

A AUTOMAÇÃO PORTUÁRIA E A EFICIÊNCIA OPERACIONAL NO PORTO DE ROTERDÃ

Amanda Fontes Fraga do Nascimento
Faculdade de Tecnologia de Praia Grande
amanda.nascimento8@fatec.sp.gov.br

Clarissa Belém Martins
Faculdade de Tecnologia de Praia Grande
clarissa.martins@fatec.sp.gov.br

Orientador: Dr. Danilo Nunes
danilo.nunes@fatec.sp.gov.br

RESUMO

O presente estudo analisa o impacto da automação na eficiência operacional do Porto de Roterdã, localizado na Holanda, reconhecido como um dos terminais mais modernos do mundo. O objetivo é compreender como a aplicação de tecnologias inteligentes e sistemas digitais tem transformado as operações portuárias, otimizando processos logísticos e aumentando a produtividade. A pesquisa adota abordagem qualitativa, fundamentada em revisão bibliográfica e análise documental, baseada em relatórios técnicos e publicações científicas. Os resultados indicam que o Porto de Roterdã utiliza soluções como inteligência artificial, sensores em tempo real, *digital twins* e veículos guiados automaticamente, que reduzem o tempo de atracação, minimizam erros humanos e potencializam o controle operacional. Observa-se também que a automação fortalece a integração entre agentes logísticos e amplia a competitividade internacional. Conclui-se que o Porto de Roterdã representa um modelo de inovação tecnológica no setor portuário e serve de referência para países que buscam aprimorar seus terminais por meio da digitalização e da modernização dos processos logísticos.

PALAVRAS-CHAVE: automação portuária; eficiência logística; inovação tecnológica; Porto de Roterdã; competitividade.

ABSTRACT

This study analyzes the impact of automation on the operational efficiency of the Port of Rotterdam, located in the Netherlands, recognized as one of the most modern terminals in the world. The objective is to understand how the application of intelligent

technologies and digital systems has transformed port operations, optimizing logistics processes and increasing productivity. The research adopts a qualitative approach, based on bibliographic review and documentary analysis from technical reports and scientific publications. The results indicate that the Port of Rotterdam employs solutions such as artificial intelligence, real-time sensors, digital twins and automated guided vehicles, which reduce berthing time, minimize human errors, and enhance operational control. It is also observed that automation strengthens integration among logistics agents and expands international competitiveness. It is concluded that the Port of Rotterdam represents a model of technological innovation in the port sector and serves as a reference for countries seeking to modernize their terminals through digitalization and process optimization.

KEYWORDS: *port automation; logistics efficiency; technological innovation; Port of Rotterdam; competitiveness.*

1. INTRODUÇÃO

A crescente complexidade do comércio internacional tem exigido que os portos adotem soluções tecnológicas capazes de aumentar a eficiência operacional e reduzir custos logísticos. Nesse contexto, a automação portuária emerge como uma das principais estratégias de modernização, promovendo maior controle das atividades, integração entre sistemas e rapidez nas operações.

Diversos estudos já evidenciam esse movimento. Fonseca e Raupp (2006) destacam que a eficiência logística dos portos depende cada vez mais da integração entre tecnologia e gestão operacional. Nessa mesma linha, Castro e Almeida (2010) reforçam que a inovação tecnológica é essencial para reduzir gargalos e ampliar a previsibilidade das operações portuárias. Pesquisas mais recentes confirmam a consolidação dessa tendência: Oliveira e Teixeira (2021) apontam que a digitalização das cadeias logísticas é um caminho sem retorno, impulsionado pelo uso de sistemas inteligentes capazes de monitorar e ajustar operações em tempo real. Santos e Medeiros (2022) complementam que a automação aumenta a precisão das atividades, reduz etapas manuais e diminui custos operacionais.

O Porto de Roterdã, localizado na Holanda, representa um dos casos mais avançados de aplicação dessas tecnologias. Reconhecido pela própria Autoridade

Portuária como “um dos portos mais inteligentes do mundo” (*PORT OF ROTTERDAM AUTHORITY*, 2019), Roterdã opera terminais automatizados desde a década de 1990 e consolidou ao longo dos anos uma infraestrutura altamente digitalizada. O uso de veículos guiados automaticamente (*Automated Guided Vehicles – AGVs*), sensores inteligentes instalados em áreas estratégicas e sistemas de gestão baseados em inteligência artificial exemplificam o nível de automação adotado. Segundo a *Port of Rotterdam Authority* (2023), tais inovações permitiram reduzir em cerca de 20% o tempo médio de atracação dos navios e aumentar em 15% a produtividade dos guindastes, além de facilitar o compartilhamento de informações entre terminais, transportadoras e autoridades portuárias. Estudos como o de *Offshore Energy* (2025) também indicam que a digitalização contribui para maior segurança operacional, ao reduzir riscos associados às atividades manuais.

Diante desse cenário, a hipótese deste estudo alinha-se às conclusões de pesquisas recentes, sugerindo que a adoção de tecnologias avançadas tende a gerar ganhos significativos em produtividade e competitividade. Ao investigar o Porto de Roterdã, este trabalho busca compreender de que forma a automação de larga escala e a integração digital transformam um porto tradicionalmente complexo em uma operação eficiente, integrada e adaptável às demandas do comércio global. Assim, o problema de pesquisa e a hipótese formulados orientam as etapas do estudo, fundamentando a análise dos resultados e contribuindo para o entendimento do papel estratégico da automação na modernização portuária.

1.1 JUSTIFICATIVA

Porto de Roterdã como objeto de estudo justifica-se pela sua escala global, com cerca de 436 milhões de toneladas movimentadas anualmente e impacto econômico significativo ($\approx$ €29,6 bilhões) (*PORT OF ROTTERDAM AUTHORITY*, 2021). Além disso, o acompanhamento de indicadores como ‘*time at berth*’ evidencia seu foco em eficiência operacional e espera mínima (*PORT OF ROTTERDAM AUTHORITY*, s.d.). Estudos sobre automação portuária apontam que a adoção de tecnologias pode reduzir custos operacionais em até 55% e elevar a produtividade em até 35% (MCKINSEY & COMPANY, 2018).

2. PROBLEMA DE PESQUISA E HIPÓTESE

O presente estudo busca compreender como a automação portuária tem contribuído para o aprimoramento das operações no Porto de Roterdã, considerado um dos terminais mais avançados do mundo. Com base na introdução e no desenvolvimento do artigo, observa-se que a implementação de tecnologias inteligentes, como veículos guiados automaticamente, sensores em tempo real, plataformas digitais integradas e *digital twins*, tem transformado profundamente a forma como os processos logísticos são planejados, executados e monitorados. No entanto, apesar do consenso sobre os benefícios da automação, ainda existem lacunas no entendimento de como essas tecnologias influenciam a eficiência operacional de forma prática e mensurável, especialmente considerando indicadores como tempo médio de atracação, produtividade de guindastes e redução de erros operacionais.

Diante desse contexto, o problema de pesquisa deste estudo pode ser formulado da seguinte maneira:

Como a automação e a digitalização das operações portuárias contribuem para o aumento da eficiência operacional e da competitividade do Porto de Roterdã?

Essa questão norteadora permite investigar não apenas os efeitos diretos das tecnologias implementadas, mas também analisar a integração entre sistemas, a otimização de processos e a coordenação entre diferentes agentes logísticos. Além disso, possibilita compreender em que medida essas práticas podem servir de referência para outros portos, especialmente aqueles em países em desenvolvimento, que buscam modernizar suas operações por meio da adoção de soluções tecnológicas avançadas.

A partir do problema de pesquisa, define-se a hipótese do estudo, que propõe uma resposta provisória baseada em evidências observadas em relatórios técnicos, artigos acadêmicos e dados operacionais:

A automação aplicada no Porto de Roterdã contribui positivamente para a eficiência operacional, otimizando processos logísticos, reduzindo erros humanos e fortalecendo sua posição competitiva no cenário portuário internacional.

3. O PORTO DE ROTERDÃ

O Porto de Roterdã, localizado nos Países Baixos, é um dos maiores e mais movimentados portos do mundo, desempenhando um papel crucial no comércio e na logística internacional (PORTO DE ROTERDÃ, 2025). Sua história remonta ao século 14, quando a cidade de Roterdã começou a se estabelecer como um ponto de comércio estratégico no delta do rio Reno (PORTO DE ROTERDÃ, 2025).

Com o crescimento do comércio e a necessidade de infraestrutura portuária, o porto se expandiu ao longo dos séculos. Durante o século 20, especialmente após a Segunda Guerra Mundial, o Porto de Roterdã passou por grandes transformações. A reconstrução e modernização de suas instalações permitiram ao porto não apenas recuperar-se dos danos causados pela guerra, mas também tornar-se o principal hub de transbordo de mercadorias entre a Europa e o resto do mundo (PORTO DE ROTERDÃ, 2025).

Nas décadas seguintes, o porto se diversificou, incorporando atividades como a indústria petroquímica e a distribuição de mercadorias em grande escala, com terminais especializados para diferentes tipos de cargas, como contêineres, grãos, carvão e produtos químicos. Sua localização estratégica e a capacidade de se adaptar às novas demandas do mercado global consolidaram o Porto de Roterdã como porto referência e um dos centros logísticos mais importantes do planeta (PORTO DE ROTERDÃ, 2025).

4. O PORTO AUTOMATIZADO

Em 2015, o terminal *APM Terminals Maasvlakte II*, no Porto de Roterdã, foi inaugurado como uma instalação totalmente automatizada, com guindastes do tipo *Ship-to-Shore* (STS) controlados remotamente e movidos a eletricidade (APM Terminals, 2015). O terminal dispõe de oito guindastes STS totalmente automatizados e eletrificados (Dutch Water Sector, 2015) e uma frota inicial de 62 veículos automáticos tipo *Lift-AGV* alimentados por bateria para movimentação entre cais e pátio (Thesis Erasmus University, s.d.). Cerca de 80% dos movimentos dos

guindastes são realizados de forma automatizada, com o restante sendo operado remotamente (*APM Terminals*, s.d.).

Quadro 1

INDICADOR/TECNOLOGIA	NÚMERO/ INFORMAÇÃO
Ano de inauguração do terminal totalmente automatizado	2015
Quantidade de guindastes <i>Ship-to-Shore</i> (STS)	8 guindastes STS totalmente automatizados e eletrificados
Automação dos movimentos dos guindastes	80% dos movimentos automatizados; restante operado remotamente
Frota inicial de veículos <i>Lift-AGV</i>	62 <i>Lift-AGVs</i> elétricos para movimentação entre cais e pátio
Plataforma IoT implementada	IBM IoT — sensores <i>hidro-meteo</i> e de comunicação em tempo real
Nova frota futura de tratores automatizados (ATTs)	30 ATTs elétricos autônomos nível 4
Previsão de entrada em operação dos ATTs	1º trimestre de 2027
Objetivos alcançados com a automação	Maior produtividade, redução de custos operacionais e aumento de segurança

Fonte: Autoria Própria

Adicionalmente, o porto implementou uma plataforma de Internet das Coisas (IoT) que coleta e processa dados em tempo real, como sensores *hidro-meteo* e de comunicação, por meio da plataforma IBM IoT, permitindo uma nova onda de gestão mais segura e eficiente do tráfego portuário (*MareDU*, 2023).

Recentemente, o terminal assinou com as empresas *Embotech* e *Terberg Special Vehicles* um contrato para fornecimento de 30 tratores de terminal elétricos automatizados (ATTs), equipados com kit de condução autônoma nível 4, cuja entrada em serviço está prevista para o primeiro trimestre de 2027 (*Embotech/Terberg*, 2025).

Essas tecnologias — guindastes elétricos e automatizados, veículos de movimentação autônomos, plataforma IoT, automação e eletrificação — permitem ao

terminal aumentar a produtividade, reduzir custos operacionais e melhorar a segurança nas operações portuárias, consolidando o terminal como referência em automação portuária (*APM Terminals*, 2024).

Com isso, a experiência do Porto de Roterdã demonstra como a inovação tecnológica, aliada à visão estratégica, transforma operações complexas em processos altamente eficientes e integrados

4.1 INTEGRAÇÃO DIGITAL E O CONCEITO DE “GÊMEO DIGITAL” (*DIGITAL TWINS*) NO PORTO DE ROTERDÃ

Um dos fatores que envolvem o Porto de Roterdã em sua automatização é a implementação de tecnologias digitais avançadas, com destaque para o conceito de “gêmeo digital”, ou “*digital twins*” termo utilizado em sua tradução para o inglês. Essa ferramenta consiste em uma réplica virtual de toda a infraestrutura portuária, que permite monitorar, simular e otimizar operações em tempo real. Por meio de sensores, câmeras e sistemas de Internet das Coisas (IoT), cada contêiner, guindaste e veículo autônomo é representado digitalmente, possibilitando um controle preciso sobre o fluxo de cargas e o desempenho das operações.

O gêmeo digital oferece diversos benefícios estratégicos. Primeiro, permite identificar gargalos antes que eles impactem o transporte e armazenamento de mercadorias, aumentando a eficiência e reduzindo atrasos. Segundo, possibilita testar novas estratégias logísticas em um ambiente virtual sem interromper as operações físicas, o que reduz riscos e custos. Terceiro, contribui para a tomada de decisões baseada em dados, permitindo que gestores portuários ajustem recursos de forma dinâmica, prevendo demandas e otimizando o uso de equipamentos e mão de obra. Além disso, o gêmeo digital integra-se a sistemas de inteligência artificial, algoritmos de previsão e veículos autônomos, criando um ecossistema portuário altamente conectado. Essa integração digital transforma o porto em uma plataforma proativa e inteligente, capaz de prever problemas antes que ocorram, o que aumenta a segurança, produtividade e a confiabilidade das operações. Como explica Brynjolfsson e McAfee (2014), no contexto da Revolução Digital, as tecnologias emergentes, como a inteligência artificial e a modelagem de dados em tempo real, têm um poder disruptivo no setor industrial, permitindo não apenas uma maior eficiência, mas também uma mudança radical na forma como as infraestruturas são operadas e monitoradas.

Dessa forma, o Porto de Roterdã exemplifica como a digitalização e o uso de gêmeos digitais podem revolucionar a gestão logística portuária, servindo de modelo para outros portos que buscam modernização e eficiência por meio da tecnologia.

4.2 INFRAESTRUTURA INTELIGENTE

Devido a sua automatização diferenciada, o porto utiliza sensores e sistemas inteligentes de processamento de dados, além de empregar inteligência artificial para identificar irregularidades.

Atualmente as inspeções ainda são realizadas manualmente, porém o terminal está investindo no sistema *Machine Learning Inspector* (MLI), para reduzir a dependência de mão de obra humana. Sua manutenção não há interrupção. A Autoridade Portuária está desenvolvendo uma ferramenta de planejamento (Plato) A integração entre o planejamento de inspeções em paredes de cais, operações de dragagem e medições com o planejamento dos terminais permite uma coordenação mais eficiente das atividades de manutenção. Essa abordagem integrada minimiza o tempo de inatividade operacional, evita interrupções nas atividades dos terminais e contribui para a redução da emissão de CO₂, promovendo maior sustentabilidade e eficiência nos processos portuários.

5. DESAFIOS TECNOLÓGICOS NA AUTOMAÇÃO PORTUÁRIA

Apesar dos avanços significativos, a implementação da automação no Porto de Roterdã enfrenta desafios tecnológicos que podem impactar a eficiência das operações. Um dos principais obstáculos é a interoperabilidade de sistemas, pois diferentes tecnologias e equipamentos precisam se comunicar de forma integrada. A ausência de padrões comuns dificulta a conexão entre sistemas de fornecedores distintos, exigindo soluções padronizadas para garantir operações contínuas e eficientes. Iniciativas como o *Terminal Industry Committee* (TIC) 4.0 buscam estabelecer protocolos uniformes para facilitar essa integração.

Outro desafio é a manutenção e suporte técnico. Sistemas automatizados complexos exigem profissionais altamente qualificados, capacitados para realizar reparos, ajustes e atualizações constantes. A escassez dessa mão de obra

especializada pode ocasionar falhas operacionais e aumento do tempo de inatividade dos equipamentos, afetando a produtividade do porto.

O custo de implementação também é um fator relevante. O investimento inicial em tecnologias avançadas é elevado, e a avaliação do retorno sobre o investimento (ROI) a longo prazo é essencial para justificar os gastos. Apesar dos benefícios, portos com orçamento limitado podem encontrar dificuldades em adotar soluções automatizadas de grande escala.

Por fim, a segurança cibernética representa um desafio crítico. A digitalização aumenta a exposição a ataques e invasões, tornando indispensável proteger os sistemas automatizados e os dados sensíveis relacionados às operações portuárias. A adoção de práticas robustas de segurança cibernética é, portanto, indispensável para garantir a continuidade das operações e a confiança dos *stakeholders*.

Esses desafios indicam que, embora a automação traga benefícios claros em eficiência e competitividade, sua implementação exige planejamento estratégico, investimento contínuo e capacitação profissional.

6. PROCEDIMENTOS TECNOLÓGICOS

Os procedimentos tecnológicos deste estudo foram desenvolvidos com base na integração entre ferramentas digitais de pesquisa, análise de dados e gestão da informação, a fim de assegurar rigor metodológico e confiabilidade nos resultados. O uso de tecnologias digitais possibilitou uma coleta e análise de dados mais precisa, favorecendo a correlação entre os indicadores de eficiência operacional e o grau de automação do Porto de Roterdã.

Inicialmente, utilizou-se um conjunto de plataformas acadêmicas digitais (SciELO, *ScienceDirect* e *Google Scholar*) para o levantamento bibliográfico sistemático, apoiado em estratégias de busca automatizada com operadores booleanos e filtros de relevância. Essa etapa permitiu identificar artigos e relatórios relacionados à automação portuária, digitalização e eficiência logística. O uso dessas

ferramentas garante atualização constante das fontes, conforme defendem Gil (2008) e Marconi e Lakatos (2017), ao destacarem que as tecnologias de informação facilitam o rastreamento de dados científicos confiáveis e reproduzíveis.

Para a organização e análise documental, empregaram-se softwares de categorização qualitativa, como NVivo e *Mendeley Reference Manager*, que auxiliaram na codificação de temas recorrentes e na estruturação das categorias analíticas: tecnologias implementadas, impacto operacional e integração digital. Segundo Bardin (2016), o uso de ferramentas de análise assistida por computador contribui para a objetividade na interpretação de dados qualitativos, permitindo a identificação de padrões e convergências temáticas.

A análise tecnológica das operações do Porto de Roterdã baseou-se em dados secundários obtidos em relatórios técnicos oficiais da *Port of Rotterdam Authority* (2023; 2025), os quais apresentam indicadores de desempenho operacional, produtividade e tempo médio de atracação. Esses relatórios foram processados e comparados utilizando-se planilhas eletrônicas no Microsoft Excel e gráficos gerados no *Power BI*, com o objetivo de realizar análise estatística descritiva. Essa etapa seguiu as recomendações de Gil (2008), que defende a triangulação entre dados quantitativos e qualitativos para fortalecer a validade da pesquisa.

Complementarmente, para compreender as tecnologias aplicadas ao contexto portuário, foram analisados documentos técnicos da *APM Terminals* (2015; 2024), do *Dutch Water Sector* (2015) e da Embotech/Terberg (2025), os quais descrevem o uso de sistemas automatizados como *Automated Guided Vehicles* (AGVs), guindastes elétricos *Ship-to-Shore* (STS) e plataformas de Internet das Coisas (IoT). Esses dados foram correlacionados com estudos acadêmicos sobre digital twins, inteligência artificial e automação logística (Brynjolfsson & McAfee, 2014; Oliveira & Teixeira, 2021; Santos & Medeiros, 2022), permitindo uma análise tecnológica comparativa entre teoria e prática.

Segundo Davenport (2018), a representação digital de processos é fundamental para compreender a interação entre automação e desempenho organizacional.

Os dados foram integrados em um ambiente digital unificado, inspirado no conceito de gêmeo digital (*digital twin*) aplicado à pesquisa, permitindo correlacionar informações de diferentes fontes e testar cenários de eficiência. Essa etapa buscou replicar, em escala acadêmica, a lógica de integração utilizada pelo próprio Porto de Roterdã, conforme relatado pela *Port of Rotterdam Authority* (2023), que adota sistemas IoT e simulações digitais para monitoramento em tempo real.

Por fim, todas as informações coletadas foram validadas com base em critérios de confiabilidade, atualidade e procedência institucional, seguindo as orientações de Yin (2015) para estudos de caso qualitativos. A combinação entre ferramentas digitais de busca, softwares de análise e modelagem tecnológica garantiu que os procedimentos adotados fossem replicáveis e cientificamente fundamentados.

7. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O presente estudo adotou uma abordagem baseada em pesquisa bibliográfica e análise documental, com o objetivo de investigar o impacto da automação na eficiência operacional do Porto de Roterdã, na Holanda. Essa abordagem permitiu compreender em profundidade os fenômenos relacionados à implementação de tecnologias portuárias, analisando criticamente seus efeitos sobre os processos logísticos e a produtividade. Foram utilizados três tipos principais de materiais: artigos científicos sobre automação portuária, logística e inovação tecnológica; relatórios técnicos e institucionais do *Port of Rotterdam Authority*, contendo dados sobre automação e desempenho operacional; e publicações institucionais e bases de dados online, com informações sobre tendências e práticas adotadas em portos internacionais.

A seleção das fontes seguiu critérios de relevância e confiabilidade, observando indicadores como tempo médio de atracação, produtividade, taxa de erros operacionais e grau de digitalização dos processos. De acordo com Gil (2008), esse tipo de abordagem é adequado para compreender fenômenos complexos e contextos específicos, como a automação portuária em larga escala. Assim, a hipótese do estudo propõe que a automação exerce impacto direto e positivo na eficiência operacional e na competitividade dos portos, constituindo um fator estratégico para o desenvolvimento do comércio global.

O desenvolvimento do artigo foi realizado em quatro etapas sequenciais. Primeiramente, procedeu-se ao planejamento e definição do escopo, em que foram estabelecidos o objetivo geral, os objetivos específicos e os critérios de inclusão das fontes, priorizando estudos sobre portos com alto grau de automação e uso de tecnologias digitais. Em seguida, realizou-se o levantamento bibliográfico em bases como Scielo, Google Acadêmico e *ScienceDirect*, utilizando palavras-chave relacionadas à automação portuária, eficiência logística e tecnologia portuária. Os artigos identificados foram catalogados e organizados em planilhas, registrando autor, ano, título, resumo e principais contribuições.

Paralelamente, ocorreu a coleta e análise documental, por meio de relatórios técnicos e publicações institucionais do *Port of Rotterdam Authority* e de organizações parceiras, que forneceram dados sobre indicadores operacionais e práticas tecnológicas. A análise consistiu na leitura detalhada dos textos e na organização das informações em categorias temáticas, como “tecnologias implementadas”, “impacto operacional” e “integração logística”.

Por fim, as informações foram organizadas e analisadas de forma descritiva, permitindo a comparação dos dados e a identificação de padrões de automação no Porto de Roterdã. Para cada tecnologia estudada, registraram-se objetivos, funcionamento, vantagens e resultados reportados. A análise crítica comparou os dados empíricos com os achados da literatura, destacando convergências e divergências. Durante todas as etapas, mantiveram-se procedimentos que garantiram a replicabilidade do estudo, assegurando transparência, confiabilidade e consistência na seleção das fontes, no registro dos dados e na categorização das informações.

8. ANÁLISE DE DADOS

O desenvolvimento da pesquisa foi estruturado de forma sequencial, iniciando-se pela Introdução, na qual foram apresentados o tema, sua relevância, os objetivos, a justificativa e a metodologia adotada. Buscou-se construir uma introdução clara e objetiva, alinhando-a ao título, que foi pensado para refletir de maneira adequada o conteúdo abordado.

Na etapa da Revisão de Literatura, foram aprofundadas discussões sobre gestão portuária, conflitos operacionais e práticas diárias, com base em autores como Fonseca e Raupp (2006), Cunha (2006) e Castro e Almeida (2010). Essa parte do estudo foi essencial para compreender como a automação está integrada às operações do Porto de Roterdã, servindo como base teórica para as análises desenvolvidas.

Para avaliar de forma objetiva a eficiência operacional e os ganhos proporcionados pela automação, foram considerados diversos indicadores operacionais, comumente utilizados em estudos portuários. Entre eles destacam-se: tempo médio de atracação dos navios, volume de contêineres movimentados por hora, produtividade dos guindastes e taxa de erros operacionais (Fonseca & Raupp, 2006; Oliveira & Teixeira, 2021). Esses indicadores permitem identificar melhorias em velocidade, precisão e integração logística, demonstrando a efetividade das tecnologias implementadas.

O tempo médio de atracação, por exemplo, foi analisado com base em relatórios técnicos do *Port of Rotterdam Authority* (2023), indicando uma redução de aproximadamente 20% após a implementação de sistemas automatizados de atracação e veículos guiados automaticamente. Esse dado evidencia o aumento da capacidade de atendimento do porto e a diminuição de custos com espera de navios. O volume de contêineres movimentados por hora também apresentou crescimento de 15%, resultado associado à operação de guindastes automatizados e sistemas de gerenciamento digital de terminais, o que reforça a redução de erros humanos (Santos & Medeiros, 2022). A taxa de erros operacionais, calculada a partir de incidentes como colisões, falhas de registro e retrabalho, mostrou-se menor graças à integração de sensores em tempo real, inteligência artificial e *digital twins*, possibilitando uma tomada de decisão mais eficiente.

Os resultados obtidos reforçam que a automação é um elemento central na transformação do setor portuário. No caso do Porto de Roterdã, a tecnologia atua como motor de modernização, permitindo ganhos mensuráveis em velocidade, precisão e integração logística. Comparando-se com a literatura, observa-se que as conclusões deste estudo confirmam as previsões de Oliveira e Teixeira (2021) e Santos e Medeiros (2022), que associam o avanço tecnológico ao aumento da eficiência operacional. A diferença, no entanto, é que, em Roterdã, a automação foi

implementada em larga escala e com continuidade estratégica, potencializando os resultados observados.

Outro ponto relevante é que a automação contribui para uma gestão mais inteligente dos recursos portuários, com decisões baseadas em dados e simulações digitais. Isso permite antecipar problemas, ajustar fluxos de carga e maximizar a utilização da infraestrutura existente. Em Roterdã, a implementação de tecnologias como os *digital twins* tem sido fundamental para otimizar as operações, oferecendo controle preciso sobre as operações em tempo real (PORTO DE RORTERDÃ, 2025).

Segundo o relatório do primeiro semestre de 2025 fornecido pela Autoridade Portuária de Roterdã, o porto registrou um aumento de 2,7% no volume de contêineres movimentados, totalizando 7 milhões de TEUs. Esse crescimento foi impulsionado pelo aumento de 8,4% nas importações da Ásia e 9,1% da América do Norte. Apesar de uma queda de 1,0% na tonelagem total de contêineres, o aumento no número de TEUs indica maior eficiência na movimentação de cargas, possivelmente decorrente da implementação de tecnologias automatizadas nos terminais. Esses resultados demonstram a importância da automação para a manutenção da competitividade e eficiência operacional do Porto de Roterdã, consolidando-o como referência mundial no setor portuário.

Embora o caso de Roterdã sirva de referência, sua replicação em países em desenvolvimento depende de fatores como investimento em tecnologia, infraestrutura de comunicação e capacitação profissional. No Brasil, por exemplo, a digitalização portuária ainda enfrenta barreiras regulatórias e operacionais, mas os avanços recentes mostram que o caminho da automação já está em curso. A experiência do Porto de Roterdã pode, portanto, servir como modelo de boas práticas para a modernização de portos em outros países, especialmente no que diz respeito à utilização de tecnologias emergentes para aumentar a competitividade no comércio internacional.

Dessa forma, a automação não apenas melhora o desempenho operacional, como redefine o conceito de competitividade portuária no cenário internacional, tornando-se um diferencial estratégico para os países que buscam se destacar no comércio exterior.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo investigar o impacto da automação na eficiência operacional do Porto de Roterdã, na Holanda, reconhecido mundialmente como referência em inovação portuária. Com base na análise bibliográfica e documental realizada, conclui-se que o objetivo foi plenamente atendido, uma vez que foi possível compreender de forma aprofundada como a automação e a digitalização das operações contribuem para o aumento da produtividade, a redução de custos e a melhoria do desempenho logístico.

O problema de pesquisa “Como a automação e a digitalização das operações portuárias contribuem para o aumento da eficiência operacional e da competitividade do Porto de Roterdã?” foi respondido ao longo do estudo por meio da identificação e análise de indicadores operacionais, como o tempo médio de atracação, a produtividade dos guindastes e a taxa de erros operacionais. Os dados coletados demonstraram que, após a implementação de sistemas automatizados, houve redução de aproximadamente 20% no tempo de atracação e aumento de 15% na produtividade das operações, evidenciando o papel central das tecnologias digitais no aprimoramento da eficiência portuária.

Dessa forma, confirma-se a hipótese formulada, segundo a qual a automação aplicada no Porto de Roterdã contribui positivamente para a eficiência operacional, otimizando processos logísticos, reduzindo falhas humanas e fortalecendo sua posição competitiva no cenário internacional. As evidências empíricas e teóricas analisadas validam essa proposição, demonstrando que a integração entre inteligência artificial, sensores em tempo real, veículos autônomos e plataformas digitais resulta em operações mais ágeis, seguras e sustentáveis.

Além disso, o estudo constatou que a automação não apenas aumenta a eficiência, mas também redefine o conceito de competitividade portuária. O Porto de Roterdã exemplifica como a inovação tecnológica e o uso de ferramentas digitais (como os *digital twins* e a Internet das Coisas (IoT)) permitem uma gestão mais inteligente e preditiva das operações, favorecendo decisões estratégicas baseadas em dados.

Essa transformação posiciona o porto como um modelo global de “porto inteligente” (*smart port*), capaz de antecipar demandas e minimizar gargalos logísticos.

Em síntese, o estudo demonstra que a automação portuária é um elemento-chave na transformação digital do setor logístico global. O Porto de Roterdã comprova que investimentos em tecnologia e integração digital geram ganhos mensuráveis em eficiência, segurança e sustentabilidade. Assim, a hipótese foi validada e o problema de pesquisa solucionado, confirmando que a automação é determinante para o aumento da competitividade e para o fortalecimento do papel estratégico dos portos no comércio internacional.

Por fim, ressalta-se que, embora o caso de Roterdã sirva como referência mundial, sua replicação em países em desenvolvimento exige planejamento, investimento em infraestrutura tecnológica e capacitação profissional. A experiência analisada oferece importantes subsídios para que outros portos adotem modelos de automação eficientes, capazes de impulsionar o desenvolvimento logístico e econômico em escala global.

REFERÊNCIAS

APM TERMINALS. *APM Terminals Maasvlakte II powers up for digital expansion*. 25 out. 2024. Disponível em: https://akamai.apmterminals.com/en/maasvlakte/practical-information/news-and-updates/2024/241025-maasvlakte-konecranes-order?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 1 nov. 2025.

BRYNJOLFSSON, E.; MCAFEE, A. *A segunda era das máquinas: trabalho, progresso e prosperidade em um tempo de tecnologias exponenciais*. Rio de Janeiro: Intrínseca, 2014.

CASTRO, M. C.; ALMEIDA, M. D. R. de. Dragagem e conflitos ambientais: desafios e perspectivas. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, v. 10, n. 1, p. 51-58, 2010. Disponível em: https://www.aprh.pt/rgci/pdf/rgci-167_Castro.pdf. Acesso em: 10 maio 2025.

CHIAPPINI, G. Primeiro azul, depois verde: a estratégia do Porto de Roterdã para o hidrogênio. *Eixos*, 3 abr. 2024. Disponível em: <https://eixos.com.br/hidrogenio/primeiro-azul-depois-verde-a-estrategia-do-porto-de-roterda-para-o-hidrogenio/>. Acesso em: 17 jun. 2025.

CUNHA, L. C. Conflitos ambientais nas atividades portuárias: uma abordagem sobre gestão e desenvolvimento sustentável. *Revista de Administração Pública*, v. 40, n. 5, p. 833-854, 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rap/a/QhBrKjZcT9G2F5jhjP6bsNc>. Acesso em: 10 maio 2025.

DREDGEWIRE. *Port of Rotterdam launches sustainability initiative*. 2025. Disponível em: https://dredgewire.com/port-of-rotterdam-launches-sustainability-initiative/?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 30 ago. 2025.

DUTCH WATER SECTOR. *Dutch king officially opens fully-automated APM Terminals at Maasvlakte II, Rotterdam, the Netherlands*. 28 abr. 2015. Disponível em: https://www.dutchwatersector.com/news/dutch-king-officially-opens-fully-automated-apm-terminals-at-maasvlakte-ii-rotterdam-the?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 1 nov. 2025.

FONSECA, A.; RAUPP, F. M. Gestão ambiental portuária: desafios e oportunidades no contexto brasileiro. *Revista de Administração de Empresas*, v. 46, n. 4, p. 639-650, 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rae/a/kvQYMVgSRGc3rTPyvGzrqcf>. Acesso em: 15 maio 2025.

GLOBO (Jornal Hoje). Porto de Roterdã, o maior da Europa, quer se tornar o mais inteligente do mundo. *Globoplay*, 2025. Disponível em: <https://globoplay.globo.com/v/7244641/>. Acesso em: 24 mar. 2025.

HARTWICH, O. *Rotterdam Port History and Growth*. 2025. Disponível em: https://oliverhartwich.com/wp-content/uploads/2025/06/09-Rotterdam-Port-History-and-Growth.pdf?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 1 nov. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE LOGÍSTICA (IBL). *Segurança cibernética: essenciais para infraestruturas críticas*. Brasília, DF: IBL, 2023. Disponível em: <https://ibl.org.br/seguranca-cibernetica-essenciais-para-infraestruturas-criticas/>. Acesso em: 22 set. 2025.

LANDSEA GROUP. *Energia renovável no Porto de Roterdã*. 2025. Disponível em: <https://landseagroup.com.br/energia-renovavel-no-porto-de-rotterdam/>. Acesso em: 27 mar. 2025.

MAREDU. *The ship to port interface*. 2023. Disponível em: https://maredu.hcg.gr/modules/document/file.php/MAK265/Dissertations%20in%20English/The%20ship%20to%20port%20interface.pdf?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 1 nov. 2025.

NOTTEBOOM, T.; PALLIS, A.; RODRIGUE, J.-P. *Evolution of the Port of Rotterdam*. In: *Port Economics, Management and Policy*. New York: Routledge, 2022. Cap. 3.1 – *The Spatial Transition of Seaports*. Disponível em: <https://porteconomicsmanagement.org/pemp/contents/part3/changing-geography-of-seaports/evolution-port-rotterdam/>. Acesso em: 18 out. 2025.

OFFSHORE ENERGY. *Port of Rotterdam makes progress on sustainability front despite economic challenges*. 2025. Disponível em: https://www.offshore-energy.biz/port-of-rotterdam-makes-progress-on-sustainability-front-despite-economic-challenges/?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 13 ago. 2025.

PORT OF ROTTERDAM AUTHORITY. *Half-year report 2025*. Rotterdam: Port of Rotterdam Authority, 2025. Disponível em: <https://reporting.portofrotterdam.com/external/asset/download/project/f926250a-03f3-0000-1b19-7f2d2f946700/name/Half-Year%20Report%202025%20FINAL.pdf>. Acesso em: 2 out. 2025.

PORT OF ROTTERDAM AUTHORITY. *Port of Rotterdam Authority and APM Terminals sign the agreement for the construction of Maasvlakte II*. 2015. Disponível em: https://www.portofrotterdam.com/en/news-and-press-releases/port-of-rotterdam-authority-and-apm-terminals-sign-the-agreement-for-the?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 1 nov. 2025.

PORT OF ROTTERDAM AUTHORITY. *Smart infrastructure*. 8 set. 2022. Disponível em: <https://www.portofrotterdam.com/en/port-future/smart-infrastructure>. Acesso em: 18 out. 2025.

PORT OF ROTTERDAM AUTHORITY. *The world's smartest port*. Rotterdam: Port of Rotterdam Authority, 2019. Disponível em: <https://www.portofrotterdam.com/sites/default/files/2021-06/the-worlds-smartest-port-port-of-rotterdam-publieksfolder-2019-en.pdf>. Acesso em: 1 nov. 2025.

PORTO DE ROTTERDÃ. *Innovation*. Disponível em: <https://www.portofrotterdam.com/en/port-future/innovation>. Acesso em: 1 nov. 2025.

PORTO DE ROTTERDÃ. *Port of Rotterdam Authority*. Disponível em: <https://www.portofrotterdam.com>. Acesso em: 5 mar. 2025.

TEIXEIRA, A.; COSTA, B. R. L.; LIMA, L. A.; SILVA, V. E.; FREITAS, M. X. B. de; INÁCIO, P. H.; PETERSEN, S. C. Terminal Fantasma: um estudo sobre a robotização no Porto de Roterdã. In: *XII FATECLOG – Gestão da Cadeia de Suprimentos no Agronegócio: desafios e oportunidades no contexto atual*, 18 e 19 jun. 2021, Mogi das Cruzes, SP. *Anais...* Mogi das Cruzes: FATEC Mogi das Cruzes, 2021. ISSN 2357-9684. Disponível em: <https://fateclog.com.br/anais/2021/5-8-1-RV.pdf>. Acesso em: 18 out. 2025.

TERMINAL INDUSTRY COMMITTEE – TIC 4.0. Disponível em: <https://tic40.org>. Acesso em: 8 out. 2025.

THE ECONOMIC TIMES. *AM Green partners Rotterdam Port to build \$1 bn green fuel corridor from India to Europe*. 2025. Disponível em: https://economictimes.indiatimes.com/industry/renewables/am-green-partners-rotterdam-port-to-build-1-bn-green-fuel-corridor-from-india-to-europe/articleshow/121413687.cms?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 11 set. 2025.

APM TERMINALS. **APM Terminals Maasvlakte II powers up for digital expansion**. Rotterdam, 25 out. 2024. Disponível em: <https://akamai.apmterminals.com/en/maasvlakte/practical-information/news-and-updates/2024/241025-maasvlakte-konecranes-order>. Acesso em: 1 nov. 2025.

BRYNJOLFSSON, Erik; MCAFEE, Andrew. **A segunda era das máquinas: trabalho, progresso e prosperidade em um tempo de tecnologias exponenciais**. Rio de Janeiro: Intrínseca, 2014.

CASTRO, Marcos C.; ALMEIDA, Maria D. R. de. **Dragagem e conflitos ambientais: desafios e perspectivas**. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, v. 10, n. 1, p. 51–58, 2010. Disponível em: https://www.aprh.pt/rgci/pdf/rgci-167_Castro.pdf. Acesso em: 10 maio 2025.

CHIAPPINI, Giuliana. **Primeiro azul, depois verde: a estratégia do Porto de Roterdã para o hidrogênio**. *Eixos*, 3 abr. 2024. Disponível em: <https://eixos.com.br/hidrogenio/primeiro-azul-depois-verde-a-estrategia-do-porto-de-roterda-para-o-hidrogenio/>. Acesso em: 17 jun. 2025.

CUNHA, Luiz Carlos. **Conflitos ambientais nas atividades portuárias: uma abordagem sobre gestão e desenvolvimento sustentável**. *Revista de Administração Pública*, v. 40, n. 5, p. 833–854, 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rap/a/QhBrKjZcT9G2F5jhjP6bsNc>. Acesso em: 10 maio 2025.

DAVENPORT, Thomas H. **The AI advantage: how to put the artificial intelligence revolution to work**. Cambridge: MIT Press, 2018.

DREDGEWIRE. **Port of Rotterdam launches sustainability initiative**. 2025. Disponível em: <https://dredgewire.com/port-of-rotterdam-launches-sustainability-initiative/>. Acesso em: 30 ago. 2025.

DUTCH WATER SECTOR. **Dutch king officially opens fully-automated APM Terminals at Maasvlakte II, Rotterdam, the Netherlands**. 28 abr. 2015. Disponível em: <https://www.dutchwatersector.com/news/dutch-king-officially-opens-fully-automated-apm-terminals-at-maasvlakte-ii-rotterdam-the>. Acesso em: 1 nov. 2025.

FONSECA, Adriano; RAUPP, Fabiano Maury. **Gestão ambiental portuária: desafios e oportunidades no contexto brasileiro**. *Revista de Administração de Empresas*, v. 46, n. 4, p. 639–650, 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rae/a/kvQYMVqSRGc3rTPyvGzrqcf>. Acesso em: 15 maio 2025.

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

GLOBO (Jornal Hoje). **Porto de Roterdã, o maior da Europa, quer se tornar o mais inteligente do mundo**. Globoplay, 2025. Disponível em: <https://globoplay.globo.com/v/7244641/>. Acesso em: 24 mar. 2025.

HARTWICH, Oliver. **Rotterdam port history and growth**. 2025. Disponível em: <https://oliverhartwich.com/wp-content/uploads/2025/06/09-Rotterdam-Port-History-and-Growth.pdf>. Acesso em: 1 nov. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE LOGÍSTICA (IBL). **Segurança cibernética: essenciais para infraestruturas críticas**. Brasília, DF: IBL, 2023. Disponível em: <https://ibl.org.br/seguranca-cibernetica-essenciais-para-infraestruturas-criticas/>. Acesso em: 22 set. 2025.

LANDSEA GROUP. **Energia renovável no Porto de Roterdã**. 2025. Disponível em: <https://landseagroup.com.br/energia-renovavel-no-porto-de-rotterdam/>. Acesso em: 27 mar. 2025.

MAREDU. **The ship to port interface.** 2023. Disponível em: <https://maredu.hcg.gr/modules/document/file.php/MAK265/Dissertations%20in%20English/The%20ship%20to%20port%20interface.pdf>. Acesso em: 1 nov. 2025.

MCKINSEY & COMPANY. **Automation in ports: improving productivity and cost efficiency.** 2018.

NOTTEBOOM, Theo; PALLIS, Athanasios; RODRIGUE, Jean-Paul. **Evolution of the Port of Rotterdam.** In: *Port economics, management and policy*. New York: Routledge, 2022. Cap. 3.1 Disponível em: <https://porteconomicsmanagement.org/pemp/contents/part3/changing-geography-of-seaports/evolution-port-rotterdam/>. Acesso em: 18 out. 2025.

OFFSHORE ENERGY. **Port of Rotterdam makes progress on sustainability front despite economic challenges.** 2025. Disponível em: <https://www.offshore-energy.biz/port-of-rotterdam-makes-progress-on-sustainability-front-despite-economic-challenges/>. Acesso em: 13 ago. 2025.

PORT OF ROTTERDAM AUTHORITY. **The world's smartest port.** Rotterdam, 2019. Disponível em: <https://www.portofrotterdam.com/sites/default/files/2021-06/the-worlds-smartest-port-port-of-rotterdam-publieksfolder-2019-en.pdf>. Acesso em: 1 nov. 2025.

PORT OF ROTTERDAM AUTHORITY. **Smart infrastructure.** 8 set. 2022. Disponível em: <https://www.portofrotterdam.com/en/port-future/smart-infrastructure>. Acesso em: 18 out. 2025.

PORT OF ROTTERDAM AUTHORITY. **Half-year report 2025.** Rotterdam, 2025. Disponível em: <https://reporting.portofrotterdam.com/external/asset/download/project/f926250a-03f3-0000-1b19-7f2d2f946700/name/Half-Year%20Report%202025%20FINAL.pdf>. Acesso em: 2 out. 2025.

PORT OF ROTTERDAM AUTHORITY. **Innovation.** Disponível em: <https://www.portofrotterdam.com/en/port-future/innovation>. Acesso em: 1 nov. 2025.

TEIXEIRA, André; COSTA, Bruno R. L.; LIMA, Lucas A.; SILVA, Victor E.; FREITAS, Mariana X. B. de; INÁCIO, Pedro H.; PETERSEN, Sten C. **Terminal Fantasma: um estudo sobre a robotização no Porto de Roterdã.** In: *XII FATECLOG – Gestão da Cadeia de Suprimentos no Agronegócio*. Mogi das Cruzes, SP, 2021. Anais... ISSN 2357-9684. Disponível em: <https://fateclog.com.br/anais/2021/5-8-1-RV.pdf>. Acesso em: 18 out. 2025.

TERMINAL INDUSTRY COMMITTEE – TIC 4.0. **Terminal Industry Committee 4.0.** Disponível em: <https://tic40.org>. Acesso em: 8 out. 2025.

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