADO DA PRÁTICA NOS EUA: CUSTOS, PEÇAS NOVAS VS. REMAN E PRESSÕES REGULATÓRIAS

No contexto norte-americano, o custo de substituição de injetores em motores diesel cria um ponto de inflexão econômico para oficinas e frotistas, pois a decisão entre aquisição de peças novas e recuperação de componentes precisa considerar margens, escala e horizonte de uso, bem como o efeito em capital de giro e disponibilidade da frota (Duberg; Sundin; Tang, 2024). A literatura sobre análises de custo-benefício e desempenho ambiental indica que, quando processos de remanufatura atingem padrões de qualidade equivalentes aos de fábrica, surgem ganhos econômicos cumulativos que reposicionam a manutenção como vetor de competitividade em mercados de alta intensidade logística (Lee *et al.*, 2023).

A dependência dos Estados Unidos de cadeias internacionais de autopeças expõe o setor a variações de preço e prazo decorrentes de oscilações tarifárias e cambiais, o que altera o custo total de propriedade e amplia o risco de indisponibilidade de veículos em manutenção (United States, 2025b). Nesse cenário, decisões de reposição passam a internalizar incertezas de abastecimento e efeitos sobre lead time, reforçando a atratividade de estratégias locais de reaproveitamento tecnicamente robustas e economicamente estáveis em diferentes regimes de demanda (Kim *et al.*, 2024).

O ambiente regulatório federal, orientado pelo *Clean Air Act*, estrutura expectativas rígidas sobre integridade dos sistemas de controle de emissões e coíbe intervenções que configurem adulteração, o que exige processos de manutenção e remanufatura alinhados a parâmetros originais e a rastreabilidade técnica (United States, 2020). A perspectiva de economia circular aplicada a componentes automotivos mostra que a conformidade ambiental pode ser compatível com estratégias de valor retido, desde que a recuperação de desempenho seja documentada e verificável em condições de operação equivalentes (Russell; Nasr, 2022).

A complexidade dos injetores contemporâneos, que combinam dinâmica de escoamento em alta pressão e atuação eletromagnética em janelas temporais estreitas, demanda diagnósticos capazes de correlacionar grandezas elétricas e respostas mecânicas para sustentar decisões de manutenção com previsibilidade (Kucera *et al.*, 2025). Métodos que observam sinais elétricos associados ao deslocamento da agulha permitem identificar degradações incipientes e orientar intervenções antes de falhas críticas, reduzindo retrabalho e estabilizando o desempenho em campo (Więcławski *et al.*, 2022).

Fenômenos como cavitação e microerosão alteram a atomização e a repetibilidade de injeção ao longo do ciclo de vida do componente, o que intensifica a necessidade de controle metrológico e validação funcional após intervenções (Kevorkian *et al.*, 2024). Protocolos que combinam inspeção dimensional, ajustes micrométricos e testes sob parâmetros equivalentes aos de operação contribuem para confiabilidade pós-manutenção e para a consistência de resultados em escala (Mączak *et al.*, 2023).

Quando custos de aquisição, exposição a importações e requisitos de conformidade são considerados de forma integrada, a opção por remanufatura de alta precisão emerge como alternativa com potencial para reduzir variância de custo e mitigar riscos de suprimento sem abrir mão de desempenho (Vrublevskyi *et al.*, 2023). A articulação entre bases técnico-científicas de diagnóstico e validação e metas de eficiência econômica consolida um espaço de adoção em que decisões de manutenção se alinham a objetivos de disponibilidade de frota e sustentabilidade operacional no mercado norte-americano (Lee *et al.*, 2023; Kucera *et al.*, 2025).

3 METODOLOGIA

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa aplicada de natureza comparativa, com abordagem quantitativa e exploratória, voltada à análise de custos e viabilidade técnica de processos de manutenção de unidades injetoras diesel. O objetivo metodológico é confrontar os custos médios de substituição por peças novas praticados no mercado norte-americano com estimativas baseadas no processo de remanufatura já consolidado em experiências realizadas no Brasil e em países da América Latina, adaptando os resultados para simulações no contexto regulatório e econômico dos Estados Unidos.

A estratégia adotada é fundamentada na coleta e análise de dados secundários, extraídos de relatórios de mercado, catálogos de fornecedores especializados, bases públicas sobre comércio de autopeças e estatísticas de transporte rodoviário. Esses dados foram organizados em dois cenários: o Cenário A, referente à substituição por peças novas de especificação original, e o Cenário B, referente a processos de remanufatura de alta precisão. Como não há validação prática do método nos Estados Unidos até o momento, o Cenário B é construído a partir de dados documentados em patentes,

relatórios técnicos e resultados de aplicações em países latino-americanos, sendo interpretado como um exercício de simulação prospectiva.

As métricas adotadas para comparação incluem custo médio por injetor, custo médio por veículo, custo projetado por 100 mil milhas de operação, tempo estimado de indisponibilidade (*downtime*), taxa de retrabalho e impactos ambientais potenciais associados à substituição versus reaproveitamento. Os preços de referência para o Cenário A foram coletados em distribuidoras e varejistas especializados do mercado norte-americano, enquanto os parâmetros técnicos que embasam o Cenário B foram extraídos de registros técnicos e científicos disponíveis.

A análise é conduzida em duas etapas: uma análise determinística, em que se comparam diretamente os custos médios e indicadores de desempenho entre os cenários, e uma análise de sensibilidade, em que são simuladas variações de ± 10 a $\pm 30\%$ nos preços das peças novas, $\pm 15\%$ nos prazos de entrega, bem como cenários tarifários de 0% a 25% sobre importações de componentes. Essa abordagem busca capturar a amplitude possível de impactos financeiros e operacionais em diferentes condições de mercado.

A confiabilidade metodológica é sustentada pela triangulação de fontes, na qual dados econômicos, estatísticas setoriais e relatórios técnicos são cruzados para mitigar vieses e ampliar a consistência das simulações. Como não há aplicação empírica nos Estados Unidos, a replicabilidade do estudo depende do acesso às mesmas bases de preço, comércio e transporte utilizadas nesta pesquisa, bem como da aplicação dos protocolos de análise aqui descritos, o que garante que os resultados possam ser reproduzidos por outros pesquisadores em condições semelhantes.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A experiência brasileira em remanufatura de injetores diesel mostra reduções de custo superiores a 80% sem perda de desempenho, algo que Duberg, Sundin e Tang (2024) já projetavam em seus estudos quando destacaram que a remanufatura bem estruturada diminui o custo total de propriedade das frotas ao longo do tempo. Essa constatação se confirma em orçamentos comparativos que evidenciam conjuntos de injetores cujo custo de substituição por peças novas atingiria dezenas de milhares de reais, enquanto a recuperação com métodos de alta precisão reduziu o valor para frações mínimas mantendo parâmetros originais de desempenho.

Kucera *et al.* (2025) defendem que a análise de grandezas elétricas vinculadas ao movimento da agulha do injetor é fundamental para antecipar falhas, e Więsławski *et al.* (2022) reforçam que diagnósticos avançados permitem intervenções preventivas com maior confiabilidade. Os resultados observados em campo dialogam diretamente com essas análises, já que o emprego de medições elétricas simuladas e de testes em bancada assegurou a detecção de falhas incipientes e possibilitou a

validação antes da reinstalação, reduzindo significativamente retrabalhos e aumentando a previsibilidade da manutenção.

Segundo Kevorkijan *et al.* (2024), fenômenos como cavitação e erosões microscópicas alteram a dinâmica de escoamento e exigem ajustes micrométricos para restaurar a consistência da pulverização. A prática brasileira confirma essa necessidade, pois a aplicação de retífica seletiva e a calibração dimensional com instrumentos de alta precisão restabeleceram a resposta dos injetores, alinhando-se às recomendações técnicas de que pequenas variações podem comprometer todo o desempenho do sistema de combustão.

A literatura sobre remanufatura, representada por Lee *et al.* (2023), demonstra que em setores de alta escala como o transporte de cargas, a substituição frequente por peças novas impacta fortemente a sustentabilidade econômica das frotas. O contraste com os resultados locais é evidente, já que a remanufatura permitiu ampliar a vida útil dos conjuntos e reduzir o tempo de indisponibilidade, criando condições para que transportadoras mantivessem competitividade sem depender de cadeias de fornecimento externas.

De acordo com Kim *et al.* (2024), a remanufatura também apresenta ganhos ambientais significativos, pois evita emissões associadas à produção de peças novas e reduz resíduos industriais. Essa perspectiva encontra paralelo direto nos resultados relatados, já que a adoção da recuperação de injetores diminuiu a necessidade de descarte em larga escala e promoveu economia de insumos, reforçando que ganhos econômicos e ambientais podem ser obtidos de forma simultânea quando os processos seguem protocolos de validação.

Mączak *et al.* (2023) destacam que a confiabilidade depende de protocolos claros que incluem diagnóstico, calibração e verificação final, e Vrublevskyi *et al.* (2023) complementam que a repetibilidade dos resultados é determinante para a aceitação de peças remanufaturadas em cadeias logísticas. Os dados coletados no Brasil se alinham a essa concepção, pois a padronização das etapas e a exigência de testes equivalentes aos de fábrica garantiram qualidade consistente, fortalecendo a confiança de clientes e a expansão da base de oficinas que incorporaram esse método.

Russell e Nasr (2022) argumentam que a remanufatura deve ser entendida como prática de valor retido que une viabilidade econômica à sustentabilidade, não se limitando a reparar falhas, mas a restaurar integralmente o desempenho de componentes. Essa interpretação se materializa na realidade brasileira ao mostrar que a economia gerada não decorreu de cortes de qualidade, mas da implementação de processos estruturados de diagnóstico, ajuste e validação, permitindo que os resultados dialoguem com a teoria internacional e sirvam de base para considerar sua aplicação em mercados como o norte-americano.

Nos estudos de Duberg, Sundin e Tang (2024) a remanufatura é descrita como uma estratégia que reduz custos de capital de manutenção e ao mesmo tempo mitiga riscos associados à dependência

de cadeias globais, e quando esses argumentos são projetados para o contexto norte-americano observa-se que a substituição de conjuntos completos de injetores por peças novas, cujo custo pode superar dez mil dólares em motores pesados, gera uma diferença significativa frente ao método de remanufatura que já demonstrou no Brasil reduções superiores a 80%, de modo que a comparação projeta uma economia compatível com o que a literatura já identificava como potencial transformador da prática.

Lee *et al.* (2023) argumentam que em frotas de grande escala o custo total de propriedade depende do preço direto da peça e da previsibilidade de tempo de parada e da consistência na performance, e quando se compara o cenário de peças novas, sujeito a lead times longos e tarifas de importação, com o cenário de remanufatura com diagnóstico fora do motor e validação em bancada, fica evidente que a redução de downtime se soma à economia direta de capital, criando um efeito cumulativo que amplia a competitividade do transportador.

De acordo com Kim *et al.* (2024), a instabilidade cambial e tarifária pode impactar de forma significativa o custo operacional anual das frotas, e a análise de sensibilidade aplicada ao mercado norte-americano confirma essa observação, pois em um cenário de tarifas de 25% sobre autopeças importadas o custo por conjunto novo aumenta de forma abrupta, enquanto o processo de remanufatura mantém preços estáveis e previsíveis, reforçando a tese de que estratégias locais de reaproveitamento funcionam como mecanismo de proteção contra volatilidade externa.

Russell e Nasr (2022) destacam que a remanufatura não deve ser vista como mera substituição de etapas, mas como uma forma de valor retido que conecta ganhos econômicos a conformidade ambiental, e essa ideia se projeta para o mercado dos Estados Unidos quando se considera que a redução de necessidade de estoques de peças novas importadas contribui para menor pegada logística e maior aderência a políticas de sustentabilidade corporativa, criando sinergia entre exigências regulatórias e gestão de custos.

Mączak *et al.* (2023) reforçam que a confiabilidade da remanufatura depende de protocolos que assegurem repetibilidade e rastreabilidade, e a ferramenta analisada, ao permitir diagnóstico preciso e calibração micrométrica antes da reinstalação, atende a essas exigências de controle metrológico, o que sustenta a validade da projeção de que o método pode ser incorporado em oficinas norte-americanas sem comprometer padrões de qualidade exigidos pelo *Clean Air Act*.

Para Vrublevskyi *et al.* (2023) a aceitação de peças remanufaturadas em cadeias logísticas depende da capacidade de oferecer desempenho equivalente ao de fábrica com redução de risco de falha, e quando se compara a experiência prática documentada no Brasil com os cenários financeiros modelados para os Estados Unidos, percebe-se que a mesma lógica de redução de custo e aumento de confiabilidade pode ser replicada, criando condições para que frotas norte-americanas adotem o processo como alternativa viável frente à dependência de importações e à volatilidade tarifária.

Duberg, Sundin e Tang (2024) já destacavam que a dependência de cadeias globais de peças expõe setores logísticos a riscos de custo e disponibilidade, e quando esse argumento é projetado para o contexto norte-americano torna-se ainda mais evidente diante das estatísticas de importação de autopeças que alcançaram valores recordes em 2024, reforçando a vulnerabilidade das oficinas e transportadoras que dependem de reposições externas. A possibilidade de remanufatura local reduz diretamente essa exposição, pois cada conjunto recuperado substitui a necessidade de adquirir peças importadas, diminuindo a variância de custos e aumentando a previsibilidade operacional.

Kim *et al.* (2024) argumentam que oscilações cambiais e tarifárias impactam de forma decisiva o custo total de propriedade em setores intensivos, e a realidade recente dos Estados Unidos confirma esse raciocínio, já que variações de tarifas sobre componentes importados afetaram preços finais e lead times de reposição, aumentando a ociosidade de frota. Ao reduzir a necessidade de importações, a remanufatura local estabiliza custos e funciona como um amortecedor frente a políticas comerciais voláteis, permitindo que transportadoras mantenham níveis mais altos de disponibilidade mesmo em contextos adversos.

Segundo Lee *et al.* (2023), a competitividade de grandes operadores logísticos depende da combinação entre custo previsível e estabilidade de fornecimento, e nesse sentido a adoção de processos de remanufatura tecnicamente confiáveis atua como mecanismo de mitigação de risco-país ao reduzir a exposição a oscilações tarifárias e a interrupções comerciais. A prática documentada no Brasil demonstra que é possível estruturar rotinas padronizadas de diagnóstico, ajuste e validação com resultados consistentes, o que reforça a viabilidade de replicar esse modelo em oficinas norte-americanas para assegurar resiliência em uma cadeia de suprimentos sujeita a choques externos.

Russell e Nasr (2022) ressaltam que a remanufatura não deve ser compreendida apenas como um processo de economia direta, mas como uma estratégia de retenção de valor que fortalece cadeias produtivas locais e reduz a dependência de recursos externos, e essa perspectiva encontra correspondência no cenário dos Estados Unidos, onde a redução da importação de peças novas contribui não só para a competitividade econômica, mas também para a soberania tecnológica. Nesse sentido, a expansão de processos de reaproveitamento avançado oferece uma resposta prática às pressões tarifárias e cambiais, integrando sustentabilidade econômica e segurança de fornecimento em um ambiente global instável.

No processo de adoção em mercados externos, Duberg, Sundin e Tang (2024) já apontaram que a documentação técnica e a rastreabilidade são pré-condições para que soluções de remanufatura sejam aceitas em cadeias de alto volume, e quando esse raciocínio é aplicado ao contexto norte-americano, a necessidade de dossiês técnicos robustos, registros de calibração e certificações compatíveis com padrões locais aparece como etapa inicial indispensável para introdução da tecnologia. Nesse sentido, a documentação do processo e os mecanismos de rastreabilidade de lote servem como elementos de

confiança para frotistas e oficinas que dependem de repetibilidade e conformidade para validar o uso da remanufatura em escala.

Segundo Lee *et al.* (2023), a difusão de práticas inovadoras em manutenção depende de pontos-piloto em ambientes de alto volume que funcionam como prova de conceito, e essa estratégia se mostra coerente ao propor que grandes oficinas e frotistas nos Estados Unidos se tornem os primeiros a adotar o método, monitorando métricas de custo por 100 mil milhas, tempo médio entre falhas (MTBF) e índice de retrabalho. A utilização de parâmetros técnicos já consolidados em auditorias de desempenho permite que esses pilotos gerem dados comparáveis e sustentem a expansão para redes maiores de oficinas.

Russell e Nasr (2022) enfatizam que a transferência de conhecimento é determinante para garantir aderência e reduzir riscos de implementação, e esse ponto conecta-se diretamente ao histórico de formação de mais de 20 mil técnicos em quatro países latino-americanos, experiência que comprova a capilaridade de um modelo docente replicável em novos mercados. A partir desse know-how, a expansão para os Estados Unidos pode ser estruturada em módulos de treinamento combinando fundamentos técnicos, protocolos de bancada e gestão de processo, criando a base para difusão consistente do método em diferentes regiões.

Na perspectiva do gestor norte-americano, Kim *et al.* (2024) demonstram que o *payback* de investimentos em manutenção deve ser avaliado pelo custo direto da peça e pelo efeito sobre capital de giro e disponibilidade operacional. Os cálculos comparativos projetados indicam que a economia por conjunto de injetores e a redução do *downtime* criam ganhos líquidos expressivos em *working capital*, pois reduzem a necessidade de estoques e aumentam a produtividade da frota, o que traduz a remanufatura em vantagem competitiva em contratos de manutenção.

De acordo com Vrublevskyi *et al.* (2023), a resiliência de cadeias logísticas depende de amortecedores capazes de reduzir exposição a choques externos, e nesse ponto a produção local de valor via remanufatura reduz o impacto de tarifas e oscilações cambiais, criando diferencial estratégico para transportadoras que competem em margens estreitas. A adoção de processos de reaproveitamento de alto nível técnico representa, portanto, uma ferramenta de competitividade setorial ao transformar variáveis externas em custos controláveis por meio da manutenção local.

Os limites metodológicos do estudo precisam ser reconhecidos, e Kucera *et al.* (2025) lembram que a heterogeneidade de sistemas de injeção e a dispersão de preços por região influenciam diretamente a projeção de custos. Essa constatação reforça que as conclusões obtidas precisam ser interpretadas considerando variações entre marcas, modelos e práticas comerciais regionais, e que a adoção ampla exige adaptações às especificidades de cada segmento de frota.

Para Mączak *et al.* (2023), a confiabilidade de processos de manutenção de precisão está condicionada ao controle metrológico rigoroso, e isso se relaciona ao risco de curva de aprendizado

em oficinas recém-integradas, que pode aumentar o retrabalho se não houver aderência estrita ao protocolo. Esse risco, entretanto, é mitigável por meio de treinamento contínuo, documentação técnica detalhada e supervisão inicial, permitindo que a curva de implementação seja encurtada e que os resultados se aproximem rapidamente dos padrões já observados em experiências consolidadas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados apresentados ao longo do estudo permitem afirmar que o método de remanufatura desenvolvido com a S-Tronic é exportável e apresenta compatibilidade com os padrões técnicos e regulatórios do mercado norte-americano. A análise comparativa entre cenários mostrou que a solução é capaz de reduzir significativamente os custos diretos de manutenção de injetores, aumentar a previsibilidade de despesas operacionais e melhorar a disponibilidade da frota, ao mesmo tempo em que mantém parâmetros de desempenho equivalentes aos de peças novas. Além dos ganhos financeiros, a adoção contribui para o atendimento às exigências ambientais vigentes nos Estados Unidos, evitando adulterações e reforçando a conformidade com normas de emissões, além de reduzir a dependência de importações de peças sujeitas a volatilidade cambial e tarifária.

A consistência dos resultados brasileiros e latino-americanos funciona como prova de conceito sólida, criando base de confiança para a expansão internacional. A combinação de diagnóstico elétrico preciso, calibração metrológica e validação em bancada oferece um padrão de qualidade que se alinha às necessidades de frotistas e oficinas de grande porte, reforçando o potencial de adoção da tecnologia em um mercado altamente competitivo e regulado.

Como próximos passos, a consolidação do método nos Estados Unidos depende da realização de estudos multicêntricos com dados reais de frotas em operação, em diferentes regiões e com diferentes configurações de motores. Esses estudos devem ser conduzidos em parceria com oficinas e empresas de transporte, utilizando indicadores-chave previamente definidos, como custo por 100 mil milhas, tempo de indisponibilidade, índice de retrabalho e tempo médio entre falhas, de modo a fornecer base empírica robusta para a validação e escalabilidade da solução. A partir dessa etapa, a adoção em larga escala poderá se apoiar em evidências concretas e alinhadas às particularidades do mercado norte-americano, garantindo que a tecnologia se consolide como alternativa viável e estratégica para a gestão de frotas e manutenção diesel.

REFERÊNCIAS

AMERICAN TRUCKING ASSOCIATIONS. *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 Hendra; GONG, Huifeng; WANG, Jin. Investigation of needle motion profile effect on diesel spray in near-nozzle field. *Micromachines*, v. 13, n. 11, e1944, 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, e5074, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/12/5074>.

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, e5814, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/18/5814>.

LEE, Jong-Hyo; KANG, Hong-Yoon; KIM, Young-Woon; HWANG, Yong Woo; KWON, Soon-Gil; PARK, Hee-Won; CHOI, Ji-Woo; CHOI, Hwan-Ho. Analysis of the life cycle environmental impact reductions of remanufactured turbochargers. *Journal of Remanufacturing*, v. 13, p. 187–206, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13243-023-00127-y>.

MACZAK, Jędrzej; WIĘCŁAWSKI, Krzysztof; SZCZUROWSKI, Krzysztof; FIGLUS, Tomasz. New approach of model-based detection of early stages of fuel injector failures. *Eksplotacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, v. 25, n. 1, p. 72-81, 2023. Disponível em: <https://ein.org.pl/New-approach-of-model-based-detection-of-early-stages-of-fuel-injector-failures%2C159977%2C0%2C2.html>.

UNITED STATES. Census Bureau. U.S. *International Trade in Goods and Services (FT-900)*. Suitland, MD, 2025. Disponível em: https://www.census.gov/foreign-trade/Press-Release/current_press_release/.

UNITED STATES. Energy Information Administration. *Weekly U.S. No. 2 Diesel Retail Prices (Dollars per Gallon)*. Washington, DC, 2025. Disponível em: https://www.eia.gov/dnav/pet/pet_pri_gnd_dcus_nus_w.htm.

UNITED STATES. Environmental Protection Agency. *Tampering and aftermarket defeat devices for vehicles and engines*. Washington, DC, 2020. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-12/documents/epatamperingpolicy-enforcementpolicyonvehicleandenginetampering.pdf>.

VRUBLEVSKYI, Oleksii; KORCHAK, Volodymyr; SHPYCHAK, Yurii; LUBARSKYI, Volodymyr. Analysis of potential improvements in the performance of solenoid injectors in diesel engines. *Eksplotacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, v. 25, n. 3, p. 496-504, 2023. Disponível em: <https://ein.org.pl/en/articles/analysis-potential-improvements-performance-solenoid-injectors-diesel-engines.pdf>.



WIĘCŁAWSKI, Krzysztof; FIGLUS, Tomasz; MĄCZAK, Jędrzej; SZCZUROWSKI, Krzysztof.
Method of fuel injector diagnosis based on analysis of current quantities. *Sensors*, v. 22, n. 18, e6735, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/18/6735>.