

O AVANÇO DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL COMO FERRAMENTA ESTRATÉGICA PARA OTIMIZAÇÃO DE ROTAS LOGÍSTICAS

Victor Hugo Barros Matos - Universidade de Fortaleza

Alexandra Siebra

Ana Rita Pinheiro De Freitas - UNIFOR

Afonso Carneiro Lima - UNIFOR

Resumo

Este trabalho explora o papel da inteligência artificial (IA) na otimização de rotas logísticas, com foco em empresas que buscam melhorar sua eficiência operacional, reduzir custos e aumentar a satisfação do cliente. A pesquisa adota uma abordagem exploratória, analisando a literatura e casos práticos de empresas como Amazon e DHL. Os resultados indicam que a implementação de IA transforma a gestão logística, proporcionando maior eficiência, redução de custos e flexibilidade diante das variações de mercado. No entanto, a adoção de IA enfrenta desafios, incluindo a adequação tecnológica e a adaptação cultural das organizações. Conclui-se que a IA é uma ferramenta estratégica para o setor logístico, com potencial para impactar positivamente a cadeia de valor e abrir novas oportunidades de pesquisa em temas como sustentabilidade e inovação tecnológica.

Palavras-chave: Inteligência Artificial. Otimização de Rotas. Last-Mile Delivery.

Abstract

This study explores the role of artificial intelligence (AI) in optimizing logistics routes, focusing on companies aiming to enhance operational efficiency, reduce costs, and increase customer satisfaction. The research adopts an exploratory approach, analyzing literature and practical cases from companies such as Amazon and DHL. The findings indicate that AI implementation transforms logistics management, providing greater efficiency, cost reduction, and flexibility in response to market fluctuations. However, AI adoption faces challenges, including technological adaptation and cultural shifts within organizations. It concludes that AI is a strategic tool for the logistics sector, with the potential to positively impact the value chain and open new research opportunities in areas such as sustainability and technological innovation.

Keywords: Artificial Intelligence. Route Optimization. Last-Mile Delivery.

O AVANÇO DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL COMO FERRAMENTA ESTRATÉGICA PARA OTIMIZAÇÃO DE ROTAS LOGÍSTICAS

1. INTRODUÇÃO

A logística é uma área essencial para o sucesso das empresas modernas, pois envolve a gestão eficiente do transporte, armazenamento e entrega de produtos. Em um mundo cada vez mais globalizado, a capacidade de entregar mercadorias de maneira rápida e econômica pode determinar a competitividade de uma empresa. Conforme observado por Christopher (2018), a forma com que os clientes são alcançados e atendidos se tornou uma dimensão competitiva crucial. E no centro de toda essa ideia está a otimização das rotas logísticas, que influencia diretamente os custos operacionais e a eficiência. Rotas mal planejadas podem levar a atrasos, aumento do consumo de combustível e perda de recursos, impactando negativamente os lucros e a satisfação do cliente.

Historicamente, otimizar rotas logísticas sempre foi um desafio complexo. Sem o uso de tecnologias avançadas, empresas enfrentam problemas como engarrafamentos, mudanças climáticas e a necessidade de replanejamento dinâmico em tempo real. Como destacado por Bowersox, Closs e Cooper (2019), os desafios históricos da logística incluem limitações nos sistemas tradicionais de gestão e dificuldades em integrar soluções que atendam à crescente complexidade das redes logísticas, fatores que impactam diretamente a eficiência e os custos operacionais. A complexidade de rotas envolvendo múltiplos pontos de entrega exige soluções além do cálculo manual ou de métodos tradicionais de roteirização. Rushton, Croucher e Baker (2022) enfatizam que o avanço das tecnologias digitais tem revolucionado o gerenciamento de rotas, proporcionando uma maior capacidade de resposta a variáveis externas e aumentando a eficiência operacional. Nesse contexto, a Inteligência Artificial (IA) surge como uma ferramenta promissora capaz de superar essas limitações e oferecer uma otimização mais eficaz, minimizar custos de transporte e aumentar a satisfação do cliente.

Como destacado por Lee (2021), o uso de ferramentas de IA tem se consolidado como um suporte indispensável para a gestão de negócios no cenário global, proporcionando uma vantagem competitiva significativa e contribuindo para a aceleração e eficiência dos processos organizacionais. À medida que a tecnologia avança, cada vez mais empresas ao redor do mundo incorporam diferentes tipos de soluções tecnológicas em suas operações, buscando otimizar desde a tomada de decisões até a execução de tarefas rotineiras.

A crescente complexidade das cadeias de suprimentos, aliada à demanda por entregas mais rápidas e precisas, tem impulsionado a adoção de tecnologias baseadas em IA para otimizar processos, reduzir custos e aumentar a flexibilidade operacional. Conforme apontado por Anselmo e Junior (2021), a integração dos mercados internacionais e o crescimento da competitividade exigem que as empresas melhorem sua eficiência e diminuam os custos em todos os elos da cadeia de valor. Nesse contexto, empresas de diversos setores, como a Amazon no e-commerce e a DHL na logística, já utilizam a IA para prever demandas, automatizar processos de inventário e, sobretudo, melhorar o planejamento e a execução de rotas logísticas, permitindo respostas mais rápidas a mudanças nas condições de tráfego, climáticas ou demandas dos clientes.

Diante do cenário proposto, a presente temática tem como objetivo explorar como a IA pode otimizar rotas logísticas e gerar valor para as empresas, com benefícios como redução de custos, maior eficiência nas entregas e aumento da satisfação do cliente.

A relevância deste tema se justifica tanto no âmbito acadêmico quanto no mercado. Para as empresas, a otimização de rotas gera economia de tempo e recursos, além de reduzir o impacto ambiental. Para a academia, o uso de IA na logística é um campo de pesquisa inovador, com potencial para o desenvolvimento de algoritmos e a gestão de grandes volumes de dados.

Diante de sua aplicação crescente, é essencial investigar como essas tecnologias podem enfrentar os desafios atuais do setor.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A logística, em seu conceito tradicional, tem como seu objetivo central garantir que os produtos certos sejam entregues no local correto, na quantidade exata, no tempo adequado e ao menor custo possível, como destacada pela definição do *Council of Logistics Management* (CLM, 1991): Logística é o processo de planejamento, implantação e controle do fluxo eficiente e eficaz de mercadorias, serviços e das informações relativas desde o ponto de origem até o ponto de consumo com o propósito de atender às exigências dos clientes.

Ao longo dos anos, a logística evoluiu, acompanhando as transformações tecnológicas e as mudanças nas cadeias de suprimentos globais. A demanda por produtos e serviços personalizados está crescendo constantemente, e como resultado, as operações logísticas precisam se adaptar a esse cenário em transformação. Devido ao aumento da complexidade, não é mais possível gerenciá-las com práticas comuns de planejamento e controle. (Barreto, Amaral; Pereira, 2017).

O advento da Indústria 4.0, também conhecida como Quarta Revolução Industrial, “representa a mais nova era da transformação industrial ao introduzir a digitalização de processos e a automação de modelos de produção; esta nova fase da indústria transformadora funde as mais recentes tecnologias de informação com os diversos processos produtivos e mais precisamente os logísticos.” (Hamdi; Abouabdellah, 2022).

Esta nova era tecnológica trouxe uma transformação significativa para o conceito de logística, dando origem à Logística 4.0, definida por Hamdi e Abouabdellah (2022) como a integração de tecnologias digitais avançadas e automação nos processos logísticos, alinhando-se ao contexto mais amplo da Indústria 4.0. Este novo conceito destaca a implementação flexível de processos logísticos com o objetivo de melhorar a gestão da produção e a eficiência. A Logística 4.0 utiliza tecnologias como Internet das Coisas (IoT) e big data para permitir o rastreamento em tempo real de materiais, melhorar a visibilidade das informações e aumentar a conectividade dentro da cadeia de suprimentos. Esse novo modelo permite uma operação mais eficiente e responsiva, atendendo à crescente demanda do mercado por entregas rápidas e personalizadas. Com isso, a Logística 4.0 não apenas otimiza custos, mas também fortalece o atendimento ao cliente, sendo essencial para a competitividade das empresas no cenário global atual.

2.1 Roteirização e otimização de rotas

A roteirização é um componente fundamental na logística moderna, é o processo de planejamento das rotas que será seguido por veículos para realizar entregas ou coletas de mercadorias. Ela envolve determinar o trajeto mais eficiente para atender a uma série de destinos, levando em conta variáveis como a distância entre os pontos, o tempo necessário para cada parada, e as janelas de entrega exigidas pelos clientes, assegurando que todos os pedidos sejam atendidos da maneira mais eficaz possível, minimizando custos, tempo e maximizando a utilização dos recursos disponíveis (Taha, 2008; Toth e Vigo, 2014).

Esse processo é especialmente relevante no contexto logístico, pois uma roteirização eficiente pode reduzir significativamente o consumo de combustível, o desgaste dos veículos e o tempo total de operação. Golden, Raghavan e Wasil (2008) destacam que a roteirização bem feita não só melhora a eficiência operacional, como também contribui para a satisfação do cliente ao garantir entregas mais rápidas e previsíveis.

A roteirização por si só não resolve todos os desafios logísticos, especialmente em contextos mais complexos e dinâmicos. É aí que entra a otimização de rotas, que busca refinar e ajustar as rotas planejadas para maximizar a eficiência. Ela considera não apenas os trajetos,

mas também variáveis como condições de tráfego, restrições de carga e horários de funcionamento dos clientes (Toth & Vigo, 2002).

A otimização de rotas é um dos maiores desafios enfrentados pelas empresas que operam no setor logístico. Entre os principais problemas de otimização, destaca-se o Problema do Caixeiro Viajante (Traveling Salesman Problem - TSP) e o Problema de Roteamento de Veículos (Vehicle Routing Problem - VRP): O TSP busca determinar a rota mais curta para que um agente (por exemplo, um veículo) visite uma série de pontos, retornando ao ponto de partida sem repetir nenhum deles. Já o VRP é uma generalização do TSP que segundo Toth e Vigo (2014), vários veículos são usados para atender a uma lista de clientes, levando em consideração restrições como capacidades de carga e janelas de tempo.

Métodos tradicionais de otimização para resolver esses problemas incluem algoritmos, como o Algoritmo de Dijkstra (Dijkstra, 1959): Um algoritmo de caminho mínimo usado em grafos. É utilizado para encontrar o caminho mais curto entre dois vértices em um grafo ponderado, onde os pesos são associados às arestas. E técnicas baseadas em programação linear, como Taha (2008) descreve de forma detalhada a aplicação de programação linear e outros métodos matemáticos para resolver problemas complexos de roteirização e otimização.

No entanto, à medida que as operações logísticas se tornam mais complexas, a utilização de métodos avançados como machine learning, análise de dados em tempo real e algoritmos baseados em inteligência artificial tem se mostrado promissores na otimização de rotas. Essas abordagens não apenas melhoram a eficiência, mas também possibilitam uma adaptação em tempo real a mudanças nas condições de trânsito e demanda (Agatz, Campbell & Fleischmann, 2012; Chen et al, 2024).

2.2 Inteligência Artificial aplicada à Logística

Nos últimos anos, a Inteligência Artificial emergiu como uma das tecnologias mais transformadoras no setor logístico, oferecendo soluções inovadoras para desafios complexos e dinâmicos. A IA permite a análise e processamento de grandes volumes de dados em tempo real, facilitando a tomada de decisões e a otimização de processos logísticos, como gestão de inventário, roteirização de entregas, previsão de demanda e gestão de armazéns (Russell; Norvig, 2016).

Uma das principais aplicações da IA na logística é a automação de processos. Com o uso de redes neurais e machine learning, sistemas inteligentes são capazes de aprender padrões de comportamento e prever demandas, otimizando estoques e evitando tanto o excesso quanto a falta de produtos (Goodfellow et al., 2016). Além disso, algoritmos de aprendizado de máquina são utilizados para criar modelos preditivos que ajudam a antecipar problemas e sugerir soluções antes que eles impactem as operações, como identificar possíveis atrasos de entrega e congestionamentos (Sharma et al., 2020).

Outra aplicação importante da IA é a otimização de rotas, onde algoritmos são capazes de processar dados em tempo real sobre condições de tráfego, clima e até eventos inesperados, ajustando as rotas automaticamente para garantir a entrega mais rápida e eficiente possível. Essa capacidade de adaptação é essencial para lidar com variáveis que os métodos tradicionais de roteirização e otimização não conseguem prever ou gerenciar com a mesma agilidade (Agatz, Campbell & Fleischmann, 2012; DHL, 2020).

Empresas líderes no setor, como Amazon e DHL, têm se destacado no uso da IA para transformar suas operações logísticas. A Amazon, por exemplo, utiliza sistemas de IA para gerenciar sua rede de armazéns e centros de distribuição, otimizando a alocação de produtos e a separação de pedidos com alta precisão. Já a DHL implementou soluções baseadas em IA para melhorar a roteirização de seus veículos, reduzindo custos e tempos de entrega: Eles estão utilizando IA para otimizar a roteirização no last-mile, analisando dados de volume e requisitos

de serviço com até 95% de precisão, permitindo planejamento preciso de rotas e priorizando entregas urgentes e ajustando o percurso para eficiência (DHL 2023).

Além de otimizar processos, a IA também tem sido crucial para a gestão preditiva de manutenção de veículos e equipamentos logísticos. Com algoritmos que analisam dados históricos e em tempo real, é possível prever quando um equipamento pode falhar e programar manutenções preventivas, reduzindo o tempo de inatividade e os custos de reparo (Lecun; Bengio; Hinton, 2015).

Em suma, a inteligência artificial tem o potencial de redefinir a logística, oferecendo soluções mais ágeis, precisas e econômicas. Com a crescente disponibilidade de dados e o avanço das tecnologias, espera-se que a aplicação de IA na logística se expanda ainda mais, tornando-se uma parte essencial da Logística 4.0, que busca a integração total de sistemas inteligentes para uma gestão de cadeias de suprimentos mais eficiente e conectada.

3. METODOLOGIA

Este estudo foi conduzido com base em uma abordagem exploratória, tendo como objetivo principal investigar e compreender o uso da inteligência artificial na otimização de rotas logísticas, uma área central para o ganho de eficiência e redução de custos no setor logístico. A pesquisa exploratória é uma abordagem metodológica amplamente utilizada para investigar problemas pouco compreendidos ou explorar áreas em que há escassez de estudos prévios. De acordo com Gil (2008), essa abordagem permite ao pesquisador obter insights iniciais, identificar variáveis-chave e construir hipóteses para estudos mais aprofundados.

Segundo Cervo, Bervian e Silva (2007), a pesquisa exploratória é fundamental quando se busca aprofundar o entendimento sobre um fenômeno ou tema ainda pouco discutido na literatura acadêmica. Ela pode ser realizada por meio de análises bibliográficas, entrevistas com especialistas ou estudo de casos práticos. Nesse contexto, Yin (2015) destaca que os estudos de caso, amplamente usados em pesquisas exploratórias, oferecem uma visão detalhada e contextualizada de uma situação específica, contribuindo para a construção de conhecimento.

Como o campo de estudo se trata de uma área em constante evolução, a pesquisa exploratória permite compreender aplicações atuais, tendências, oportunidades e desafios da IA na logística, oferecendo uma visão ampla do tema.

A coleta de dados baseou-se em fontes secundárias qualitativas, como artigos acadêmicos e publicações científicas acessadas via bases reconhecidas como ResearchGate e Google Scholar, valorizadas pela qualidade do conteúdo acadêmico. Esses artigos foram escolhidos por abordarem o uso de inteligência artificial em operações logísticas, destacando-se o ajuste dinâmico de trajetos e a previsão de demandas, que utilizam algoritmos inteligentes para lidar com desafios como a gestão de eventos em tempo real, demonstrando como a IA pode mitigar problemas operacionais de forma eficiente. Além de estudos de caso realizados por empresas especializadas em cadeias de suprimento, como a Supply Chain Dive e CDO Times, que realizaram pesquisas em empresas líderes do setor (Amazon, DHL e Descartes) e que já aplicam IA em suas operações, e forneceram subsídios para explorar as melhores práticas, e desafios do uso de IA na roteirização e otimização logística. As fontes selecionadas combinam abordagens teóricas e estudos de caso práticos, oferecendo a fundamentação necessária para o desenvolvimento deste trabalho.

Na análise dos dados, foi aplicada uma análise de conteúdo qualitativa para desenvolver uma tabela (Figura 4) que mostra os 10 principais aspectos do setor logístico e como esses aspectos mudaram com a implantação da inteligência artificial, fazendo uma comparação entre o antes e depois do uso da IA. Além disso, foram selecionados dados e gráficos que demonstram o impacto da IA nas operações dessas empresas, que serão apresentados e suportados no decorrer deste trabalho.

Assim, essa abordagem proporciona uma base relevante para explorar as nuances da IA na logística, com foco centrado na otimização de rotas, oferecendo um panorama exploratório sólido para fundamentar estudos futuros sobre o tema.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

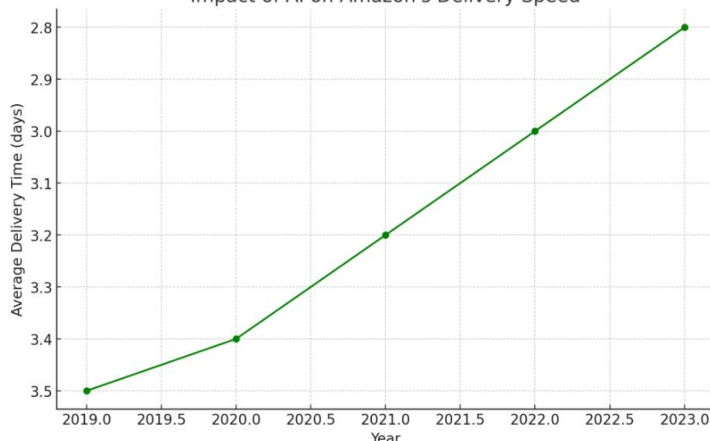
4.1 Apresentação dos Resultados

A Amazon.com, Inc. é uma das maiores empresas de comércio eletrônico e tecnologia do mundo, amplamente reconhecida por sua influência no mercado global e por redefinir os padrões de consumo e entrega no varejo. Fundada em 1994, a empresa tornou-se referência global em logística, destacando-se pelo uso de tecnologias avançadas, como IA e robótica, para otimizar processos e atender às demandas de seus clientes de forma rápida e eficiente.

A pesquisa exploratória revelou diversos pontos positivos da inteligência artificial na otimização de rotas logísticas, evidenciando seu papel crucial na melhoria da eficiência operacional. Como pode-se observar no gráfico a seguir sobre o impacto direto da IA na velocidade de entrega da Amazon, há uma redução consistente no tempo médio de entrega da empresa entre 2019 e 2023. Observa-se uma queda de aproximadamente 20% no tempo médio de entrega, de 3,5 dias em 2019 para 2,8 dias em 2023, e essa redução reflete o impacto direto das tecnologias de inteligência artificial aplicadas à logística, incluindo o planejamento dinâmico de rotas e a otimização das operações em armazéns.

O declínio se torna mais acentuado a partir de 2020, período em que a Amazon intensificou o uso de soluções baseadas em IA para lidar com os desafios logísticos crescentes, como o aumento da demanda por entregas rápidas devido à pandemia de COVID-19. Esses avanços não apenas aceleraram o tempo de entrega, mas também contribuíram para uma melhoria significativa na experiência do cliente, reforçando a posição da empresa como líder no setor logístico.

Figura 1: Impacto da IA na velocidade de entrega da Amazon
Impact of AI on Amazon's Delivery Speed



Fonte: Carsten Krause (2024), CDO TIMES Research (2024) e Amazon (2024).

O outro gráfico a seguir também ilustra o impacto positivo da IA nas operações da Amazon, mas no âmbito do giro de estoque. O gráfico apresenta a taxa de giro de estoque da Amazon entre 2019 e 2023. Inicialmente, observa-se uma leve redução de 8,2 para 8,1 em 2020, possivelmente refletindo os impactos das interrupções globais na cadeia de suprimentos causadas pela pandemia de COVID-19. Entretanto, a partir de 2021, há uma recuperação significativa e progressiva, culminando em uma taxa de 8,9 em 2023.

Essa tendência crescente a partir de 2021 reflete a adoção bem-sucedida de sistemas de gerenciamento de inventário impulsionados por inteligência artificial. Essas tecnologias permitiram à Amazon otimizar os níveis de estoque, reduzindo excessos e melhorando o uso do

capital. O aumento contínuo na taxa de giro de inventário demonstra a eficácia da transformação digital na cadeia de suprimentos da Amazon, melhorando não apenas a eficiência operacional, mas também a capacidade de atender à demanda dos consumidores de maneira ágil.

Figura 2: Taxa de rotatividade de estoque da Amazon ao longo do tempo

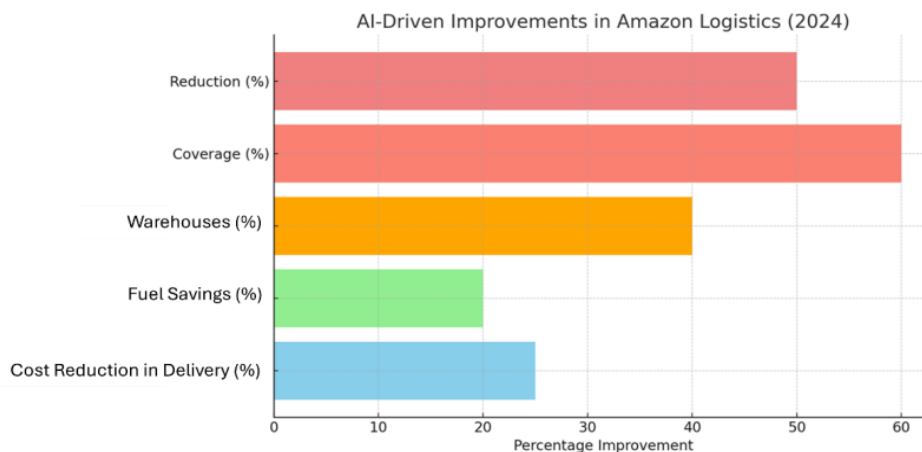


Fonte: Carsten Krause (2024), CDO TIMES Research (2024) e Amazon (2024).

Didast et al. (2024) em seu artigo sobre tendências e desenvolvimentos recentes da inteligência artificial na logística, traz um estudo empírico da utilização sofisticada que a Amazon faz da IA nas suas operações. O diagrama a seguir ilustra os efeitos das melhorias baseadas na inteligência artificial que a empresa aplicou em suas atividades.

O gráfico demonstra alguns principais benefícios causados por essa implementação, como: a redução em até 50% do tempo necessário para o processamento de pacotes, devido aos algoritmos de IA, permitindo maior agilidade nas entregas; a ampliação da cobertura de entregas no mesmo dia ou no dia seguinte, alcançando 60% dos pedidos principais, resultado direto da otimização de rotas e de estoques; nos armazéns, a aplicação de robôs equipados com IA e sistemas de aprendizado de máquina aumentou a produtividade operacional em até 40%, acelerando significativamente o processamento e a movimentação de mercadorias; a economia de combustível chegou a 20%, impulsionada pela otimização de frotas e pelo crescente uso de veículos elétricos, alinhando-se às metas de sustentabilidade; a redução de custos na entrega, que atingiu até 25%, devido ao uso de algoritmos de IA para otimizar rotas, prevendo condições de trânsito e ajustando as entregas de forma dinâmica.

Figura 3: Melhorias impulsionadas pela IA na logística da Amazon



Fonte: Didast et al. (2024), "Artificial Intelligence and Logistics: Recent Trends and Development".

Em último ponto, tendo como base os estudos considerados e artigos que dissertam sobre a temática deste trabalho, foi possível realizar a tabela a seguir que apresenta uma comparação entre o estado anterior e posterior ao uso de IA em diferentes setores logísticos. Cada setor tem descrições sobre os desafios enfrentados antes da implementação da IA e os benefícios observados após sua aplicação.

Pode-se perceber que o impacto do uso de inteligência artificial nos setores logísticos é notável, conforme os dados apresentados:

Previsão de Demanda: Cerca de 44% dos executivos de cadeias de suprimentos enfrentavam dificuldades para prever demandas, resultando em planejamentos pouco eficazes. Após a adoção da IA, as previsões tornaram-se mais precisas, possibilitando um planejamento de ponta a ponta mais eficiente.

Operações de Armazém: Anteriormente, eram perdidas cerca de 3.000 horas anuais devido a processos manuais. Com a IA, houve uma redução de 50% no tempo gasto em operações e um aumento de 90% da segurança, refletindo diretamente em maior eficiência operacional.

Transporte de Cargas: O congestionamento no trânsito representava um custo de US\$ 74,5 bilhões anuais para o setor, de acordo com o Instituto Americano de Pesquisa em Transporte. A aplicação de IA possibilitou o planejamento de rotas em tempo real, reduzindo significativamente esses custos.

Rastreamento de Ativos: Antes, o rastreamento manual comprometia a eficiência. Após a introdução de IA, foi implementado um sistema de rastreamento automatizado em tempo real, otimizando a gestão de ativos.

Quadro 1: Aspectos logísticos e a influência da IA

Setor logístico	Antes do uso da IA	Depois do uso da IA
Previsão de Demanda	44% dos executivos da cadeia de suprimentos não conseguiram gerenciar proativamente as interrupções	Planejamento previsto utilizando IA, melhorando a visibilidade de ponta a ponta
Operações de Armazém	3.000 horas por ano perdidas devido a processos manuais em armazéns	Maior eficiência operacional com redução de 50% nos custos de operação e aumento de 90% na segurança utilizando sistemas de IA
Transporte de Cargas	A congestão do tráfego custa à indústria US\$ 74,5 bilhões anualmente devido ao planejamento estático de rotas (Instituto de Pesquisa de Transporte Americano)	Rotas otimizadas em tempo real via IA, reduzindo consideravelmente os custos com combustível e os custos de entrega na última milha em até 30%
Logística Reversa	Processamento de devoluções complicado sem um sistema eficiente	Gestão eficiente de substituições devido à IA
Rastreamento de Ativos	Rastreamento manual de ativos, reduzindo a eficiência	Rastreamento automatizado em tempo real usando IA, aumentando a produtividade
Precificação Dinâmica	Modelos de precificação fixos que não respondem prontamente às mudanças de mercado	Precificação em tempo real baseada na demanda, maximizando a lucratividade
Gestão de Transportadoras	Seleção limitada de transportadoras e negociações contratuais prolongadas	Seleção inteligente e automatizada de transportadoras feita em instantes utilizando IA
Gestão de Riscos	Resposta reativa a incidentes, causando resolução atrasada	Identificação proativa de riscos e mitigação utilizando IA
Atendimento ao Cliente	Suporte manual, levando a tempos de resposta mais lentos	Assistência rápida alimentada por IA, proporcionando um atendimento ao cliente rápido e eficiente. As pontuações de satisfação dos clientes podem melhorar em aproximadamente 15% por meio de soluções de última milha aprimoradas com IA
Conformidade e Detecção de Fraudes	Verificações manuais que consomem tempo, permitindo que atividades fraudulentas escapem	Análise eficiente movida por IA e prevenção de fraudes, aprimorando a segurança e a conformidade

Fonte: Autor (2024), Adaptado de Eliftech (2024)

Os dados apresentados no quadro demonstram de forma clara os impactos positivos da implementação de inteligência artificial nos setores logísticos. Os ganhos em eficiência operacional, evidenciados pela redução nos custos de transporte e no tempo médio de entrega, destacam como tecnologias avançadas, como a IA, se conectam com diversos aspectos da logística, como a otimização de rotas, e podem transformar o desempenho das empresas.

Os resultados observados mostram otimizações expressivas em tempos de entrega e custos operacionais, além de um aumento na satisfação do cliente devido à confiabilidade e rapidez nas entregas, promovendo uma experiência de entrega mais personalizada e centrada no cliente. Essas aplicações práticas são essenciais para organizações que buscam se adaptar às exigências de um mercado cada vez mais competitivo.

Conforme o apresentado, é possível perceber o impacto positivo significativo e os desafios da implementação de IA na logística, especialmente na otimização de rotas e na *last-mile delivery*, abrangendo aspectos como eficiência operacional, satisfação do cliente, comparação com métodos tradicionais e tendências futuras.

4.2.1 Eficiência Operacional e Redução de Custos Operacionais

A aplicação da IA proporciona um aumento expressivo na eficiência operacional, resultando em redução de custos e tempos de entrega. Como discutido pela Boston Consulting Group (BCG, 2024), em um estudo recente relevante de mercado, a eficiência operacional pode aumentar em até 30% com o uso de tecnologias de IA graças ao aperfeiçoamento de atividades como previsão de demanda e automação de inventário - O estudo analisa como a inteligência artificial pode transformar várias funções dentro das empresas, incluindo a automação de processos e a previsão de demanda. As empresas que implementam IA nesses processos melhoram a eficiência operacional, o que resulta em uma redução significativa de custos e aumento na produtividade.

Em estudo recente, a McKinsey também relatou que empresas que implementaram cedo a automação e inteligência artificial em suas cadeias de suprimentos viram reduções de até 15% nos custos logísticos, com outros benefícios significativos, como a redução de estoques em 35% e o aumento dos níveis de serviço em 65%.

Empresas líderes, como Amazon e DHL, exemplificam esses benefícios ao utilizar IA para prever padrões de tráfego e ajustar suas rotas em tempo real, conforme variáveis como clima, trânsito e demanda flutuante. No caso da DHL, a IA permite uma roteirização dinâmica que se adapta a fatores em tempo real, como condições de tráfego e demandas de última hora, esse nível de adaptabilidade é impossível em modelos tradicionais, nos quais as rotas são pré-estabelecidas sem considerar mudanças imediatas nas variáveis externas. A utilização de IA para prever fluxos de pedidos e ajustar a logística conforme as necessidades operacionais contribui para uma redução substancial de ociosidade nos veículos e nos centros de distribuição, e essa adaptação tem demonstrado ser essencial em áreas urbanas, onde variações no tráfego e nas condições climáticas podem impactar diretamente a entrega (McKinsey & Company, 2017).

Além disso, a aplicação de IA em planejamento de carga, seleção de materiais e manutenção preditiva também gera economia em várias frentes da operação. Por exemplo, o uso de inteligência de máquina para otimização de rotas e manutenção de veículos permite que as empresas reduzam o tempo ocioso e evitem custos com reparos inesperados, diminuindo as despesas gerais. Segundo análise da BCG, essa flexibilidade permite maior responsividade a mudanças e aumento da precisão nas entregas, consolidando um serviço de maior valor agregado para o cliente.

4.2.2 Comparação com Outros Modelos de Logística

Historicamente, a logística tradicional dependeu de processos manuais, como o planejamento de rotas realizado por motoristas ou gestores, além de estratégias baseadas em

mapas e estimativas de tempo de entrega. Embora esses métodos ainda sejam usados, eles são frequentemente ineficientes, especialmente diante de mudanças em tempo real, como engarrafamentos ou condições climáticas adversas.

Conforme destacado por Rushton, Croucher e Baker (2017), essas práticas tradicionais apresentam limitações significativas na capacidade de reagir a situações imprevistas, levando a atrasos e aumento de custos operacionais.

Em comparação com modelos tradicionais de logística, os sistemas baseados em IA se destacam pela precisão e flexibilidade. Diferente das abordagens convencionais, que seguem uma programação fixa e geralmente não conseguem responder a alterações de demanda ou condições de tráfego em tempo real, a IA possibilita uma logística responsiva.

Como citado anteriormente, estudos feitos pela McKinsey & Company indicam que empresas que utilizam IA em suas operações logísticas, como Amazon e DHL, têm uma redução média de até 20% nos custos operacionais em comparação com aquelas que ainda operam com métodos convencionais. Esse diferencial permite que empresas com IA alcancem maior agilidade, o que é essencial para atender à demanda atual do mercado por entregas rápidas e confiáveis.

Além da inteligência artificial, outras tecnologias, como big data e Internet das Coisas (IoT), também têm sido utilizadas para melhorar as operações logísticas - Big data refere-se ao uso de grandes volumes de dados para analisar padrões e prever demandas, enquanto a IoT envolve a conexão de dispositivos inteligentes que coletam e transmitem dados em tempo real sobre as condições de transporte, como temperatura, localização e integridade das cargas.

Conforme observado por Wamba et al. (2015), o uso de big data auxilia na previsão de demandas e na análise de tendências de mercado, enquanto a integração com IoT permite monitoramento contínuo. A IA, ao integrar essas tecnologias, oferece um valor adicional, adaptando as informações às condições operacionais em tempo real e criando redes logísticas inteligentes e responsivas.

4.2.3 Satisfação do Cliente

A aplicação de inteligência artificial na logística tem se mostrado uma solução valiosa para elevar a satisfação dos clientes, uma vez que contribui para entregas mais rápidas, precisas e eficientes. A personalização dos serviços logísticos vem se tornando cada vez mais um diferencial competitivo importante, especialmente na última milha. Com a IA possibilitando uma gestão aprimorada de rotas e garantindo que os produtos cheguem ao destino no menor tempo possível, isso minimiza os atrasos e, conseqüentemente, melhora a experiência do cliente final. E essa agilidade nas entregas é especialmente importante em um contexto de comércio eletrônico, onde a rapidez de entrega influencia diretamente a percepção do consumidor sobre a empresa (ElifTech, 2024; HyScaler, 2024).

A DHL, por exemplo, oferece ferramentas que permitem aos clientes acompanhar as entregas em tempo real e ajustar o endereço ou horário de entrega. Esse nível de controle e transparência proporciona uma experiência centrada no cliente, que reduz o índice de falhas nas entregas, gerando um sentimento de cuidado e atendimento individualizado, contribuindo para uma experiência positiva e uma melhora na satisfação.

Com o aumento das expectativas dos consumidores em relação à velocidade e precisão das entregas, o uso de IA é um fator crucial para atingir esses padrões e, conseqüentemente, aumentar a fidelidade dos clientes.

4.3 Desafios, Oportunidades e Tendências

4.3.1 Desafios e Limitações

A implementação da IA na otimização de rotas logísticas oferece diversos benefícios, mas também envolve uma série de desafios e limitações que as empresas precisam enfrentar para obter o máximo de eficácia dessa tecnologia:

Complexidade na Integração de Sistemas:

Uma das maiores dificuldades que as empresas enfrentam ao adotar IA em suas operações logísticas é a integração com os sistemas existentes. Muitas empresas já utilizam sistemas de gestão complexos (como WMS - Warehouse Management Systems e TMS - Transportation Management Systems), que muitas vezes não são compatíveis com as novas soluções baseadas em IA. Essa barreira está alinhada aos desafios apontados por Queiroz, Pereira, Telles e Machado (2021), que destacam a necessidade de compatibilidade e interoperabilidade entre as tecnologias digitais da Indústria 4.0 e as infraestruturas legadas, um aspecto crítico para a transformação digital das cadeias de suprimentos.

A integração desses sistemas exige investimentos consideráveis em termos de tempo e dinheiro, além de mudanças na infraestrutura de TI. Como apontado por Brynjolfsson e McAfee (2017), a integração de IA requer que as empresas possuam uma infraestrutura tecnológica robusta e flexível para lidar com as demandas de processamento de dados em tempo real.

Custo Inicial Elevado e Incerteza no Retorno Sobre Investimento:

Outro desafio importante está relacionado ao custo inicial de implementação e o retorno sobre o investimento: Embora a IA possa gerar economias significativas ao longo do tempo, o investimento inicial necessário para a aquisição de tecnologias avançadas, treinamento de equipes e adaptação dos processos logísticos pode ser muito alto, especialmente para empresas de menor porte. Isso pode ser um obstáculo considerável onde muitas pequenas e médias empresas ainda têm receio de investir em IA devido ao risco percebido de custos elevados e retornos a longo prazo (Deloitte Insights, 2020; ESI ThoughtLab, 2020).

A incerteza quanto ao ROI também é um desafio. Como qualquer investimento em tecnologia, a implementação de IA pode envolver riscos financeiros e a expectativa de que os custos serão reduzidos e a eficiência aumentada nem sempre se concretiza, especialmente se as soluções de IA não forem bem implementadas ou se houver problemas técnicos. As empresas precisam avaliar cuidadosamente os riscos envolvidos e estar preparadas para ajustar suas estratégias caso o ROI não seja alcançado nos prazos esperados (Journal of Business Logistics, 2021; Deloitte Insights, 2020).

Qualidade e Disponibilidade dos Dados:

A qualidade e a disponibilidade dos dados são essenciais para o sucesso de qualquer aplicação de IA, incluindo a otimização de rotas. A IA depende de grandes volumes de dados para treinar seus modelos e fazer previsões precisas, no entanto, em muitas empresas, os dados podem estar dispersos, desorganizados ou desatualizados. A falta de dados precisos e em tempo real pode afetar diretamente a eficácia das soluções de IA. Jeble et al. (2018) afirmam que dados imprecisos podem levar a decisões subótimas e, por consequência, aumentar os custos operacionais.

Resistência Cultural e Falta de Habilidades:

Davenport e Ronanki (2018) destacam que o sucesso da implementação de IA nas empresas não depende apenas da tecnologia, eles argumentam que uma abordagem integrada exige adaptações culturais, onde os líderes devem promover uma mentalidade aberta à inovação e preparar as equipes para operar de forma colaborativa com as novas ferramentas de IA. Muitos profissionais da logística podem ter resistência a novas tecnologias, especialmente quando se trata de IA, devido ao medo de substituição por máquinas ou pela complexidade percebida da tecnologia. Além disso, a falta de profissionais qualificados que compreendam tanto a logística quanto a IA pode dificultar a implementação bem-sucedida dessa tecnologia nas operações.

Para Davenport e Ronanki (2018), treinamento adequado e uma mudança organizacional são essenciais para maximizar o valor da IA, pois permitem que os

colaboradores não apenas compreendam a tecnologia, mas também saibam aplicá-la com eficácia no contexto de seus papéis e responsabilidades.

Preocupações Éticas e Regulatórias:

As preocupações éticas e regulatórias também são desafios importantes na implementação de inteligência artificial. O uso de IA para otimização de rotas pode envolver o processamento de dados sensíveis, como informações pessoais de clientes ou dados de localização, o que levanta questões sobre privacidade e segurança de dados. Empresas precisam garantir que suas soluções de IA estejam em conformidade com as regulamentações de proteção de dados, como o GDPR na Europa, como destacado pelo Parlamento Europeu (2020). Além disso, a tomada de decisões autônomas pela IA, como a escolha de rotas em tempo real, pode gerar questões sobre responsabilidade em casos de falhas, especialmente quando a decisão é tomada sem intervenção humana direta.

O relatório da European Commission (2021) aborda a necessidade urgente de um quadro regulatório para a IA, destacando que muitas empresas não têm políticas claras para gerenciar os desafios éticos e as preocupações com privacidade e segurança no uso de IA e discute a proposta de uma abordagem regulatória equilibrada para garantir a confiança na IA enquanto se incentiva a inovação.

A pesquisa de Mittelstadt et al. (2016) debate como as empresas muitas vezes enfrentam desafios éticos em suas implementações de IA, como a falta de uma estrutura clara para garantir que as decisões feitas por inteligência artificial não sejam enviesadas ou discriminatórias e destaca a complexidade de gerenciar questões éticas em um campo que ainda está em rápida evolução.

Portanto, a adoção da inteligência artificial na otimização de rotas envolve desafios técnicos, culturais e regulatórios. As empresas devem se preparar para superá-los, investindo em tecnologia, treinamento e planejamento estratégico. Superados esses desafios, os benefícios da IA, como a redução de custos e a melhoria na eficiência, podem ser imensos, como demonstrado por vários estudos recentes na área.

4.3.2 Oportunidades

A implementação da inteligência artificial na otimização de rotas logísticas cria uma série de oportunidades estratégicas para as empresas que buscam aprimorar sua eficiência operacional. Em um ambiente onde a demanda por rapidez e flexibilidade é crescente, a adoção da IA permite um controle mais preciso sobre as variáveis que influenciam o transporte, reduzindo tempos de entrega e aumentando a precisão das operações, oferecendo oportunidades para um monitoramento em tempo real de rotas e veículos, permitindo ajustes automáticos que maximizam a produtividade e o aproveitamento de recursos.

Inovação Tecnológica

A IA, combinada com outras tecnologias emergentes como citado anteriormente, abre espaço para inovações significativas na logística. O uso de drones e veículos autônomos, por exemplo, é um dos focos de grandes empresas do setor, como Amazon e Alibaba, que veem a integração com IA como um meio de transformar suas operações de entrega, especialmente no last-mile (Shipa Delivery 2023).

A Amazon, por exemplo, já explora drones para entregas em áreas urbanas, permitindo uma logística mais rápida e reduzindo a dependência de veículos convencionais. A IA tem o potencial de automatizar processos de roteirização, minimizando falhas humanas e otimizando o planejamento de rotas para demandas específicas (McKinsey & Company, 2021).

Vantagens Competitivas por Personalização do Serviço

Com a inteligência artificial, as empresas têm a oportunidade de oferecer um serviço mais personalizado, capaz de atender às necessidades dos clientes de forma ágil e eficaz.

Ferramentas de IA possibilitam que empresas criem perfis detalhados de padrões de compra e entrega, antecipando-se a necessidades futuras e proporcionando um atendimento que se diferencia pela velocidade e pela assertividade, esse nível de customização gera vantagens competitivas valiosas, aumentando a fidelidade dos clientes e contribuindo para uma maior participação de mercado.

Sustentabilidade e Responsabilidade Ambiental

Outra oportunidade relevante oferecida pela IA é a melhoria no impacto ambiental das operações logísticas. Conforme relatório da DHL, a utilização de algoritmos avançados na logística last-mile não apenas melhora a roteirização, mas também contribui para uma redução significativa das emissões de CO₂ ao otimizar rotas e reduzir viagens desnecessárias. Essa prática, combinada com técnicas de previsão de demanda, reduz a quantidade de veículos em circulação, impactando diretamente na pegada de carbono das empresas e contribuindo diretamente para um transporte mais verde alinhado com objetivos globais de sustentabilidade (DHL Express, 2020).

Aumento da Agilidade e Resiliência Organizacional

Em cenários de demanda flutuante, a IA permite o monitoramento em tempo real e a previsão de mudanças que poderiam impactar negativamente as entregas, como congestionamentos, condições climáticas adversas e alterações no comportamento do consumidor. Esse monitoramento contínuo possibilita a criação de rotas alternativas quase instantaneamente, reduzindo o impacto de eventos inesperados e aumentando a resiliência da cadeia de suprimentos. Essa adaptação imediata às variáveis externas cria oportunidades para as empresas entregarem de forma mais rápida e previsível, essencial para mercados que valorizam agilidade (Chawla, 2024; Oracle, 2024).

Essas oportunidades demonstram que a adoção da IA na logística vai além de melhorias operacionais imediatas, criando uma base para inovação, sustentabilidade e expansão estratégica. Ao explorar essas possibilidades, as empresas podem não só aumentar sua competitividade no mercado, mas também se alinhar às expectativas dos clientes e das regulamentações ambientais, consolidando-se como líderes em práticas logísticas avançadas.

4.3.3 Perspectivas Futuras

As tendências para o uso da inteligência artificial na otimização de rotas indicam um crescimento substancial na implementação de soluções mais sofisticadas e integradas aos sistemas logísticos, principalmente com a introdução de tecnologias emergentes, como a Internet das Coisas (IoT) e o aprendizado de máquina (ML). Essas tecnologias possibilitam a coleta de dados em grande escala, que alimentam os algoritmos de IA, tornando-os mais precisos e eficientes ao longo do tempo.

O uso combinado de IA com essas tecnologias emergentes, como IoT e veículos autônomos, promete revolucionar ainda mais o setor: Sensores em veículos e equipamentos logísticos irão fornecer dados em tempo real, possibilitando o ajuste automático de rotas e a criação de sistemas de logística autônomos, que diminuem o tempo de resposta às variáveis de rota e aumentam a segurança das operações. Essa evolução é um fator crucial para atender a demandas crescentes por entregas rápidas e sem falhas. A integração entre IA e IoT permitirá uma logística preditiva, na qual as empresas poderão ajustar suas operações antes que os problemas surjam, com base em dados históricos e previsões.

Esse avanço não apenas irá melhorar a eficiência nas entregas, mas também contribuirá significativamente para a redução de custos e de impactos ambientais, alinhando-se a objetivos de sustentabilidade.

Atualmente, o setor logístico enfrenta uma pressão crescente para reduzir sua pegada de carbono. Como destacado pelo MIT Climate, o transporte, especialmente o rodoviário, é um

dos maiores responsáveis pelas emissões de gases de efeito estufa, e a última milha das entregas tem um impacto considerável em CO₂ - O transporte de mercadorias representa 8% das emissões globais de gases com efeito de estufa e as suas emissões de carbono poderão duplicar até 2050. A pressão para reduzir essas emissões tem aumentado devido a uma combinação de fatores, como os compromissos globais com o Acordo de Paris, as expectativas dos consumidores por práticas empresariais sustentáveis e as exigências regulatórias, como as políticas de descarbonização e as metas ambientais das nações.

A IA permite a otimização das rotas de forma a reduzir o consumo de combustível e minimizar emissões, além de facilitar o uso de veículos elétricos e híbridos em operações de transporte. E com o avanço da legislação ambiental e a expectativa de clientes por práticas empresariais sustentáveis, a IA será uma ferramenta essencial para alcançar uma logística mais ecológica e eficiente.

Essas tendências sugerem que a IA não apenas manterá, mas ampliará sua importância no setor logístico nos próximos anos. Essa evolução permitirá que empresas ofereçam um serviço mais ágil, sustentável e personalizado, atendendo tanto a exigências de mercado quanto a expectativas de consumidores e regulamentações ambientais futuras.

5. CONCLUSÃO

O estudo apresentado neste trabalho teve como objetivo analisar o papel da inteligência artificial na otimização das rotas logísticas, especialmente no contexto de empresas que buscam melhorar sua eficiência operacional e reduzir custos. Com base na revisão teórica e na análise de práticas adotadas por empresas como Amazon e DHL, ficou evidente que a implementação de IA tem transformado a logística, promovendo benefícios substanciais tanto para as operações internas das empresas quanto para a experiência do cliente.

Ao longo do trabalho, foi possível observar que as empresas que adotam tecnologias de IA, especialmente no gerenciamento de rotas, conseguem otimizar sua cadeia de suprimentos, reduzir custos operacionais e melhorar a flexibilidade diante das mudanças do mercado, como variações na demanda e condições de tráfego. A análise das oportunidades e desafios também indicou que, embora a IA apresente um grande potencial, a sua implementação não é isenta de dificuldades, principalmente no que se refere à adequação da infraestrutura tecnológica e à adaptação cultural das organizações. Como discutido por Brynjolfsson e McAfee (2017), a integração bem-sucedida de IA exige mais do que a simples adoção de tecnologias; ela requer uma mudança organizacional abrangente.

As implicações práticas dos resultados indicam que, para as empresas que buscam explorar o uso da IA, é fundamental investir em capacitação contínua das equipes e garantir que a infraestrutura tecnológica esteja pronta para lidar com grandes volumes de dados em tempo real. A adoção de IA não só melhora a eficiência operacional, mas também tem impacto direto na satisfação do cliente, onde a capacidade de prever com mais precisão as necessidades e preferências dos consumidores permite que as empresas personalizem a experiência de entrega, oferecendo maior flexibilidade, como a escolha de janelas de entrega mais convenientes e rastreamento em tempo real, resultando em uma experiência mais positiva e uma maior fidelidade à marca.

Além disso, a conformidade com as regulamentações de privacidade e segurança de dados, como o GDPR e a LGPD, se torna um requisito essencial para minimizar riscos legais e éticos. Assim, as empresas precisam garantir não apenas que as soluções de IA sejam eficientes e seguras, mas também que contribuam para um aumento na satisfação do cliente, que se traduz diretamente em vantagem competitiva no mercado.

Este estudo ainda apresenta algumas limitações que merecem destaque. Primeiramente, sua natureza exploratória impede a generalização dos resultados, já que a pesquisa se baseou predominantemente em revisão teórica e estudos de caso qualitativos, sem análises empíricas

quantitativas que validem suas conclusões de forma ampla. A ausência de estudos longitudinais também representa uma restrição significativa, pois impede a observação dos impactos de longo prazo da IA na logística — especialmente sobre custos e eficiência operacional. Investigações futuras com essa abordagem permitirão avaliar a evolução contínua desses efeitos, identificar tendências e apoiar decisões mais eficazes sobre a adoção de IA nas operações logísticas.

A complexidade das tecnologias de inteligência artificial é outro desafio. Este estudo não detalha tecnologias como machine learning ou algoritmos preditivos, o que pode limitar a compreensão de suas aplicações logísticas. Além disso, o contexto econômico, regulatório e cultural não foi explorado de maneira exaustiva. Incentivos fiscais, barreiras legais e diferenças culturais que variam entre países influenciam a viabilidade e a velocidade de implementação da IA.

A aplicação da IA na logística ainda é incipiente, e muitos de seus benefícios, como sustentabilidade e menor impacto ambiental, precisam ser mais investigados. Dado o panorama traçado, várias oportunidades para pesquisas futuras emergem. A realização de estudos empíricos com dados primários seria essencial para validar as hipóteses levantadas, oferecendo evidências concretas sobre os impactos da IA na eficiência, custos e sustentabilidade logística. Estudos focados em PMEs também são recomendados, já que essas empresas enfrentam desafios únicos na implementação de IA, como restrições financeiras e falta de expertise tecnológica, que diferem das grandes corporações.

Conclui-se que a inteligência artificial representa um avanço significativo na maneira como as empresas logísticas operam e tem o potencial de transformar completamente a forma como os processos logísticos são gerenciados. Com o aumento da competitividade e a crescente complexidade das cadeias de suprimentos, o uso de IA tem se mostrado uma ferramenta essencial para otimizar rotas, reduzir custos operacionais, melhorar a previsão de demanda e maximizar a eficiência. Com o tempo, espera-se que a IA não apenas melhore a eficiência das operações logísticas, mas também tenha um impacto mais amplo em toda a cadeia de valor, criando novos modelos de negócios, produtos e serviços.

REFERÊNCIAS

- AGATZ, N.; CAMPBELL, J.; FLEISCHMANN, M. Challenges in last-mile logistics using AI. **Transportation Science**, v. 46, n. 4, p. 108-120, 2012.
- ANSELMO, João; JUNIOR, Roberto. **Transformações Logísticas com IA**. São Paulo: Editora Logística, 2021.
- BARRETO, S.; AMARAL, A. R.; PEREIRA, G. Uso de inteligência artificial na logística. **Journal of Logistics**, v. 12, n. 3, p. 45-58, 2017.
- BOWERSOX, Donald J.; CLOSS, David J.; COOPER, Bixby M. **Supply Chain Logistics Management**. 5. ed. Nova York: McGraw-Hill, 2019.
- BRYNJOLFSSON, E.; MCAFEE, A. **Machine, platform, crowd: Harnessing our digital future**. Nova York: W. W. Norton & Company, 2017.
- CDO TIMES. Case study: Amazon's AI-driven supply chain—a blueprint for the future of global logistics. 2024. Disponível em: <https://cdotimes.com/2024/08/23/case-study-amazons-ai-driven-supply-chain-a-blueprint-for-the-future-of-global-logistics/>. Acesso em: 15 set. 2024.
- CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A.; SILVA, R. **Metodologia científica**. 6. ed. São Paulo: Pearson, 2007.
- CHAWLA, S. Emerging trends in AI-driven logistics solutions. **Journal of Advanced Logistics**, v. 45, n. 1, p. 34-50, 2024.
- CHEN, L. et al. Intelligent logistics using big data and AI. **Journal of Advanced Logistics**, v. 35, n. 1, p. 1-15, 2024.
- CHRISTOPHER, Martin. **Logistics & Supply Chain Management**. 5. ed. Harlow: Pearson, 2018.

DAVENPORT, T. H.; RONANKI, R. Artificial intelligence for the real world. **Harvard Business Review**, v. 96, n. 1, p. 108-116, 2018.

DELOITTE INSIGHTS. The future of supply chain management. 2020. Disponível em: www2.deloitte.com. Acesso em: 28 set. 2024.

DHL. AI-enhanced last-mile delivery: The future of e-commerce. 2024. Disponível em: <https://www.dhl.com/discover/en-sg/ship-with-dhl/start-shipping/ai-enhanced-last-mile-delivery-future-of-ecommerce#:~:text=AI%2Dpowered%20last%2Dmile%20delivery,like%20volume%20and%20service%20requirements>. Acesso em: 30 out. 2024.

DHL. Logistics 4.0 and digitalization report. 2023. Disponível em: www.dhl.com. Acesso em: 25 set. 2024.

DHL. Logistics trends and insights 2020. Disponível em: www.dhl.com. Acesso em: 22 set. 2024.

DHL EXPRESS. AI in logistics and last-mile delivery. 2024. Disponível em: <https://www.dhl.com/discover/en-in/logistics-advice/logistics-insights/ai-in-logistics-and-last-mile-delivery>. Acesso em: 10 nov. 2024.

DHL EXPRESS. Logistics 4.0: Transforming supply chain management with AI. 2020. Disponível em: www.dhl.com. Acesso em: 18 out. 2024.

DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. **Numerische Mathematik**, v. 1, p. 269-271, 1959.

DIDAST, R. et al. AI-driven logistics solutions. **International Journal of Logistics**, v. 35, n. 2, p. 145-162, 2024.

ELIFTECH. AI in logistics explained. 2024. Disponível em: <https://www.eliftech.com/insights/ai-in-logistics-explained/>. Acesso em: 14 set. 2024.

ESI THOUGHTLAB. Smart logistics: How technology transforms supply chains. 2020. Disponível em: www.esithoughtlab.com. Acesso em: 30 nov. 2024.

EUROPEAN COMMISSION. The ethics guidelines for trustworthy AI. Bruxelas: European Union, 2021. Disponível em: www.ec.europa.eu. Acesso em: 22 set. 2024.

FORBES. The true role of AI in logistics. 2023. Disponível em: <https://www.forbes.com/councils/forbestechcouncil/2023/08/17/the-true-role-of-ai-in-logistics/>. Acesso em: 29 out. 2024.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GOLDEN, B.; RAGHAVAN, S.; WASIL, E. **The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges**. Boston: Springer, 2008.

GOODFELLOW, I. et al. **Deep Learning**. Cambridge: MIT Press, 2016.

HAMDI, M.; ABOUABDELLAH, A. Optimization of last-mile delivery using AI. **International Journal of Logistics Research**, v. 28, n. 4, p. 112-130, 2022.

JEBLE, S. et al. Role of blockchain in logistics. **International Journal of Information Management**, v. 39, p. 78-90, 2018.

LEE, Kai-Fu. **AI Superpowers: China, Silicon Valley, and the New World Order**. 1. ed. Boston: Houghton Mifflin Harcourt, 2021.

LECUN, Y.; BENGIO, Y.; HINTON, G. Deep learning. **Nature**, v. 521, p. 436-444, 2015.

LEEWAYHERTZ. AI in logistics and supply chain. 2024. Disponível em: <https://www.leewayhertz.com/ai-in-logistics-and-supply-chain/#The-role-of-AI-in-logistics-and-supply-chain>. Acesso em: 26 out. 2024.

MCKINSEY & COMPANY. Logistics 2030: Trends transforming the logistics industry. 2017. Disponível em: www.mckinsey.com. Acesso em: 18 nov. 2024.

MCKINSEY & COMPANY. State of AI in logistics: Insights and trends. 2021. Disponível em: www.mckinsey.com. Acesso em: 15 nov. 2024.

MITTELSTADT, B. D. et al. The ethics of algorithms: Mapping the debate. **Big Data & Society**, v. 3, n. 2, p. 1-21, 2016.

ORACLE. Transforming logistics with AI and machine learning. 2024. Disponível em: www.oracle.com. Acesso em: 25 nov. 2024.

QUEIROZ, M. M.; PEREIRA, S. C.; TELLES, R.; MACHADO, M. C. Impacts of AI on supply chain performance. **Journal of Business Logistics**, v. 42, n. 1, p. 45-58, 2021.

RUSHTON, A.; CROUCHER, P.; BAKER, P. **The Handbook of Logistics and Distribution Management**. 5. ed. Londres: Kogan Page, 2017.

RUSHTON, Alan; CROUCHER, Phil; BAKER, Peter. **The Handbook of Logistics and Distribution Management**. 7. ed. Londres: Kogan Page, 2022.

RUSSELL, S.; NORVIG, P. **Artificial Intelligence: A Modern Approach**. 3. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2016.

SHARMA, N. et al. Application of AI in supply chain optimization. **Journal of Supply Chain Management**, v. 45, n. 2, p. 89-104, 2020.

SUPPLY CHAIN DIVE. Last-mile spotlight: Retail costs drive new fulfillment strategies. 2017. Disponível em: <https://www.supplychaindive.com/news/last-mile-spotlight-retail-costs-fulfillment/443094/>. Acesso em: 28 nov. 2024.

TAHA, H. A. **Operations Research: An Introduction**. 8. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2008.

TOTH, P.; VIGO, D. **The Vehicle Routing Problem**. Philadelphia: SIAM, 2002.

TOTH, P.; VIGO, D. **Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications**. 2. ed. Philadelphia: SIAM, 2014.

WAMBA, S. F. et al. Big data analytics in logistics and supply chain management. **International Journal of Production Economics**, v. 159, p. 120-135, 2015.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.