

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



CATEGORIA 3

OPORTUNIDADES DA INDÚSTRIA 4.0 PARA EMPRESAS METROFERROVIÁRIAS

INTRODUÇÃO

A Indústria 4.0, ou Quarta Revolução Industrial (Liao et al., 2017), tem sido amplamente pesquisada desde sua concepção (Meindl et al., 2021). Esse conceito desperta interesse global em países desenvolvidos e emergentes. Seus pilares fundamentais são os Sistemas Ciber Físicos, integrando o mundo físico e digital (Xu et al., 2018), e a Internet das Coisas e Serviços, conectando objetos, pessoas e sistemas de informação (Kagermann et al., 2013).

A Indústria 4.0 encontra aplicações em diversos setores, como saúde (Tortorella et al., 2019), educação (Hussin, 2018) e cidades inteligentes (Lom et al., 2016), proporcionando benefícios reconhecidos. O setor de transporte sobre trilhos desempenha um papel relevante no deslocamento de pessoas e mercadorias, sendo considerado prioritário em termos de sistemas de mobilidade amigáveis ao usuário e sustentáveis (Pieriegud, 2018; Laiton-Bonadiez et al., 2022; Gerhátová et al., 2021a, Gerhátová et al., 2021b; Jo et al., 2018).

Estudos sobre a Indústria 4.0 no transporte sobre trilhos são escassos, especialmente em relação à adoção holística dos conceitos em todas as dimensões do negócio. A maioria das pesquisas existentes analisa tecnologias específicas de forma isolada, destacando a necessidade premente de mais estudos nesse campo.

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



Segundo a Associação Nacional dos Transportadores de Passageiros sobre Trilhos (ANPTrilhos, 2017), a ferrovia é a única opção efetiva para lidar com o pico de demanda de passageiros nas grandes cidades brasileiras, tornando as viagens menos impactantes ao meio ambiente do que outros modais de transporte. Portanto, este trabalho tem como objetivos verificar o estado de maturidade da Indústria 4.0 no transporte sobre trilhos por meio de estudo na literatura, explorar as tecnologias relacionadas através de entrevistas com especialistas do setor brasileiro e adaptar o conceito de Indústria 4.0 para empresas metroferroviárias, apresentando os possíveis ganhos para melhorar o desempenho do negócio.

Utilizou-se as Quatro Dimensões Inteligentes da Indústria 4.0 (Frank et al., 2019a) como ponto focal para obter uma visão abrangente das oportunidades proporcionadas pelas tecnologias avançadas. Adotou-se uma abordagem exploratória e qualitativa, considerando a escassez de trabalhos com a visão holística pretendida (Goffin et al., 2019). A metodologia proposta é adequada, fornecendo informações de campo detalhadas para uma construção teórica indutiva sobre fenômenos contemporâneos (Eisenhardt e Graebner, 2007).

Entrevistou-se especialistas de oito operadoras metroferroviárias e quatro empresas de tecnologia do setor brasileiro, complementando com outras fontes de consulta para triangulação de dados. Os resultados mostram que a Indústria 4.0 é amplamente aplicável nas dimensões internas e externas das empresas metroferroviárias. As operadoras brasileiras estão evoluindo em direção a um centro de inteligência operacional, visando implementar oferta de trens robusta e eficiente, manutenção prescritiva, gerenciamento robusto da cadeia de suprimentos e melhorar a experiência dos passageiros e o desempenho dos trabalhadores.

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



DIAGNÓSTICO

AS QUATRO DIMENSÕES INTELIGENTES DA INDÚSTRIA 4.0

O conceito da Indústria 4.0 teve sua origem na manufatura (Kagermann et al., 2013), que continua sendo protagonista (Frank et al., 2019a). No entanto, ao longo do tempo, outros aspectos também ganharam relevância, como o suporte aos trabalhadores, a comunicação na cadeia de suprimentos e a forma de ofertar produtos e serviços (Meindl et al., 2021).

Um modelo conceitual de Indústria 4.0 que se destaca nesse contexto é o proposto por Frank et al. (2019a) conhecido como as Quatro Dimensões Inteligentes da Indústria 4.0. Essa abordagem considera quatro dimensões inteligentes como conjunto de tecnologias *front-end*, abrangendo necessidades operacionais (nas dimensões internas) e de mercado (nas dimensões externas) de uma empresa. Além disso, o modelo incorpora outras tecnologias de base, como Internet das Coisas (IoT), Computação em Nuvem, *Big Data* e Análise de Dados, que fornecem conectividade e inteligência às tecnologias *front-end*, impulsionando a transformação digital das empresas ao encontro da Quarta Revolução Industrial (Meindl et al., 2021). Nos estágios mais avançados da Indústria 4.0, prevê-se a adaptabilidade dos negócios por meio da capacidade preditiva e auto otimização de processos (Schuh et al., 2020).

Manufatura Inteligente

A dimensão interna chamada Manufatura Inteligente refere-se a sistemas avançados de produção que possibilitam maior produtividade, qualidade e flexibilidade para as empresas. Essa dimensão aborda problemas comuns nas fábricas, tais como paralisação de ativos por

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



falhas, manutenção preventiva desnecessária, desperdício de energia e geração de sucata devido a ajustes inadequados de máquinas, bem como longos tempos de desenvolvimento de processos para novos produtos (Frank et al., 2019a). Quando totalmente implementada como um sistema de manufatura responsivo, essa dimensão promete ser o destaque da Quarta Revolução Industrial, adaptando-se instantaneamente às mudanças nas demandas e condições da fábrica, da cadeia de suprimentos e das necessidades dos clientes (Kusiak, 2018).

A Tabela 1 apresenta as principais tecnologias utilizadas para esse fim.

Tabela 1 - Tecnologias-chave para Manufatura Inteligente

Propósito primário	Tecnologias	Referências
Integração Vertical	Sensores, atuadores	
	Controlador lógico programável (CLP)	Tabim et al., 2021
	Sistemas de supervisão e aquisição de dados (SCADA)	Frank et al., 2019a
	<i>Manufacturing execution system</i> (MES) <i>Enterprise resource planning</i> (ERP)	Kagermann et al., 2013
Virtualização	Simulação de processos	
	Comissionamento virtual	Bueno et al., 2020
	Inteligência artificial para planejamento da produção Inteligência artificial para manutenção preditiva	Frank et al., 2019a
Autonomia	Robôs industriais	Frank et al., 2019a
	Comunicação máquina-máquina (M2M)	Kagermann et al., 2013
	Identificação automática de não-conformidades	
Rastreabilidade	Sensores para detecção de matérias-primas	Schuh et al., 2020
	Sensores para detecção de produtos acabados	Frank et al., 2019a
Flexibilidade	Manufatura aditiva	Meindl et al., 2021
	Linhas flexíveis e autônomas	Frank et al., 2019a
Gestão de energia	Sistemas de monitoramento de energia	Frank et al., 2019a
	Sistemas de melhoria da eficiência energética	Kusiak, 2018
		Kagermann et al., 2013

Trabalho Inteligente

A dimensão interna denominada Trabalho Inteligente está relacionada a tecnologias da Indústria 4.0 que capacitam os trabalhadores envolvidos em atividades industriais (Dornelles

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



et al., 2022). Essas tecnologias emergentes fornecem suporte físico e cognitivo, criando um ambiente propício para a troca de informações e promovendo o crescimento profissional, o que resulta em um desempenho empresarial aprimorado (Romero et al., 2020). A Tabela 2 apresenta as principais tecnologias utilizadas para esse fim.

Tabela 2 - Tecnologias-chave para Trabalho Inteligente

Propósito primário	Tecnologias	Referências
Alívio e integridade do físico humano	Exoesqueletos	Dornelles et al., 2022
Treinamento e aprendizado	Robôs colaborativos	Schuh et al., 2020
	Realidade virtual	
Interface homem-máquina	Realidade aumentada	Frank et al., 2019a
	Assistentes ativados por voz	Dornelles et al., 2022
Representação virtual de um sistema físico	Gêmeo digital	Bustos et al., 2021 Romero et al., 2020
Coleta, análise e síntese de dados visuais	Visão computacional	Dornelles et al., 2022
Otimização de processos por meio da tomada de decisão ideal	Sistema inteligente de apoio à decisão	Laiton-Bonadiez et al., 2022
Visualização de dados para obtenção de insights	Análise visual	Dornelles et al., 2022
Complemento das capacidades do trabalhador	Inteligência artificial	Laiton-Bonadiez et al., 2022
Melhorias no desempenho do trabalhador e liberação de atividades de baixo valor agregado	Automação	Dornelles et al., 2022
Saúde do trabalhador, estudos de deslocamentos e movimentos	Dispositivos vestíveis	Romero et al., 2020
Prever eventos relevantes em tempo real	Sensores de ambiente e nas máquinas	Dornelles et al., 2022
Melhorias na colaboração corporativa	Redes sociais industriais	Romero et al., 2020

Cadeia de Suprimentos Inteligente

A dimensão externa chamada Cadeia de Suprimentos Inteligente envolve a utilização de tecnologias para integrar horizontalmente as empresas com seus fornecedores externos,

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



resultando em melhorias no abastecimento de matéria-prima e do produto final, o que impacta nos custos e prazos industriais (Frank et al., 2019a). O conceito busca otimizar o fluxo de dados logísticos em tempo real, desde os fornecedores até os clientes, passando pelo fabricante principal e outras unidades do mesmo grupo acionista, utilizando tecnologias emergentes para agilizar os processos da cadeia de suprimentos (Frederico et al., 2020). A Tabela 3 apresenta as principais tecnologias utilizadas para esse fim.

Tabela 3 - Tecnologias-chave para Cadeia de Suprimentos Inteligente

Propósito primário	Tecnologias	Referências
Informações sob demanda	Plataforma digital com outras empresas do grupo	Frank et al., 2019a
	Plataforma digital com fornecedores	Ivanov et al., 2018
	Plataforma digital com clientes	
Melhorar o planejamento e a resposta a interrupções de fornecimento	Manufatura aditiva	Ivanov et al., 2018
	Análise de big data	
	Sistemas de rastreamento	
Redesenhar a cadeia de suprimentos de acordo com os principais indicadores de desempenho (KPI)	Gêmeo digital da cadeia de suprimentos	Ivanov & Dolgui, 2020
	Sistemas modernos de gestão de armazéns	Identificação por radiofrequência (RFID)
Melhorias na logística interna de matérias-primas e produtos manufaturados	robótica, automação	Meindl et al., 2021
	Veículos guiados automaticamente (AGV)	
	Robôs móveis autônomos (AMR)	

Produtos-Serviços Inteligentes

A dimensão externa denominada Produtos-Serviços Inteligentes refere-se à adoção de tecnologias que aproximam a empresa e o usuário final. A integração de recursos digitais em produtos e serviços aumenta o valor percebido pelos clientes (Meindl et al., 2021; Frank et al.,

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



2019a). Produtos e serviços inteligentes são ofertas distintas aos clientes, mas podem formar uma solução integrada em alguns casos (Meindl et al., 2021).

Os produtos inteligentes podem fornecer recursos adicionais aos clientes, como *feedback* de dados relevantes para a empresa, integrando os dados do usuário final ao sistema de produção (Dalenogare et al., 2018). As empresas comercializam seus produtos no mercado, gerando retorno sobre o investimento. Algumas empresas aumentam sua receita integrando serviços inteligentes para oferecer suporte aos clientes em um modelo produto-serviço com base em suas necessidades e nos dados gerados pelo produto (Frank et al., 2019b).

Tabela 4 - Tecnologias-chave para Produtos-Serviços Inteligentes

Propósito primário	Tecnologias	Referências
Produtos inteligentes	Conectividade do produto	Meindl et al., 2021 Frank et al., 2019a Dalenogare et al., 2018
	Monitoramento do produto	
	Controle de produto	
	Otimização do produto	
Serviços inteligentes	Autonomia do produto	Meindl et al., 2021 Frank et al., 2019b Ayala et al., 2017
	Sistema produto-serviço	
	Produto como um serviço	

Além disso, algumas empresas adotam uma abordagem alternativa, transformando o próprio produto em serviço, como por exemplo optando pelo modelo de aluguel em vez de venda (Ayala et al., 2017). A Tabela 4 apresenta as principais tecnologias utilizadas para esse fim.

INDÚSTRIA 4.0 NO TRANSPORTE SOBRE TRILHOS

Dimensões internas Operação e Trabalho Inteligentes

A dimensão Manufatura Inteligente, originalmente focada no chão de fábrica, pode ser aplicada de forma análoga no contexto do transporte de passageiros sobre trilhos. As

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



empresas metroferroviárias brasileiras operam extensas linhas que podem abranger centenas de quilômetros de trilhos, dezenas de estações de passageiros e muitas composições de trens circulando nos horários de pico, tornando-as comparáveis a grandes parques industriais que produzem o serviço de transporte.

Dentro desse contexto, a dimensão interna Operação Inteligente concentra-se em otimizar o fluxo de trens e passageiros no sistema de transporte metroferroviário, bem como a manutenção dos ativos operacionais e o consumo energético. A literatura investigada apresenta diversas tecnologias que podem contribuir para esses objetivos. Isso inclui a implementação de uma oferta de trens robusta e eficiente (Liu et al., 2020), atendendo adequadamente à demanda de passageiros, reduzindo atrasos e otimizando o consumo de energia do material rodante.

Além disso, é crucial destacar a importância da manutenção dos ativos ferroviários para garantir a segurança dos passageiros e a qualidade dos serviços prestados (Jo et al., 2018; Yokoyama, 2015). As operadoras metroferroviárias podem inovar seus processos de trabalho, adotando a manutenção baseada na condição do material rodante e da infraestrutura (Bustos et al., 2021; Karakose e Yoman, 2020; Jo et al., 2018; Pieriegud, 2018; Li et al., 2017; Takikawa, 2016).

O conceito de Trabalho Inteligente tem uma aplicação direta no contexto das operadoras metroferroviárias, pois muitas tecnologias emergentes da Indústria 4.0 têm o potencial de diversificar as atividades desenvolvidas no transporte sobre trilhos e aprimorar os resultados das empresas (Gerhátová et al., 2021a). Yokoyama (2015) e Takikawa (2016) destacam a

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



importância da Inteligência Artificial na tomada de decisões relacionadas ao trabalho de engenharia de manutenção. Além disso, Consilvio et al. (2019) propuseram uma abordagem prescritiva para a infraestrutura ferroviária, utilizando dados gerados para apoiar a tomada de decisões na priorização de intervenções de manutenção.

Tecnologias como Realidade Aumentada têm o potencial de fornecer informações contextualizadas e personalizadas durante as atividades (Scheffer et al., 2021), enquanto a Realidade Virtual pode reduzir custos de treinamento, desenvolvendo a expertise dos trabalhadores. Além disso, ferramentas de colaboração têm sido usadas para potencializar a cooperação entre os trabalhadores em suas atividades rotineiras (Kans et al., 2016).

Dimensões externas Cadeia de Suprimentos e Serviços Inteligentes

A aplicação do conceito de Cadeia de Suprimentos Inteligente é de extrema relevância para o transporte sobre trilhos, pois envolve a integração eficiente de fornecedores e outras empresas do grupo acionista, modernização de armazéns e melhorias no fluxo interno de materiais. Uma gestão robusta da cadeia de suprimentos é fundamental para o desempenho do transporte sobre trilhos, especialmente no que diz respeito ao fornecimento de materiais de reposição para a manutenção de ativos operacionais (Fourie et al., 2018).

Por fim, a dimensão Produtos-Serviços Inteligentes pode ser aplicada no transporte de passageiros sobre trilhos através do conceito de Serviços Inteligentes. Ao agregar capacidades digitais e utilizar os dados relevantes gerados pelos clientes, as operadoras metroferroviárias podem melhorar significativamente a experiência dos passageiros e alavancar seus negócios

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

(Wang et al., 2021; Corman e Kecman, 2018; Pieriegud, 2018; Li et al., 2017; CER et al., 2016; Thaduri et al., 2015).

MODELO CONCEITUAL E PROCEDIMENTOS PARA COLETA DE DADOS

Construiu-se um modelo inicial de aplicação da Indústria 4.0 nas empresas metroferroviárias (Figura 1) para orientar a investigação empírica (Voss et al., 2002). Utilizou-se os conceitos apresentados na revisão da literatura da Indústria 4.0, adaptando as quatro dimensões inteligentes voltadas para empresas de manufatura (Frank et al., 2019a) ao contexto das operadoras metroferroviárias.

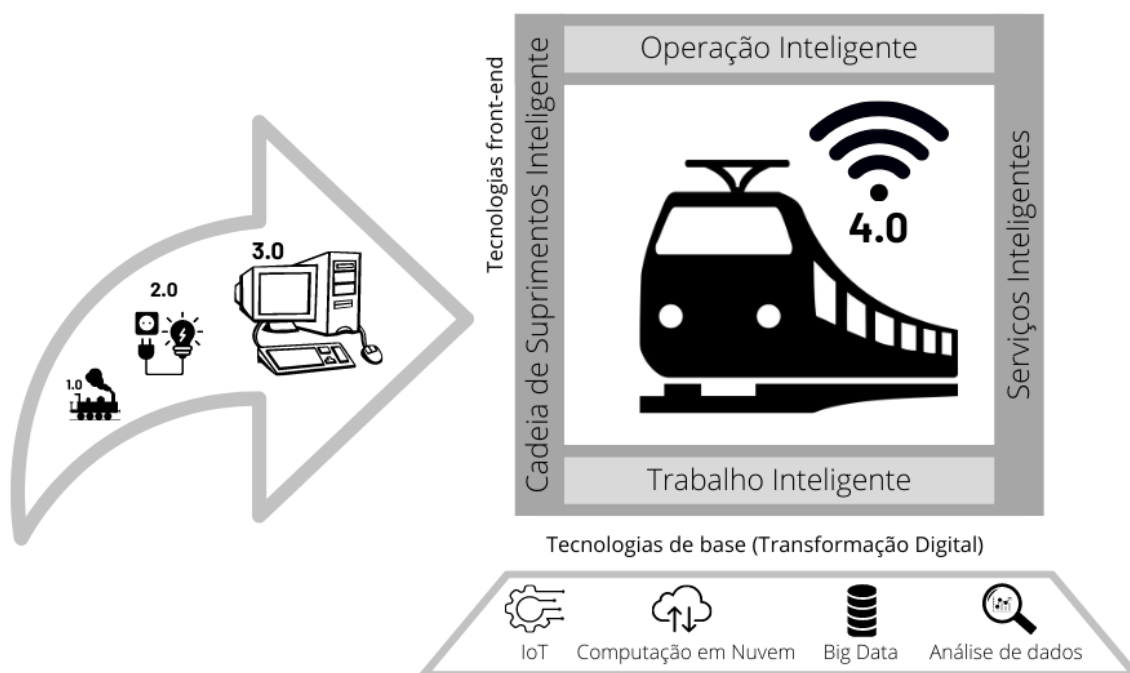


Figura 1 - Modelo conceitual inicial para investigação empírica

Realizou-se um estudo de caso no setor de transporte de passageiros sobre trilhos do Brasil, com o objetivo de identificar empresas de metroferroviárias que estivessem adotando tecnologias emergentes a fim de iluminar e ampliar as construções deste estudo (Eisenhardt e Graebner, 2007).

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



Para obter a participação das empresas no estudo, foram enviadas cartas-convite aos contatos dentro das organizações, nas quais foram detalhadas a natureza da pesquisa e a forma como os profissionais especializados poderiam contribuir, caso se considerassem adequados para o estudo. Adicionalmente, foi enviado um esboço do protocolo de pesquisa, que serviu como guia para conduzir as entrevistas semiestruturadas com os profissionais. Essa abordagem visou preparar os entrevistados para as conversas futuras e garantir a consistência nas informações coletadas.

Selecionamos oito operadoras metroferroviárias, dentre as treze vinculadas à associação ANPTrilhos. Escolhemos empresas onde tivemos acesso a profissionais especializados que estavam desenvolvendo estudos de aplicação de tecnologias da Indústria 4.0 neste segmento empresarial em pelo menos uma das dimensões propostas em nosso modelo conceitual inicial (Figura 1). Além disso, consultamos quatro empresas fornecedoras de tecnologias alinhadas à Indústria 4.0 que possuíam interações no transporte sobre trilhos brasileiro.

Tabela 5 - Características das empresas entrevistadas (operadoras metroferroviárias)

Empresa	Categoria de trem	Extensão (km)	Número de empregados	Fonte de dados	Tempo de casa
A	Urbano	43,8	1.097	Gerente de TI	14
B	Metrô	69,7	8.284	Coordenador do monitoramento de ativos	34
C	Metrô	12,8	1.157	Gerente de manutenção	9
D	Urbano	271	7.656	Coordenador do núcleo de inteligência	17
E	Metrô	54	2.145	Engenheiro sênior Gerente de engenharia de manutenção	14 9
F	Urbano	270	2.541	Coordenador de planejamento e engenharia	24
G	Metrô	42,4	1.260	Analista de operação e manutenção	8
H	Urbano	71,4	1.689	Gerente de material rodante	9

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



As Tabelas 5 e 6 apresentam o perfil das empresas selecionadas e dos profissionais entrevistados. Os nomes de todas as empresas e profissionais consultados foram mantidos no anonimato.

Tabela 6 - Características das empresas entrevistadas (fornecedoras de tecnologias)

Empresa	Segmento	Fonte de dados	Tempo de casa
I	Tecnologias para eletrificação e automação industrial	Especialista digital	8
J	Soluções avançadas para a indústria ferroviária	CEO Brasil	13
K	Soluções de software para gestão de processos industriais	Gerente de vendas	26
L	Tecnologia ferroviária para segurança e telecomunicações	CEO e fundador	23

Para fortalecer a triangulação de dados, utilizou-se outras fontes de consulta, principalmente fontes documentais. Analisou-se relatórios técnicos elaborados pelas operadoras metroferroviárias consultadas sobre os casos relatados, assim como documentos das empresas de tecnologia sobre as soluções oferecidas. Comparou-se e aprofundou-se os dados coletados nas entrevistas com os especialistas. Também se avaliou newsletters de revistas especializadas do setor, buscando notícias sobre as operadoras metroferroviárias e informações relevantes sobre a aplicação da Indústria 4.0 no transporte sobre trilhos do Brasil.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção, apresentam-se os resultados empíricos da coleta de dados qualitativos nos casos estudados. Analisam-se as iniciativas de tecnologias da Indústria 4.0 implementadas ou em estudo pelas operadoras metroferroviárias brasileiras, bem como as soluções de mercado oferecidas pelas empresas de tecnologia especializadas. Além disso, mencionam-se outras oportunidades identificadas pelos entrevistados quando questionados sobre as quatro

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



dimensões da Indústria 4.0 adaptadas ao transporte de passageiros sobre trilhos (Figura 1). Por fim, comparam-se os resultados do cruzamento da análise individual de cada caso estudado com a literatura e desenvolve-se um modelo de oportunidades da Indústria 4.0 para as empresas metroferroviárias (Figura 2).

No contexto das operadoras metroferroviárias, a Internet das Coisas (IoT) desempenha um papel fundamental na integração vertical. Ela permite o envio de dados dos servidores a bordo do material rodante para um banco de dados externo (telemetria de trens) através da internet móvel ou rede Wi-Fi nas estações de passageiros. Além disso, a IoT suporta a integração vertical dos ativos fixos e auxiliares, que são equipados com sensores e conectividade (infraestrutura inteligente) ao longo da via férrea, em instalações industriais adjacentes e nas estações de passageiros.

Para explorar o enorme potencial da IoT, a operadora A enfatizou a importância da cibersegurança. Algumas empresas optaram por soluções mais conservadoras, mantendo as tecnologias operacionais segregadas das conexões móveis e da Computação em Nuvem. Por exemplo, a operadora B utiliza uma rede de fibra ótica e servidores locais para a infraestrutura inteligente, enquanto a operadora F envia dados para a nuvem em duas etapas, evitando interfaces de conexão móvel com as tecnologias operacionais. Já a operadora D expressou preocupações com ataques cibernéticos, por isso, investiu em um data center moderno e de alta capacidade, optando por trabalhar com dados de operação *on-premise*. Por outro lado, muitas empresas consultadas adotaram plataformas na nuvem, tanto nas operadoras metroferroviárias quanto nos fornecedores de soluções tecnológicas de mercado.

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



Neste momento, as operadoras estão na fase de aquisição intensiva de dados, e a utilização plena da *Big Data* ainda está em desenvolvimento. Isso permitirá que elas avancem para o estágio de Análise de Dados de forma mais robusta. A seguir, apresentamos as tecnologias *front-end* encontradas nas empresas consultadas, organizadas de acordo com a dimensão inteligente da Indústria 4.0 nas empresas metroferroviárias (ver Figura 1).

OPERAÇÃO INTELIGENTE

Monitoramento do fluxo de passageiros

As operadoras demonstraram monitorar a lotação de passageiros no material rodante em serviço, aplicando a telemetria de trens. As empresas B e C já conseguiram implementar essa tecnologia, enquanto as empresas A e E estão em processo de implantação de projetos relacionados. Essa abordagem permite que elas obtenham, em tempo real ou próximo disso, dados sobre a lotação dos trens e verifiquem o nível de ocupação dos carros de passageiros.

Além disso, durante as entrevistas com representantes das operadoras A e D e por meio de pesquisa documental, foram exploradas as possibilidades do uso de câmeras inteligentes nas estações. Essas câmeras permitiriam a verificação do fluxo de passageiros em tempo real, fornecendo informações estruturadas, além das imagens. Ao verificar o site e contatar um fornecedor dessas câmeras, recebeu-se um documento comercial que destacava os benefícios desse sistema. Dentre eles, estavam a contagem bidirecional de pessoas, o gerenciamento de filas (tamanho, tempo de espera, desistências) e a criação de mapas de fluxo de pessoas. Além disso, o sistema fornecia relatórios com dados em forma de tabelas e gráficos, e era capaz de

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



fazer previsões sobre os próximos dias com base no fluxo histórico, nas condições climáticas e em outras tendências relevantes.

Planejamento da oferta de trens e gestão de energia

As operadoras evidenciaram utilizar software para simular o carregamento dos trens, como observado nos estudos de caso nas empresas B, C, D e E. A operadora C relatou que leva em consideração os dados da telemetria de trens em suas simulações. Enquanto isso, a operadora B iniciou um projeto de instrumentação dos grupos retificadores de tração com o objetivo monitorar grandezas elétricas para melhorias na gestão de energia e para incorporar os dados de consumo de energia elétrica na preparação do programa de oferta de trens.

Nesse contexto, a empresa de tecnologia I apresentou uma solução de mercado que atende plenamente às necessidades das operadoras metroferroviárias em relação à gestão de energia. O *ABB Ability Energy and Asset Manager* é uma solução digital que adiciona conectividade aos dispositivos de campo das instalações elétricas e oferece a visualização de dados em uma plataforma na nuvem. Os *dashboards* gerados por esse sistema são personalizáveis para cada circuito elétrico, instalação completa ou grupo de instalações, permitindo monitoramento em tempo real e a consulta histórica de diversas grandezas como demanda de potência, consumo, fator de potência, bem como a compreensão do peso do custo de energia por segmento analisado.

Flexibilidade no atendimento aos clientes e controle autônomo de trens

A operadora B enfatizou que para alcançar flexibilidade no atendimento à demanda de passageiros de forma eficiente, seria necessário implementar o controle autônomo dos trens.

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



Atualmente, a empresa está trabalhando em um projeto com o objetivo de aumentar a capacidade das linhas e melhorar o atendimento aos clientes por meio da otimização dos sistemas de controle dos trens.

A operadora G já adotou a operação de trem automática (ATO). Essa tecnologia permite que os trens operem de forma automatizada, seguindo um conjunto predefinido de parâmetros que possibilita um melhor gerenciamento dos trens em circulação e pode ajudar a atender de forma mais eficiente às necessidades dos passageiros.

Por sua vez, a operadora C dispõe de operação de trem não assistida (UTO), na qual os trens são operados de forma autônoma, sem intervenção humana durante a condução. A empresa informou que sua área de pesquisa e desenvolvimento está buscando avançar para a alteração em tempo real do programa de oferta de trens. Isso significa que a operadora C pretende ajustar dinamicamente o plano de operação dos trens conforme a demanda varia ao longo do dia, proporcionando maior agilidade no atendimento aos clientes e melhor adequação aos fluxos de passageiros em diferentes horários.

Identificação autônoma de não conformidades

A identificação autônoma de não conformidades representa um avanço importante nas operadoras metroferroviárias, proporcionando maior eficiência, segurança e confiabilidade na detecção e correção de problemas na infraestrutura. As operadoras estão adotando tecnologias avançadas para aprimorar os processos de manutenção, minimizar os riscos e reduzir a exposição dos trabalhadores em atividades de inspeção durante a operação comercial dos trens.

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



A operadora E, por exemplo, investiu em equipamentos de inspeção instalados a bordo dos trens durante a operação comercial. Esses equipamentos realizam medições precisas da geometria da via permanente e enviam os dados diretamente para a nuvem. Com a revisão e análise dos dados ocorrendo de forma autônoma, a empresa pode criar um banco de dados abrangente com informações geométricas de toda a malha ferroviária, o que permite identificar com antecedência necessidades de manutenção e realizar intervenções preventivas, otimizando a gestão e a operação da via permanente.

Outra solução relevante é o PCDS (*Pantograph Collision Detection System*), desenvolvido pela empresa de tecnologia J, que é montado no pantógrafo do trem durante a operação comercial. Esse sistema oferece acesso a dados atualizados sobre o perfil da rede aérea de tração e histórico de impactos ocorridos, com localizações georreferenciadas e imagens armazenadas na nuvem. As operadoras A e D estão avaliando a possibilidade de adotar o PCDS. A operadora F já utiliza essa solução, destacando sua excelente capacidade de detecção precoce de falhas na catenária. Além disso, o PCDS proporciona maior segurança, reduzindo a necessidade de reparos emergenciais durante a operação comercial, o que contribui para minimizar interrupções no serviço e garantir uma experiência mais confiável aos passageiros.

Modus operandi autônomo das estações de passageiros

A empresa de tecnologia K apresentou a solução de mercado *Eclipse Plant Manager* (EPM). Trata-se de um software de gestão de processos em tempo real em uso na operadora C que integra e otimiza diversos processos realizados nas estações de passageiros. Como um SCADA, ele monitora e controla os sistemas de energia e os ativos auxiliares (bloqueios, portas de

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



plataforma, iluminação, ar-condicionado, escadas rolantes). Além disso, o EPM gerencia a receita considerando o fluxo de passageiros e os tipos de bilhetes utilizados nos bloqueios. O EPM abre pedidos de intervenção da manutenção quando alarmes prioritários são gerados pelos ativos, liga e desliga iluminação e escadas rolantes, inverte o sentido dos bloqueios, tudo isso considerando o fluxo dos clientes. Ele ainda oferece facilidades como destaque de imagens em telas de videomonitoramento em caso de atuação de sensores de incêndio.

Monitoramento do desempenho de ativos

As operadoras B e C afirmaram monitorar o desempenho dos ativos fixos e auxiliares (infraestrutura inteligente) e do material rodante (telemetria de trens). Elas trabalham de forma mais assertiva e eficiente com as equipes de manutenção, com base nas condições operacionais da infraestrutura e dos trens. Isso resultou em redução significativa de interferências na operação comercial de trens causadas por falhas em ativos, prevendo problemas técnicos em máquinas de chave (empresa B) e em portas de plataforma (empresa C). Essa abordagem também foi corroborada por artigos técnicos publicados.

Outro ganho significativo que a operadora C nos informou, e pode-se conferir detalhadamente em um artigo técnico publicado, é na identificação de fugas de corrente no circuito de retorno da energia elétrica de tração. A empresa agrupou a visualização de dados que já eram continuamente monitorados, e designa equipes de manutenção para atuar nos primeiros sintomas da falha diretamente na área problemática. Assim, economiza muitas horas-homem de equipes de inspeção manual ao longo de toda a linha quando este tipo de falha toma grandes proporções.

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



As operadoras B e C relataram monitorar muitos outros ativos e ter boas expectativas de avançar para a etapa de Análise de Dados gerando bons resultados para as empresas. Atendendo a esse propósito, a solução de mercado *ABB Ability* (empresa I) estima a curva de saúde dos ativos elétricos analisando a evolução da degradação deles. Dependendo das condições de uso (curtos-circuitos, regimes de sobrecarga) e da restauração do ativo após intervenções (dados dos serviços executados), o sistema projeta a próxima necessidade de manutenção, economizando recursos sem descuidar dos equipamentos.

As operadoras D e E declararam que iniciaram projetos para instrumentar ativos da infraestrutura para monitorá-los. A operadora F relatou a formação de um banco de dados das medições geométricas da via permanente realizadas por carro controle, analisando os dados com suporte de plataformas na nuvem da Oracle que geram alertas ou solicitações de manutenção de acordo com a gravidade das falhas identificadas. A operadora G relatou contratar um serviço para vistoriar a via permanente periodicamente por meio de carro controle, acessando os dados após as inspeções em uma plataforma na nuvem e relatório de toda a malha para ser analisado por especialistas.

A operadora H equipou um trem com medidores de vibração nos truques e na carroceria de um carro para obter dados sobre a interação do material rodante com a rede aérea de tração e com a via permanente. A empresa desenvolveu uma plataforma em Python para analisar esses dados cruzando com os disponíveis nos servidores a bordo dos trens. Segundo o entrevistado, a empresa integrou a análise preditiva do material rodante e elementos da infraestrutura à rotina de manutenção.

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Rastreabilidade do material rodante

A empresa de tecnologia L apresentou duas soluções de mercado baseadas em Visão Computacional. Elas são utilizadas em ferrovias de carga e têm bom potencial de utilização no modal de passageiros. Segundo relato do CEO entrevistado e corroborado por uma publicação em revista especializada, a contagem e identificação dos trens que passam por pontos estratégicos da via é possível por meio da análise dos números gravados em seus chassis.

A segunda solução refere-se ao monitoramento de passagens de nível em tempo real e controle automático de semáforos da rodovia de interseção. Além de proporcionar maior segurança nos cruzamentos em nível, é possível informar aos órgãos de trânsito quais carros ultrapassam o semáforo vermelho.

TRABALHO INTELIGENTE

Análise Visual

As operadoras D e G relataram a aplicação de Análise Visual integrando dados da operação para obter *insights*, agilizar processos de trabalho e melhorar a tomada de decisões. Algumas soluções de mercado apresentadas pelos fornecedores de tecnologia também possuem um ambiente de *dashboards* (empresas I, J e K), assim como nas plataformas de monitoramento de ativos utilizadas pelas operadoras (empresas B, C, F e A).

A operadora D adotou um software de *Business Intelligence* (BI) para monitorar informações provenientes de diversas áreas envolvidas diretamente no processo de mais de 1.500 viagens diárias de trem. O entrevistado informou coordenar do núcleo de inteligência da diretoria de

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



operações e expressou: *“O objetivo é trabalhar com dados de operação e manutenção, cruzar essas informações [...], avaliar a percepção dos passageiros [...], desenvolver estudos com base no que está acontecendo na operação, e como melhorar essa operação [...]. O núcleo olha isso [dados de diversas áreas] e depois tenta juntar os números e achar algum padrão ou situação que pode ser melhorada ou precisa de algum ajuste”*. A operadora D afirmou que reporta a situação de suprimentos dentro da diretoria de operações, por meio da integração do BI com o ERP da empresa. Essa integração permite cruzar dados da previsão de consumo de itens de estoque críticos com sua utilização em ocorrências de manutenção, possibilitando assim ajustar os lotes de materiais sobressalentes de forma assertiva.

A operadora G informou que centralizou todas as informações sobre a situação dos trens em seu software de BI. Por meio dessa plataforma, é possível visualizar quais trens estão em serviço e acompanhar suas posições nas seções da via principal. Além disso, é feita uma avaliação em tempo real para determinar se os trens no pátio ferroviário estão disponíveis para operação após testes, em manutenção ou em processo de limpeza, exibindo suas respectivas posições nas vias secundárias. O representante da empresa destacou que a operadora G implementou medidas para reduzir as comunicações por telefone e rádio, otimizando os tempos de espera e agilizando a logística de recolhimento e injeção de trens.

Sistemas Inteligentes de Apoio à Decisão

As operadoras C e F, juntamente com as empresas de tecnologias I e K, apresentaram plataformas de manutenção que desencadeiam pedidos de intervenção em ativos com deficiências operacionais. Além disso, a operadora de transporte E destacou sua parceria com

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



startups para desenvolver ferramentas baseadas em dados. De acordo com o engenheiro sênior entrevistado, a empresa tem o objetivo de fornecer ao Centro de Controle Operacional (CCO) e às equipes de campo informações em tempo real sobre os ativos, com o propósito suporte às tomadas de decisão.

A operadora B declarou fornecer informações aos operadores do CCO para ajudá-los a tomar decisões. Conforme exposto pelo entrevistado: *“A gente pega os dados de monitoramento de ativos e usa com uma visão de operação [...]. Por exemplo, sugerir parar um ativo com alarmes gerados, agir durante a noite para corrigi-lo e usar outro recurso disponível [...]. Parar o trem em outra plataforma quando houver duas escadas rolantes quebradas em determinada estação[...], usar outra via para manobrar os trens ao invés daquela que está com problemas”*.

Redes Sociais Industriais

Algumas operadoras de transporte relataram o uso de ferramentas colaborativas para facilitar a interação entre os trabalhadores. As empresas C e E utilizam o *Microsoft Teams* como plataforma para comunicação virtual e colaboração entre os membros das equipes de trabalho. Por sua vez, a empresa F emprega o *Google Forms* para compartilhar notas de não conformidades em inspeções visuais de manutenção.

Além disso, a operadora D desenvolveu um aplicativo móvel que exhibe aos funcionários as escalas de trabalho em várias estações de passageiros na linha férrea. Esse aplicativo permite que os trabalhadores confirmem sua chegada ao posto de trabalho. Segundo o coordenador entrevistado, essa ferramenta é de grande auxílio na realocação de trabalhadores em

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



situações operacionais especiais, garantindo um bom atendimento aos passageiros com a equipe disponível durante o turno de trabalho.

Geolocalização dos trabalhadores

A operadora H lançou um projeto em parceria com uma empresa de tecnologia para a gestão de mão de obra através de geolocalização. A iniciativa inclui a implementação de uma rede Wi-Fi dedicada para monitorar a presença e o tempo de permanência dos trabalhadores nos locais das atividades, usando dispositivos vestíveis ou smartphones. O gerente afirmou que o objetivo do projeto é: *“gerenciar a execução de ordens de serviço preventivas e corretivas, deslocamento de equipes [...], abertura, execução e fechamento, acompanhamento de ordens de serviço, auditadas com cruzamento de dados [...], geolocalização, registros fotográficos do antes e depois, controle de tempos [de execução] e deslocamento”*.

A empresa H afirmou que acredita ser viável a fiscalização remota dos serviços contratados. Através de ordens de serviço associadas aos locais de trabalho, o sistema pode encerrá-las automaticamente caso seja atingido um tempo mínimo de permanência e realizar a medição dos serviços prestados por terceiros. Além disso, foi informado que essa solução já foi implementada com sucesso em uma rede de hospitais brasileiros, com o auxílio da empresa fornecedora de tecnologia parceira do projeto.

Inteligência Artificial

A operadora B está implementando o uso de Inteligência Artificial (IA) para analisar os dados dos ventiladores de túneis em estações de passageiros. A operadora D montou um laboratório de IA para testar soluções a serem incorporadas nos processos de trabalho. Enquanto isso, a

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



operadora H utiliza *Machine Learning* para cruzar dados dos servidores a bordo dos trens com os dados dos sensores de vibração instalados no truque e na carroceria dos carros, visando melhorar a manutenção e desempenho do material rodante e dos ativos da infraestrutura.

A solução EPM da empresa de tecnologia K é utilizada pela operadora C na gestão das estações de passageiros, enquanto a operadora F adotou a solução Oracle para a gestão de manutenção de ativos, ambas com interfaces para IA. No entanto, essas empresas ainda estão em estágios iniciais em relação à Análise de Dados, e o pleno potencial dessa tecnologia para impulsionar decisões informadas e eficazes ainda não foi completamente explorado.

Gestão de serviços nos ativos

Outros projetos em andamento foram relatados pelas operadoras de transporte, com foco no gerenciamento dos serviços realizados nos ativos. A empresa C reportou sua intenção de utilizar a tecnologia QR Code para etiquetar os ativos, e o processo de abertura, visualização e fechamento de ordens de serviço de manutenção será totalmente digitalizado.

Além disso, a operadora H afirmou que os smartphones também permitem o acesso a registros de manutenção dos ativos, bem como instruções de execução de serviços, vistas explodidas de equipamentos e possibilitam o upload de fotos de serviços por meio de tecnologias de proximidade, como *Near Field Communication* (NFC).

Realidade Aumentada

A operadora de transporte B iniciou um projeto de Realidade Aumentada para apoiar a manutenção e o trabalho nas estações de passageiros, permitindo a visualização de

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



informações contextualizadas. Esse avanço foi manifestado por outras operadoras, como as empresas A, E e H, que também demonstraram interesse em projetos semelhantes.

Realidade Virtual

A operadora D utiliza um simulador de operação de trem para treinar trabalhadores em uma réplica de cabine realista. Em um newsletter de uma revista especializada no setor ferroviário brasileiro, encontrou-se informações sobre outro simulador que usa óculos de Realidade Virtual e controles para treinar maquinistas em situações reais de operação. A operadora C está desenvolvendo um projeto de Realidade Virtual para treinar trabalhadores em áreas de risco e que lidam com escadas rolantes.

CADEIA DE SUPRIMENTOS INTELIGENTE

Plataforma digital com fornecedores

A operadora A visualizou restrições legais na integração de dados logísticos com fornecedores devido à legislação de isonomia em licitações. Por outro lado, a operadora H tem boas perspectivas em uma plataforma integradora com fornecedores para pedidos de cotação. A precificação é um requisito importante nos processos licitatórios para aquisição de produtos ou contratação de serviços nas empresas públicas, como é o caso das operadoras A e H.

A operadora F obtém preços do mercado por meio de uma plataforma de integração com fornecedores e, quando necessário, prioriza o prazo de entrega em detrimento do custo. Por outro lado, a operadora C visualiza complicações na integração de dados com fornecedores,

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



pois envolve a abertura de informações internas da empresa para o mercado. Ambas as empresas pertencem à iniciativa privada.

A operadora E planejava integrar a cadeia de suprimentos usando software de relacionamento, prevendo o acompanhamento das aquisições desde a emissão dos pedidos de compras até a entrega no estoque, mas devido a mudanças acionárias, os planos foram perdidos. Atualmente, eles monitoram manualmente a lista de materiais para garantir disponibilidade quando necessário parar um ativo operacional importante, com apoio de um analista de compras dedicado. Esse processo envolve muitas interações por telefone e e-mail, segundo relatou o gerente entrevistado.

Plataforma digital com outras empresas do grupo

A operadora C relatou que está integrada com empresas do mesmo grupo acionista, incluindo o segmento não ferroviário. Essa integração trouxe benefícios significativos nas negociações de compras e contratos de serviços, possibilitando atender às diversas unidades de negócios com sucesso.

Por sua vez, a operadora E contratou um serviço em conjunto com outra operadora devido à especificidade e valores envolvidos. Essa experiência foi bem-sucedida, e a empresa tem perspectivas positivas de repetir essa abordagem. As operadoras A e H também demonstraram interesse em realizar compras conjuntas.

O entrevistado da empresa H afirmou que a compra conjunta entre operadoras fortaleceria fornecedores locais e consideraria a demanda brasileira por produtos ferroviários, como rodas de trem, em seus planos de negócios. O gerente da empresa ressaltou que: "*[pelo menos] as*

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



empresas públicas [ferroviárias brasileiras] já deveriam trabalhar suas cadeias produtivas em conjunto [...]".

Iniciativas tecnológicas para modernização de armazéns

A operadora D informou que adquiriu uma impressora 3D e um scanner 3D para implementar projetos utilizando manufatura aditiva, visando a flexibilização de peças de reposição para ativos. A operadora A também indicou boas perspectivas de utilizar uma impressora 3D para o mesmo fim.

Enquanto isso, a operadora B relatou o uso de QR Code no armazém para gerenciar o estoque de materiais. Por outro lado, a operadora H prevê o uso de RFID (Identificação por Radiofrequência) para controlar os materiais em estoque.

SERVIÇOS INTELIGENTES

Aplicativo móvel para clientes

As operadoras A, D e F oferecem um aplicativo móvel que fornece informações em tempo real aos clientes sobre o status da operação, avisos de mudanças nos serviços, horário estimado de chegada do próximo trem e a posição deles ao longo da linha, entre outras informações úteis para os passageiros. A operadora C tem essa iniciativa tecnológica em estudo.

Venda de bilhetes digitais

Algumas empresas estão aprimorando a autonomia dos passageiros através da venda de bilhetes digitais, o que torna a viagem mais ágil e facilita o acesso dos clientes ao sistema metroferroviário. Especificamente, as operadoras de transporte C e D relataram que vendem

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



suas passagens em formato QR Code através de smartphones, com interações ocorrendo em aplicativos móveis ou até mesmo pelo WhatsApp.

Além disso, a operadora E adota uma abordagem diferente, permitindo que os passageiros adquiram passagens diretamente nos bloqueios usando NFC. Essa tecnologia de proximidade está presente em cartões ou dispositivos, como celulares, relógios e pulseiras, dispensando a necessidade de um bilhete físico.

Informações visuais nas plataformas e acesso à internet para os clientes

A operadora C informa visualmente a previsão de chegada do próximo trem nas plataformas de embarque das estações de passageiros e mostra o percentual de ocupação de cada carro da composição por meio dos painéis informativos. De acordo com o gerente entrevistado da empresa C, essas informações são úteis para que os passageiros se organizem nas plataformas de embarque, distribuindo-se adequadamente nos carros, o que beneficia a qualidade da viagem e a vida útil do material rodante. A operadora B informou que iniciou um projeto com o objetivo de alcançar essa facilidade de informações visuais para os passageiros nas plataformas de embarque das estações.

As operadoras C e D oferecem Wi-Fi em algumas estações para integrar os clientes aos serviços digitais e aumentar a satisfação com os serviços prestados. Além disso, disponibilizam pontos de energia para recarregar dispositivos móveis.

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



Atendimento ao cliente por meio de plataformas de relacionamento

As operadoras A e F relataram que oferecem suporte aos clientes através das redes sociais. As demandas dos passageiros são encaminhadas internamente na empresa para obter as respostas pertinentes junto às áreas responsáveis. No entanto, esse serviço de suporte ocorre apenas durante o horário comercial.

Estudos de mobilidade digitais

A operadora D deu início a um projeto de coleta digital de dados de clientes para estudos de mobilidade. A empresa pretende realizar pesquisas de origem-destino de passageiros por meio de seu aplicativo móvel, sempre com o consentimento do usuário. Para incentivar a participação, eles planejam oferecer recompensas aos clientes, como informações úteis, como a localização de um caixa eletrônico, em troca da permissão para coletar seus dados. As operadoras de transporte A e C também estão interessadas em realizar pesquisas origem-destino e de satisfação dos clientes utilizando o aplicativo móvel de suas respectivas empresas.

Já a operadora H afirmou que tem planos de disponibilizar uma rede Wi-Fi nas estações de passageiros, visando mapear as condições de fluxo de passageiros por meio de seus smartphones. Um ponto interessante destacado pelos entrevistados das operadoras B e D é que uma das limitações para a realização de estudos de mobilidade com dados de passageiros está relacionada à LGPD (Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais), que exige cuidados rigorosos com a proteção dos dados pessoais dos clientes.

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EMPÍRICOS

Na Figura 1, apresentou-se um modelo inicial para a aplicação do conceito da Indústria 4.0 nas empresas metroferroviárias. Essa proposta foi expandida com base na coleta de dados qualitativos realizada nos casos estudados junto às empresas brasileiras e com suporte da literatura consultada, resultando no modelo de oportunidades conforme mostra a Figura 2.

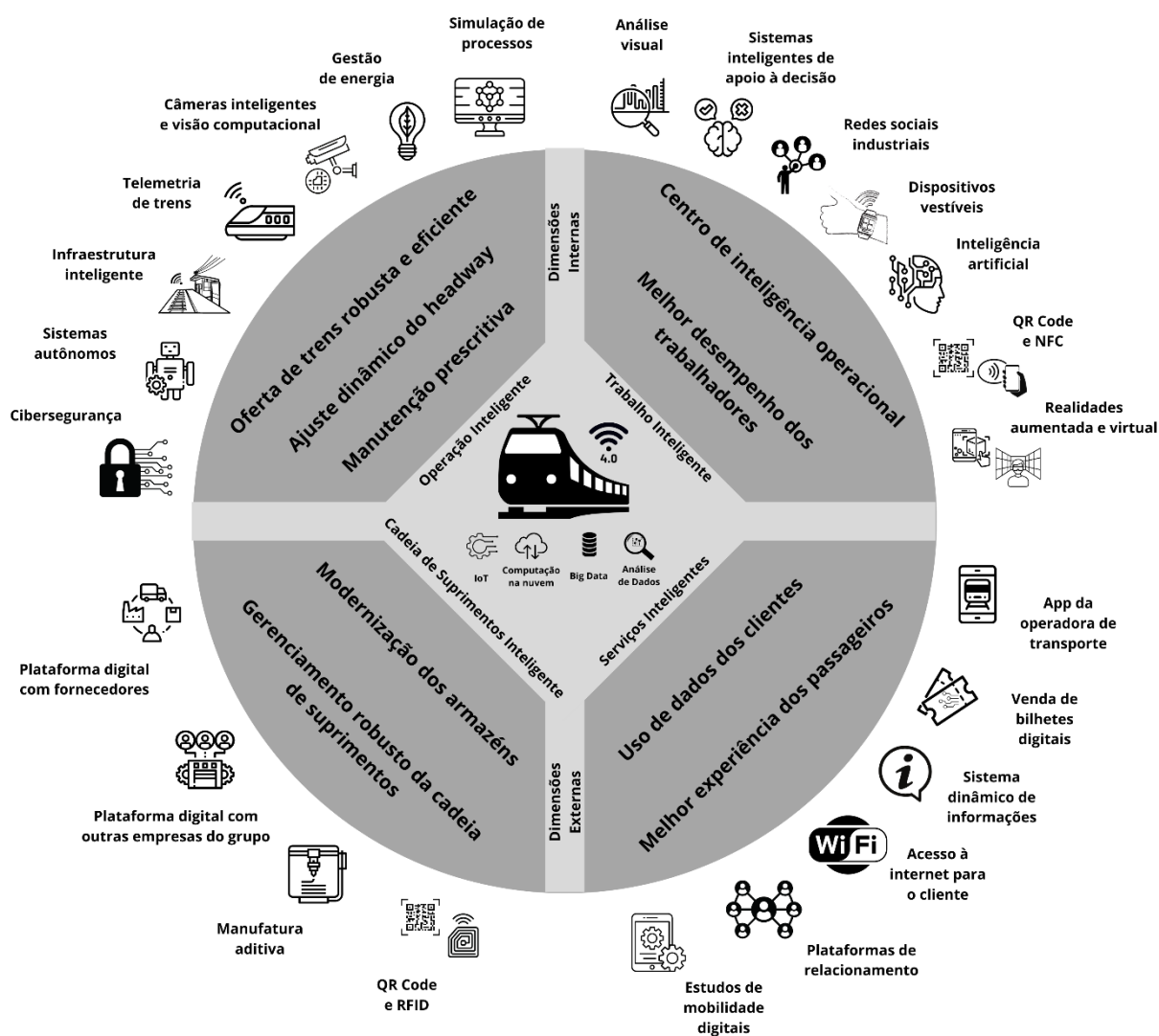


Figura 2 - Modelo de oportunidades para aplicação da Indústria 4.0 nas empresas metroferroviárias

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



Nesse modelo, cada dimensão inteligente é representada com suas respectivas tecnologias *front-end* ao seu redor, indicando que essas tecnologias são meios para alavancar o negócio, mas não constituem um objetivo final. As dimensões inteligentes são abordadas tanto internamente quanto externamente nas empresas metroferroviárias. Dentro delas, também são demonstrados os potenciais ganhos esperados no negócio que podem ser percebidos tanto na eficiência operacional, na experiência do cliente, na gestão de ativos e recursos, entre outros aspectos relevantes para o setor metroferroviário. O modelo de oportunidades (Figura 2) foi usado para guiar as discussões a seguir.

O estudo revelou diversas iniciativas tecnológicas implementadas pelas operadoras consultadas, indicando um certo grau de maturidade e convicção no retorno dos investimentos nessa área. As iniciativas tecnológicas podem continuar avançando gradualmente, preenchendo lacunas nas diferentes dimensões do negócio e explorando oportunidades latentes. Uma importante conclusão é que não é necessário adotar o conceito de Indústria 4.0 por meio de uma abordagem "tudo ou nada", como enfatizado por Gerhátoová et al. (2021a). As empresas podem adotar as tecnologias e práticas relevantes de acordo com suas necessidades e objetivos específicos, permitindo uma implementação mais flexível e adaptada ao contexto de cada empresa.

O modelo proposto no trabalho reflete principalmente a situação dos estudos de caso realizados, e não é considerado como uma solução completa ou ideal para todas as empresas. Ele serve como um guia e uma estrutura para entender as oportunidades e possibilidades de aplicação da Indústria 4.0 no setor metroferroviário, mas cada empresa deve adaptá-lo conforme suas particularidades e recursos disponíveis.

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



Os dados empíricos suportam a ideia de que a Operação Inteligente é um elemento central da Indústria 4.0 no transporte ferroviário de passageiros, conforme apontado por Meindl et al. (2021) para o conceito de Manufatura Inteligente. A proposta de Operação Inteligente derivou dessas constatações e mostrou-se relevante para o setor metroferroviário.

Captou-se a preocupação das operadoras consultadas com relação à segurança cibernética nos projetos de IoT. A proteção contra o acesso não autorizado aos sistemas de controle de trens e outras tecnologias operacionais é fundamental para evitar que invasões comprometam a operação do *core business*, ou seja, o funcionamento essencial da empresa. Diante disso, consideramos a cibersegurança como uma das tecnologias *front-end* da dimensão Operação Inteligente no modelo de oportunidades proposto.

Os resultados empíricos obtidos mostram que as operadoras consultadas têm uma preocupação em monitorar a capacidade de passageiros dentro dos carros das composições por meio da telemetria de trens. A utilização de câmeras inteligentes nas estações de passageiros também se mostrou uma iniciativa importante para aprimorar o controle de fluxo de pessoas, melhorar o gerenciamento de filas em bilheterias, bloqueios e portas de plataforma nas estações de passageiros. O monitoramento contínuo do fluxo de passageiros permitiria verificar em tempo real os níveis de serviço, ou seja, a quantidade de pessoas por metro quadrado, nos saguões, plataformas de embarque e desembarque, bem como no interior dos carros dos trens. Além disso, ao armazenar um histórico detalhado da demanda de passageiros, as operadoras metroferroviárias teriam uma valiosa fonte de dados para melhorar o planejamento das operações para prever padrões de demanda em diferentes

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



horários e dias da semana, facilitando a tomada de decisões estratégicas relacionadas ao dimensionamento da frota, alocação de recursos e programação de serviços.

Os resultados corroboram com algumas premissas da Indústria 4.0, como virtualização de processos e gestão de energia (Frank et al., 2019a). A solução de mercado para gestão de energia mostrou-se viável para ganhos de eficiência, embora apenas uma operadora monitore o consumo de energia elétrica dos trens. A inclusão desse dado nas simulações para elaboração do programa de oferta de trens pode equilibrar a demanda de passageiros e o gasto com energia, proporcionando uma **oferta de trens robusta e eficiente**, com níveis de serviço adequados e eficiência energética (Liu et al., 2020).

O uso de dados em tempo real obtidos pela telemetria de trens e nas câmeras inteligentes nas estações de passageiros pode melhorar a tomada de decisão do Centro de Controle para ajustar o headway em operações degradadas, como incentivado por estudos anteriores (Meindl et al., 2021; Huang et al., 2020; Corman e Kecman, 2018). Além disso, a combinação de sistemas autônomos de controle de trens (ATO e UTO) e algoritmos para otimizar o fluxo do tráfego do material rodante (Laiton-Bonadiez et al., 2022) permitiria um **ajuste dinâmico do headway**, adaptando-se conforme a demanda real de passageiros na linha, informada pela IoT da operação. Isso representa um estágio avançado da Indústria 4.0, suportado pela Análise de Dados, que fornece adaptabilidade do negócio (Schuh et al., 2020; Kusiak, 2018).

As descobertas revelam que as empresas consultadas têm demonstrado cuidado especial com os ativos da infraestrutura e material rodante, por meio de inspeções e monitoramentos. Algumas operadoras já adotaram a manutenção baseada na condição, permitindo conhecer o

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



desempenho dos ativos sem necessidade de proximidade física. Essa abordagem possibilita reparos antes de falhas ocorrerem, aumentando confiabilidade e disponibilidade, e utilizando recursos de forma mais assertiva e eficiente. Alinhado com estudos recentes (Jo et al., 2018; Li et al., 2017; Takikawa, 2016; Yokoyama, 2015), o estágio de Análise de Dados levará as empresas além da detecção de anomalias, fornecendo diagnósticos precisos e recomendações para aprimorar a gestão de ativos rumo à **manutenção prescritiva** (Consilvio et al., 2019).

Os resultados sugerem um estágio inicial de desenvolvimento das iniciativas tecnológicas na dimensão Cadeia de Suprimentos Inteligentes. No entanto, eles também apontam oportunidades para simplificar e aumentar a confiabilidade dos processos de compras e alcançar ganhos de escala através de um **gerenciamento robusto da cadeia de suprimentos** para as operadoras metroferroviárias (Fourie et al., 2018). Essas oportunidades podem ser apoiadas por informações sob demanda e **modernização dos armazéns** (Barreto et al., 2017).

Além disso, os dados da dimensão Serviços Inteligentes mostram uma **melhor experiência dos passageiros**, aumentando sua autonomia e fornecendo sistemas dinâmicos de informação (Pieriegud, 2018; CER et al., 2016). O aplicativo móvel das operadoras metroferroviárias poderia oferecer informações da linha em tempo real, atendimento e pesquisa de satisfação dos clientes, e até auxiliar os passageiros no planejamento da sua jornada desde sair de casa até chegar no destino. Pontos forte do transporte de passageiros sobre trilhos poderiam ser destacados, como economia de tempo e dinheiro nos deslocamentos, baixa emissão de poluentes. Além disso, as operadoras de transporte também podem se beneficiar do **uso de dados dos clientes**, conforme sugerido por Dalenogare et al. (2018) e Li et al. (2017), como

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



por exemplo para melhorar os serviços prestados e alavancar a locação de espaços nas estações de passageiros, aumentando as receitas não tarifárias.

Por fim, o estudo mostra que as operadoras metroferroviárias estão buscando um **centro de inteligência operacional** para integrar informações de tráfego do material rodante, saúde dos ativos, previsão de fornecimento de materiais de reposição críticos, percepção dos passageiros e atividades dos trabalhadores. Os dados da dimensão Trabalho Inteligente também apontam que as empresas buscam **melhor desempenho dos trabalhadores** por meio de tecnologias emergentes que suportem eles durante as atividades (Dornelles et al., 2022).

CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo investigar a aplicação holística do conceito da Indústria 4.0 nas empresas metroferroviárias. Partiu-se de um modelo conceitual inicial (Figura 1), baseado no modelo proposto por Frank et al. (2019a), reconhecido internacionalmente. O modelo inicial foi ajustado após consultar o estado de maturidade da Indústria 4.0 no transporte de passageiros sobre trilhos na literatura recente. Por fim, realizou-se uma pesquisa empírica com operadoras metroferroviárias e empresas de tecnologia do setor brasileiro.

As Quatro Dimensões Inteligentes da Indústria 4.0 adaptadas para as empresas metroferroviárias fizeram sentido no contexto das operadoras consultadas, com várias tecnologias *front-end* relacionadas. Os resultados mostram que a Indústria 4.0 pode ser aplicada abrangentemente nas dimensões internas e externas do negócio. As tecnologias de base estão transformando as operadoras de transporte, conectando trabalhadores, ativos,

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



empresas parceiras e clientes. No entanto, o estágio mais avançado de Análise de Dados ainda possui poucas aplicações nas empresas consultadas.

Os resultados indicam que as operadoras brasileiras estão caminhando em direção a um centro de inteligência operacional para implementar oferta de trens robusta e eficiente, manutenção prescritiva, gerenciamento robusto da cadeia de suprimentos e melhor experiência dos passageiros e desempenho dos trabalhadores. Propôs-se um modelo de oportunidades para aplicação da Indústria 4.0 nas empresas metroferroviárias (Figura 2), mostrando cada dimensão inteligente para o transporte de passageiros sobre trilhos, a adoção de tecnologia na amostra de empresas consultadas e as implicações práticas para o negócio.

A contribuição prática deste trabalho é auxiliar as empresas metroferroviárias no planejamento de sua jornada na Indústria 4.0 dentro do segmento. O modelo final proposto orienta as práticas das empresas que buscam melhorar o desempenho empresarial na concepção de novas linhas metroferroviárias e na busca por sistemas operacionais mais sustentáveis. As empresas podem buscar estratégias para melhorar seus indicadores de desempenho por meio da aplicação das tecnologias propostas.

A principal limitação deste trabalho é a amostra restrita às operadoras brasileiras, um país em desenvolvimento com poucas linhas de última geração. Para trabalhos futuros, sugere-se consultar mais empresas para expandir os resultados empíricos e desenvolver um modelo de maturidade da Indústria 4.0 para empresas metroferroviárias, com base nas descobertas empíricas e nos principais indicadores de desempenho das operadoras. O objetivo é sugerir uma sequência de implementação das tecnologias e os ganhos ao negócio em cada estágio.

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANPTRILHOS. Como inserir os trilhos no Plano de Mobilidade (2017). Brasília, 2017. <https://anptrilhos.org.br/wp-content/uploads/2017/04/WEB-Como-inserir-os-trilhos-no-Plano-de-Mobilidade.pdf>
- Ayala, N. F.; Paslauski, C. A., Ghezzi, A., Frank, A. G. (2017). Knowledge sharing dynamics in service suppliers' involvement for servitization of manufacturing companies. *International Journal of Production Economics*, Volume 193, 2017, Pages 538-553. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.08.019>
- Barreto, L., Amaral, A., Pereira, T. (2017). Industry 4.0 implications in logistics: an overview. *Procedia Manufacturing*, Volume 13, 2017, Pages 1245-1252. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.045>
- Bueno, A., Filho, M. G., Frank A. G. (2020). Smart production planning and control in the Industry 4.0 context: A systematic literature review, *Computers & Industrial Engineering*, Volume 149, 2020, 106774. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106774>
- Bustos, A., Rubio, H., Soriano-Heras, E., Castejon, C. (2021). Methodology for the integration of a high-speed train in Maintenance 4.0. *Journal of Computational Design and Engineering*, Volume 8, Issue 6, December 2021, Pages 1605–1621, <https://doi.org/10.1093/icde/qwab064>
- CER, C., & EIM, U. (2016). A Roadmap for Digital Railways. https://uic.org/com/IMG/pdf/a_roadmap_for_digital_railways.pdf
- Consilvio, A., Sanetti, P., Anguìta, D., Crovetto, C., Dambra, C., Oneto, L., Papa, F., Sacco, N. (2019). "Prescriptive Maintenance of Railway Infrastructure: From Data Analytics to Decision Support," 6th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS), Cracow, Poland, 2019, pp. 1-10, doi: 10.1109/MTITS.2019.8883331
- Corman, F., Kecman, P. (2018). Stochastic prediction of train delays in real-time using Bayesian networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Volume 95, 2018, Pages 599-615. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.08.003>
- Dalenogare, L. S., Benitez, G. B., Ayala, N. F., Frank, A. G. (2018). The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. *International Journal of Production Economics*, Volume 204, 2018, Pages 383-394. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.08.019>
- Dornelles, J. de A., Ayala, N.F., Frank., A.G. (2022). Smart working in Industry 4.0: How digital technologies enhance manufacturing workers' activities. *Computers & Industrial Engineering*, 163 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107804>
- Eisenhardt, K. M., Graebner, M. E., 2007. Theory building from cases: opportunities and challenges. *Acad. Manag. J.* 50, 25–32. <http://dx.doi.org/10.2307/20159839>
- Fourie, C. J. and Chimusoro, O., 2018. An examination of the relationship between supply chain management practices and business performance: A case analysis of a passenger rail

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



- company. South African J. Ind. Eng., vol. 29, no. 2, pp. 141–152, 2018. <https://hdl.handle.net/10520/EJC-10bf56a695>
- Frank, A. G., Dalenogare, L. S., Ayala, N. F. (2019a). Industry 4.0 Technologies: Implementation Patterns in Manufacturing Companies. International Journal of Production Economics 210: 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004>
- Frank, A. G., Mendes, G. H.S., Ayala, N. F., Ghezzi, A. (2019b). Servitization and Industry 4.0 convergence in the digital transformation of product firms: A business model innovation perspective. Technological Forecasting and Social Change, Volume 141, 2019, Pages 341-351. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.01.014>
- Frederico, G.F., Garza-Reyes, J.A., Anosike, A., & Kumar, V. (2020). Supply Chain 4.0: concepts, maturity and research agenda. Supply Chain Management, Vol. 25 No. 2, pp. 262-282. <https://doi.org/10.1108/SCM-09-2018-0339>
- Gerháťová, Z., Zitrický, V., Klapita, V. (2021a). Industry 4.0 Implementation Options in Railway Transport. Transportation Research Procedia, Volume 53, Pages 23-30. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.003>
- Gerháťová, Z., Zitrický, V. Gašparik, J. (2021b). Analysis of Industry 4.0 elements in the transport process at the entrance of the train from Ukraine to Slovakia. Transportation Research Procedia, Volume 55, Pages 165-171. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.06.018>
- Goffin, K., Åhlström, P., Bianchi, M., & Richtnér, A. (2019). Perspective: State-of-the-Art: The Quality of Case Study Research in Innovation Management. Journal of Product Innovation Management, 36(5), 586–615. <https://doi.org/10.1111/jpim.12492>
- Huang, P., Wen, C., Fu, L., Peng, Q., Tang, Y. (2020). A deep learning approach for multi-attribute data: A study of train delay prediction in railway systems. Information Sciences, Volume 516, 2020, Pages 234-253. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.12.053>
- Hussin, A. A. (2018). Education 4.0 Made Simple: Ideas for Teaching. International Journal of Education & Literacy Studies. <http://dx.doi.org/10.7575/aiac.ijels.v.6n.3p.92>
- Ivanov, D., Dolgui, A., & Sokolov, B. (2018). The impact of digital technology and Industry 4.0 on the ripple effect and supply chain risk analytics. International Journal of Production Research. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1488086>
- Ivanov, D., Dolgui, A. (2020). A digital supply chain twin for managing the disruption risks and resilience in the era of Industry 4.0. Production Planning & Control. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1768450>
- Jo, O., Kim, Y.-K., Kim, J. (2018). Internet of Things for Smart Railway: Feasibility and Applications. In IEEE Internet of Things Journal, vol. 5, no. 2, pp. 482-490, April 2018, doi: 10.1109/JIOT.2017.2749401
- 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.

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



- Kans, M., Galar, D., Thaduri, A. (2016). Maintenance 4.0 in Railway Transportation Industry. In: Koskinen, K., et al. Proceedings of the 10th World Congress on Engineering Asset Management (WCEAM 2015). Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27064-7_30
- Karakose, M., Yaman, O. (2020). Complex Fuzzy System Based Predictive Maintenance Approach in Railways. in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 16, no. 9, pp. 6023-6032, Sept. 2020. doi: 10.1109/TII.2020.2973231
- Kusiak, A. (2018). Smart manufacturing. International Journal of Production Research, 56:1-2, 508-517. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1351644>
- Laiton-Bonadiez, C., Branch-Bedoya, J., Zapata-Cortes, J., Paipa-Sanabria, E., Arango-Serna, M. (2022). Industry 4.0 Technologies Applied to the Rail Transportation Industry: A Systematic Review. Sensors, 22, 2491. <https://doi.org/10.3390/s22072491>
- Li, Q. Y., Zhong, Z. D., Liu, M., Fang, W. W. (2017). Chapter 14 - Smart Railway Based on the Internet of Things, Editor(s): Hui-Huang Hsu, Chuan-Yu Chang, Ching-Hsien Hsu, In Intelligent Data-Centric Systems, Big Data Analytics for Sensor-Network Collected Intelligence, Academic Press, 2017, Pages 280-297. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809393-1.00014-3>
- Liao, Y., Deschamps, F., Loures, E.D.F.R., Ramos, L.F.P. (2017). Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal. International Journal of Production Research, 55:12, 3609-3629. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1308576>
- Liu, P., Schmidt, M., Kong, Q., Wagenaar, J. C., Yang, L., Gao, Z., Zhou, H. (2020). A robust and energy-efficient train timetable for the subway system. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 121, 2020, 102822. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102822>
- Lom, M., Pribyl, O., Svitek, M. (2016). Industry 4.0 as a part of smart cities. Smart Cities Symposium Prague (SCSP), pp. 1-6. doi: 10.1109/SCSP.2016.7501015
- Meindl, B., Ayala, N. F., Mendonça, J., Frank, A. G. (2021). The Four Smarts of Industry 4.0: Evolution of ten Years of Research and Future Perspectives. Technological Forecasting and Social Change 168: 120784. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120784>
- 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
- Romero, D., Stahre, J., Taisch, M. (2020). The Operator 4.0: Towards socially sustainable factories of the future. Computers & Industrial Engineering, Volume 139, 2020, 106128. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106128>
- Scheffer, S., Martinetti, A., Damgrave, R., van Dongen, L., 2021. Augmented reality for IT/OT failures in maintenance operations of digitized trains: current status, research challenges and future directions. Procedia CIRP, Volume 100, Pages 816-821. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.038>

29ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
10º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
METROFERROVIÁRIOS



- Schuh, G., Anderl, R., Dumitrescu, R., Krüger, A., & Hompel, M. ten. (2020). Industrie 4.0 Maturity Index. Managing the Digital Transformation of Companies – UPDATE 2020 – (acatech STUDY). <https://en.acatech.de/publication/industrie-4-0-maturity-index-update%202020/>
- Tabim, V.M., Ayala, N.F., & Frank, A.G. (2021). Implementing Vertical Integration in the Industry 4.0 Journey: Which Factors Influence the Process of Information Systems Adoption? Inf Syst Front (2021). <https://doi.org/10.1007/s10796-021-10220-x>
- Takikawa, M. (2016). Innovation in railway maintenance utilizing information and communication technology (smart maintenance initiative). Japan Railway & Transport Review, 67, 14.
- Thaduri, A., Galar, D., Kumar, U., 2015. Railway assets: a potential domain for big data analytics. Procedia Comput. Sci., 53 (2015), pp. 457-467. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.323>
- Tortorella, G. L., Fogliatto, F. S., Vergara, A. M. C., A., Vassolo, R., Sawhney, R. (2019). Healthcare 4.0: trends, challenges and research directions. Production Planning & Control, 31:15, 1245-1260. <https://doi.org/10.1080/09537287.2019.1702226>
- Voss, C.A., Tsiriktsis, N., Frohlich, M., 2002. Case research in operations management. Int. J. Oper. Prod. Manag. 22, 195–219. <http://dx.doi.org/10.1108/>
- Wang, Y., Zhu, S., D'Ariano, A., Yin, J., Miao, J., Meng, L. (2021). Energy-efficient timetabling and rolling stock circulation planning based on automatic train operation levels for metro lines. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 129, 2021, 103209, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103209>
- Xu, L. D., Xu, E. L., Li, L. (2018). Industry 4.0: state of the art and future trends. International Journal of Production Research, 56:8, 2941-2962. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806>
- Yokoyama, A. (2015). Innovative Changes for Maintenance of Railway by Using ICT–To Achieve “Smart Maintenance”. Procedia CIRP, Volume 38, 2015, Pages 24-29. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.07.074>