

MONITORAMENTO DA FAIXA DE DOMÍNIO FERROVIÁRIA POR MEIO DE IMAGENS: UMA ANÁLISE ABRANGENTE DE TECNOLOGIAS DE SENSORIAMENTO REMOTO E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Flávio de Souza Morgado

Resumo

Este artigo apresenta um estudo aprofundado sobre a utilização de tecnologias de sensoriamento remoto, como drones, imagens de satélite e câmeras fixas, aplicadas ao monitoramento da faixa de domínio ferroviária. Explora-se o potencial dessas tecnologias para a detecção de invasões, ocupações irregulares e outras anomalias que comprometem a segurança operacional e a integridade da infraestrutura. A metodologia detalha equipamentos e sensores, frequência de coleta de dados, técnicas de processamento de imagens e integração com sistemas de gestão ferroviária. Os resultados esperados destacam a melhoria da efetividade na detecção de anomalias e na gestão proativa. A seção de discussão aborda os benefícios operacionais, estratégicos e os desafios técnicos (acurácia, interferência climática, custos). A conclusão reforça os benefícios significativos dessas tecnologias para aprimorar a segurança operacional e a preservação da faixa de domínio ferroviária.

Palavras-chave: Faixa de Domínio Ferroviária. Sensoriamento Remoto. Drones. Imagens de Satélite. Inteligência Artificial.

Abstract

This article presents an in-depth study on the application of remote sensing technologies, including drones, satellite imagery, and fixed cameras, for monitoring railway right-of-way. It explores the potential of these technologies for detecting invasions, irregular occupations, and other anomalies that compromise operational safety and infrastructure integrity. The methodology details equipment and sensors, data collection frequency, image processing techniques, and integration with railway management systems. Expected results highlight improved effectiveness in anomaly detection and proactive management. The discussion section addresses operational and strategic benefits, technical challenges (accuracy, climatic interference, costs), and regulatory limitations. The conclusion emphasizes the significant advantages of these technologies for enhancing operational safety and preserving the railway right-of-way.

Keywords: Railway Right-of-Way. Remote Sensing. Drones. Satellite Imagery. Artificial Intelligence.

Sumário

1. Introdução	4
1.1. Contextualização da Faixa de Domínio Ferroviária e sua Importância Estratégica ..	4
1.2. Desafios Operacionais e Legais no Monitoramento e Gestão da Faixa de Domínio	4
1.3. Objetivo e Estrutura do Artigo	5
2. Monitoramento de Infraestruturas Lineares por Imagens	6
2.1. Fundamentos e Evolução do Sensoriamento Remoto Aplicado a Ferrovias	6
2.2. Aplicações de Drones e Aerofotogrametria na Inspeção Ferroviária	6
2.3. O Papel das Imagens de Satélite na Vigilância de Grandes Extensões	7
2.4. Sistemas de Câmeras Fixas Acopladas em Material Rodante	8
2.5. Inteligência Artificial e Visão Computacional em Processos de Inspeção e Análise	8
3. Metodologia para o Monitoramento Integrado da Faixa de Domínio Ferroviária	9
3.1. Equipamentos e Sensores para Aquisição de Imagens	9
3.1.1. Drones: Configurações e Sensores	9
3.1.2. Satélites: Características e Fontes de Dados.....	9
3.1.3. Câmeras Fixas: Tipos e Tecnologias.....	10
3.2. Definição da Frequência de Coletas de Imagens	11
3.3. Processamento e Análise de Dados de Imagem.....	12
3.3.1. Técnicas de Processamento de Imagens e Sistemas de Informação Geográfica ..	12

3.3.2. Algoritmos de Inteligência Artificial e Aprendizado Profundo para Detecção e	
Classificação	12
3.4. Estratégias de Armazenamento e Integração com Sistemas de Gestão Ferroviária	13
3.4.1. Armazenamento de Dados	13
3.4.2. Plataformas SIG Centralizadas	13
3.4.3. Integração com Sistemas de Gestão Ferroviária	14
4. Desenvolvimento e Resultados	14
4.1. Resultados Esperados e Potencial de Aplicação	15
4.1.1. Detecção Automatizada de Invasões e Ocupações Irregulares	15
4.1.2. Geração de Relatórios e Alertas para Tomada de Decisão	15
4.2. Discussão: Vantagens, Desafios e Limitações do Monitoramento por Imagens	15
4.2.1. Benefícios Operacionais e Estratégicos da Tecnologia	16
4.2.2. Desafios Técnicos: Acurácia, Resolução e Robustez dos Modelos	16
4.2.3. Impacto das Condições Climáticas Adversas na Qualidade das Imagens	17
4.2.4. Análise de Custos de Implementação e Manutenção do Sistema	18
4.2.5. Requisitos de Pessoal Qualificado e Aspectos Regulatórios	18
4.2.6. Considerações sobre Cibersegurança e Privacidade dos Dados	19
5. Conclusão	19
6. Referências	22

1. INTRODUÇÃO

A faixa de domínio ferroviária constitui uma área de fundamental importância estratégica para a operação e segurança do transporte sobre trilhos. Sua delimitação e manutenção adequadas são imperativas para garantir a fluidez e a integridade da malha, bem como a segurança das comunidades lindeiras. Este segmento introdutório contextualiza a relevância dessa área e os desafios inerentes ao seu monitoramento e gestão

1.1. Contextualização da Faixa de Domínio Ferroviária e sua Importância Estratégica

A faixa de domínio ferroviária é definida como uma área de terreno de largura geralmente pequena em relação ao seu comprimento, onde se localizam as vias férreas e todas as instalações associadas à ferrovia, incluindo aquelas necessárias para sua futura expansão. Esta área é, por natureza, de uso exclusivo para atividades ferroviárias. Qualquer outra

finalidade é considerada incompatível devido aos riscos substanciais inerentes às operações de transporte ferroviário.

A segurança operacional e a segurança no trânsito no entorno das ferrovias representam uma preocupação coletiva que abrange toda a comunidade que interage com essas áreas. Trechos ferroviários que cruzam vias urbanas ou que apresentam grande movimentação demandam atenção redobrada. A legislação brasileira reconhece essa criticidade, proibindo desde 1979 edificações a menos de 15 metros da faixa de domínio, estabelecendo uma limitação administrativa para construções regulares. A Lei nº 14.273, de 2021, reitera a responsabilidade da operadora ferroviária pela implantação de dispositivos de proteção e segurança ao longo de suas faixas de domínio, abrangendo a via permanente, o material rodante, os equipamentos e as instalações essenciais para a segurança da operação em situações regulares e de emergência.

1.2. Desafios Operacionais e Legais no Monitoramento e Gestão da Faixa de Domínio

O crescimento urbano desordenado no entorno das ferrovias tem intensificado os desafios de gestão da faixa de domínio. Essa expansão resulta em passivos históricos de ocupação, aspectos ambientais complexos e imposição de restrições de velocidade aos trens em áreas urbanizadas. Gargalos operacionais significativos no Brasil incluem o contorno de cidades, a invasão da faixa de domínio por construções e atividades irregulares, e o compartilhamento de linhas entre diferentes tipos de tráfego, como carga e passageiros.

A complexidade do tema é agravada pela multiplicidade de atores envolvidos, que incluem concessionárias ferroviárias, o Ministério dos Transportes, a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), a Secretaria de Patrimônio da União (SPU), municípios e as próprias comunidades lindeiras. A falha na documentação e a ausência de regularização cartorial de muitas áreas são problemas persistentes que dificultam a gestão eficaz. A ANTT, por exemplo, tem debatido ativamente critérios e procedimentos para a delimitação, proteção, ocupação e utilização da faixa de domínio operacional, buscando reforçar a livre utilização pela concessionária e a proteção do patrimônio ferroviário.

A pressão exercida pelo avanço urbano sobre as áreas ferroviárias é um catalisador primário para a busca por soluções inovadoras. A natureza linear e extensa da faixa de domínio, combinada com a crescente densidade populacional em seu entorno, torna os métodos de monitoramento tradicionais, como as inspeções manuais, ineficientes e dispendiosos. Essa ineficiência aumenta o risco de acidentes, a degradação patrimonial e a dificuldade em fazer

cumprir a legislação vigente. A necessidade de um monitoramento contínuo e em larga escala, que transcende a capacidade de equipes humanas, impulsiona a adoção de tecnologias avançadas. Essa dinâmica de tensão entre o desenvolvimento urbano e a infraestrutura ferroviária é o motor para a transformação do monitoramento de uma atividade reativa para uma abordagem proativa, fundamental para a segurança operacional e a sustentabilidade das ferrovias modernas.

1.3. Objetivo e Estrutura do Artigo

Este artigo tem como objetivo apresentar um estudo aprofundado sobre a utilização de tecnologias de sensoriamento remoto, como drones, imagens de satélite e câmeras fixas, aplicadas ao monitoramento da faixa de domínio ferroviária. Será explorado o potencial dessas tecnologias para a detecção de invasões, ocupações irregulares e outras anomalias que comprometem a segurança e a integridade da infraestrutura ferroviária, abordando desde a contextualização e revisão de literatura até a metodologia, resultados esperados, discussão e conclusão, com foco na linguagem formal e técnica.

2. MONITORAMENTO DE INFRAESTRUTURAS LINEARES POR IMAGENS

A evolução tecnológica tem proporcionado avanços significativos no monitoramento de infraestruturas lineares, com destaque para o sensoriamento remoto e a inteligência artificial. Esta seção revisa a literatura existente, abordando os fundamentos, as aplicações e as integrações dessas tecnologias no contexto ferroviário.

2.1. Fundamentos e Evolução do Sensoriamento Remoto Aplicado a Ferrovias

O sensoriamento remoto é uma técnica que permite a obtenção de informações sobre objetos, fenômenos naturais ou áreas da superfície terrestre sem contato físico direto. Essa coleta é realizada por meio da captação e análise da radiação eletromagnética, seja ela gerada por fontes naturais (sensores passivos, como o Sol) ou artificiais (sensores ativos, como um radar). A tecnologia de drones tem sido desenvolvida e utilizada em inúmeras áreas, incluindo o monitoramento de infraestruturas, potencializando a capacidade produtiva, gerando redução de custos e aumentando lucros.

A aplicação do sensoriamento remoto para o monitoramento de infraestruturas lineares, como as ferrovias, é um campo de estudo consolidado. Técnicas de processamento digital de imagens são cruciais para extrair informações relevantes. A análise de componentes principais, por exemplo, é empregada para reduzir a redundância entre bandas em imagens multiespectrais, comprimindo a informação em um conjunto menor de bandas principais. O modelo linear de mistura espectral permite estimar a proporção de diferentes alvos dentro de um pixel, gerando imagens de fração que representam a abundância de cada componente. A acurácia das classificações geradas por essas técnicas é avaliada por meio de matrizes de confusão, comparando os dados classificados com pontos de referência coletados em campo.

2.2. Aplicações de Drones e Aerofotogrametria na Inspeção Ferroviária

Drones, ou aeronaves remotamente pilotadas (RPAs), oferecem vantagens consideráveis no sensoriamento remoto para inspeção ferroviária. Eles possibilitam a obtenção de imagens e dados com grande detalhamento e alta resolução, muitas vezes em tempo real, a um custo significativamente menor do que outras técnicas de sensoriamento. Além disso, permitem a coleta de dados em locais de difícil acesso ou que apresentem riscos para a pesquisa presencial.

Esses equipamentos são tipicamente configurados com câmeras de alta resolução e sensores sofisticados, como os sensores lidar (Light Detection and Ranging) e térmicos, que proporcionam múltiplas perspectivas da área inspecionada. A aerofotogrametria, técnica que utiliza drones para capturar imagens aéreas sobrepostas, é fundamental para a criação de mapas tridimensionais e modelos digitais do terreno com alta precisão, essenciais para o planejamento, monitoramento e manutenção de ferrovias. A tecnologia LiDAR, em particular, destaca-se por sua capacidade de gerar representações extremamente precisas do terreno e suas características. O uso de drones, nesse contexto, não visa substituir as inspeções tradicionais, mas sim aumentar a frequência com que o monitoramento é realizado, complementando as abordagens existentes.

2.3. O Papel das Imagens de Satélite na Vigilância de Grandes Extensões

As imagens de satélite de alta resolução constituem uma ferramenta inovadora e poderosa para o monitoramento de extensas faixas de domínio ferroviária. Sistemas como o Sistema de Monitoramento de Alertas por Satélite (SMAS), utilizado pela CPTM, empregam constelações de satélites para detectar remotamente mudanças no uso do solo e invasões.

Empresas como a MRS Logística já implementaram plataformas, a exemplo da FaixaGeo MRS, que combinam imagens de satélite e inteligência artificial para automatizar a detecção de ocupações irregulares, descarte de lixo e outras alterações na faixa de domínio. Essa tecnologia opera comparando imagens coletadas em diferentes períodos, com intervalos de atualização que podem variar de 15 a 30 dias em trechos mais sensíveis. A tecnologia espacial, aliada à inteligência artificial, permite um monitoramento contínuo e preciso das áreas sob responsabilidade, antecipando problemas e complementando as inspeções de campo. A disponibilidade de dados históricos de satélite também oferece a vantagem de comparar mudanças no terreno ao longo de décadas sem custos adicionais significativos.

A eficácia do monitoramento da faixa de domínio é amplificada pela integração e complementaridade de diferentes plataformas de sensoriamento remoto. Drones, com sua capacidade de fornecer alta resolução e detalhes em tempo real para áreas específicas, e

satélites, que oferecem cobertura ampla e dados históricos para grandes extensões, possuem distintas vantagens e limitações em termos de escala, resolução e frequência de coleta. A verdadeira força do sistema reside na sua sinergia. Satélites podem ser empregados para um monitoramento macro, identificando alterações em vastas áreas e priorizando locais que demandam uma inspeção mais minuciosa. Em seguida, drones podem ser mobilizados para realizar varreduras de alta resolução nessas zonas específicas, capturando detalhes granulares essenciais para a tomada de decisão. Essa abordagem multiplataforma e hierárquica otimiza o uso de recursos, minimiza custos operacionais ao reduzir a frequência de implantação de drones em áreas de baixo risco e maximiza a eficácia da detecção, permitindo uma resposta ágil e direcionada a anomalias, superando as limitações que cada tecnologia enfrentaria se utilizada isoladamente.

2.4. Sistemas de Câmeras Fixas Acopladas em Material Rodante

As Câmeras fixas embarcadas em material rodante, sejam locomotivas ou veículos de apoio, são essenciais para o monitoramento contínuo da faixa de domínio ferroviária, provêm a captura visual de trechos extensos durante a operação, permitindo a detecção de anomalias durante o trajeto. A presença de pessoas, animais ou veículos na via férrea é uma das principais causas de acidentes graves. O monitoramento inteligente oferece uma camada proativa de segurança para mitigar e mapear esses riscos, levando a digitalização dos dados visuais e das informações geradas por esses sistemas com o potencial de criar um banco de dados geoespacial

preciso e em tempo real da faixa de domínio. Essa base de dados pode se tornar uma ferramenta para decisões estratégicas e direcionamento das equipes.

2.5. Inteligência Artificial e Visão Computacional em Processos de Inspeção e Análise

A Inteligência Artificial (IA) e o Aprendizado de Máquina (Machine Learning - ML), incluindo o Aprendizado Profundo (Deep Learning - DL), emergiram como ferramentas promissoras no campo da visão computacional para a detecção de defeitos e anomalias em infraestruturas ferroviárias. Essas tecnologias são cruciais para automatizar a análise de grandes volumes de dados de imagem, que seriam inviáveis para inspeção manual.

Algoritmos de detecção de objetos são amplamente empregados para identificar e classificar defeitos, objetos ilegais e diversas anomalias de forma rápida e precisa. A IA permite a automação de processos complexos de inspeção, reduzindo a dependência do trabalho manual e aumentando a eficiência e precisão na identificação de falhas e não conformidades. Modelos de IA podem ser treinados com vastos conjuntos de dados de imagens para reconhecer padrões associados a invasões, ocupações irregulares e descarte de lixo. A acurácia desses modelos de detecção é um fator crítico, com estudos indicando a obtenção de métricas de avaliação satisfatórias.

3. METODOLOGIA PARA O MONITORAMENTO INTEGRADO DA FAIXA DE DOMÍNIO FERROVIÁRIA

A implementação de um sistema de monitoramento eficaz da faixa de domínio ferroviária exige uma metodologia robusta que abranja a aquisição, o processamento e a análise de dados de imagem, bem como a sua integração com os sistemas de gestão existentes. Esta seção detalha os componentes essenciais dessa metodologia.

3.1. Equipamentos e Sensores para Aquisição de Imagens

A escolha dos equipamentos e sensores é crucial para garantir a qualidade e a relevância dos dados coletados. A combinação de diferentes plataformas e tipos de sensores permite uma cobertura abrangente e a detecção de uma vasta gama de anomalias.

3.1.1. Drones: Configurações e Sensores

Para o monitoramento da faixa de domínio, podem ser empregados drones de asa fixa ou multirrotores, cuja seleção dependerá da extensão da área a ser coberta e da complexidade do terreno.

- Câmeras RGB de alta resolução: São fundamentais para o mapeamento fotogramétrico, permitindo a geração de ortomosaicos e modelos 3D com resolução sub-centimétrica. Essas imagens são essenciais para a detecção visual de invasões, novas construções e descarte de lixo.
- Sensores Térmicos: Permitem a detecção de focos de calor, incêndios incipientes e a identificação de intrusos mesmo em condições de baixa luminosidade.
- Sensores LiDAR (Light Detection and Ranging): Cruciais para a criação de Modelos Digitais de Elevação (MDE) e Modelos Digitais de Superfície (MDS) de alta precisão.

3.1.2. Satélites: Características e Fontes de Dados

O uso de satélites oferece uma perspectiva macro para o monitoramento de grandes extensões territoriais.

- Satélites Ópticos de Alta Resolução: Constelações como PlanetScope ou Sentinel-2 fornecem imagens com resolução espacial e temporal adequadas para o monitoramento de mudanças de uso do solo em larga escala. São empregados para a detecção de novas ocupações.
- Satélites SAR (Synthetic Aperture Radar): Possuem a capacidade de penetrar nuvens e tornando-os ideais para monitoramento em condições climáticas adversas ou para a detecção de alterações estruturais que não seriam visíveis com sensores ópticos.

3.1.3. Câmeras Fixas Acopladas em Material Rodante: Tipos e Tecnologias

As câmeras fixas acopladas em material rodante complementam o monitoramento aéreo e orbital, fornecendo vigilância contínua em pontos estratégicos. Câmeras com IA Embarcada permitem o processamento de vídeo na borda, realizando detecção de objetos, análise de comportamento (permanência indevida, intrusão) em tempo real, o que reduz a carga de transmissão de dados para o centro de controle.

A seguir, a Tabela 1 oferece um comparativo das tecnologias de sensoriamento remoto, e a Tabela 2 detalha os tipos de sensores e suas aplicações na detecção de anomalias.

Tabela 1: Comparativo de Tecnologias de Sensoriamento Remoto para Monitoramento Ferroviário

Característica	Drones	Imagens de Satélite	Câmeras Fixas
Plataforma	Aeronave não tripulada	Satélite orbital	Infraestrutura terrestre
Sensores Comuns	RGB, LiDAR, Térmico	Óptico (multiespectral), SAR	RGB, PTZ, Térmica, IR
Resolução Espacial	Sub-centimétrica a decimétrica	Métrica a decimétrica	Centimétrica a métrica
Resolução Temporal	On-demand, diária a semanal	Diária a mensal	Contínua (24/7)
Cobertura	Localizada a regional	Regional a global	Pontual a perimetral
Vantagens Chave	Alta resolução, flexibilidade, acesso a áreas difíceis	Ampla cobertura, dados históricos, menor custo por área	Monitoramento contínuo, tempo real, detecção proativa

Tabela 2: Tipos de Sensores e Suas Aplicações na Detecção de Anomalias na Faixa de Domínio

Tipo de Sensor	Princípio de Funcionamento	Anomalias Detectáveis	Vantagens para Anomalia
RGB	Captura luz visível para formar imagens.	Invasões, ocupações irregulares, descarte de lixo, construções.	Alta familiaridade, custo-efetivo, fácil interpretação visual.

Térmico	Mede a radiação infravermelha (calor) emitida pelos objetos.	Intrusos (dia/noite), focos de incêndio, anomalias térmicas em equipamentos ou solo.	Operação 24/7, detecção em baixa visibilidade (neblina, fumaça), distingue calor de objetos.
LiDAR	Emite pulsos de laser e mede o tempo de retorno para criar modelos 3D.	Alterações topográficas, modelos 3D precisos.	Gera modelos de terreno de alta precisão, detecta pequenas deformações.
SAR	Utiliza ondas de rádio para gerar imagens, independente de luz.	Alterações estruturais (subsídios, deformações), detecção em condições climáticas adversas (nuvens, chuva).	Opera em qualquer condição climática, detecta deformações milimétricas, útil para monitoramento de solo.

3.2. Definição da Frequência de Coletas de Imagens

A frequência de coleta de imagens deve ser cuidadosamente definida para otimizar o custo-benefício, considerando a criticidade da área e o tipo de anomalia a ser detectada.

- Drones: Para inspeções detalhadas em áreas de alto risco de invasão, a frequência pode variar de semanal a mensal. Para o monitoramento de infraestrutura linear, drones são capazes de cobrir até 50 km de linha férrea por dia, o que permite aumentar significativamente a frequência de monitoramento em comparação com as inspeções tradicionais a pé.
- Satélites: As imagens de satélite podem ser atualizadas a cada 15 a 30 dias em trechos considerados mais sensíveis, ou conforme a disponibilidade de imagens sem cobertura de nuvens. Para o monitoramento de grandes extensões e detecção de mudanças de uso do solo a longo prazo, uma frequência trimestral ou semestral pode ser suficiente.
- Câmeras Fixas Acopladas em Material Rodante: O ideal é um monitoramento contínuo, 24 horas por dia, 7 dias por semana. Sistemas equipados com inteligência artificial podem gerar alertas em tempo real para eventos específicos. A frequência de quadros por segundo (fps) pode ser ajustável, com exemplos de 10 fps para monitoramento contínuo.

3.3. Processamento e Análise de Dados de Imagem

O processamento e a análise dos dados de imagem são etapas cruciais para transformar informações brutas em inteligência acionável.

3.3.1. Técnicas de Processamento de Imagens e Sistemas de Informação Geográfica

As imagens coletadas por plataformas aéreas e satelitais são submetidas a processamento para gerar produtos como ortomosaicos, modelos 3D, nuvens de pontos e mapas topográficos de alta precisão.

- **Aerofotogrametria:** Utiliza imagens sobrepostas para criar modelos tridimensionais e mapas topográficos detalhados.
- **Processamento LiDAR:** Gera modelos 3D extremamente precisos do terreno.
- **Sistemas de Informação Geográfica (SIG):** São ferramentas fundamentais para gerenciar, analisar e visualizar dados espaciais relacionados à faixa de domínio. Permitem a integração de diferentes camadas de informação, como topografia, uso do solo, limites da faixa de domínio e localização de anomalias, para uma análise espacial aprofundada.
- **Análise de Mudanças:** Técnicas de detecção de mudanças em ambientes SIG comparam imagens de diferentes períodos para identificar alterações na paisagem, como novas construções.

3.3.2. Algoritmos de Inteligência Artificial e Aprendizado Profundo para Detecção e Classificação

A Inteligência Artificial (IA) e o Aprendizado Profundo (Deep Learning) são essenciais para automatizar a análise de grandes volumes de dados de imagem, transformando-os em informações significativas.

- **Visão Computacional:** É amplamente utilizada para a detecção e classificação de objetos e anomalias.

- Redes Neurais Convolucionais (CNNs): Modelos como YOLO (You Only Look Once) e Mask R-CNN são empregados para detecção de objetos em tempo real e segmentação precisa de objetos em imagens e vídeos.
- Exemplos de aplicação incluem a detecção de invasores, construções ilegais e descarte de lixo.

A acurácia desses modelos de detecção é um fator crítico, com estudos indicando a obtenção de métricas de avaliação satisfatórias.

3.4. Estratégias de Armazenamento e Integração com Sistemas de Gestão Ferroviária

A eficácia de um sistema de monitoramento por imagens depende intrinsecamente da capacidade de gerenciar e integrar os vastos volumes de dados gerados.

3.4.1 Armazenamento de Dados

Os grandes volumes de dados geoespaciais e de imagem, característicos do Big Data, exigem soluções de armazenamento robustas, preferencialmente baseadas em nuvem, para garantir escalabilidade, acessibilidade e segurança.

3.4.2 Plataformas SIG Centralizadas

O Sistema de Informação Geográfica (SIG) atua como o sistema de registro central para a localização de todos os ativos físicos e anomalias detectadas. Isso minimiza incertezas e garante que as atualizações sejam propagadas automaticamente para todos os bancos de dados conectados, eliminando a necessidade de edição duplicada de informações. O SIG é fundamental para gerenciar, analisar e visualizar os dados espaciais relacionados à faixa de domínio.

3.4.3 Integração com Sistemas de Gestão Ferroviária

Os dados processados e as detecções de anomalias devem ser integrados de forma fluida com os sistemas de gestão de ativos, manutenção preditiva e planejamento operacional das ferrovias. Essa integração permite que os alertas gerados pela inteligência artificial sejam

automaticamente traduzidos em ordens de serviço ou ações de resposta, otimizando a alocação de recursos e a agilidade na resposta a incidentes.

A transformação de dados em inteligência acionável é um processo que se concretiza por meio da integração de sistemas. Embora exista uma vasta capacidade de coleta de dados de imagem e processamento por inteligência artificial, a simples obtenção e análise de dados não garantem a melhoria operacional se as informações não forem acessíveis e utilizáveis pelos tomadores de decisão em tempo hábil.

A integração dos dados de sensoriamento remoto e das análises de IA com os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e, subsequentemente, com os Sistemas de Gestão Ferroviária (SGF) é o mecanismo que converte dados brutos em inteligência acionável. O SIG funciona como um hub central, georreferenciando todas as anomalias detectadas e fornecendo uma base espacial para a análise, enquanto a IA automatiza a identificação e classificação dessas anomalias. Essa integração com os SGFs permite que alertas e relatórios sejam diretamente vinculados a fluxos de trabalho de manutenção, segurança e planejamento, otimizando a resposta e a alocação de recursos.

Essa sinergia não apenas aumenta a eficiência operacional e a segurança, mas também capacita as ferrovias a adotarem uma abordagem de manutenção preditiva e gestão proativa, minimizando custos e riscos a longo prazo e garantindo a conformidade regulatória. Sem essa integração, o investimento em tecnologias de sensoriamento e inteligência artificial seria subutilizado, resultando em "ilhas de dados" que não contribuem efetivamente para a gestão estratégica da infraestrutura ferroviária.

4. DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

A implementação de um sistema de monitoramento da faixa de domínio ferroviária baseado em imagens e inteligência artificial projeta uma série de resultados transformadores para a gestão e segurança operacional.

4.1. Resultados Esperados e Potencial de Aplicação

4.1.1. Detecção Automatizada de Invasões e Ocupações Irregulares

Espera-se que sistemas baseados em imagens de satélite e inteligência artificial sejam capazes de detectar automaticamente ocupações irregulares e novas construções na faixa de

domínio, comparando imagens coletadas em diferentes períodos. Essa tecnologia permite identificar o momento exato da instalação de uma construção ou ocupação indevida, o que é crucial para facilitar a ação legal e a gestão de passivos.

Além disso, a detecção de intrusos em tempo real por câmeras fixas com IA é uma realidade comprovada, com sistemas capazes de identificar pessoas e veículos em zonas de segurança. As diversas formas de ocupação, que podem incluir casas, cercas, plantações e criações de animais, são todas passíveis de detecção por meio dessas tecnologias de sensoriamento remoto. A inteligência artificial, particularmente o Deep Learning, também pode ser treinada para identificar descarte irregular de lixo e outros objetos estranhos na faixa de domínio.

4.1.2. Geração de Relatórios e Alertas para Tomada de Decisão

Os sistemas de monitoramento por imagens são projetados para gerar relatórios detalhados, que incluem a localização precisa e o tipo de defeitos ou anomalias detectadas. Além disso, a capacidade de emitir alertas automáticos, seja por e-mail ou por integração direta com sistemas de gestão, permite uma resposta rápida e coordenada a novas ocupações ou incidentes. A análise de grandes volumes de dados (Big Data) coletados por esses sistemas permite otimizar os processos de manutenção preditiva, ampliando a segurança das operações e resultando em redução de custos e atrasos.

4.2. Discussão: Vantagens, Desafios e Limitações do Monitoramento por Imagens

A adoção de tecnologias de sensoriamento remoto e inteligência artificial para o monitoramento da faixa de domínio ferroviária apresenta um vasto leque de benefícios, mas também impõe desafios técnicos, operacionais e regulatórios que precisam ser cuidadosamente considerados.

4.2.1. Benefícios Operacionais e Estratégicos da Tecnologia

A implementação de sistemas de monitoramento baseados em imagens oferece vantagens operacionais e estratégicas significativas:

- **Aumento da Eficiência e Agilidade:** O sensoriamento remoto, especialmente com drones, potencializa a eficiência e agilidade de mapeamento, fornecendo maior embasamento para as tomadas de decisão e tornando o processo mais econômico. Projetos de mapeamento podem ter seus prazos reduzidos em até 60% em comparação com métodos terrestres tradicionais.
- **Melhora da Segurança Operacional:** A detecção precoce de problemas e anomalias permite a realização de manutenções preventivas, o que se traduz em uma redução significativa na taxa de acidentes. A minimização da necessidade de presença humana nos trilhos também aumenta a segurança da equipe de campo.
- **Cobertura Abrangente:** Drones e satélites possibilitam a inspeção de grandes trechos da malha ferroviária com alta precisão, incluindo áreas de difícil acesso ou perigosas para inspeção manual.
- **Otimização de Custos:** Embora haja um investimento inicial, a redução do trabalho manual, a otimização dos processos de manutenção e a prevenção de acidentes e multas resultam em economias substanciais a longo prazo.
- **Dados para Gestão e Planejamento:** A geração contínua de dados geoespaciais precisos fornece uma base sólida para o planejamento de expansões da malha, a gestão eficiente de ativos e a conformidade com as regulamentações de segurança.

4.2.2. Desafios Técnicos: Acurácia, Resolução e Robustez dos Modelos

Apesar dos avanços, a implementação desses sistemas não está isenta de desafios técnicos:

- **Acurácia dos Modelos de IA:** Embora os modelos de inteligência artificial demonstrem alta eficiência e precisão na detecção de objetos, a sensibilidade e a acurácia podem variar consideravelmente dependendo das condições visuais e da complexidade do ambiente de aplicação. A acurácia dos dados de sensoriamento remoto é um fator crítico para a confiabilidade das decisões operacionais.
- **Resolução e Detalhamento:** A escolha da resolução temporal, espacial e espectral dos sensores deve ser cuidadosamente balanceada com o objetivo e o objeto de estudo. Para detecções de anomalias muito sutis, pode ser necessária uma resolução extremamente

alta, o que impacta diretamente o custo da coleta e o volume de dados a serem processados.

- **Robustez em Diferentes Cenários:** Os algoritmos de inteligência artificial precisam ser robustos o suficiente para lidar com variações nas condições de iluminação e a presença de múltiplos objetos no campo de visão, garantindo desempenho consistente em diversos cenários operacionais.

4.2.3. Impacto das Condições Climáticas Adversas na Qualidade das Imagens

As condições climáticas representam um fator significativo que pode afetar a qualidade e a disponibilidade das imagens.

- **Nuvens, Chuva e Neblina:** Condições climáticas desfavoráveis, como nuvens densas, chuva e neblina, podem impactar negativamente a qualidade das imagens de satélite e drones, limitando a frequência de coleta e, conseqüentemente, a acurácia da detecção. Isso pode gerar lacunas no monitoramento contínuo e comprometer a detecção de anomalias em tempo hábil, impactando a segurança.
- **Sensores Térmicos e SAR:** Para mitigar essa dependência, a inclusão de sensores térmicos e SAR (Synthetic Aperture Radar) é crucial. Câmeras térmicas e sensores SAR são menos suscetíveis a essas condições, oferecendo detecção confiável 24 horas por dia e em condições de baixa visibilidade. A dependência excessiva de uma única tecnologia de sensoriamento cria um ponto de falha significativo. A resiliência operacional do sistema de monitoramento é alcançada por meio da diversificação das tecnologias de sensoriamento. Uma abordagem híbrida e adaptativa, que combina o melhor de cada tecnologia e utiliza inteligência artificial para integrar e interpretar esses dados de forma inteligente, garante um monitoramento mais robusto, contínuo e confiável, mesmo em ambientes dinâmicos e desafiadores, elevando a segurança e a eficiência a um novo patamar.

4.2.4. Análise de Custos de Implementação e Manutenção do Sistema

A análise de custos é um componente essencial para a viabilidade de qualquer projeto de grande escala.

- **Custos de Drones:** O custo de drones equipados com tecnologia LiDAR pode variar de alguns milhares a dezenas de milhares de reais, influenciado pela qualidade do sensor, capacidades de voo e software associado. Além do custo de aquisição, o custo operacional inclui o treinamento de pessoal qualificado para a operação.
- **Custos de Satélites:** Embora a aquisição de dados históricos de satélite possa ser sem custo adicional em algumas plataformas, o acesso a imagens de alta resolução e a plataformas de monitoramento específicas pode envolver custos de serviço ou licenciamento.
- **Custos de Câmeras Fixas:** A instalação e manutenção de sistemas de monitoramento de longo alcance podem representar um investimento significativo. No entanto, a incorporação de inteligência artificial nesses sistemas resulta em um custo-benefício positivo devido à redução de alarmes falsos e ao aumento da eficácia na detecção de ameaças reais.
- **Custos de Software:** Softwares de SIG e análise de imagens geoespaciais, como o ArcGIS Pro, podem ter custos de licenciamento variados, dependendo do nível de funcionalidades e da escala de uso. É importante notar que existem opções gratuitas e de código aberto (e.g., QGIS) que podem reduzir os custos iniciais de implementação.
- **Análise Custo-Benefício:** O investimento inicial em tecnologia pode ser substancial, mas os benefícios a longo prazo, como a redução de acidentes, a otimização da manutenção, a prevenção de invasões e multas, e a melhoria geral da segurança operacional, justificam o investimento, tornando-o economicamente vantajoso.

4.2.5. Requisitos de Pessoal Qualificado e Aspectos Regulatórios

A complexidade das tecnologias exige considerações sobre recursos humanos e conformidade legal.

- **Pessoal Qualificado:** A operação e a análise de dados provenientes de sistemas de sensoriamento remoto e inteligência artificial demandam pessoal altamente qualificado para garantir o uso eficaz e a interpretação correta dos dados. Isso inclui a necessidade de pilotos de drones certificados, especialistas em geoprocessamento e cientistas de dados com expertise em visão computacional.
- **Regulamentação de Drones (ANAC):** No Brasil, a Agência Nacional de

Telecomunicações (ANATEL), o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) e a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) são as entidades responsáveis pela regulamentação do uso de drones. A ANAC, em particular, fiscaliza o uso de aeronaves não tripuladas, com regras específicas para aeromodelos e RPAs .

- Regulamentação da Faixa de Domínio (ANTT, DNIT): A ANTT e o DNIT desempenham papéis cruciais na regulamentação e fiscalização da faixa de domínio ferroviária. A ANTT, por exemplo, está ativamente envolvida no debate e na definição de regras para a delimitação, proteção e ocupação da faixa de domínio.

4.2.6. Considerações sobre Cibersegurança e Privacidade dos Dados

A crescente digitalização e o monitoramento remoto introduzem novas preocupações.

- Riscos de Cibersegurança: A informatização da infraestrutura crítica ferroviária e a dependência de sistemas de monitoramento remoto aumentam a exposição a ataques cibernéticos. É imperativo concentrar esforços na proteção da infraestrutura ferroviária e na gestão proativa dos riscos cibernéticos. Ações como roubo de credenciais de acesso, comprometimento de dispositivos e violação de pontos de acesso remoto são ameaças reais que exigem medidas de segurança robustas.
- Privacidade: O uso extensivo de câmeras e tecnologias de sensoriamento remoto para monitoramento levanta questões importantes relacionadas à privacidade de indivíduos gravados na ou nas proximidades da faixa de domínio. É fundamental que as operadoras ferroviárias implementem políticas claras de proteção de dados e garantam a conformidade com a legislação de privacidade vigente.

5. CONCLUSÃO

O monitoramento da faixa de domínio ferroviária por meio de imagens, utilizando a sinergia de drones, imagens de satélite e câmeras fixas, representa um avanço tecnológico fundamental para a segurança e eficiência do setor. A integração dessas tecnologias com algoritmos de Inteligência Artificial e Sistemas de Informação Geográfica (SIG) permite uma detecção automatizada e precisa de uma vasta gama de anomalias, desde invasões e ocupações irregulares até descarte de lixo.

Essa abordagem proativa transforma a gestão da faixa de domínio, migrando de inspeções manuais e reativas para um sistema contínuo, eficiente e preditivo. Os ganhos são substanciais, incluindo a melhoria da segurança operacional através da detecção precoce de riscos, a otimização dos custos de manutenção pela identificação automatizada de problemas, e a proteção efetiva do patrimônio ferroviário.

A capacidade de monitorar grandes extensões de forma detalhada e frequente, aliada à automação da análise, permite que as concessionárias respondam de forma mais ágil e informada a qualquer alteração, garantindo a integridade da infraestrutura e a segurança das operações. Para maximizar o potencial desses sistemas e superar os desafios existentes, as seguintes recomendações são propostas:

- **Desenvolvimento de Modelos de IA Robusto:** É crucial investir em pesquisa e desenvolvimento de algoritmos de IA mais robustos, capazes de manter alta acurácia em diversas condições climáticas e de iluminação, e de diferenciar com maior precisão entre diferentes tipos de anomalias e objetos. Isso envolve a criação de vastos bancos de dados de treinamento e a aplicação de técnicas avançadas de aprendizado de máquina.
- **Integração de Sensores Heterogêneos:** Aprofundar estudos sobre a fusão de dados provenientes de múltiplos sensores (ópticos, LiDAR, SAR) é essencial para criar uma visão mais completa e resiliente da faixa de domínio, superando as limitações individuais de cada tecnologia e garantindo um monitoramento ininterrupto e preciso.
- **Padronização de Protocolos:** Estabelecer protocolos padronizados para a coleta, processamento e análise de dados de sensoriamento remoto no contexto ferroviário facilitará a interoperabilidade e o compartilhamento de informações entre diferentes concessionárias e órgãos reguladores, promovendo uma gestão mais colaborativa e eficiente da malha nacional.
- **Capacitação de Pessoal:** É imperativo promover programas contínuos de capacitação e formação para engenheiros, técnicos e operadores. Isso assegurará o uso eficaz e a gestão otimizada dessas tecnologias avançadas, garantindo que o potencial dos sistemas seja plenamente explorado por equipes qualificadas.
- **Estudos de Custo-Benefício Detalhados:** A realização de estudos de caso e análises de custo-benefício mais aprofundadas, quantificando o retorno sobre o investimento e os impactos socioeconômicos da implementação desses sistemas em diferentes contextos ferroviários brasileiros, é fundamental para justificar e direcionar futuros investimentos.

- Aspectos Legais e de Privacidade: É necessário continuar o diálogo e o desenvolvimento de marcos regulatórios que equilibrem a imperativa necessidade de monitoramento da segurança ferroviária com as legítimas preocupações de privacidade e cibersegurança. Isso garantirá a conformidade legal e a construção da confiança pública na utilização dessas tecnologias.

6. REFERÊNCIAS

ABIFER. **Satélites aliados a IA monitoram qualidade e irregularidades em ferrovia no Brasil**. Disponível em: <https://abifer.org.br/en/satelites-aliados-a-ia-monitoram-qualidade-irregularidades-em-ferrovia-no-brasil/>. Acesso em: 2 ago. 2025.

AEROENGENHARIA. **Drones nas Faixas de Domínio: Eficiência e Segurança**. 2023. Disponível em: <https://aeroengenharia.com/drones-nas-faixas-de-dominio-eficiencia/>. Acesso em: 11 jul. 2025.

ANAC. **Orientações para usuários de Drones**. Disponível em: https://www.gov.br/anac/ptbr/assuntos/drones/orientacoes_para_usuarios.pdf. Acesso em: 8 ago. 2025.

ANPTRILHOS. **Monitoramento de Vídeo em Tempo Real**. Disponível em: https://anptrilhos.org.br/wpcontent/uploads/2018/09/ANPTrilhos_livro_Monitoramento_Video_tempo_real_web.pdf. Acesso em: 7 ago. 2025.

ANTT. **Regras de exploração de faixa de domínio das ferrovias**. Disponível em: https://anttlegis.antt.gov.br/action/UrlPublicasAction.php?acao=abrirAtoPublico&num_ato=0004597&sgl_tipo=RES&sgl_orgao=DG/ANTT/MT&vlr_ano=2015&seq_ato=000. Acesso em: 25 jul. 2025.

ANTT. **Portaria nº 15, de 27 de outubro de 2023**. Disponível em: [Transporte Ferroviário - Fiscalização - Correção de Irregularidades - Regulamentação](#). Acesso em: 5 ago. 2025.

BRASIL. **Lei nº 14.273, de 23 de dezembro de 2021**. Dispõe sobre o transporte ferroviário. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/114273.htm. Acesso em: 18 jul. 2025.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE MUNICÍPIOS. **Conquista: DNIT regulamenta uso das faixas de domínio de rodovias federais e CNM esclarece gestores**. Disponível em: <https://cnm.org.br/comunicacao/noticias/conquista-dnit-regulamenta-uso-das-faixas-dedominio-de-rodovias-federais-e-cnm-esclarece-gestores>. Acesso em: 11 jul. 2025.

DNIT. **Reconhecimento e monitoramento da faixa de domínio ferroviária no âmbito das concessões vigentes e os desafios atrelados à gestão e regularização fundiária**. 2023.

Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/campanhas-e-eventos/seminarios-dedesapropriacao-e-reassentamento/3o-seminario-nacional-de-desapropriacao-ereassentamento/palestras/palestras-quarta_2023/02.ReconhecimentoemonitoramentodafaixadedomnioferroviaDANIELAJUNQUEIRA.pdf. Acesso em: 11 jul. 2025.

DPI/INPE. **Sensoriamento Remoto.** Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/labisa/livro/res/conteudo.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2025

ESTADÃO. **Satélites aliados a IA monitoram qualidade e irregularidades em ferrovia no Brasil.** Disponível em: <https://mobilidade.estadao.com.br/inovacao/satelites-aliados-a-iamonitoram-qualidade-e-irregularidades-em-ferrovia-no-brasil/>. Acesso em: 2 ago. 2025.

GOV.BR. **Política e Plano de Desenvolvimento Transporte Ferroviário de Passageiros.** Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transporte-terrestre/politica-eplano-de-desenvolvimento-transporte-ferroviario-de-passageiros/arquivos/consultaestruturada-pdtfp-v2.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2025.

IPEA. **Ferrovias - O futuro sobre trilhos - Volume de cargas transportadas e investimento em alta.** Disponível em: https://www.ipea.gov.br/desafios/index.php?option=com_content&id=1264:reportagensmateria. Acesso em: 18 jul. 2025.

MAPPA. **Sensoriamento remoto com drones: como funciona?** Disponível em: <https://mappa.ag/blog/sensoriamento-remoto-com-drones/>. Acesso em: 25 jul. 2025

OBSERVATÓRIO METROFERRO. **Uso de drones no setor ferroviário reduz custos em até 22%.** Disponível em: <https://observatoriometroferro.ufsc.br/2017/03/>. Acesso em: 29 jul. 2025.