

INDÚSTRIA 4.0 NO TRANSPORTE FERROVIÁRIO: MODELO DE MATURIDADE PARA GESTÃO DE TECNOLOGIAS

MICHAEL LUCIANO CHAVES FRANZ¹, NÉSTOR FABIÁN AYALA², ANA MARGARITA LARRANAGA³

¹ Doutorando UFRGS, Porto Alegre - RS, Engenheiro TRENSURB, michael.franz@trensurb.gov.br

² Professor Dr. e pesquisador UFRGS, Membro Câmara Brasileira da Indústria 4.0, Coordenador Rede RS Indústria 4.0, nestor.ayala@ufrgs.br

³ Professora Dra. e pesquisadora UFRGS, Conselheira PANAMSTR, Diretora da ANPET, analarra@ufrgs.br

Apresentado no
Congresso Técnico-Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC
6 a 9 de outubro de 2025

RESUMO: O setor ferroviário desempenha papel estratégico no transporte de pessoas e bens, contribuindo para o desenvolvimento econômico e a redução de impactos ambientais. Este estudo propõe um modelo de maturidade voltado à Indústria 4.0 no transporte ferroviário de passageiros, com o objetivo de apoiar a gestão de tecnologias emergentes e promover avanços integrados nas dimensões internas e externas das operadoras metroferroviárias. A pesquisa adota uma abordagem exploratória e qualitativa, baseada em entrevistas semiestruturadas com especialistas do setor ferroviário brasileiro. A partir das oportunidades e indicadores de desempenho identificados, desenvolveu-se um modelo de maturidade específico para o setor e realizou-se um teste prático em colaboração com uma operadora-chave. Os resultados indicam que o modelo proposto pode orientar a aplicação de tecnologias avançadas, favorecendo operações de trens mais robustas e eficientes, manutenção prescritiva de ativos, gestão sólida da cadeia de suprimentos e melhorias na experiência dos passageiros e no desempenho dos trabalhadores.

PALAVRAS-CHAVE: Indústria 4.0, Transporte ferroviário, Empresas metroferroviárias, Transformação digital.

INDUSTRY 4.0 FOR RAIL TRANSPORT: A MATURITY MODEL PROPOSAL FOR TECHNOLOGY MANAGEMENT

ABSTRACT: The railway sector plays a strategic role in transporting people and goods, contributing to economic development and reducing environmental impacts. This study proposes an Industry 4.0 maturity model for passenger rail transport, aiming to support the management of emerging technologies and foster integrated progress across internal and external organizational dimensions. The research adopts an exploratory and qualitative approach, based on semi-structured interviews with experts from the Brazilian railway sector. Based on the identified opportunities and performance indicators, a sector-specific maturity model was developed and tested in collaboration with a key transport operator. The findings indicate that the proposed model can guide the application of advanced technologies, enabling more robust and efficient train operations, prescriptive asset maintenance, strong supply chain management, and improvements in passenger experience and workforce performance.

KEYWORDS: Industry 4.0, Rail transport, Passenger railway companies, Digital transformation.

INTRODUÇÃO

A Indústria 4.0 tem recebido atenção crescente desde sua concepção, em 2011, como resultado de uma aliança estratégica entre governo, academia e empresas alemãs, visando manter o país na vanguarda tecnológica da manufatura e da gestão de processos industriais complexos (Kagermann et al., 2013). Desde então, o conceito se expandiu globalmente, despertando o interesse de países desenvolvidos e emergentes que buscam protagonismo na chamada Quarta Revolução Industrial

(Frank et al., 2019). Outras áreas, como sistemas de saúde (Tortorella et al., 2019), educação (Hussin, 2018) e cidades inteligentes (Lom et al., 2016), já o adaptaram para gerar benefícios significativos.

O setor ferroviário é essencial para promover mobilidade sustentável e inclusiva, contribuindo para o crescimento econômico, a redução de impactos ambientais e o desenvolvimento regional (De Souza et al., 2022; Tapia et al., 2020; Pieriegud, 2018). Esse modal mitiga externalidades, como congestionamentos, acidentes e emissões, além de ampliar o acesso a serviços essenciais. A integração da Indústria 4.0 nesse contexto está alinhada à Agenda 2030 da ONU, em especial aos ODS 9 e 11, ao impulsionar inovação, infraestrutura e sistemas urbanos sustentáveis. Entretanto, as pesquisas sobre sua aplicação holística em ferrovias permanecem limitadas, predominando estudos que abordam soluções tecnológicas isoladas (Tang et al., 2022; Ghofrani et al., 2018; Jo et al., 2018).

Para suprir essa lacuna, este estudo propõe um modelo de maturidade voltado à Indústria 4.0, direcionado a empresas metroferroviárias, com o propósito de apoiar a gestão de tecnologias emergentes e orientar processos de transformação digital. O modelo contempla as dimensões internas das operadoras e as demandas externas de usuários e demais stakeholders, sendo estruturado a partir de entrevistas com especialistas do setor ferroviário brasileiro e da análise de indicadores de desempenho relevantes à digitalização no transporte de passageiros.

MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo empregou uma abordagem qualitativa e exploratória, com o objetivo de compreender o estágio atual de maturidade tecnológica em empresas metroferroviárias e propor um modelo alinhado aos princípios da Indústria 4.0. A investigação foi orientada pelas diretrizes de Voss et al. (2002) para estudos de caso na área de gestão de operações, cujas etapas são descritas a seguir.

Realizou-se um estudo de caso no setor de transporte ferroviário de passageiros no Brasil, com foco em operadoras de metrô e trens urbanos. A coleta de dados ocorreu por meio de entrevistas semiestruturadas com especialistas das empresas, envolvendo oito operadoras selecionadas dentre as treze vinculadas à associação nacional ANPTripos. O critério de seleção considerou a implementação, ou ao menos a adoção inicial de tecnologias associadas à Indústria 4.0. O roteiro das entrevistas foi elaborado com base em uma revisão da literatura sobre modelos de Indústria 4.0, transformação digital e aplicação de tecnologias emergentes no transporte ferroviário.

Os dados qualitativos obtidos foram analisados e triangulados com informações provenientes de entrevistas adicionais com profissionais de quatro empresas fornecedoras das tecnologias mencionadas, bem como com documentos disponibilizados pelas organizações. Esse processo possibilitou identificar padrões recorrentes, lacunas tecnológicas e fatores críticos para a adoção da Indústria 4.0. Além disso, com o apoio da associação nacional, incorporaram-se os principais indicadores de desempenho (KPIs) utilizados no setor como insumos para a construção do modelo de maturidade proposto.

Por fim, o modelo desenvolvido passou por validação prática mediante sua aplicação conceitual em uma operadora metroferroviária. Nessa etapa, foram realizadas discussões com profissionais especializados sobre as especificidades da ferramenta, além de observações diretas e conversas informais com demais colaboradores. Esse procedimento permitiu verificar a aderência do instrumento à realidade organizacional e identificar ajustes necessários para seu aprimoramento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As entrevistas realizadas possibilitaram identificar diversas iniciativas tecnológicas alinhadas à Indústria 4.0, já implementadas ou em fase de estudo por operadoras metroferroviárias brasileiras, além de soluções oferecidas por fornecedores especializados e oportunidades adicionais apontadas pelos entrevistados.

No que se refere às tecnologias de base (IoT, computação em nuvem, Big Data e análise de dados), observou-se que a Internet das Coisas tem desempenhado papel fundamental na integração vertical das operações. Essa integração abrange a transmissão de dados de telemetria dos trens para bases externas por meio de internet móvel ou Wi-Fi em estações de passageiros, bem como a

Figura 2. Modelo de maturidade da Indústria 4.0 no transporte ferroviário de passageiros.

MODELO DE MATURIDADE DE INDÚSTRIA 4.0 PARA EMPRESAS METROFERROVIÁRIAS						
OBJETIVOS PRODUTIVOS e KPIs associados	ESTÁGIO 1	ESTÁGIO 2	ESTÁGIO 3	ESTÁGIO 4	ESTÁGIO 5	
1. DESEMPENHO NO ATENDIMENTO DA DEMANDA DE PASSAGEIROS PONTUALIDADE DOS TRENS TEMPO MÉDIO DE VIAGEM NÚMERO DE PASSAGEIROS TRANSPORTADOS REGULARIDADE ENTRE TRENS OCUPAÇÃO NO INTERIOR DOS TRENS CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA POR NÚMERO DE PASSAGEIROS TRANSPORTADOS	As ofertas de trens são planejadas manualmente em planilhas eletrônicas, com base em dados do sistema consolidado de bilhetagem e em pesquisas origem-destino realizadas nas estações de passageiros, tornando o processo mais ágil e preciso. O centro de controle ajusta os intervalos entre trens durante a operação comercial com base em conhecimento empírico.	As ofertas de trens são planejadas em software de simulação, com base em dados do sistema consolidado de bilhetagem e em pesquisas origem-destino realizadas nas estações de passageiros, tornando o processo mais ágil e preciso. O centro de controle utiliza IoT (com suporte em nuvem) para ajustar os intervalos entre trens durante a operação comercial, com base no fluxo de passageiros em tempo real dentro dos trens.	As ofertas de trens são planejadas em software de simulação, com base em dados do sistema consolidado de bilhetagem e em pesquisas origem-destino realizadas nas estações de passageiros, tomando o processo mais ágil e preciso. O centro de controle utiliza IoT (com suporte em nuvem) para ajustar os intervalos entre trens durante a operação comercial, com base no fluxo de passageiros em tempo real dentro dos trens.	As ofertas de trens são planejadas em software de simulação com base em dados históricos de fluxo de passageiros dentro dos trens, utilizando big data e análise de dados. Grades horárias robustas e eficientes são personalizadas, conforme as demandas. O centro de controle utiliza IoT (com suporte em nuvem) para ajustar os intervalos entre trens durante a operação comercial, com base no fluxo de passageiros em tempo real dentro dos trens. O planejamento das ofertas de trens é calibrado continuamente.	As ofertas de trens são planejadas com base em dados históricos e em tempo real, utilizando big data, análise de dados avançada e IA. A execução é dinâmica e ajustada conforme a demanda real, com uso de IoT (com suporte em nuvem), inteligência artificial (IA) para tomada de decisão e controle autônomo de trens (ATO/UTO). Grades horárias robustas e eficientes são personalizadas continuamente.	
TECNOLOGIAS-CHAVE	Planilhas eletrônicas	Software de simulação	Software de simulação + IoT trens + Nuvem	Software de simulação + IoT trens + Nuvem + Big data + análise de dados	Software de simulação + IoT trens + Nuvem + Big data + análise avançada + IA+ ATO/UTO	
2. DESEMPENHO DO MATERIAL RODANTE DISPONIBILIDADE DOS TRENS OCORRÊNCIAS COM INTERFERÊNCIA NA OPERAÇÃO COMERCIAL	A manutenção preventiva do material rodante é planejada manualmente em planilhas eletrônicas, com base em critérios técnicos traduzidos em quilômetros rodados e intervalos de tempo. Demandas corretivas emergenciais ocorrem de forma inesperada, interferindo na operação comercial.	A manutenção preventiva do material rodante é planejada no ERP com base em critérios técnicos traduzidos em quilômetros rodados e intervalos de tempo, apoiada pelo monitoramento de parâmetros técnicos extraídos do sistema computacional embarcado nos trens. As falhas são detectadas precocemente e corrigidas, aprimorando decisões de manutenção e reduzindo interferências na operação comercial.	A manutenção preventiva do material rodante é planejada no ERP com base em critérios técnicos, complementada pelo monitoramento em tempo real dos parâmetros dos trens utilizando IoT (com suporte em nuvem). As falhas são detectadas precocemente e corrigidas, aprimorando decisões de manutenção e operação suportadas pelo sistema e reduzindo impactos na operação comercial.	A manutenção preventiva é planejada no ERP com base em dados históricos de falhas, utilizando big data e análise de dados. Além disso, é apoiada pelo monitoramento em tempo real de parâmetros dos trens utilizando IoT (com suporte em nuvem). Parte da manutenção preventiva sistemática migra para manutenção baseada em condição. As falhas são detectadas precocemente e corrigidas, aprimorando decisões de manutenção e operação suportadas pelo sistema e reduzindo impactos na operação comercial.	A manutenção prescritiva do material rodante é baseada em dados históricos de falhas e monitoramento em tempo real de parâmetros técnicos obtidos por IoT (com suporte em nuvem), big data e análise avançada. O sistema diagnostica falhas potenciais e recomenda ações utilizando inteligência artificial (IA). As previsões auxiliam no planejamento de necessidades de longo prazo, melhorando o orçamento de manutenção e o ciclo de vida dos ativos.	
TECNOLOGIAS-CHAVE	Planilhas eletrônicas	ERP + Sensores + Sistema computacional embarcado	ERP + IoT (trens) + Nuvem	ERP + IoT (trens) + Nuvem + Big data + Análise de dados	ERP + IoT (trens) + Nuvem + Big data + Análise avançada + IA	
3. DESEMPENHO DA INFRAESTRUTURA DISPONIBILIDADE DA INFRAESTRUTURA OCORRÊNCIAS COM INTERFERÊNCIA NA OPERAÇÃO COMERCIAL	A manutenção preventiva da infraestrutura é planejada manualmente em planilhas eletrônicas, com base em critérios técnicos traduzidos em intervalos de tempo. Inspeção visual da via férrea e da rede aérea de tração ocorre in loco, concomitante à circulação dos trens. Demandas corretivas emergenciais ocorrem de forma inesperada, interferindo na operação comercial.	A manutenção preventiva da infraestrutura é planejada no ERP, com base em critérios técnicos traduzidos em intervalos de tempo. A inspeção da via férrea e da rede aérea de tração é realizada de forma autônoma, utilizando equipamentos com sensores embarcados nos trens. As falhas são detectadas precocemente e corrigidas, aprimorando decisões de manutenção e reduzindo interferências na operação comercial.	A manutenção preventiva da infraestrutura é planejada no ERP com base em critérios técnicos, apoiada pelo monitoramento em tempo real dos parâmetros da infraestrutura por meio de IoT (com suporte em nuvem). As falhas são detectadas precocemente e corrigidas, aprimorando decisões de manutenção e operação suportadas pelo sistema e reduzindo impactos na operação comercial.	A manutenção preventiva da infraestrutura é planejada no ERP com base em dados históricos de falhas, utilizando big data e análise de dados. Além disso, é apoiada pelo monitoramento em tempo real dos parâmetros da infraestrutura por IoT (com suporte em nuvem). Parte da manutenção preventiva sistemática migra para manutenção baseada em condição. As falhas são detectadas precocemente e corrigidas, aprimorando decisões de manutenção e operação suportadas pelo sistema e reduzindo impactos na operação comercial.	A manutenção prescritiva da infraestrutura é baseada em dados históricos de falhas e no monitoramento em tempo real dos parâmetros técnicos obtidos por IoT (com suporte em nuvem), big data e análise de dados avançada. O sistema diagnostica falhas potenciais e recomenda ações utilizando inteligência artificial (IA). As previsões auxiliam no planejamento de necessidades de longo prazo, melhorando o orçamento de manutenção e o ciclo de vida dos ativos.	
TECNOLOGIAS-CHAVE	Planilhas eletrônicas	ERP + Equipamentos com sensores embarcados	ERP + IoT (infraestrutura) + Nuvem	ERP + IoT (infraestrutura) + Nuvem + Big data + Análise de dados	ERP + IoT (infraestrutura) + Nuvem + Big data + Análise avançada + IA	
4. DESEMPENHO NA GESTÃO DE UTILIDADES CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA CONSUMO DE ÁGUA	Avaliação tardia do consumo de água e energia elétrica por meio de faturas. Operações manuais para conectar e desconectar pontos de consumo. Ocorrência de gastos adicionais por consumo desnecessário e pagamento de multas por ultrapassagem da demanda contratada e baixo fator de potência.	Avaliação diária do consumo de água e energia elétrica in loco, utilizando medidores físicos das concessionárias. Autonomia para ligar e desligar iluminação, ativos auxiliares e interromper pontos de consumo de água utilizando sensores e CLP. Gastos adicionais com consumo desnecessário são mitigados. Pagamento de multas por ultrapassagem da demanda contratada e baixo fator de potência.	Monitoramento em tempo real dos parâmetros técnicos das utilidades utilizando IoT (com suporte em nuvem). Controle remoto das instalações via SCADA, com autonomia para ligar e desligar iluminação e ativos, além de interromper pontos de consumo de água utilizando sensores e CLP. Gastos adicionais e multas são mitigados.	Monitoramento em tempo real das utilidades por IoT (com suporte em nuvem) e uso de dados históricos com big data e análise de dados, permitindo otimizar contratos com concessionárias, programação de CLPs e uso de fontes alternativas de energia. O sistema detecta padrões anormais e emite alertas quando de falhas. Controle remoto das instalações via SCADA e autonomia no gerenciamento de iluminação, ativos e pontos de consumo de água. Gastos e multas são reduzidos.	Monitoramento em tempo real das utilidades por IoT (com suporte em nuvem) com tomada de decisão autônoma apoiada por inteligência artificial (IA), acionando ou desligando pontos de consumo, interrompendo o fornecimento quando detectadas anomalias e alternando entre fontes de energia utilizando sensores, CLP e SCADA. O sistema projeta a demanda de água e energia e propõe ações para otimizar o consumo com base em big data, análise de dados avançada e IA.	
TECNOLOGIAS-CHAVE	Documentos físicos ou digitais	Medidores físicos das concessionárias + Sensores + CLP	IoT (utilidades) + Nuvem + Sensores + CLP + SCADA	IoT (utilidades) + Nuvem + Sensores + CLP + SCADA + Big data + Análise de dados	IoT (utilidades) + Nuvem + Sensores + CLP + SCADA + Big data + Análise avançada + IA	
5. DESEMPENHO DOS TRABALHADORES ACIDENTES COM TRABALHADORES TREINAMENTO DE TRABALHADORES	A comunicação entre os trabalhadores é restrita aos colegas mais próximos em situações imprevistas e pouco frequentes, com decisões tomadas de forma empírica. O treinamento é realizado em sala de aula, baseado em procedimentos e normas, mas sem relação próxima com o local das atividades.	Os trabalhadores compartilham conhecimento para enfrentar situações imprevistas e pouco frequentes por meio de redes sociais industriais. Além disso, o contato com todos os trabalhadores durante a jornada é simplificado. O treinamento é realizado em sala de aula com base em procedimentos e normas, vinculado ao local das atividades práticas, por meio de atividades práticas.	Os trabalhadores compartilham conhecimento para enfrentar situações imprevistas e pouco frequentes por meio de redes sociais industriais. Além disso, o contato com todos os trabalhadores durante a jornada é simplificado. O treinamento é baseado em procedimentos e normas, vinculado ao local das atividades utilizando plataformas de apoio à aprendizagem, complementado por atividades práticas sempre que possível.	O contato entre trabalhadores e o compartilhamento de conhecimento são simplificados por meio de redes sociais industriais. A realidade aumentada (AR) apoia a execução das atividades, melhorando a tomada de decisão e orientando ações. O treinamento é baseado em procedimentos e normas, vinculado ao local das atividades com plataformas de apoio à aprendizagem, complementado por realidade virtual (RV) em ambientes especiais de execução.	O contato entre trabalhadores e o compartilhamento de conhecimento são simplificados por meio de redes sociais industriais. A realidade aumentada (AR) apoia a execução das atividades, melhorando a execução e emite alertas de segurança em conjunto com inteligência artificial (IA). O treinamento é baseado em procedimentos e normas, vinculado ao local das atividades com plataformas de apoio à aprendizagem, complementado por realidade virtual (RV) em ambientes especiais de execução.	
TECNOLOGIAS-CHAVE	Documentos físicos	Redes sociais industriais	Redes sociais industriais + Plataformas de apoio à aprendizagem	Redes sociais industriais + Plataformas de apoio à aprendizagem + RA + RV	Redes sociais industriais + Plataformas de apoio à aprendizagem + RA + RV + IA	
6. DESEMPENHO DA CADEIA DE SUPRIMENTOS VALOR DO ESTOQUE DE MATERIAIS TEMPO MÉDIO DE AQUISIÇÃO AGILIDADE NO RECEBIMENTO DE MATERIAIS CONFABILIDADE NA ENTREGA DE MATERIAIS	O planejamento de compras é baseado em políticas de estoque mínimo e demandas pontuais e consumo registrado no ERP. Uma plataforma digital entre empresas do mesmo grupo societário permite ganhos de escala nas negociações e compartilhamento de itens em estoque. Requisições, cotações, pedidos e acompanhamentos continuam sendo realizados por e-mail e telefone. Os produtos são armazenados de forma estática no almoxarifado, com etiquetas de identificação alocadas manualmente.	O planejamento de compras é baseado em políticas de estoque mínimo e demandas pontuais e consumo registrado no ERP. Uma plataforma digital entre empresas do mesmo grupo societário permite ganhos de escala e compartilhamento de itens em estoque. A possibilidade de precificação automática e acompanhamento do pedido até a entrega. Sistemas de identificação por QR Code ou RFID aprimoram a gestão de inventário.	O planejamento de compras é baseado em políticas de estoque mínimo e consumo registrado no ERP. Uma plataforma digital entre empresas do mesmo grupo societário permite ganhos de escala e compartilhamento de itens em estoque. Plataforma digital com fornecedores possibilita precificação automática e acompanhamento do pedido até a entrega. Sistemas de identificação por QR Code ou RFID aprimoram a gestão de inventário.	O planejamento de compras é realizado no ERP com base em dados históricos da cadeia de suprimentos, utilizando big data e análise de dados. O sistema identifica necessidades de aquisição com base no nível atual de estoque, monitoramento da condição dos ativos e integração com plataformas digitais. As plataformas digitais aceleram negociações, compartilhamento de itens, precificação automática e acompanhamento das entregas. A manufatura aditiva torna a obtenção de peças sobressalentes mais flexível. Sistemas de identificação por QR Code ou RFID aprimoram a gestão de inventário.	O planejamento de compras é realizado no ERP com base em dados históricos da cadeia, utilizando big data e análise de dados. O sistema identifica necessidades de aquisição com base no estoque atual, monitoramento da condição dos ativos e integração com plataformas digitais. Além disso, atua de forma autônoma para evitar interrupções na cadeia de suprimentos, utilizando inteligência artificial (IA). As plataformas digitais agilizam negociações, compartilhamento de itens, precificação automática e acompanhamento das entregas. A manufatura aditiva proporciona maior flexibilidade para obtenção de peças. Sistemas de identificação por QR Code ou RFID aprimoram a gestão de inventário.	
TECNOLOGIAS-CHAVE	E-mail + Telefone + Documentos físicos	E-mail + Telefone + ERP + Plataforma digital + QR Code/RFID	ERP + Plataformas digitais + QR Code/RFID	ERP + Plataformas digitais + QR Code/RFID + Big data + Análise de dados + Manufatura aditiva	ERP + Plataformas digitais + QR Code/RFID + Big data + Análise avançada + Manufatura aditiva + IA	
7. DESEMPENHO NA PRESTAÇÃO DO SERVIÇO SATISFAÇÃO DOS CLIENTES COM O SERVIÇO	Vendas de bilhetes, atendimento e pesquisas de satisfação realizadas manualmente nas estações de passageiros. As informações operacionais sobre as linhas ferroviárias são atualizadas manualmente no site da operadora, nas estações e no interior dos trens. Câmeras de segurança monitoram o fluxo de passageiros para conter riscos e subsidiar estudos de mobilidade.	Vendas de bilhetes, atendimento e pesquisas de satisfação realizadas por canais digitais de relacionamento. Como alternativa ao uso de QR Codes, o pagamento pode ser feito diretamente nas catracas via NFC. As informações operacionais sobre as linhas são atualizadas manualmente no canal digital, estações e trens. O fluxo de passageiros é monitorado por câmeras de segurança. Wi-Fi disponível para clientes nas estações.	Vendas de bilhetes, atendimento e pesquisas de satisfação por canais digitais. Como alternativa aos QR Codes, pagamento direto nas catracas via NFC. Sistemas dinâmicos de informação sobre as linhas são atualizados em tempo real nos canais digitais, estações e trens utilizando IoT (trens, infraestrutura, utilidades). O fluxo de passageiros é monitorado em tempo real com câmeras inteligentes ou IoT (com suporte em nuvem), melhorando a tomada de decisão operacional e estudos de mobilidade. Wi-Fi disponível nas estações e trens.	Infoentretenimento, vendas de bilhetes, atendimento e pesquisas de satisfação via canais digitais. Como alternativa aos QR Codes, pagamento direto nas catracas via NFC. Sistemas dinâmicos de informação atualizados em tempo real nos canais digitais, estações e trens com IoT (trens, infraestrutura, utilidades). O monitoramento do fluxo de passageiros em tempo real via IoT (e nuvem) apoia decisões operacionais. Dados históricos, analisados com big data e análise de dados, fortalecem estudos de mobilidade e otimizam o uso de recursos. Wi-Fi disponível nas estações e trens.	Planejamento da viagem, infoentretenimento, vendas de bilhetes, atendimento e pesquisas de satisfação via canais digitais com suporte de inteligência artificial (IA). Como alternativa aos QR Codes, pagamento direto nas catracas via NFC. Sistemas dinâmicos de informação atualizados em tempo real com IoT (trens, infraestrutura, utilidades). O monitoramento do fluxo de passageiros em tempo real via IoT (e nuvem) apoia decisões operacionais, enquanto dados históricos com big data e análise avançada fortalecem estudos de mobilidade e otimizam o uso de recursos. O sistema projeta a demanda e propõe ações para otimizar recursos nas estações com suporte de IA. Wi-Fi disponível nas estações e trens.	
TECNOLOGIAS-CHAVE	Documentos físicos + Câmeras de segurança	Câmeras de segurança + Canais digitais + QR Code/NFC + Wi-Fi	Canais digitais + QR Code/NFC + Wi-Fi + IoT estações+ Nuvem	Canais digitais + QR Code/NFC + Wi-Fi + IoT estações + Nuvem + Big data + Análise de dados	Canais digitais + QR Code/NFC + Wi-Fi + IoT estações + Nuvem + Big data + Análise avançada + IA	

CONCLUSÃO

Este trabalho analisou de forma abrangente a aplicação dos conceitos da Indústria 4.0 no transporte ferroviário de passageiros, com o objetivo de propor um modelo de maturidade adaptado às especificidades do setor. Partiu-se da construção de um modelo conceitual baseado nas quatro dimensões da Indústria 4.0, ajustado posteriormente a partir de objetivos produtivos definidos com base em KPIs observados nas operadoras metroferroviárias brasileiras.

A pesquisa empírica confirmou a aderência das dimensões inteligentes ao contexto operacional das empresas analisadas, evidenciando a adoção crescente de tecnologias como IoT e computação em nuvem para infraestrutura inteligente e telemetria de trens. Contudo, verificou-se que o uso de Big Data e técnicas avançadas de análise de dados ainda é limitado, indicando oportunidades promissoras para avanços estratégicos.

O modelo proposto aponta para o potencial de criação de centros de inteligência operacional, capazes de aprimorar a oferta de trens, implementar manutenção prescritiva, fortalecer a gestão da cadeia de suprimentos e elevar tanto a experiência dos passageiros quanto o desempenho dos trabalhadores. Sua principal contribuição consiste na disponibilização de uma ferramenta prática, fundamentada em evidências empíricas e alinhada a indicadores do setor, para orientar a transformação digital e gerar impactos positivos em eficiência, qualidade e sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

- De Souza, F.L.U., Larranaga, A.M., Palma, D., Pitombo, C.S., 2022. Modeling travel mode choice and characterizing freight transport in a Brazilian context. *Transportation Letters* 14 (9), 983–996. <https://doi.org/10.1080/19427867.2021.1976011>.
- Frank, A.G., Dalenogare, L.S., Ayala, N.F., 2019. Industry 4.0 technologies: implementation patterns in manufacturing companies. *Int. J. Prod. Econ.* 210, 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004>.
- Ghofrani, F., He, Q., Goverde, R.M.P., Liu, X., 2018. Recent applications of big data analytics in railway transportation systems: a survey. *Transport. Res. C Emerg. Technol.* 90 (2018), 226–246. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.03.010>.
- Hussin, A.A., 2018. Education 4.0 made simple: ideas for teaching. *Int. J. Educ. Literacy Stud.* <https://doi.org/10.7575/aiac.ijels.v.6n.3p.92>.
- Jo, O., Kim, Y.-K., Kim, J., 2018. Internet of Things for smart railway: feasibility and applications. *IEEE Internet Things J.* 5 (2), 482–490. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2749401>. April 2018.
- Kagermann, H., Wahlster, W., Helbig, J., 2013. Recommendations for Implementing the Strategic Initiative Industrie 4.0: Securing the Future of German Manufacturing Industry. Final Report of the Industrie 4.0 Working Group. Acatech, Forschungsunion.
- Lom, M., Pribyl, O., Svitek, M., 2016. Industry 4.0 as a part of smart cities. *Smart Cities Symposium Prague (SCSP)*, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/SCSP.2016.7501015>.
- Pieriegud, J., 2018. Digital Transformation of Railways. SGH Warsaw School of Economics, Siemens. https://rail-research.europa.eu/wp-content/uploads/2018/04/DIGITAL_TRANSFORMATION_RAILWAYS_2018_web.pdf.
- Tang, R., De Donato, L., Besinovi'c, N., Flammini, F., Goverde, R.M., Lin, Z., Liu, R., Tang, T., Vittorini, V., Wang, Z., 2022. A literature review of Artificial Intelligence applications in railway systems. *Transport. Res. C Emerg. Technol.* 140, 103679 <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103679>.
- Tapia, R.J., Jong, G., Larranaga, A.M., Cybis, H.B.B., 2020. Application of MDCEV to infrastructure planning in regional freight transport. *Transport. Res. Pol. Pract.* 133, 255–271. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.01.016>. ISSN 0965-8564.
- Tortorella, G.L., Fogliatto, F.S., Vergara, A.M.C.A., Vassolo, R., Sawhney, R., 2019. Healthcare 4.0: trends, challenges and research directions. *Prod. Plann. Control* 31 (15), 1245–1260. <https://doi.org/10.1080/09537287.2019.1702226>.
- Voss, C.A., Tsikriktsis, N., Frohlich, M., 2002. Case research in operations management. *Int. J. Oper. Prod. Manag.* 22, 195–219