

ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres

RDT - Recurso de Desenvolvimento Tecnológico

PLANO DE TRABALHO

**PN INTELIGENTE: PLATAFORMA INTEGRADA DE DIGITALIZAÇÃO DE
PASSAGENS DE NÍVEL PARA MONITORAMENTO, VIGILÂNCIA,
DETECÇÃO DE OBSTÁCULOS E NOVAS TECNOLOGIAS DE
SINALIZAÇÃO ATIVA**

**PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO DE SOLUÇÕES PARA AUMENTO DA
SEGURANÇA FERROVIÁRIA, COM FOCO PRINCIPAL EM PASSAGENS DE
NÍVEL E LOCAIS CRÍTICOS (TEMA 4, DELIBERAÇÃO Nº 28/2026)**

MRS Logística S.A.

29/05/2026

SUMÁRIO

1. DESCRIÇÃO DO PROJETO	4
1.1. Título do Projeto	4
1.1.1. Linha de inovação e desenvolvimento	4
1.1.2. Temas	5
1.2. Objetivos	5
1.2.1. Objetivo Geral	5
1.2.2. Objetivos Específicos	6
2. JUSTIFICATIVA	8
2.1. Contexto e Relevância	8
2.2. Lacuna Tecnológica	9
2.3. Estado da Arte e Inovações Propostas	11
2.3.1. Revisão do Estado da Arte	11
2.3.2. Inovações Propostas	13
2.4. Contribuição ao Setor	14
2.5. Complementaridade com Outros Projetos RDT da MRS	15
2.6. Resultados Esperados e Atendimento às Diretrizes da Resolução nº 6.021/2023	16
2.6.1. Distinção de Obrigações Contratuais	17
2.7. Participação em Seminários, Congressos e Visitas Técnicas	18
3. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	18
3.1. Métodos e Técnicas Utilizadas	18
3.1.1. Maturidade Tecnológica (TRL)	18
3.1.2. Visão Computacional e Inteligência Artificial	19
3.1.3. Otimização para Edge (Processamento de Borda)	20
3.1.4. Hardware de Computação de Borda	21
3.1.5. Monitoramento do Sistema de Sinalização Ativa	22
3.1.6. Plataforma Integrada de Monitoramento	24
3.1.7. Metodologia de Validação	26
3.1.8. Frente Exploratória: Interoperabilidade e Sinalização Ativa Digital	27
3.1.9. Conformidade com a LGPD	29
3.1.10. Quadro Sinóptico: Objetivos, Métodos, Etapas e Produtos	29
3.2. Etapas	30

3.3.	Indicadores de Impacto	40
3.4.	Gestão de Riscos	43
4.	PREVISÃO DE INÍCIO, TEMPO DE EXECUÇÃO E CUSTO TOTAL	46
5.	LOCAL DE EXECUÇÃO	46
5.1.	Laboratório e Desenvolvimento.....	46
5.2.	Passagens de Nível (Instalação e Validação).....	47
6.	ENTIDADE E EQUIPE EXECUTORA.....	48
6.1.	Identificação da Entidade Executora	48
6.2.	Instituição de Ciência e Tecnologia Parceira.....	49
6.3.	Identificação da Equipe Executora	50
7.	PRODUTOS.....	52
7.1.	Produtos do Projeto.....	52
7.2.	Publicações e Disseminação	54
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS / NORMATIVOS APLICÁVEIS.....	55
8.1.	Regulamentação	55
8.2.	Normas Técnicas Brasileiras.....	55
8.3.	Normas Internacionais	56
8.4.	Referências Técnicas e Setoriais.....	56
8.5.	Referências Acadêmicas	57
9.	ANEXOS DO PLANO DE TRABALHO	57

1. DESCRIÇÃO DO PROJETO

1.1. Título do Projeto

PN Inteligente: Plataforma Integrada de Digitalização de Passagens de Nível para Monitoramento, Vigilância, Detecção de Obstáculos e Novas Tecnologias de Sinalização Ativa

1.1.1. Linha de inovação e desenvolvimento

Conforme a Resolução nº 6.021/2023 da ANTT, o presente projeto enquadra-se nas seguintes diretrizes e objetivos inovativos:

Diretrizes (Art. 3º): - Inciso I: modernização da infraestrutura integrante do Subsistema Ferroviário Federal, por meio de plataforma integrada de digitalização de Passagens de Nível que compreende monitoramento do sistema de sinalização ativa, vigilância por visão computacional, detecção de obstáculos e pesquisa em tecnologias de sinalização ativa digital; - Inciso II: melhoria da qualidade dos serviços de concessão ferroviária, ao fornecer dados estruturados para gestão de segurança, supervisão remota de sinalização e priorização de investimentos em PNs.

Objetivos inovativos (Art. 4º): - Inciso II: tecnologia básica e aplicada, por meio do desenvolvimento de modelos de visão computacional, algoritmos de fusão de risco, sistemas de monitoramento de sinalização e estudo de protocolos abertos de interoperabilidade para ambientes ferroviários; - Inciso III: soluções técnicas para problemas específicos, endereçando as lacunas de percepção inteligente de eventos de risco, supervisão do sistema de sinalização ativa e interoperabilidade em Passagens de Nível; - Inciso IV: soluções de monitoramento e fiscalização em tempo real, com supervisão remota do sistema de sinalização ativa, detecção automática de eventos de risco, contagem volumétrica e geração de evidências para a ANTT.

Enquadramento normativo:

O projeto responde diretamente aos requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 17252:2026 (Sinalização ferroviária: Sistema de sinalização de PN com proteção ativa - Requisitos funcionais), publicada em março de 2026. A norma estabelece, em seu item 5, requisitos para monitoramento do sistema de sinalização ativa, incluindo registro de dados, análise, supervisão remota, autodiagnóstico de dispositivos e comunicação, watchdog e monitoramento de light-out de LEDs. Em seu item 6, a norma define requisitos obrigatórios de vigilância da PN por sistema CFTV. Em seu item 7, estabelece requisitos para detecção de obstáculos na pista de rolamento com geração de alarmes críticos e não críticos, cuja implantação é facultativa, mas cujos sub-requisitos tornam-se obrigatórios uma vez adotada. Complementarmente, a ABNT NBR 7613:2020 define os critérios de classificação de PNs por meio do Grau de Importância (GI) e do Momento de Circulação (MC), cujo cálculo depende de dados de contagem volumétrica de tráfego.

O presente projeto desenvolve uma plataforma integrada de digitalização que atende aos requisitos dos itens 5, 6 e 7 da NBR 17252, integrando monitoramento do sistema de sinalização ativa, vigilância inteligente por visão computacional, detecção automática de obstáculos com geração de alarmes e contagem volumétrica para cálculo de GI e MC conforme NBR 7613. A solução é baseada em processamento de borda (edge AI), com

módulos de hardware embarcado e câmeras instalados nas PNs, e algoritmos de inteligência artificial otimizados para operação no dispositivo.

Adicionalmente, o projeto inclui uma frente exploratória de pesquisa em tecnologias de sinalização ativa digital, abrangendo o estudo de protocolos abertos de interoperabilidade e a avaliação de alternativas de controladores que combinem integridade de segurança ferroviária já estabelecida (SIL 4 por IEC 61508/EN 50129 ou conformidade com padrões AREMA), fornecimento com suporte técnico no Brasil e capacidade de habilitar a digitalização das PNs. Esta frente produzirá estudo de viabilidade, roadmap tecnológico e prova de conceito em bancada, posicionando o projeto na fronteira da digitalização de PNs no Brasil.

1.1.2. Temas

O projeto está alinhado aos seguintes temas prioritários definidos pela Deliberação nº 28/2026 do Comitê de RDT/RPMF:

Tema 4: Pesquisas e desenvolvimento de soluções para aumento da segurança ferroviária, com foco principal em passagens de nível e locais críticos. O projeto desenvolve uma plataforma integrada de digitalização de PNs que abrange monitoramento do sistema de sinalização ativa, vigilância por visão computacional, detecção de obstáculos e pesquisa em sinalização ativa digital, abordando diretamente o tema mais relevante para a segurança ferroviária no Brasil.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

A ABNT NBR 17252:2026 estabelece requisitos funcionais para o sistema de sinalização de PN com proteção ativa, incluindo: monitoramento do sistema de sinalização ativa com registro de dados, análise, supervisão remota e autodiagnóstico (item 5); vigilância da PN por sistema CFTV (item 6); e detecção de obstáculos na pista de rolamento com geração de alarmes críticos e não críticos (item 7). A ABNT NBR 7613:2020 define os critérios de classificação de PNs por meio do Grau de Importância (GI) e do Momento de Circulação (MC), cujo cálculo requer dados de contagem volumétrica de tráfego.

O presente projeto desenvolve e valida uma plataforma integrada de digitalização de Passagens de Nível que responde a esses requisitos normativos (itens 5, 6 e 7), organizada em dois eixos co-iguais: um eixo operacional com três camadas de monitoramento, vigilância e detecção, e um eixo exploratório de pesquisa em sinalização ativa digital:

- **Camada 1, Monitoramento do sistema de sinalização ativa (Item 5 da NBR 17252):** supervisão remota do sistema de sinalização ativa existente, com registro e análise de dados, autodiagnóstico de dispositivos e comunicação, watchdog, monitoramento de light-out de LEDs de sinais luminosos, identificação de alarmes falsos durante manutenção e transmissão de condições de alarme e evento para sistema centralizado. Entrega operacional nas 4 PNs piloto.
- **Camada 2, Vigilância da PN (Item 6 da NBR 17252):** CFTV inteligente 24/7 com visão computacional, mínimo de 2 câmeras em quadrantes opostos, operação diurna e noturna (iluminação mínima de 0,5 lux), cobertura da zona completa da PN (linha de retenção, cancela, pista de rolamento, via de acesso), gravação em

mídia digital com marcação temporal sincronizada e dashboard de funcionamento. Entrega operacional nas 4 PNs piloto.

- **Camada 3, Detecção de obstáculos na pista de rolamento (Item 7 da NBR 17252):** detecção de objetos móveis e imóveis via “video image”, classificação por regras e algoritmos com geração de alarmes críticos e não críticos, e contagem volumétrica automatizada para cálculo de GI e MC conforme NBR 7613. Entrega operacional nas 4 PNs piloto.
- **Eixo exploratório, Sinalização ativa digital:** estudo de viabilidade de tecnologias de digitalização para sinalização ativa de PNs, abrangendo duas frentes: (a) protocolos abertos e interfaces de interoperabilidade, com referência a iniciativas internacionais como o Eulynx; e (b) avaliação de alternativas de controladores que combinem integridade de segurança ferroviária já estabelecida (SIL 4 por IEC 61508/EN 50129 ou conformidade com padrões AREMA), fornecimento com suporte técnico no Brasil e capacidade de habilitar a digitalização e interoperabilidade das PNs. Entregáveis: estudo de viabilidade, roadmap tecnológico e prova de conceito em bancada.

As três camadas operacionais serão instaladas e validadas em 4 Passagens de Nível da malha da MRS Logística, contemplando diferentes cenários operacionais. A plataforma é baseada em processamento de borda (edge AI), com toda a inferência de IA executada no próprio dispositivo, garantindo autonomia operacional para as funções críticas de detecção e alerta mesmo durante falhas de conectividade.

Além de atender aos requisitos da NBR 17252, a plataforma oferece capacidades adicionais: detecção e classificação de mais de 10 tipos de eventos de risco em um único pipeline de processamento, contagem volumétrica contínua no maior nível de precisão previsto pelo Manual de Estudos de Tráfego (nível A), categorização de alertas por tipo, gravidade e classificação da PN, e transfer learning incremental para adaptação a novas PNs com volume mínimo de dados adicionais. O eixo exploratório investiga protocolos abertos e interfaces padronizadas para comunicação entre sistemas e avalia controladores comerciais certificados que atendam aos requisitos de segurança ferroviária para aplicações de sinalização ativa, posicionando o projeto na fronteira da digitalização de PNs no Brasil.

1.3. Objetivos Específicos

Objetivos operacionais (Camadas 1 a 3):

1. **Desenvolver sistema de monitoramento do sistema de sinalização ativa de PNs**, atendendo aos requisitos do item 5 da NBR 17252, incluindo: registro e análise de dados de operação do sistema de sinalização, autodiagnóstico de dispositivos na inicialização e periodicamente (requisitos 5a e 5b), watchdog com tentativa de reinicialização automática quando o temporizador expirar (requisito 5c), monitoramento de condições de light-out das unidades de LED dos sinais luminosos e demais funções (requisito 5d), identificação de alarmes falsos gerados durante tarefas de manutenção (requisito 5e) e transmissão de condições de alarme e evento para sistema centralizado por meio de rede de comunicação com autodiagnóstico do canal.
2. **Desenvolver e otimizar modelos de visão computacional para vigilância da PN e detecção de obstáculos na pista de rolamento**, atendendo aos requisitos

dos itens 6 e 7 da NBR 17252, incluindo: detecção de objetos móveis e imóveis (veículo parado, pedestre nos trilhos, obstrução de via, fila de veículos, invasão/contramão, quase-acidentes), classificação de eventos com geração de alarmes críticos e não críticos, detecção de condições ambientais adversas e falha/oclusão de câmera, além de contagem volumétrica automatizada de tráfego rodoviário e ferroviário para cálculo de GI e MC conforme NBR 7613.

3. **Projetar e fabricar módulo de computação de borda com interfaces para monitoramento de sinalização**, dimensionado para atender aos requisitos de vigilância da NBR 17252 (mínimo de 2 câmeras CFTV em quadrantes opostos, operação diurna e noturna com iluminação mínima de 0,5 lux, cobertura da zona completa da PN), com interfaces de comunicação para coleta de dados do sistema de sinalização ativa (Camada 1), operação 24x7 em ambiente externo ferroviário, redundância de energia e conectividade, e proteção antivandalismo.
4. **Desenvolver plataforma integrada de monitoramento, vigilância e detecção** com: painel de saúde e estado do sistema de sinalização ativa (Camada 1), dashboard de vigilância em tempo real com streaming ao vivo (Camada 2), gestão de alarmes críticos e não críticos com envio aos sistemas operacionais da concessionária (Camada 3), consulta pós-ocorrência e vídeo sob demanda, gestão de ocorrências e tratativas, contagem volumétrica com cálculo periódico de GI e MC conforme NBR 7613, trilhas de auditoria e geração de relatórios.
5. **Instalar e comissionar a plataforma nas 4 (quatro) Passagens de Nível** da malha da MRS Logística, contemplando diferentes cenários operacionais (alto/baixo fluxo, diferentes condições ambientais e de conectividade), com verificação de conformidade aos requisitos dos itens 5, 6 e 7 da NBR 17252.
6. **Validar o desempenho da plataforma** em condições operacionais reais, atingindo F1-score mínimo de 95,4% em condições padrão (dia, boa visibilidade) e de 85% em condições adversas (chuva, neblina, noite) na detecção de eventos, com amostragem de no mínimo 30 eventos por tipo e monitoramento contínuo de 14 dias por PN, incluindo verificação de aderência aos requisitos funcionais da NBR 17252 (itens 5, 6 e 7) e validação do sistema de monitoramento da sinalização ativa.
7. **Desenvolver e documentar metodologia de análise integrada de risco em PNs**, correlacionando os eventos de risco detectados pelo sistema de vigilância e detecção de obstáculos com os dados de contagem volumétrica, os indicadores de classificação da PN (GI e MC conforme NBR 7613) e os dados de monitoramento do sistema de sinalização ativa. A metodologia incluirá: identificação de eventos que extrapolam os tempos de segurança calculados para cada cruzamento como medida direta de risco operacional, atualização periódica de GI e MC com dados de contagem contínua (nível A de precisão conforme Manual de Estudos de Tráfego), correlação entre anomalias do sistema de sinalização e eventos de risco na PN, e subsídio para classificação da PN quanto ao tipo de proteção recomendado. O resultado será um protocolo documentado e reproduzível, validado nas 4 PNs piloto e replicável a outras PNs da malha ferroviária nacional.

Objetivos exploratórios (Frente de sinalização ativa digital):

8. **Realizar estudo de protocolos abertos e interfaces de interoperabilidade para PNs ferroviárias**, abrangendo: mapeamento de interfaces existentes nos sistemas de sinalização ativa da MRS, estudo de protocolos abertos aplicáveis ao contexto

brasileiro (com referência a iniciativas internacionais como o Eulynx), especificação de interfaces abertas para integração entre as camadas de monitoramento, vigilância e detecção e os controladores de sinalização, e prova de conceito de comunicação entre a plataforma PN Inteligente e controladores via protocolo aberto. Entregáveis: relatório de estudo de interoperabilidade, especificação de interfaces abertas e prova de conceito funcional.

9. **Avaliar alternativas de controladores que combinem integridade de segurança ferroviária, suporte técnico no Brasil e habilitação da digitalização de PNs**, abrangendo: levantamento de requisitos de integridade de segurança aplicáveis à sinalização ferroviária (SIL 4 conforme IEC 61508/EN 50129 ou conformidade com padrões AREMA); avaliação de controladores comerciais que atendam a esses requisitos, com ênfase em soluções com fornecimento e suporte técnico no Brasil; testes em bancada de integração entre controladores, sensores de detecção de tráfego ferroviário e dispositivos de sinalização; e elaboração de roadmap para desenvolvimento de solução de sinalização ativa digital. Entregáveis: relatório de viabilidade técnica, roadmap tecnológico e relatório de testes em bancada.

Nota: A frente exploratória (OE8 e OE9) tem como objetivo o estudo de viabilidade e prova de conceito, não o desenvolvimento de produto certificado SIL 4 nem a substituição dos sistemas de sinalização existentes. O foco está em avaliar a integração e a aplicabilidade de hardware comercial existente ao contexto de PNs brasileiras.

2. JUSTIFICATIVA

2.1. Contexto e Relevância

As Passagens de Nível (PNs) representam um dos principais pontos de risco da operação ferroviária brasileira e são reconhecidas pelo Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito (Vol. IX) como locais de elevada incidência de acidentes envolvendo veículos rodoviários, pedestres e composições ferroviárias. Em notícia oficial publicada pela ANTT em 30 de setembro de 2025, a Agência informou o registro de 698 acidentes ferroviários no Brasil em 2024, destacando que cerca de 75% desses eventos decorreram de imprudência ou negligência de terceiros. Adicionalmente, a consolidação histórica da base aberta de acidentes ferroviários da ANTT indica mais de 13 mil ocorrências no período de 2004 a 2023, com maior concentração nos estados de Minas Gerais, São Paulo e Paraná.

A dimensão territorial da malha e a dispersão das PNs tornam o problema estrutural. Levantamentos setoriais e institucionais historicamente apontam a existência de cerca de 12 mil passagens de nível no país, com parcela relevante em condição crítica, o que evidencia a insuficiência de soluções exclusivamente baseadas em obras civis de grande porte para tratamento de toda a rede. Nesse mesmo sentido, o Programa Nacional de Segurança Ferroviária em Áreas Urbanas (PROSEFER/DNIT) reúne 217 empreendimentos e prevê investimentos superiores a R\$ 7 bilhões, demonstrando a magnitude do passivo existente e a necessidade de complementar intervenções físicas com soluções tecnológicas escaláveis, capazes de ampliar a capacidade de monitoramento, vigilância e detecção de riscos com custo viável.

A publicação da ABNT NBR 17252:2026 (Sinalização ferroviária: Sistema de sinalização de PN com proteção ativa - Requisitos funcionais), em março de 2026, representa marco

regulatório relevante para a segurança em Passagens de Nível no Brasil. A norma estabelece requisitos funcionais para PNs com proteção ativa em três dimensões: monitoramento do sistema de sinalização ativa, com registro de dados, análise, supervisão remota, autodiagnóstico e watchdog (item 5); vigilância da PN por câmeras CFTV com cobertura da zona completa, operação diurna e noturna e gravação sincronizada (item 6); e detecção de obstáculos na pista de rolamento com geração de alarmes críticos e não críticos (item 7). Complementarmente, a ABNT NBR 7613:2020 define os critérios de classificação das PNs por meio do Grau de Importância (GI) e do Momento de Circulação (MC), ambos dependentes de dados de contagem volumétrica de tráfego. Em conjunto, esses normativos criam demanda concreta por soluções integradas, escaláveis e economicamente viáveis para apoio à gestão da segurança ferroviária.

Paralelamente ao avanço normativo, observa-se tendência internacional de digitalização das redes ferroviárias. Na Europa, iniciativas como o Eulynx vêm desenvolvendo especificações de interfaces padronizadas e abertas entre componentes de sinalização, com o objetivo de ampliar a interoperabilidade entre equipamentos de diferentes fabricantes e reduzir a dependência de soluções proprietárias. No Brasil, por outro lado, os sistemas de sinalização ativa de PNs operam predominantemente com interfaces fechadas, dificultando a integração de novas tecnologias de monitoramento inteligente, detecção de obstáculos e supervisão remota. Esse cenário evidencia a oportunidade de investigar, no contexto do presente projeto, protocolos abertos e interfaces padronizadas como caminho para a modernização dos sistemas de sinalização de PNs no país.

Nesse contexto, o presente projeto propõe uma abordagem abrangente de digitalização de Passagens de Nível, combinando três camadas operacionais aderentes aos itens 5, 6 e 7 da ABNT NBR 17252 com uma frente exploratória de pesquisa em tecnologias de sinalização ativa digital. A plataforma integrada de monitoramento, vigilância e detecção, baseada em processamento de borda (edge AI), busca viabilizar o atendimento aos requisitos normativos mesmo em PNs com conectividade limitada, mantendo a operação autônoma das funções críticas de detecção e alerta em cenários de falha de conectividade e tornando a solução replicável em larga escala.

Embora o projeto esteja formalmente enquadrado no **Tema 4** da Deliberação nº 28/2026 do Comitê de RDT/RPMF, sua abrangência também produz efeitos aderentes a outros temas previstos no normativo. Os dados gerados pela plataforma — como contagem volumétrica, registros de eventos, informações de monitoramento do sistema de sinalização e trilhas de auditoria — podem subsidiar a automação e o aprimoramento da fiscalização da ANTT, em convergência com o **Tema 5**. De forma complementar, ao disponibilizar dados operacionais em tempo real para os sistemas da concessionária, apoiar decisões mais informadas sobre gestão de tráfego e priorização de intervenções em Passagens de Nível, e explorar protocolos abertos e interoperabilidade, o projeto também contribui para o desenvolvimento de estudos e tecnologias voltados à melhoria da operação ferroviária, em linha com o **Tema 10**.

2.2. Lacuna Tecnológica

O presente projeto endereça três lacunas tecnológicas no contexto de Passagens de Nível ferroviárias no Brasil, evidenciadas pela publicação da NBR 17252:2026 e pela tendência global de digitalização ferroviária:

Lacuna 1: Ausência de percepção inteligente de eventos de risco na PN

As Passagens de Nível no Brasil contam atualmente com sistemas de **sinalização** (passiva e ativa), cuja função é alertar motoristas e pedestres sobre a aproximação de composições ferroviárias. Esses sistemas, incluindo soluções mais recentes com componentes eletrônicos e conectividade, cumprem uma função regulatória essencial, mas não constituem sistemas de **percepção inteligente**. A distinção é fundamental: sinalização comunica um estado (trem se aproximando), enquanto percepção inteligente analisa a cena continuamente para detectar, classificar e registrar eventos de risco, independentemente da presença de composição ferroviária.

Com a publicação da NBR 17252:2026, essa lacuna ganhou enquadramento normativo: a norma exige vigilância por CFTV (item 6) e permite a implantação de sistemas de detecção de obstáculos (item 7) em PNs com proteção ativa, mas não existem, no setor ferroviário brasileiro, soluções tecnológicas validadas que atendam a esses requisitos de forma integrada. As lacunas específicas incluem:

- *Detecção automática de múltiplos eventos de risco:* As soluções existentes concentram-se em tipos específicos de detecção (presença de pessoas ou veículos). Não há, no setor brasileiro, sistema que integre a detecção automática de mais de 10 tipos de eventos de risco (veículo parado, pedestre nos trilhos, violação de barreiras, obstrução de via, fila de veículos, invasão/contramão, quase-acidentes, condições ambientais adversas, falha de câmera) com classificação de gravidade, em um único pipeline de processamento.
- *Correlação entre risco e volumetria:* Nenhuma solução disponível integra, em um único sistema, a detecção de eventos de risco com a contagem volumétrica automatizada de tráfego (pedestres, veículos leves, veículos pesados). Essa integração é fundamental para o cálculo do Grau de Importância (GI) e do Momento de Circulação (MC) das PNs conforme NBR 7613, e para a priorização de investimentos em segurança.
- *Dependência de conectividade para processamento:* Soluções de videomonitoramento existentes transmitem fluxo de vídeo para processamento remoto (em nuvem ou centros de dados). Em ambientes rurais ou com conectividade instável, característica de grande parte da malha ferroviária brasileira, essas abordagens ficam inoperantes justamente nos momentos de maior necessidade. O processamento de borda (edge AI) elimina essa dependência ao executar toda a inferência de IA no próprio dispositivo instalado na PN, transmitindo apenas metadados, alertas e evidências sintéticas do evento (snapshots e clipes pré/pós), sem necessidade de enviar o fluxo contínuo de vídeo, e mantendo operação autônoma mesmo em cenários de falha de conectividade.

Lacuna 2: Ausência de supervisão remota da saúde do sistema de sinalização ativa

Os sistemas de sinalização ativa instalados nas PNs brasileiras operam sem visibilidade remota sobre seu próprio estado de funcionamento. A NBR 17252:2026, em seu item 5, estabelece requisitos para supervisão desses sistemas: registro e análise de dados, supervisão remota, autodiagnóstico de dispositivos e comunicação, watchdog, monitoramento de light-out de LEDs e identificação de alarmes falsos durante manutenção. Atualmente, os sistemas de sinalização ativa de PNs no Brasil não dispõem de camada de monitoramento integrada que atenda a esses requisitos de forma automatizada e com supervisão remota. A manutenção é predominantemente reativa (baseada em falhas reportadas) e não há registro estruturado e contínuo do estado operacional dos dispositivos de sinalização.

Esta lacuna é particularmente relevante porque o sistema de sinalização ativa é a linha de defesa primária da PN: sua falha silenciosa (sem detecção nem notificação) pode resultar em exposição ao risco sem que os operadores tenham conhecimento. O monitoramento remoto do estado de saúde da sinalização, com autodiagnóstico e alertas automáticos, transforma a manutenção de reativa para proativa, baseada em evidência de anomalia e autodiagnóstico, e garante que anomalias sejam identificadas e tratadas antes que se convertam em falhas operacionais.

Lacuna 3: Integração entre sistemas e interoperabilidade

No cenário atual, os sistemas de sinalização, monitoramento e detecção operam de forma isolada, sem integração entre si e sem capacidade de troca de dados entre equipamentos de diferentes fabricantes. Essa fragmentação limita a capacidade de análise integrada de risco e impede a construção de uma visão consolidada do estado da PN. Os sistemas de sinalização ativa utilizam interfaces proprietárias e protocolos fechados, criando dependência de fornecedores únicos para manutenção, expansão e integração de novas tecnologias.

A ausência de protocolos abertos e interfaces padronizadas no contexto brasileiro dificulta a modernização incremental dos sistemas existentes e impõe custos elevados para qualquer integração entre equipamentos. No plano internacional, iniciativas como o Eulynx desenvolvem especificações abertas que permitem a comunicação entre componentes de diferentes fabricantes, reduzindo custos de ciclo de vida e facilitando a adoção de novas tecnologias. No Brasil, não identificamos estudo publicado específico sobre a aplicabilidade de protocolos abertos para sistemas de sinalização de PNs.

O presente projeto atua nas três lacunas simultaneamente: desenvolve sistema de percepção inteligente com visão computacional e processamento de borda para vigilância e detecção de obstáculos (Lacuna 1), implementa supervisão remota do estado operacional dos equipamentos de sinalização ativa com autodiagnóstico e alertas automáticos (Lacuna 2) e investiga a adoção de protocolos abertos e interfaces de interoperabilidade (Lacuna 3), integrando as três dimensões em uma plataforma única de digitalização.

2.3. Estado da Arte e Inovações Propostas

2.4. Revisão do Estado da Arte

A aplicação de visão computacional para monitoramento de segurança no setor ferroviário é um campo em rápida evolução. Até o momento, a aplicação concentrou-se em inspeção de infraestrutura (via permanente, pontes) e detecção de defeitos em material rodante, com iniciativas acadêmicas como o projeto CORE/UFSC de monitoramento estrutural com deep learning.

No contexto específico de Passagens de Nível, o estado da arte internacional inclui projetos de detecção de obstáculos com radar e câmeras (Europa, programa Shift2Rail/Europe's Rail JU), sistemas de alerta avançado (FRA, Estados Unidos) e detecção de veículos por visão computacional e radar (JR East, Japão). Essas iniciativas utilizam processamento centralizado e não produziram datasets de referência para PNs nem protocolos de validação padronizados.

No campo da digitalização de sinalização ferroviária, o consórcio Eulynx (formado por gestores de infraestrutura ferroviária europeus, incluindo Deutsche Bahn, Network Rail,

SNCF Réseau e ProRail) desenvolve especificações de interfaces abertas (Eulynx Interface Specifications) para componentes de sinalização, permitindo a interoperabilidade entre equipamentos de diferentes fabricantes. As especificações cobrem controladores de sinalização, elementos de campo (semáforos, barreiras), sistemas de detecção de trens e interfaces de diagnóstico. Embora focadas inicialmente em linhas férreas de alta velocidade, as especificações Eulynx representam a referência internacional mais avançada para protocolos abertos em sinalização ferroviária e oferecem um modelo conceitual aplicável ao contexto de PNs.

No domínio da integridade de segurança para sinalização ferroviária, duas tradições normativas principais estabelecem requisitos para desenvolvimento e certificação de sistemas: na linha europeia, a IEC 61508 (segurança funcional de sistemas elétricos, eletrônicos e programáveis) e as normas CENELEC ferroviárias (EN 50126, EN 50128, EN 50129) definem níveis de integridade de segurança (SIL); na linha americana, os padrões AREMA (American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association) consolidam as práticas de integridade para equipamentos de sinalização ferroviária. No Brasil, a sinalização ativa de PNs já conta com controladores que atendem aos requisitos de integridade de segurança ferroviária. Avançar na digitalização das PNs, entretanto, requer avaliação de alternativas que combinem integridade de segurança, fornecimento com suporte técnico local e capacidade de habilitar a interoperabilidade, combinação que ainda não foi sistematicamente estudada no contexto brasileiro.

No Brasil, as soluções existentes para PNs (seção 2.2) concentram-se em sinalização e monitoramento remoto, com componente de inteligência artificial ainda incipiente e limitado em escopo. A publicação da NBR 17252:2026 altera esse panorama ao estabelecer requisitos obrigatórios de monitoramento da sinalização (item 5), vigilância (item 6) e opcionais de detecção de obstáculos (item 7) em PNs com proteção ativa, criando demanda por soluções tecnológicas que até então não tinham enquadramento normativo. As lacunas tecnológicas que este projeto endereça são: (a) ausência de modelos de IA validados para detecção de eventos de risco em PNs brasileiras com hardware de borda; (b) inexistência de sistema de monitoramento remoto do estado operacional dos sistemas de sinalização ativa; (c) ausência de estudos sobre protocolos abertos e interoperabilidade para sistemas de PNs no contexto brasileiro; (d) inexistência de dataset público anotado para treinamento e benchmark; e (e) ausência de metodologia padronizada e reproduzível para validação de sistemas de IA neste contexto.

No primeiro ciclo de projetos RDT ferroviários submetidos à ANTT, a EFVM (Vale S.A.) apresentou o projeto RailGuard (Processo 50505.065846/2025-49), que propõe o uso de modelos YOLO para detecção de pessoas, animais e veículos em passagens de nível da Estrada de Ferro Vitória a Minas, com orçamento de R\$ 1,98 milhão e prazo de 24 meses. A existência de dois projetos independentes de inteligência artificial aplicada a PNs, propostos por concessionárias distintas no mesmo ciclo de submissão, evidencia o reconhecimento pelo setor ferroviário de que o monitoramento inteligente é uma fronteira prioritária para a segurança em passagens de nível.

Os dois projetos adotam abordagens complementares. O RailGuard utiliza processamento centralizado em servidor, adequado à realidade da EFVM; o presente projeto propõe processamento integralmente na borda (edge), eliminando a dependência de infraestrutura de rede para as funções críticas de detecção. Enquanto o RailGuard foca na detecção de pessoas, animais e veículos, o presente projeto abrange os requisitos dos itens 5, 6 e 7 da NBR 17252, integra contagem volumétrica para cálculo de GI e MC conforme NBR 7613, inclui camada de monitoramento do sistema de sinalização ativa e contempla frente exploratória de pesquisa em protocolos abertos e controladores que atendam aos

requisitos de segurança ferroviária. Essa diversidade de abordagens é desejável: dada a dispersão das PNs na malha nacional e a variedade de condições operacionais (urbanas, rurais, com ou sem conectividade), o avanço simultâneo de arquiteturas distintas amplia a base de conhecimento disponível para todo o setor e aumenta as chances de convergência para soluções eficazes em diferentes contextos.

2.5. Inovações Propostas

As inovações propostas concentram-se em contribuições metodológicas e tecnológicas que vão além dos requisitos mínimos estabelecidos pelas normas. A NBR 17252 define O QUE deve existir (monitoramento, vigilância e detecção); as inovações a seguir desenvolvem métodos novos para o contexto específico de PNs brasileiras que atendem e excedem esses requisitos:

1. **Algoritmo de fusão de detecção de risco com classificação integrada de PN:** Desenvolvimento de método que correlaciona os eventos de risco detectados por visão computacional com a contagem volumétrica automatizada de tráfego e os dados de monitoramento do sistema de sinalização ativa, produzindo os dados necessários para atualização periódica do GI e do MC da PN conforme NBR 7613. O GI ($GI = f \times T \times V$) define se a proteção da PN deve ser ativa ou passiva; o MC ($MC = 0,6 \times V \times T \times L$) define o tipo de sinalização rodoviária. A integração dos dados de monitoramento do sistema de sinalização (Camada 1) com os dados de vigilância e detecção (Camadas 2 e 3) permite identificar correlações entre anomalias do sistema de sinalização e eventos de risco na PN, fornecendo uma medida de risco operacional mais abrangente que qualquer uma das fontes isoladamente. A contagem volumétrica contínua por câmera oferece o maior nível de precisão previsto no Manual de Estudos de Tráfego (nível A, dados contínuos por 1 ano), em contraste com o método convencional de contagem manual de 3 dias (nível D-C). A literatura recente demonstra a viabilidade de abordagens baseadas em visão computacional para avaliação de risco em PNs (Aminmansour et al., “Computer vision-based approach for smart traffic condition assessment at the railroad grade crossing”, Advanced Engineering Informatics, 2022; Espinoza et al., “AI-Based Hazard Detection for Railway Crossings”, ASME JRC, 2024), porém nenhuma dessas abordagens integra detecção de eventos com monitoramento da sinalização e dados para cálculo de GI e MC.
2. **Otimização e adaptação de modelos de IA para hardware de borda em ambiente ferroviário:** Desenvolvimento de método sistemático para otimização de acurácia, latência e consumo energético de modelos de IA em processadores de borda, considerando as restrições específicas do ambiente ferroviário (operação contínua 24x7, variações de temperatura, vibração). O projeto investigará técnicas de transfer learning incremental que permitam que modelos treinados em uma PN se ajustem a novas PNs com volume mínimo de dados adicionais, sem necessidade de retreinamento completo. Essa capacidade de adaptação incremental é essencial para a escalabilidade da solução: cada PN possui características visuais distintas (geometria, iluminação, tipos de veículos, vegetação) e retreinar modelos do zero para cada nova instalação seria inviável em escala. A contribuição é metodológica: um processo documentado e reproduzível para otimização e adaptação de modelos em contexto ferroviário.
3. **Plataforma integrada de digitalização com ciclo medir-decidir-agir no dispositivo de borda:** Integração das camadas de monitoramento da sinalização

(Item 5), vigilância (Item 6) e detecção de obstáculos (Item 7) em uma plataforma única que executa o ciclo completo no dispositivo de borda: monitora o estado do sistema de sinalização, detecta eventos de risco, classifica sua gravidade, correlaciona com dados volumétricos, gera alertas configuráveis e produz evidências automáticas (snapshots, vídeo pré/pós-evento), sem dependência de conectividade para as funções críticas. A integração dessas três camadas em uma única plataforma permite análise cruzada de dados que não seria possível com sistemas isolados. Os dados acumulados alimentam periodicamente o recálculo de GI e MC da PN e permitem a identificação de eventos que extrapolam os tempos de segurança calculados para cada cruzamento.

4. **Estudo de protocolos abertos e interoperabilidade para PNs brasileiras:** Investigação da aplicabilidade de protocolos abertos e interfaces padronizadas (com referência a especificações internacionais como o Eulynx) para comunicação entre componentes de sinalização de PNs. O estudo produzirá especificação de interfaces abertas adaptadas ao contexto brasileiro e prova de conceito de comunicação entre a plataforma de monitoramento e controladores de sinalização via protocolo aberto. Embora exploratória, esta contribuição estabelece a base para a modernização incremental dos sistemas de sinalização de PNs no Brasil, abrindo caminho para a redução de custos de ciclo de vida e a eliminação da dependência de fornecedores únicos.
5. **Avaliação de alternativas de controladores que combinem integridade de segurança, suporte técnico no Brasil e habilitação da digitalização:** Avaliação sistemática de alternativas de controladores comerciais considerando três atributos em conjunto: (a) integridade de segurança ferroviária já estabelecida (SIL 4 conforme IEC 61508/EN 50129 ou conformidade com padrões AREMA); (b) fornecimento com suporte técnico no Brasil; e (c) capacidade de habilitar a digitalização da sinalização ativa de PNs. A avaliação incluirá levantamento de requisitos de integridade de segurança específicos para PNs considerando as duas tradições normativas (internacional e AREMA), testes em bancada de integração entre os controladores, sensores de detecção de tráfego ferroviário e dispositivos de sinalização, e elaboração de roadmap tecnológico para desenvolvimento de solução de sinalização ativa digital. A contribuição é exploratória: produz conhecimento técnico sobre a viabilidade de aplicar hardware de segurança comercial ao contexto de PNs brasileiras, sem desenvolvimento de produto certificado nem substituição dos sistemas existentes.

2.6. Contribuição ao Setor

Beneficiário	Contribuição
Setor ferroviário	Elevação do patamar tecnológico de segurança em PNs por meio de plataforma integrada de digitalização com processamento de borda; viabilização do atendimento aos requisitos dos itens 5, 6 e 7 da NBR 17252; metodologia de otimização e adaptação de modelos de IA aplicável a outros desafios ferroviários; estudo de protocolos abertos e interoperabilidade para PNs; avaliação de alternativas de

Beneficiário	Contribuição
	controladores com suporte técnico no Brasil para digitalização da sinalização ativa; base de conhecimento técnico que contribui para a evolução das práticas do setor
Concessionária (MRS)	Contribuição para a redução de acidentes e prejuízos em PNs da malha; dados estruturados para tomada de decisão operacional e priorização de investimentos em segurança; supervisão remota do estado dos sistemas de sinalização ativa; identificação antecipada de situações de risco e anomalias de sinalização; redução da dependência de fornecedores únicos para sistemas de sinalização de PNs; validação do modelo em 4 PNs piloto como base para escala; roadmap tecnológico para digitalização de PNs
União (ANTT)	Dados estruturados para fiscalização baseada em evidências; contribuição direta ao tema prioritário de segurança em PNs; referência tecnológica para implementação dos requisitos dos itens 5, 6 e 7 da NBR 17252 nas concessões ferroviárias; metodologia de análise integrada de risco e validação padronizada; estudo de interoperabilidade como subsídio para futuras regulamentações
Usuários (motoristas, pedestres)	Maior segurança nos cruzamentos rodoferroviários; alertas que possibilitam ação preventiva; monitoramento da integridade do sistema de sinalização ativa; redução do tempo de exposição ao risco
Sociedade	Contribuição para a redução de acidentes e suas consequências em passagens de nível; fortalecimento da capacidade tecnológica nacional em inteligência artificial e digitalização ferroviária aplicadas a transportes; geração de conhecimento técnico replicável; avanço na agenda de digitalização e interoperabilidade ferroviária

2.7. Complementaridade com Outros Projetos RDT da MRS

O presente projeto se insere em um portfólio coordenado de iniciativas da MRS Logística voltadas à segurança de Passagens de Nível, atuando de forma complementar a outros dois projetos RDT já submetidos pela concessionária. Juntos, os três projetos constituem uma abordagem em camadas para a segurança de PNs:

Pilar	Projeto	Abordagem
Barreira física	Portão Automático para Passagens de Nível de Pedestres (MRS/HUSK),	Barreira de controle de acesso para pedestres, protótipo + 10 PNPs, R\$ 3,1M

Pilar	Projeto	Abordagem
	Processo 50505.066540/2025-18	
Infraestrutura e comportamento	Sistemas Seguros em Passagens de Nível (MRS/ONSV/UFPR), Processo 50505.065555/2025-51	Desenho viário, gestão de velocidades, abordagem Visão Zero, R\$ 1,72M
Digitalização integrada	PN Inteligente (MRS/Embeddo)	Plataforma de monitoramento de sinalização + vigilância + detecção de obstáculos + pesquisa em sinalização ativa digital, R\$ 3,4M

O projeto PN Inteligente adiciona a terceira dimensão: digitalização integrada da PN, com monitoramento do sistema de sinalização ativa, percepção situacional em tempo real, detecção automatizada de eventos de risco e geração de dados estruturados para gestão, respondendo diretamente aos requisitos dos itens 5, 6 e 7 da NBR 17252:2026. Os três projetos operam em camadas distintas e sinérgicas: o Portão impede fisicamente o acesso indevido de pedestres, os Sistemas Seguros reduzem a velocidade do tráfego rodoviário e aumentam a percepção de risco dos condutores, e a PN Inteligente monitora a integridade da sinalização, detecta, registra e alerta sobre eventos que escapam às duas primeiras camadas, e investiga a digitalização futura dos sistemas de sinalização.

Os dados gerados pela plataforma PN Inteligente (contagem volumétrica, eventos de risco, GI e MC, estado da sinalização) alimentam diretamente as decisões dos outros dois projetos: a contagem volumétrica de pedestres fornece subsídios para a priorização de PNPs para instalação de portões automáticos, enquanto o registro de eventos de risco e os indicadores de classificação da PN (GI e MC) contribuem para a priorização das intervenções viárias propostas pelos Sistemas Seguros. A frente exploratória de interoperabilidade contribui para uma visão de longo prazo de integração digital entre todos os sistemas presentes nas PNs.

2.8. Resultados Esperados e Atendimento às Diretrizes da Resolução nº 6.021/2023

O projeto está alinhado aos artigos 3º e 4º da Resolução, conforme destacado a seguir:

- Art. 3º, incisos I e II: apoia a modernização da infraestrutura ferroviária e a melhoria da segurança operacional em passagens de nível, por meio de plataforma integrada de digitalização que viabiliza o atendimento aos requisitos dos itens 5, 6 e 7 da NBR 17252.
- Art. 4º, incisos II, III e IV: desenvolve tecnologias aplicadas de monitoramento em tempo real, automação de processos de coleta de dados, pesquisa em interoperabilidade e infraestrutura tecnológica para segurança.
- Art. 7º, inciso IV: define produtos, resultados e cronograma que asseguram a transparência e rastreabilidade da execução.

- Art. 10, §4º: cumpre o requisito de execução por entidade com experiência comprovada em desenvolvimento tecnológico e corpo técnico especializado.

As entregas previstas materializam as ações de inovação e desenvolvimento tecnológico previstas pelos Recursos de Desenvolvimento Tecnológico, conforme o escopo regulatório vigente. Ao final do período de execução, o projeto terá:

Entregas operacionais (Camadas 1 a 3): - Instalado e validado uma plataforma integrada de monitoramento, vigilância e detecção em 4 Passagens de Nível da malha MRS, atendendo aos requisitos dos itens 5, 6 e 7 da NBR 17252; - Desenvolvido sistema de monitoramento remoto do estado operacional do sistema de sinalização ativa, com autodiagnóstico, watchdog e alertas automáticos; - Implementado detecção automática de eventos de risco com geração de alarmes críticos e não críticos, contagem volumétrica de tráfego e cálculo de GI e MC conforme NBR 7613; - Produzido metodologia documentada de análise integrada de risco em PNs, correlacionando eventos detectados, dados de monitoramento da sinalização e indicadores de classificação (GI e MC); - Produzido metodologia de otimização e adaptação de modelos de IA para hardware de borda em ambiente ferroviário, permitindo a implantação em novas PNs com esforço reduzido; - Elaborado documentação técnica completa e capacitação da equipe da concessionária na operação e manutenção da plataforma.

Entregas exploratórias (Frente de sinalização ativa digital): - Produzido relatório de estudo de interoperabilidade com mapeamento de interfaces existentes, análise de protocolos abertos aplicáveis e especificação de interfaces abertas; - Produzido prova de conceito funcional de comunicação via protocolo aberto entre a plataforma e controladores de sinalização; - Produzido relatório de viabilidade técnica de alternativas de controladores que combinem integridade de segurança, suporte técnico no Brasil e habilitação da digitalização da sinalização ativa de PNs, com resultados de testes em bancada; - Produzido roadmap tecnológico para desenvolvimento de solução de sinalização ativa digital para PNs.

2.9. Distinção de Obrigações Contratuais

O presente projeto foi elaborado em conformidade com o disposto no inciso I do artigo 8º da Resolução nº 6.021, de 20 de julho de 2023, não se destinando ao cumprimento de obrigações contratuais regulares atribuídas à concessionária. As obrigações contratuais da MRS Logística relativas a Passagens de Nível referem-se a:

- Manutenção da sinalização existente (passiva e ativa) conforme NBR 15680 e NBR 15942;
- Atendimento das condições de segurança previstas no contrato de concessão;
- Execução de intervenções de infraestrutura determinadas pela ANTT ou pelo Poder Judiciário;
- Operação dos sistemas de controle de tráfego ferroviário já implantados.

O presente projeto desenvolve uma camada tecnológica inteiramente nova e adicional, inexistente nas obrigações contratuais vigentes, voltada à criação de ferramentas tecnológicas de monitoramento inteligente por meio de visão computacional, inteligência artificial e processamento de borda, respondendo a requisitos normativos recém-estabelecidos pela NBR 17252:2026 (monitoramento da sinalização, vigilância e

detecção de obstáculos em PNs com proteção ativa). A frente exploratória de pesquisa em protocolos abertos e controladores que atendam aos requisitos de segurança ferroviária é inteiramente de natureza investigativa, sem qualquer relação com as obrigações de operação ou manutenção da infraestrutura concedida.

2.10. Participação em Seminários, Congressos e Visitas Técnicas

O projeto prevê a difusão dos resultados e o fortalecimento técnico e institucional por meio da participação em eventos e ações de capacitação:

Participação em eventos e congressos: - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET): principal evento científico da área de transportes no Brasil, com submissão de artigo sobre arquitetura e validação em campo da plataforma de digitalização de PNs. - Workshop RDT (ANTT): apresentação dos resultados do projeto ao Comitê de RDT/RPMF e demais concessionárias, incluindo a experiência de implementação dos requisitos dos itens 5, 6 e 7 da NBR 17252:2026 e os resultados da frente exploratória de interoperabilidade. - Congressos e periódicos internacionais da área de sistemas inteligentes de transporte e segurança ferroviária, com submissão de artigos sobre os resultados do projeto, incluindo a avaliação de protocolos abertos para PNs e os resultados de testes com os controladores avaliados. - Eventos do setor de segurança funcional e sinalização ferroviária (ex.: IRSE - Institution of Railway Signal Engineers, Signal+Draht), com difusão dos resultados da frente exploratória.

Capacitação institucional: - Treinamento presencial e material EAD para a equipe da concessionária na operação e manutenção da plataforma, incluindo a camada de monitoramento da sinalização ativa.

3. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

3.1. Métodos e Técnicas Utilizadas

O projeto apoia-se em um conjunto de tecnologias complementares para atender aos requisitos dos itens 5, 6 e 7 da NBR 17252:2026. As três camadas operacionais (monitoramento do sistema de sinalização ativa, vigilância da PN e detecção de obstáculos) utilizam técnicas de instrumentação industrial, visão computacional e aprendizado profundo cujo desempenho é comprovado em benchmarks internacionais. As técnicas de compressão e otimização de modelos permitem executar inferência de alto desempenho em processadores de borda de baixo consumo. A frente exploratória emprega métodos de estudo de viabilidade, prototipagem e testes em bancada para investigar tecnologias de sinalização ativa digital.

3.2. Maturidade Tecnológica (TRL)

A tabela abaixo apresenta o nível de maturidade tecnológica (Technology Readiness Level) de entrada e de saída para cada componente funcional do projeto, evidenciando onde se concentra o esforço de P&D:

Componente funcional	TRL entrada	TRL saída	Descrição do avanço
Detecção de veículos e pedestres em PNs	4	8	Modelos de detecção validados em benchmarks genéricos; adaptação e qualificação para PNs brasileiras com processamento de borda em operação contínua
Correlação de eventos de risco com GI e MC	2	7	Conceito formulado; desenvolvimento do algoritmo de correlação, modelo de GI/MC e validação em campo compõem o desenvolvimento específico do projeto
Framework de otimização para edge	3	7	Técnicas individuais conhecidas; framework integrado para hardware embarcado em ambiente ferroviário constitui o objeto de desenvolvimento nesta frente
Contagem volumétrica integrada a detecção de risco	3	8	Contagem veicular e detecção de eventos existem separadamente; integração em pipeline único no dispositivo de borda, alimentando o cálculo de GI e MC conforme NBR 7613
Monitoramento do sistema de sinalização ativa (Item 5 NBR 17252)	2	7	Conceito de monitoramento remoto de sinalização formulado; desenvolvimento de sistema integrado de autodiagnóstico, watchdog, monitoramento de light-out e interface com sistema centralizado para PNs brasileiras compõe o desenvolvimento específico do projeto
Estudo de protocolos abertos de interoperabilidade para PNs	1	4	Conceito identificado a partir de iniciativas internacionais (Eulynx); mapeamento, especificação de interfaces abertas e prova de conceito de comunicação via protocolo aberto no contexto de PNs brasileiras
Avaliação de controladores que atendam aos requisitos de segurança ferroviária para sinalização ativa de PNs	2	5	Controladores que atendam aos requisitos de segurança ferroviária (SIL 4 por IEC 61508/EN 50129 ou tradição normativa AREMA) existem comercialmente; o avanço está na avaliação sistemática da combinação entre integridade de segurança já estabelecida, disponibilidade de suporte técnico no Brasil e capacidade de habilitar a digitalização e interoperabilidade das PNs, com testes de integração em bancada

3.3. Visão Computacional e Inteligência Artificial

Os métodos de visão computacional e inteligência artificial constituem o núcleo tecnológico que viabiliza o atendimento aos requisitos normativos: vigilância da PN por câmeras CFTV (item 6 da NBR 17252) e detecção de obstáculos na pista de rolamento

(item 7 da NBR 17252, na modalidade “video image” prevista pela norma). O sistema utilizará modelos de detecção de objetos baseados em arquiteturas de redes neurais convolucionais (CNNs) otimizadas para inferência em dispositivos embarcados. A abordagem inclui:

- **Detecção e classificação de objetos:** Modelos da família YOLO (You Only Look Once), MobileNet SSD ou equivalentes, incluindo modelos próprios desenvolvidos pela Embeddo, treinados para detectar e classificar objetos móveis e imóveis conforme item 7a da NBR 17252: veículos (leves e pesados), pedestres, ciclistas, trens e obstruções na pista de rolamento, com inferência de baixa latência no dispositivo de borda.
- **Análise temporal de eventos:** Algoritmos de tracking (rastreamento de objetos entre frames) para identificar comportamentos de risco, como veículo parado sobre a faixa ferroviária por tempo superior ao limiar configurável (ex.: > 5 segundos).
- **Classificação de eventos e geração de alarmes:** Classificação de cada evento detectado com geração de alarmes críticos (obstáculos na pista de rolamento que representem risco à circulação) e alarmes não críticos (anomalias do sistema, falha ou oclusão de câmera), conforme terminologia do item 7c da NBR 17252.
- **Zonas de interesse configuráveis:** Definição de regiões geométricas (polígonos, linhas virtuais) ajustáveis por PN, permitindo personalização das regras de detecção conforme a configuração física de cada cruzamento.
- **Contagem volumétrica:** Linhas virtuais de contagem para registro automático do fluxo de veículos leves, pesados, pedestres e composições ferroviárias, com agregação por período (horário, diário, mensal).
- **Detecção de condições adversas:** Classificadores para identificar condições ambientais que afetem a visibilidade (chuva intensa, neblina, contraluz) e estados de falha da câmera (violação, desfoque, oclusão, bloqueio).

3.4. Otimização para Edge (Processamento de Borda)

O sistema deve processar múltiplos fluxos de câmera simultaneamente, em operação contínua 24x7, em hardware de campo com restrições de consumo energético e dissipação térmica. Para viabilizar modelos de alto desempenho nessas condições, serão avaliadas e combinadas as seguintes técnicas:

- **Quantização:** Redução da precisão numérica dos pesos do modelo (de FP32 para INT8), reduzindo o tamanho do modelo e acelerando a inferência com perda controlada de acurácia, quantificada nos testes de bancada.
- **Pruning (poda):** Remoção de conexões e neurônios redundantes da rede neural, reduzindo a complexidade computacional.
- **Knowledge distillation (destilação de conhecimento):** Transferência de conhecimento de um modelo grande e preciso (teacher) para um modelo compacto e eficiente (student), otimizado para o hardware-alvo.
- **Transfer learning incremental:** Fine-tuning supervisionado com dados coletados em cada PN para adaptar os modelos pré-treinados às condições locais

(ângulo de câmera, iluminação, tipos de veículo predominantes), sem necessidade de retreinamento completo do modelo base.

A NBR 17252 estabelece como requisito mínimo a vigilância por CFTV com DVR (item 6). O processamento de borda agrega capacidade analítica a esse requisito ao executar inferência de IA localmente no dispositivo de borda, acrescentando detecção automática de eventos e geração de alarmes sem dependência de processamento remoto ou intervenção humana para a etapa de detecção. A combinação específica de técnicas de otimização adotada em cada modelo será definida por benchmark no hardware-alvo, considerando F1, latência, consumo energético, estabilidade térmica e capacidade de processamento simultâneo de múltiplos fluxos.

3.5. Hardware de Computação de Borda

O módulo de computação de borda será dimensionado e adaptado para operação contínua (24x7) em ambiente externo ferroviário, contemplando:

- **Unidade de processamento:** Processador com acelerador de inferência de IA (NPU/GPU embarcada), dimensionado para processar múltiplos fluxos de câmera simultaneamente.
- **Sistema de câmeras:** Mínimo de 2 câmeras CFTV por PN, posicionadas em quadrantes opostos conforme item 6.2b da NBR 17252, com resolução e campo de visão dimensionados para cobertura da zona completa da PN (linha de retenção oposta, cancela/sinal oposto, pista de rolamento e via de acesso, conforme item 6.3). Operação diurna e noturna com iluminação mínima de 0,5 lux (item 6.2c), com capacidade infravermelha.
- **Interfaces para monitoramento de sinalização ativa:** Módulo de aquisição de sinais para coleta de dados do sistema de sinalização ativa existente na PN (status dos dispositivos, condições de alarme, estados operacionais), conforme requisitos do item 5 da NBR 17252. Gateway de comunicação para intercâmbio de dados de telemetria, diagnóstico e estados operacionais entre a camada de monitoramento e os controladores de sinalização — sem comando da lógica de sinalização operacional —, com suporte a protocolos industriais padrão (Modbus, OPC-UA ou equivalente) e capacidade de expansão para protocolos abertos a serem investigados na frente exploratória (OE8).
- **Redundância de energia:** Alimentação principal por rede elétrica + banco de baterias para continuidade operacional durante falhas de energia.
- **Conectividade e autonomia:** Modem LTE/4G para transmissão de dados processados (eventos, alertas, métricas, dados de monitoramento de sinalização), acesso remoto e streaming de vídeo ao vivo sob demanda. Em modo degradado (falha de conectividade), o sistema mantém operação autônoma com armazenamento local de eventos e sincronização posterior.
- **Armazenamento local:** Unidade de armazenamento (SSD) para gravação contínua de vídeo, registro de dados de monitoramento do sistema de sinalização e retenção de imagens no dispositivo de borda, com capacidade e período de retenção configuráveis conforme política da concessionária. O armazenamento permite consulta e reprodução sob demanda de vídeo gravado pela plataforma de monitoramento.

- **Atualização remota de modelos (OTA):** Mecanismo de atualização over-the-air dos modelos de IA e firmware, com validação em sandbox antes da ativação, permitindo evolução contínua dos algoritmos sem necessidade de intervenção presencial.
- **Proteção física:** Painel de comando com gabinete de grau de proteção IP65 ou superior e resistência a impactos mecânicos IK08 ou superior, proteção contra surtos elétricos e interferência eletromagnética.
- **Calibração:** As câmeras serão calibradas com periodicidade não inferior à estabelecida pela NBR 17252 (item 6.5), complementada pelas recomendações do fabricante, com procedimento documentado e incluído no protocolo de manutenção preventiva.

3.6. Monitoramento do Sistema de Sinalização Ativa

O item 5 da NBR 17252:2026 estabelece que o monitoramento dos sistemas de alerta de PN deve conter, no mínimo, as funções de registro de dados, análise de dados e supervisão remota. O sistema de monitoramento deve transmitir as condições de alarme e/ou evento para um sistema centralizado, por meio de uma rede de comunicação, e deve ter a capacidade de realizar autodiagnóstico do canal de comunicação.

O projeto desenvolverá uma camada de monitoramento do sistema de sinalização ativa que atende a cada um dos requisitos do item 5 da norma, integrada ao módulo de computação de borda instalado em cada PN:

- **Autodiagnóstico na inicialização (requisito 5a):** Na inicialização ou reinicialização, o sistema executará rotina de autodiagnóstico que verifica o estado de cada dispositivo monitorado (sinais luminosos, cancelas, detectores de tráfego ferroviário, controlador de sinalização). Ao concluir com sucesso, o sistema indicará o local da PN e informará ao sistema centralizado (plataforma integrada) que está online e operacional. Em caso de falha no autodiagnóstico, será gerado alarme específico com identificação do componente e natureza da falha.
- **Diagnóstico periódico (requisito 5b):** Os diagnósticos do sistema verificarão periodicamente a funcionalidade de cada dispositivo monitorado e incluirão diagnósticos da rede de comunicação (latência, perda de pacotes, disponibilidade do canal). O intervalo de verificação será configurável por tipo de dispositivo, com valores padrão definidos em conjunto com a equipe de sinalização da concessionária durante o levantamento técnico (Etapa 1), observando requisitos operacionais e limites de carga do sistema de sinalização ativa; como referência inicial, intervalos da ordem de dezenas de segundos para dispositivos críticos e de minutos para dispositivos auxiliares. O sistema continuará a monitorar e responder às alterações de status enquanto o diagnóstico estiver sendo realizado, sem interrupção da operação normal.
- **Watchdog (requisito 5c):** O módulo de computação de borda implementará temporizador do tipo watchdog para verificação contínua do programa de monitoramento. Se o tempo do watchdog expirar (indicando travamento ou anomalia do software), o sistema tentará se reiniciar automaticamente. Após reinicialização, executará o autodiagnóstico completo (requisito 5a) antes de

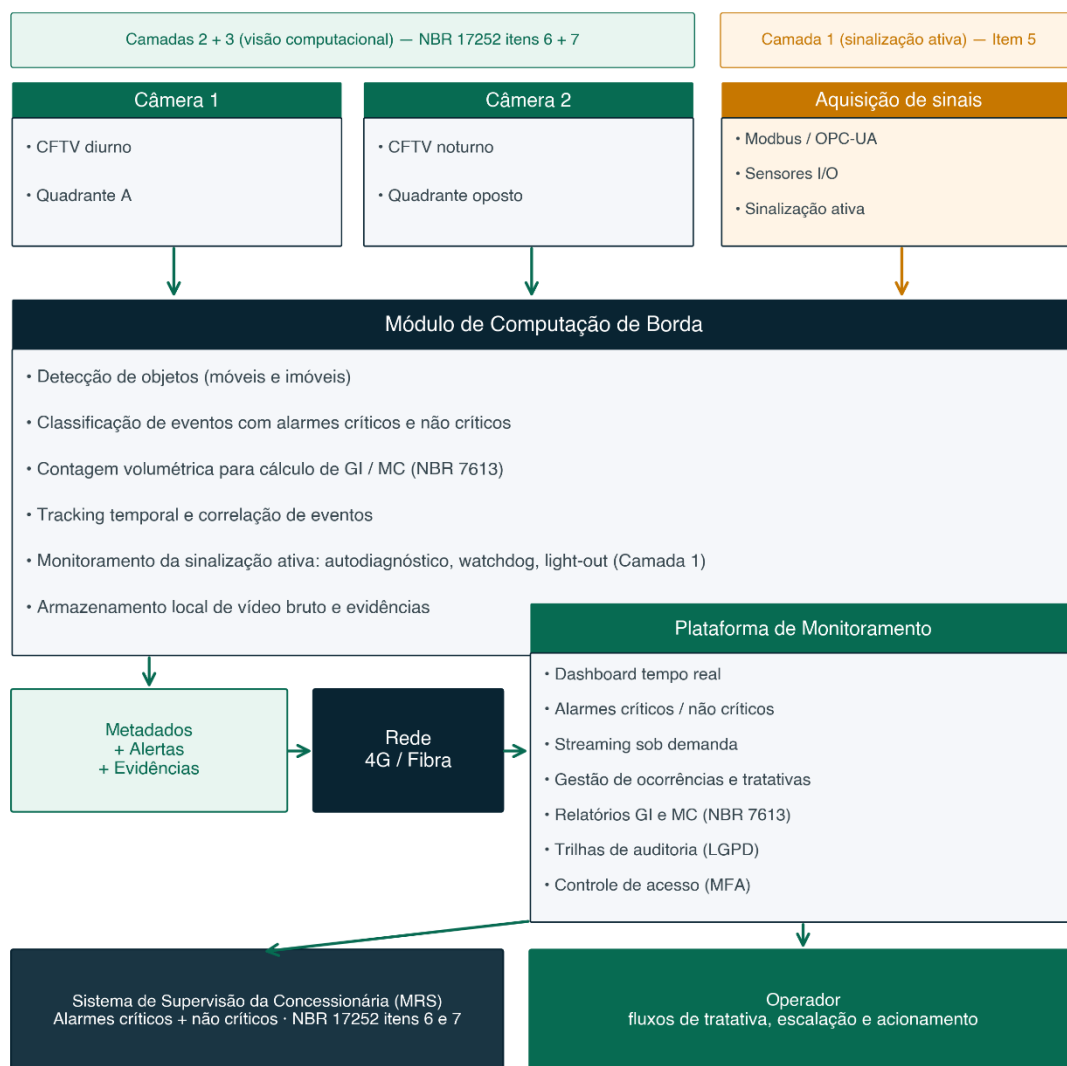
retomar a operação normal. Eventos de expiração de watchdog serão registrados e reportados ao sistema centralizado.

- **Monitoramento de light-out (requisito 5d):** O sistema monitorará as condições de light-out das unidades de LED dos sinais luminosos e demais funções do sistema de sinalização ativa, para verificar as condições operacionais. O monitoramento poderá utilizar sensores de corrente/tensão nos circuitos de alimentação dos LEDs e/ou análise de imagem das câmeras CFTV existentes para confirmação visual do estado dos sinais luminosos, com a escolha da abordagem por PN definida durante o levantamento técnico (Etapa 1) em função da infraestrutura elétrica disponível e do posicionamento das câmeras. A detecção de condição de light-out gerará alarme não crítico com identificação do sinal afetado e timestamp, transmitido ao sistema centralizado.
- **Identificação de alarmes falsos em manutenção (requisito 5e):** O sistema implementará modo de manutenção ativável por operador autorizado (via plataforma integrada), que permite identificar e sinalizar alarmes gerados durante tarefas de manutenção programada. Os alarmes gerados nesse período serão registrados com marcação de “manutenção em curso”, permitindo diferenciá-los de alarmes operacionais reais. O modo de manutenção terá duração máxima configurável e será encerrado automaticamente ao expirar, evitando que permaneça ativo inadvertidamente.
- **Registro e análise de dados:** Todos os dados de monitoramento (estados dos dispositivos, alarmes, diagnósticos, eventos de watchdog, condições de light-out) serão registrados localmente no módulo de computação de borda com marcação temporal sincronizada e transmitidos ao sistema centralizado (plataforma integrada de monitoramento) para consolidação, análise de tendências e geração de relatórios. O registro permitirá análise histórica de disponibilidade e desempenho do sistema de sinalização por PN.
- **Transmissão de condições de alarme e evento:** O sistema transmitirá as condições de alarme e evento para a plataforma integrada por meio de rede de comunicação (4G/fibra), com autodiagnóstico do canal de comunicação conforme exigido pela norma. Em caso de falha de comunicação, os dados serão armazenados localmente e sincronizados quando a conectividade for restabelecida.

Abordagem de integração: A camada de monitoramento do sistema de sinalização ativa será desenvolvida para integração não intrusiva com os sistemas de sinalização existentes nas PNs da MRS. O módulo de computação de borda coletará dados por meio de interfaces padronizadas (leitura de sinais elétricos, protocolos industriais), em modalidade de leitura e intercâmbio de telemetria, diagnóstico e estados operacionais, sem modificação dos controladores de sinalização existentes nem comando da lógica de sinalização operacional. A definição detalhada das interfaces de integração para cada PN será realizada durante o levantamento técnico (Etapa 1), em conjunto com a equipe de sinalização da concessionária.

Figura 1: Arquitetura do Sistema — PN Inteligente

3 camadas operacionais (NBR 17252 itens 5+6+7) com cobertura adicional da NBR 7613 (GI/MC)



O vídeo bruto permanece armazenado localmente no módulo de borda.

Apenas metadados, alertas e evidências transitam pela rede.

3.7. Plataforma Integrada de Monitoramento

A plataforma web de gestão e visualização consolidará os dados das três camadas operacionais (monitoramento de sinalização, vigilância e detecção) em uma interface unificada. A arquitetura permitirá implantação flexível: em infraestrutura de nuvem ou em servidor dedicado on-premises, conforme requisitos de hospedagem a serem definidos. Os requisitos de infraestrutura de TI serão documentados para viabilizar ambos os cenários. A plataforma incluirá:

- **Painel de saúde do sistema de sinalização ativa (Camada 1):** Visualização do estado operacional de cada dispositivo de sinalização monitorado por PN: status de funcionamento (operacional, degradado, falha), resultado do último autodiagnóstico, histórico de alarmes e eventos, condições de light-out, expiração de watchdog e diagnósticos de comunicação. Indicadores visuais de saúde por PN (semáforo: verde/amarelo/vermelho) com drill-down para detalhes de cada dispositivo. Notificações automáticas quando o modo de manutenção é ativado ou expirado.
- **Dashboard de vigilância em tempo real (Camada 2):** Visualização do status de cada PN monitorada, incluindo visão geral do funcionamento das câmeras CFTV (conforme item 6.2a da NBR 17252), contagem volumétrica com gráficos dinâmicos e lista de eventos recentes. Visualização ao vivo (streaming) de câmeras de qualquer PN sob demanda do operador, com ativação automática quando um evento de risco é detectado.
- **Gestão de alarmes críticos e não críticos:** Envio de alarmes críticos (obstáculos detectados na pista de rolamento) e alarmes não críticos (anomalias do sistema, falhas de sinalização) aos sistemas operacionais da concessionária, conforme item 7c da NBR 17252. Os alarmes são gerados em formato e protocolo compatíveis com esses sistemas, de modo a suportar as funções de intertravamento previstas no item 7d da norma quando implementadas pela concessionária. Configuração de alertas automáticos por tipo, gravidade e classificação da PN; envio por e-mail, SMS/telefone e integração com sistemas internos via API REST.
- **Consulta pós-ocorrência e vídeo sob demanda:** Busca por PN, data, tipo de evento e status; reprodução e download de vídeo gravado (contínuo e clipes de evento) diretamente do dispositivo de borda; linha do tempo da ocorrência com evidências e logs. A consulta de vídeo permite ao operador verificar a natureza do obstáculo detectado via CFTV e determinar as ações cabíveis, conforme item 7e da NBR 17252.
- **Gestão de ocorrências e tratativas:** Registro das ações tomadas em resposta a cada evento detectado (tratativas locais), com campos para responsável, ação realizada, status e desfecho. Histórico completo de tratativas vinculado a cada ocorrência para consulta e auditoria.
- **Relatórios integrados:** Geração de relatórios periódicos (diários, semanais, mensais) com: indicadores de desempenho do sistema de vigilância e detecção, tendências de tráfego e contagem volumétrica, análise de risco, cálculo de GI e MC por PN com atualização periódica, e indicadores de saúde e disponibilidade do sistema de sinalização ativa. Relatórios consolidados por PN e por malha.
- **Trilhas de auditoria:** Registro completo de acessos, consultas, downloads e alterações; retenção de imagens conforme política interna da concessionária.
- **Controle de acesso:** Perfis de usuário configuráveis por PN e por nível de permissão.
- **Segurança:** Autenticação multifator, criptografia de dados em trânsito (TLS) e em repouso, e conformidade com políticas de segurança da informação da concessionária.

3.8. Metodologia de Validação

A validação da plataforma abrangerá as três camadas operacionais e a frente exploratória, com protocolos específicos para cada componente:

Validação do monitoramento de sinalização ativa (Camada 1):

- **Verificação funcional requisito a requisito:** Checklist de aderência aos requisitos do item 5 da NBR 17252 (5a a 5e), verificando: autodiagnóstico na inicialização com notificação ao sistema centralizado, diagnóstico periódico com verificação de funcionalidade e comunicação, watchdog com tentativa de reinicialização, monitoramento de light-out com geração de alarme, identificação de alarmes falsos durante manutenção.
- **Testes de cenários de falha:** Simulação de falhas controladas nos dispositivos de sinalização (desconexão de sinal luminoso, interrupção de comunicação, travamento de software) para verificar que o sistema de monitoramento detecta e reporta corretamente cada tipo de anomalia.
- **Validação do registro de dados:** Verificação de completude e integridade dos dados registrados (marcação temporal, identificação de dispositivo, tipo de evento) durante período de operação contínua.

Validação da vigilância e detecção de obstáculos (Camadas 2 e 3):

- **Monitoramento operacional:** Operação contínua de 14 dias em condições reais por PN, com registro de todas as detecções e análise de falsos positivos/negativos. Esta é a validação primária do sistema de visão computacional.
- **Testes com eventos sintéticos:** Simulação de no mínimo 30 eventos por tipo de detecção, em condições controladas, para aferição de precisão e recall. Complementa o monitoramento operacional para tipos de evento raros ou difíceis de observar naturalmente.
- **Métricas de aceitação:** F1-score $\geq 95,4\%$ em condições operacionais padrão (dia, boa visibilidade) e $\geq 85\%$ em condições adversas (chuva, neblina, noite); latência ponta a ponta < 2 segundos; disponibilidade $\geq 90\%$.
- **Análise estatística:** Os resultados incluirão intervalos de confiança de 95% para todas as métricas reportadas, com análise de significância baseada no tamanho da amostra coletada.

Validação da plataforma integrada:

- **Validação funcional:** Verificação das funcionalidades do dashboard (incluindo painel de saúde da sinalização), alertas, relatórios, gestão de ocorrências e controle de acesso conforme requisitos definidos na seção 3.1.6.
- **Verificação de conformidade normativa:** Checklist de aderência aos requisitos dos itens 5, 6 e 7 da NBR 17252, verificando: monitoramento de sinalização com autodiagnóstico e supervisão remota (item 5), posicionamento de câmeras em quadrantes opostos com cobertura da zona completa da PN e operação diurna e noturna (item 6), geração de alarmes críticos e não críticos com envio aos sistemas operacionais da concessionária (item 7).

Validação da frente exploratória (OE8 e OE9):

- **Eixo 1 (Interoperabilidade):** Validação da prova de conceito de comunicação via protocolo aberto entre a plataforma PN Inteligente e um controlador comercial da bancada do Eixo 2 (não os controladores existentes nas PNs), verificando a troca de dados em ambos os sentidos (leitura de estados do controlador e envio de mensagens de telemetria e diagnóstico, sem comando da lógica de sinalização operacional), latência de comunicação e integridade dos dados transmitidos.
- **Eixo 2 (Controladores que atendam aos requisitos de segurança ferroviária):** Validação dos testes em bancada conforme protocolo documentado, com verificação do comportamento do controlador comercial em conformidade com SIL 4 sob cenários operacionais representativos, com registro de resultados para o roadmap tecnológico.

A meta de $F1 \geq 95,4\%$ é atingível por modelos modernos (YOLO, EfficientDet) em benchmarks padronizados (COCO, Pascal VOC). O desafio de pesquisa deste projeto é atingir esse nível em condições reais de PNs brasileiras, com hardware embarcado de baixo consumo, operação contínua 24x7 e cenários adversos (chuva, neblina, contraluz, noite) não representados em datasets existentes.

3.9. Frente Exploratória: Interoperabilidade e Sinalização Ativa Digital

A frente exploratória tem como objetivo investigar tecnologias de digitalização para a sinalização ativa de PNs ferroviárias, produzindo estudo de viabilidade, roadmap tecnológico e prova de conceito em bancada. Esta frente é claramente delimitada como pesquisa e avaliação, não como desenvolvimento de produto certificado nem substituição dos sistemas de sinalização existentes.

A pesquisa está organizada em dois eixos complementares:

Eixo 1: Protocolos abertos e interfaces de interoperabilidade (OE8)

A digitalização das redes ferroviárias é uma tendência global que avança sobre os sistemas de sinalização, historicamente operados com interfaces proprietárias e protocolos fechados. Na Europa, iniciativas como o Eulynx (consórcio de gestores de infraestrutura ferroviária europeus) desenvolvem especificações para interfaces padronizadas e abertas entre componentes de sinalização, visando eliminar a dependência de fornecedores únicos (vendor lock-in) e permitir a interoperabilidade entre equipamentos de diferentes fabricantes. No Brasil, os sistemas de sinalização ativa de PNs operam predominantemente com interfaces proprietárias, dificultando a integração de novas tecnologias e a manutenção por diferentes fornecedores.

O projeto investigará a adoção de protocolos abertos e interfaces padronizadas para comunicação entre sistemas de PN, alinhado a essa tendência internacional. O conceito central é interoperabilidade e eliminação de vendor lock-in; o Eulynx é citado como referência de iniciativa internacional nessa direção, mas o foco do estudo é no conceito mais amplo de interfaces abertas aplicáveis ao contexto brasileiro.

Escopo do estudo: - Mapeamento de interfaces existentes nos sistemas de sinalização ativa das PNs da MRS (protocolos, formatos de dados, pontos de integração disponíveis). - Revisão de protocolos abertos aplicáveis em três categorias complementares: (i) padrões específicos de sinalização ferroviária (Eulynx Interface Specifications como referência e protocolos do ecossistema ERTMS/ETCS); (ii) padrões industriais de automação e

supervisão (OPC-UA, MQTT); e (iii) padrões de dados estruturados aplicáveis à disponibilização de informações operacionais da PN Inteligente. - Especificação de interfaces abertas para disponibilização e intercâmbio de dados operacionais da PN Inteligente (leitura, supervisão, telemetria) e para interconexão com componentes de sinalização (controladores, dispositivos, sensores) que adotem protocolos abertos, aplicável a cenários de digitalização da sinalização ferroviária. - Prova de conceito de comunicação via protocolo aberto entre a plataforma PN Inteligente e um controlador comercial da bancada do Eixo 2 (não os controladores existentes nas PNs), com troca de dados em ambos os sentidos (leitura de estados do controlador e envio de mensagens de telemetria e diagnóstico, sem comando da lógica de sinalização operacional), demonstrando a viabilidade técnica da abordagem.

Entregáveis: relatório de estudo de interoperabilidade, especificação de interfaces abertas e prova de conceito funcional.

Eixo 2: Controladores que atendam aos requisitos de segurança ferroviária para sinalização ativa (OE9)

Os controladores que atendam aos requisitos de segurança ferroviária (SIL 4 conforme IEC 61508/EN 50129 ou conformidade com padrões AREMA) representam o estado da arte em segurança para aplicações ferroviárias e já são utilizados no Brasil na sinalização ativa de PNs. O avanço para a digitalização e a interoperabilidade dessas PNs, entretanto, requer a avaliação de alternativas que combinem três atributos: integridade de segurança já estabelecida, fornecimento e suporte técnico no Brasil e capacidade de habilitar a integração com camadas digitais de monitoramento, vigilância e detecção. Essa combinação ainda não foi sistematicamente estudada no contexto brasileiro. A avaliação dessas alternativas permitirá construir um roadmap para a evolução dos sistemas de sinalização, complementando o estudo de interoperabilidade do Eixo 1.

Escopo do estudo: - Levantamento de requisitos de integridade de segurança para sinalização ativa de PNs, com base nas normas internacionais (IEC 61508, EN 50126, EN 50128, EN 50129) e nos padrões AREMA aplicáveis. - Avaliação de controladores comerciais que atendam aos requisitos de integridade de segurança (SIL 4 ou conformidade AREMA) para aplicação em sinalização ferroviária, priorizando soluções com fornecimento e suporte técnico disponíveis no Brasil: adequação funcional, conformidade normativa, interfaces disponíveis, requisitos de integração. - Testes em bancada: validação em sistema de demonstração composto por controlador comercial em conformidade com requisitos de integridade de segurança ferroviária (SIL 4) e componentes integradores que reproduzem cenários operacionais representativos de PN, para análise do comportamento da lógica de controle e estudo de interfaces. - Elaboração de roadmap para desenvolvimento de solução de sinalização ativa digital para PNs, com identificação de etapas, investimentos, prazos e requisitos de certificação.

Entregáveis: relatório de viabilidade técnica, roadmap tecnológico e relatório de testes em bancada.

Nota: Esta frente é exploratória. O foco está em avaliar a integração e a aplicabilidade de hardware comercial existente ao contexto de PNs brasileiras, utilizando controladores comerciais que atendam aos requisitos de integridade de segurança ferroviária. O projeto não prevê o desenvolvimento de hardware novo para sinalização, nem a certificação de qualquer componente desenvolvido pela Embeddo, nem a substituição dos sistemas de sinalização existentes nas PNs piloto.

3.10. Conformidade com a LGPD

O sistema de monitoramento captura imagens de vias públicas que podem conter dados pessoais (faces de pedestres, placas de veículos). O projeto adotará as seguintes medidas de conformidade com a Lei nº 13.709/2018 (LGPD):

- **Base legal:** Legítimo interesse para garantia da segurança ferroviária e proteção da vida, conforme Art. 7º, incisos VII e IX da LGPD.
- **Minimização de dados:** O processamento de borda realiza a análise de imagens localmente no dispositivo de borda. Para cada evento detectado, o sistema transmite ao sistema centralizado os metadados do evento (tipo, coordenadas, timestamp, classificação) e um recorte de vídeo contendo o trecho relevante (snapshot e clipe pré/pós-evento), suficientes para a tratativa operacional. O vídeo contínuo completo permanece armazenado localmente no dispositivo de borda por período de retenção configurável conforme política da concessionária, sendo sobrescrito automaticamente ao final do período. O streaming de vídeo ao vivo é ativado sob demanda do operador e restrito a sessões autenticadas com registro em trilha de auditoria.
- **Anonimização:** A proteção dos dados pessoais presentes nas imagens é assegurada prioritariamente pelas demais medidas descritas neste item: controle de acesso por perfil, retenção limitada, trilhas de auditoria de todas as consultas e uso das imagens restrito às finalidades de segurança ferroviária previstas na base legal. A implementação de técnicas de anonimização automática por edição de imagem (como desfoque de faces e placas) será avaliada no roadmap do sistema em função da demanda operacional e regulatória, não estando contemplada no escopo deste projeto piloto.
- **Controle de acesso:** Acesso às imagens será restrito por perfis de usuário com autenticação e registro de todas as operações (trilhas de auditoria).
- **Retenção e descarte:** Política de retenção de imagens será definida conforme política interna de classificação de informação aplicável.
- **Responsabilidades:** Os papéis de controlador e operador dos dados serão definidos conforme a LGPD, considerando as atribuições de cada parte durante o desenvolvimento e a operação assistida.
- **RIPD:** Será elaborado Relatório de Impacto à Proteção de Dados Pessoais (RIPD) antes do início da operação do sistema, conforme orientação da ANPD, dado que o tratamento envolve imagens de vias públicas com dados pessoais (faces e placas de veículos).

3.11. Quadro Sinóptico: Objetivos, Métodos, Etapas e Produtos

Objetivo Específico	Método/Técnica Principal	Etapas	Produto
OE1. Sistema de monitoramento da sinalização ativa	IoT, autodiagnóstico, watchdog, monitoramento light-out, interfaces industriais	Etapas 1, 3, 4, 5	P1

Objetivo Específico	Método/Técnica Principal	Etapas	Produto
OE2. Modelos de visão computacional para vigilância e detecção	YOLO/EfficientDet, MobileNet SSD, modelos próprios Embeddo + quantização + transfer learning incremental	Etapas 3	P1
OE3. Módulo de computação de borda com interfaces para sinalização	Projeto eletrônico + prototipagem + testes de aceitação	Etapas 2	P1
OE4. Plataforma integrada de monitoramento, vigilância e detecção	Desenvolvimento web (API REST + dashboard + painel de saúde da sinalização)	Etapas 3	P1
OE5. Instalação e comissionamento nas 4 PNs	Projeto executivo + instalação sequencial + calibração + testes	Etapas 1, 4, 5	P1, P2
OE6. Validação de desempenho	Monitoramento operacional 14 dias + eventos sintéticos + checklist NBR 17252	Etapas 5	P2
OE7. Metodologia de análise integrada de risco	Correlação eventos + GI/MC + sinalização + tempos de segurança; contagem nível A	Etapas 6, 7	P4
OE8. Estudo de protocolos abertos e interoperabilidade	Mapeamento, revisão bibliográfica, especificação de interfaces, PoC	Etapas 8	P5
OE9. Avaliação de controladores que atendam aos requisitos de segurança ferroviária para sinalização ativa	Levantamento normativo (SIL 4 e AREMA), avaliação de controladores comerciais com suporte no Brasil, testes em bancada, roadmap	Etapas 8	P6

P3 (Documentação técnica e material de capacitação) é produzido na Etapa 7 como consolidação transversal dos resultados dos demais OEs.

3.12. Etapas

O projeto está organizado em 8 etapas distribuídas ao longo de 24 meses. As Etapas 1 a 7 constituem o desenvolvimento operacional da plataforma (três camadas), incluindo documentação final, consolidação de resultados e transferência de produtos. A Etapa 8 abrange a frente exploratória, executada em paralelo às etapas operacionais.

Etapas 1: Levantamento Técnico e Projeto Executivo (Meses 1 a 4)

Objetivo: Caracterizar as 4 PNs selecionadas, mapear os sistemas de sinalização ativa existentes e elaborar o projeto executivo de instalação da plataforma completa.

Atividades:

1.1. Seleção e caracterização das PNs - 1.1.1. Definição das 4 PNs priorizando diversidade de cenários (alto/baixo fluxo, diferentes condições ambientais e de conectividade) - 1.1.2. Levantamento de Grau de Importância (GI) e Momento de

Circulação (MC) das PNs selecionadas conforme NBR 7613, incluindo medição do Triângulo de Visibilidade para classificação completa - 1.1.3. Mapeamento de infraestrutura existente (energia, conectividade, sinalização ativa/passiva) - 1.1.4. Levantamento de registros históricos de eventos nas PNs selecionadas como baseline para indicadores de impacto

1.2. Mapeamento dos sistemas de sinalização ativa - 1.2.1. Inventário dos dispositivos de sinalização ativa em cada PN (sinais luminosos, cancelas, detectores de tráfego ferroviário, controladores) - 1.2.2. Levantamento de interfaces disponíveis nos controladores de sinalização (protocolos, pontos de acesso, sinais elétricos monitoráveis) - 1.2.3. Documentação dos modos de operação e estados de cada dispositivo (normal, degradado, falha, manutenção) - 1.2.4. Avaliação de viabilidade de integração não intrusiva para cada PN

1.3. Visitas técnicas - 1.3.1. Visitas diurnas e noturnas a cada PN - 1.3.2. Análise de fluxos rodoviários e ferroviários, visibilidade e ângulos de cobertura de câmera - 1.3.3. Captura de imagens de referência para dimensionamento do sistema de câmeras - 1.3.4. Avaliação de riscos: vandalismo, condições ambientais, interferência eletromagnética

1.4. Projeto executivo - 1.4.1. Estudo de viabilidade civil, elétrica, de rede e segurança física - 1.4.2. Elaboração de plantas e cortes com posicionamento de câmeras, postes/mastros e módulos de aquisição de sinais de sinalização - 1.4.3. Detalhamento de infraestrutura elétrica e de rede (dimensões, distâncias, conexões) - 1.4.4. Definição de arquitetura de conectividade e proteção antivandalismo por PN - 1.4.5. Levantamento de requisitos de integração com sistemas operacionais da concessionária: protocolos disponíveis, restrições de rede/firewall e formato de dados - 1.4.6. Especificação das interfaces de integração com o sistema de sinalização ativa por PN, com base no mapeamento da atividade 1.2 - 1.4.7. Definição do fluxograma de tratativas de eventos: mapeamento dos procedimentos de resposta a cada tipo de evento detectado (responsáveis, ações, prazos, escalção), em conjunto com a equipe operacional da concessionária - 1.4.8. Verificação de conformidade do projeto executivo com os requisitos dos itens 5, 6 e 7 da NBR 17252 - 1.4.9. Revisão e aprovação do projeto executivo

Desafios técnicos: O desenvolvimento buscará identificar quais variáveis ambientais e geométricas das PNs brasileiras mais impactam o desempenho de sistemas de visão computacional, como a diversidade de cenários entre PNs afeta os requisitos de configuração do sistema, e quais são as restrições de interface dos controladores de sinalização existentes para a implementação do monitoramento não intrusivo.

Resultados esperados: Projeto executivo aprovado para 4 PNs; relatório de caracterização com GI, MC e classificação de cada PN; mapeamento dos sistemas de sinalização ativa com especificação de interfaces; fluxograma de tratativas validado com a equipe operacional.

Responsável: Coordenador Técnico do Projeto (Embeddo)

Critério de medição e faturamento: Projeto executivo entregue e aprovado para as 4 PNs; relatório de caracterização com levantamento de GI e MC, mapeamento de infraestrutura, inventário de sinalização ativa e requisitos de integração; fluxograma de tratativas aprovado pela concessionária.

Etapa 2: Desenvolvimento de Hardware (Meses 3 a 10)

Objetivo: Projetar, fabricar e testar o módulo de computação de borda com interfaces para monitoramento de sinalização ativa.

Atividades:

2.1. Projeto de hardware - 2.1.1. Definição da arquitetura do módulo (processador, memória, armazenamento, interfaces de vídeo, interfaces de sinalização) - 2.1.2. Seleção de componentes (processador com acelerador de inferência (GPU ou NPU), câmeras IP, modem LTE, baterias, módulo de aquisição de sinais) - 2.1.3. Projeto eletrônico do painel de comando com grau de proteção IP65 e resistência a impactos IK08 ou superior - 2.1.4. Projeto do gateway de comunicação para intercâmbio de dados de telemetria, diagnóstico e estados operacionais com controladores de sinalização (suporte a Modbus, OPC-UA ou equivalente), sem comando da lógica de sinalização operacional - 2.1.5. Projeto do sistema de alimentação com redundância (rede + bateria) - 2.1.6. Projeto do sistema de dissipação térmica para operação em ambiente externo

2.2. Prototipagem - 2.2.1. Fabricação de protótipo funcional (1 unidade) - 2.2.2. Testes de bancada: funcionalidade, estresse térmico, consumo energético - 2.2.3. Testes de compatibilidade eletromagnética (EMC) - 2.2.4. Validação da autonomia do banco de baterias em cenário de falha de energia - 2.2.5. Validação das interfaces de aquisição de sinais de sinalização com equipamento de teste (conclusão até o mês 8)

2.3. Produção - 2.3.1. Revisão do projeto conforme resultados dos testes de prototipagem - 2.3.2. Fabricação de 4 unidades de produção + 1 unidade sobressalente - 2.3.3. Testes de aceitação para cada unidade - 2.3.4. Elaboração de documentação técnica de hardware (esquemáticos, BOM, manual de montagem)

Desafios técnicos: O desenvolvimento buscará identificar a configuração de hardware embarcado que ofereça o melhor trade-off custo-desempenho para inferência de baixa latência no dispositivo de borda e monitoramento de sinalização em ambiente externo, considerando o impacto das condições térmicas e de vibração do ambiente ferroviário na estabilidade dos componentes, e a diversidade de interfaces dos controladores de sinalização existentes.

Resultados esperados: 5 módulos de computação de borda fabricados e testados, com interfaces validadas para monitoramento de sinalização; documentação técnica completa de hardware.

Responsável: Líder de Hardware (Embeddo)

Critério de medição e faturamento: 5 unidades aprovadas em testes de aceitação (incluindo interfaces de sinalização); documentação técnica de hardware entregue.

Etapa 3: Desenvolvimento de Software, Modelos de IA e Sistema de Monitoramento (Meses 2 a 10)

Objetivo: Desenvolver e otimizar os modelos de visão computacional, o sistema de monitoramento da sinalização ativa e a plataforma integrada.

Atividades:

3.1. Coleta e preparação de dados - 3.1.1. Captura de imagens de PNs em diferentes condições (dia, noite, chuva, neblina, contraluz). Nos meses 2 e 3, a coleta utiliza PNs candidatas e imagens de referência do acervo da Embeddo e da MRS para construção do pipeline de anotação e treinamento inicial dos modelos. A partir do Gate 1 (mês 4), com as 4 PNs definidas, a coleta é direcionada às PNs selecionadas para fine-tuning e

validação. - 3.1.2. Anotação do dataset de treinamento (bounding boxes, classes de objetos, eventos de risco) - 3.1.3. Geração de dados sintéticos para cenários raros (quase-acidentes, obstruções atípicas) - 3.1.4. Curadoria e validação da qualidade do dataset

3.2. Treinamento e otimização de modelos - 3.2.1. Treinamento de modelos de detecção de objetos (YOLO, MobileNet SSD ou equivalente, incluindo modelos próprios Embeddo) - 3.2.2. Fine-tuning com dados específicos das PNs selecionadas - 3.2.3. Aplicação de técnicas de otimização: quantização (FP32 para INT8), pruning, knowledge distillation - 3.2.4. Validação de desempenho no hardware-alvo (latência, acurácia, consumo de memória) - 3.2.5. Desenvolvimento de algoritmos de tracking e análise temporal de eventos - 3.2.6. Desenvolvimento de classificadores de condições ambientais e estados de falha de câmera

3.3. Desenvolvimento do software embarcado - 3.3.1. Pipeline de inferência em tempo real (captura, pré-processamento, inferência, pós-processamento) - 3.3.2. Motor de regras para classificação de eventos (alarmes críticos e não críticos) - 3.3.3. Módulo de contagem volumétrica (pedestres, veículos leves, veículos pesados, composições ferroviárias) - 3.3.4. Módulo de geração de evidências (snapshots, vídeo pré/pós-evento) - 3.3.5. Módulo de comunicação (transmissão de eventos e métricas para a plataforma; streaming de vídeo ao vivo sob demanda) - 3.3.6. Sistema de autodiagnóstico e monitoramento de saúde do equipamento

3.4. Desenvolvimento do sistema de monitoramento de sinalização ativa (Camada 1, Meses 2 a 8) - 3.4.1. Software de aquisição de sinais dos dispositivos de sinalização via interfaces definidas no projeto executivo - 3.4.2. Implementação do autodiagnóstico na inicialização com notificação ao sistema centralizado (requisito 5a) - 3.4.3. Implementação do diagnóstico periódico de funcionalidade e comunicação (requisito 5b) - 3.4.4. Implementação do watchdog com tentativa de reinicialização automática (requisito 5c) - 3.4.5. Implementação do monitoramento de light-out dos sinais luminosos (requisito 5d) - 3.4.6. Implementação do modo de manutenção com identificação de alarmes falsos (requisito 5e) - 3.4.7. Módulo de registro, análise e transmissão de dados de monitoramento ao sistema centralizado

3.5. Desenvolvimento da plataforma integrada de monitoramento - 3.5.1. Backend: API de ingestão de dados (vigilância, detecção e monitoramento de sinalização), armazenamento, processamento de relatórios - 3.5.2. Frontend: painel de saúde do sistema de sinalização ativa, dashboard de vigilância em tempo real com streaming ao vivo, gestão de alarmes - 3.5.3. Módulo de consulta pós-ocorrência e vídeo sob demanda - 3.5.4. Módulo de gestão de ocorrências e registro de tratativas - 3.5.5. Módulo de trilhas de auditoria e controle de acesso - 3.5.6. Módulo de relatórios periódicos integrados (vigilância + sinalização + volumetria) e exportação de dados - 3.5.7. Integração com sistemas operacionais da concessionária - 3.5.8. Testes de usabilidade e segurança da plataforma

Desafios técnicos: O desenvolvimento buscará identificar a arquitetura de modelo que atinja $F1 \geq 95,4\%$ em condições padrão e $\geq 85\%$ em condições adversas após quantização para INT8 em processador de borda, determinar o volume mínimo de amostras anotadas por classe para convergência no cenário de PNs, definir o modelo adequado para correlação entre eventos de risco e contagem volumétrica para cálculo de GI e MC, e validar a viabilidade de monitoramento não intrusivo dos dispositivos de sinalização ativa existentes.

Resultados esperados: Modelos de IA treinados e otimizados para edge; software embarcado funcional com inferência de baixa latência e monitoramento de sinalização;

plataforma integrada operacional com painel de saúde da sinalização, dashboard de vigilância e gestão de ocorrências; dataset anotado de PNs.

Responsável: Coordenador Técnico (Embeddo), em parceria com o SENAI CIMATEC

Critério de medição e faturamento: Modelos de IA com F1 $\geq$ 95,4% em condição padrão e $\geq$ 85% em condições adversas em dataset de teste (pré-campo); software embarcado executando inferência e monitoramento de sinalização no módulo de computação de borda; plataforma integrada funcional com as três camadas; dataset anotado com tamanho suficiente para convergência dos modelos, definido conforme resultado da atividade 3.2.4, observado como piso mínimo 5.000 imagens.

Publicação e disseminação: Resultados de otimização de modelos para edge serão submetidos ao ANPET ou congresso equivalente.

Etapla 4: Instalação e Comissionamento (Meses 6 a 14)

Objetivo: Instalar a plataforma completa (três camadas) nas 4 PNs e realizar calibração e comissionamento.

Atividades:

4.1. Instalação e comissionamento do monitoramento de sinalização ativa (Camada 1, Meses 6 a 9) - 4.1.1. Instalação dos módulos de aquisição de sinais nas 4 PNs e conexão com o sistema de sinalização ativa conforme especificação da Etapa 1 - 4.1.2. Configuração e verificação do monitoramento de sinalização ativa por PN (autodiagnóstico, watchdog, light-out, comunicação) - 4.1.3. Integração do painel de saúde da sinalização com o sistema centralizado (plataforma integrada de monitoramento), preservando a autonomia das funções críticas no dispositivo de borda - 4.1.4. Verificação de conformidade com o item 5 da NBR 17252 (autodiagnóstico, supervisão remota, watchdog, light-out, identificação de alarmes falsos, transmissão de condições de alarme)

4.2. Instalação física das Camadas 2 e 3 (Meses 9 a 12) - 4.2.1. Fornecimento de infraestrutura civil (postes, mastros, eletrodutos) conforme projeto executivo - 4.2.2. Fornecimento de infraestrutura elétrica (alimentação, proteção contra surtos, aterramento) - 4.2.3. Instalação de câmeras, módulos de computação de borda e painéis de comando - 4.2.4. Instalação de sistema de conectividade (antenas LTE, cabeamento)

4.3. Comissionamento das Camadas 2 e 3 (Meses 10 a 14) - 4.3.1. Calibração de câmeras por PN (ajuste de foco, ângulo, exposição) - 4.3.2. Configuração de zonas de interesse e linhas virtuais por PN - 4.3.3. Ajuste fino dos modelos de IA com amostras locais de cada PN (dia/noite/chuva/neblina) - 4.3.4. Configuração da plataforma: criação de usuários, perfis, alertas, relatórios - 4.3.5. Testes funcionais integrados por PN (detecção, alertas, comunicação, evidências) - 4.3.6. Verificação de conformidade com os itens 6 e 7 da NBR 17252 (cobertura visual conforme item 6.3, operação em iluminação mínima de 0,5 lux, geração de alarmes críticos e não críticos)

4.4. Integração sistêmica (Meses 12 a 14) - 4.4.1. Integração de alertas com sistemas operacionais da concessionária - 4.4.2. Configuração dos fluxos de decisão e tratativa de eventos conforme fluxograma definido na Etapa 1 - 4.4.3. Testes de integração ponta a ponta (três camadas + plataforma + sistemas operacionais da concessionária)

Estratégia de instalação: A implantação combina duas dimensões. No eixo do tempo, as camadas são sequenciadas conforme atividades 4.1 a 4.4, de modo que a Camada 1 conclui no M9 (Gate G2.5) e as Camadas 2 e 3 iniciam em seguida. Dentro de cada

camada, as 4 PNs são atendidas sequencialmente, começando pela **PN 1 (MVP)** com cronograma estendido para absorver aprendizados de instalação, calibração e iteração; as **PNs 2, 3 e 4** se beneficiam desses aprendizados e seguem com cronograma mais curto por atividade. A ordem das PNs será definida no projeto executivo (Etapa 1), com a PN MVP priorizando a localidade com melhor infraestrutura disponível para absorver eventuais atrasos. Os prazos específicos por PN e por camada seguem os intervalos indicados em cada bloco de atividades (4.1, 4.2, 4.3).

Desafios técnicos: O desenvolvimento buscará identificar os desafios de instalação e calibração que emergem em PNs com características distintas, quantificar o esforço de fine-tuning local necessário por PN, avaliar a capacidade de generalização dos modelos entre PNs diferentes, e validar a integração não intrusiva com diferentes configurações de controladores de sinalização.

Resultados esperados: 4 PNs com plataforma completa instalada (três camadas), calibrada e integrada; relatório de comissionamento por PN.

Responsável: Coordenador Técnico (Embeddo), com suporte do Técnico de Campo e da equipe operacional e de sinalização da concessionária

Critério de medição e faturamento: Por PN: plataforma instalada (três camadas), calibrada e com teste funcional aprovado (detecção, monitoramento de sinalização, alertas, comunicação com sistemas operacionais da concessionária). Relatório de comissionamento aprovado para cada PN.

Etapa 5: Validação e Testes de Aceitação (Meses 8 a 16)

Objetivo: Validar o desempenho da plataforma conforme critérios de aceitação definidos, abrangendo as três camadas operacionais.

Atividades:

5.1. Validação do monitoramento de sinalização ativa (Camada 1, Meses 8 a 9) -

5.1.1. Checklist de aderência aos requisitos do item 5 da NBR 17252 (5a a 5e) por PN - 5.1.2. Testes de cenários de falha simulados (desconexão de sinal, interrupção de comunicação, travamento) - 5.1.3. Verificação de completude e integridade dos dados registrados - 5.1.4. Validação da transmissão de condições de alarme ao sistema centralizado

5.2. Testes com eventos sintéticos das Camadas 2 e 3 (Meses 13 a 15) -

5.2.1. Planejamento dos cenários de teste (mín. 30 eventos por tipo de detecção) - 5.2.2. Execução dos testes com simulação controlada de eventos - 5.2.3. Registro e análise de resultados: precisão, recall, F1-score por tipo de evento - 5.2.4. Identificação e correção de falhas de detecção

5.3. Monitoramento operacional das Camadas 2 e 3 (Meses 14 a 16) -

5.3.1. Operação contínua de 14 dias em condições reais por PN - 5.3.2. Registro de todas as detecções (verdadeiros positivos, falsos positivos, falsos negativos) - 5.3.3. Medição de latência ponta a ponta e disponibilidade do sistema - 5.3.4. Análise de desempenho em condições adversas (noite, chuva, neblina)

5.4. Relatório de validação consolidado (Meses 15 a 16) -

5.4.1. Consolidação dos resultados de todos os testes (três camadas) - 5.4.2. Comparação com critérios de aceitação ($F1 \geq 95,4\%$ padrão / $\geq 85\%$ adverso, latência $< 2s$, disponibilidade $\geq 90\%$) - 5.4.3. Avaliação de conformidade com os requisitos dos itens 5, 6 e 7 da NBR 17252 -

5.4.4. Elaboração do relatório técnico de validação - 5.4.5. Apresentação dos resultados para aprovação

Desafios técnicos: O desenvolvimento buscará verificar se o desempenho obtido em laboratório se mantém em condições operacionais reais, identificando a taxa de degradação por condição ambiental, os tipos de evento mais desafiadores para a meta de F1, e a eficácia do monitoramento de sinalização em diferentes configurações de controladores.

Resultados esperados: Relatório de validação com métricas de desempenho aprovado, incluindo avaliação de conformidade com NBR 17252 (itens 5, 6 e 7).

Responsável: Coordenador Técnico (Embeddo), em parceria com o SENAI CIMATEC

Critério de medição e faturamento: Relatório de validação entregue, demonstrando F1 $\geq 95,4\%$ em condição padrão e $\geq 85\%$ em condições adversas (amostra mínima de 30 eventos por tipo), monitoramento contínuo de 14 dias em cada PN e checklist de conformidade NBR 17252 (itens 5, 6 e 7) aprovado.

Etapa 6: Operação Assistida e Transferência de Conhecimento (Meses 15 a 22)

Objetivo: Operar a plataforma com suporte técnico, capacitar a equipe operacional e coletar dados para a metodologia de análise integrada de risco.

Atividades:

6.1. Operação assistida - 6.1.1. Monitoramento contínuo do desempenho da plataforma (três camadas) com suporte remoto - 6.1.2. Manutenção preventiva trimestral (limpeza de câmeras, verificação de hardware, verificação de interfaces de sinalização, atualização de firmware) - 6.1.3. Manutenção corretiva sob demanda (SLA: 1 dia útil remoto, 3-5 dias úteis presencial) - 6.1.4. Ajustes nos modelos de IA conforme feedback operacional - 6.1.5. Ajustes no monitoramento de sinalização conforme feedback da equipe de sinalização da concessionária - 6.1.6. Validação do fluxograma de tratativas com eventos reais: acompanhamento da execução dos procedimentos, identificação de ajustes e atualização - 6.1.7. Coleta e consolidação de dados para a metodologia de análise integrada de risco (OE7): correlação entre eventos detectados, dados de contagem volumétrica, GI e MC, dados de monitoramento de sinalização e tempos de segurança calculados para cada PN - 6.1.8. Registro de indicadores de disponibilidade e desempenho

6.2. Transferência de conhecimento - 6.2.1. Treinamento presencial para operadores (operação da plataforma completa, incluindo painel de saúde da sinalização, interpretação de eventos, procedimentos de manutenção básica) - 6.2.2. Treinamento técnico para equipe de TI/automação (administração da plataforma, configuração de alertas, resolução de problemas) - 6.2.3. Treinamento para equipe de sinalização (interpretação dos dados de monitoramento, diagnósticos e manutenção preventiva baseada em dados) - 6.2.4. Elaboração de material de treinamento em formato EAD (vídeos gravados) - 6.2.5. Elaboração de manuais de operação e manutenção

Desafios técnicos: O desenvolvimento buscará avaliar o comportamento dos modelos ao longo do tempo em operação contínua (model drift), definir a frequência necessária de retreinamento, identificar o nível de autonomia alcançado pela equipe operacional após a transferência de conhecimento, e avaliar a utilidade dos dados de monitoramento de sinalização para a manutenção proativa baseada em evidência de anomalia e autodiagnóstico.

Resultados esperados: Plataforma operando de forma autônoma (três camadas); equipe operacional capacitada (incluindo equipe de sinalização); material de treinamento produzido; dados consolidados para metodologia de análise de risco.

Responsável: Coordenador Técnico do Projeto (Embeddo), com participação do SENAI CIMATEC nos workshops e capacitação técnica como contrapartida institucional não-financeira (sem valor monetário alocado a esta etapa para o CIMATEC).

Critério de medição e faturamento: Disponibilidade da plataforma $\geq 90\%$ durante período de operação assistida; treinamentos presenciais realizados (listas de presença); material EAD entregue; manuais de operação e manutenção entregues.

Etapa 7: Documentação Final, Consolidação e Transferência de Produtos (Meses 21 a 24)

Objetivo: Consolidar toda a documentação, integrar os resultados das etapas operacionais e exploratória e realizar a transferência formal dos produtos.

Atividades:

7.1. Documentação técnica - 7.1.1. Documentação técnica do sistema (hardware, software embarcado, modelos de IA, sistema de monitoramento de sinalização) - 7.1.2. Manuais de operação e manutenção da plataforma completa - 7.1.3. Material de capacitação para equipe técnica - 7.1.4. Relatório de conformidade com NBR 17252 (verificação de atendimento aos requisitos dos itens 5, 6 e 7)

7.2. Relatórios finais - 7.2.1. Relatório técnico final do projeto (metodologia, resultados, lições aprendidas) - 7.2.2. Relatório de desempenho da operação assistida (indicadores acumulados das três camadas) - 7.2.3. Relatório de transferência de conhecimento (treinamentos realizados, avaliação) - 7.2.4. Relatório da metodologia de análise integrada de risco em PNs (OE7): protocolo documentado com correlação entre eventos detectados, indicadores de classificação (GI e MC), dados de monitoramento de sinalização e tempos de segurança

7.3. Consolidação de resultados - 7.3.1. Integração dos resultados da frente exploratória (Etapa 8) com os resultados operacionais (Etapas 1-6) - 7.3.2. Análise de sinergia entre os dados de monitoramento de sinalização (Camada 1) e os resultados do estudo de interoperabilidade (OE8) - 7.3.3. Consolidação da metodologia de análise integrada de risco (OE7) com dados acumulados - 7.3.4. Relatório de execução financeira e indicadores de impacto consolidados

7.4. Transferência de produtos e encerramento - 7.4.1. Disponibilização dos produtos conforme Art. 12 da Resolução nº 6.021/2023 - 7.4.2. Entrega formal dos equipamentos instalados - 7.4.3. Entrega formal de toda documentação à MRS e à ANTT - 7.4.4. Seminário de encerramento: apresentação de resultados para a MRS, ANTT e demais partes interessadas, incluindo workshop de resultados da frente exploratória com recomendações para próximos passos

Resultados esperados: Todos os produtos entregues formalmente; documentação técnica completa; resultados consolidados e apresentados; projeto encerrado.

Responsável: Coordenador Geral do Projeto (Embeddo), com co-autoria do SENAI CIMATEC nas publicações científicas como contrapartida institucional não-financeira (sem valor monetário alocado a esta etapa para o CIMATEC).

Critério de medição e faturamento: Todos os produtos (P1 a P6) entregues formalmente; relatório técnico final entregue; seminário de encerramento realizado; prestação de contas final elaborada e entregue, com documentação comprobatória consolidada.

Publicação e disseminação: Resultados serão apresentados em evento técnico do setor ferroviário. Artigo científico sobre resultados do projeto será submetido ao ANPET ou congresso equivalente.

Etapla 8: Frente Exploratória: Interoperabilidade e Sinalização Ativa Digital (Meses 4 a 20)

Objetivo: Investigar tecnologias de digitalização para sinalização ativa de PNs, produzindo estudo de viabilidade, especificações técnicas, roadmap tecnológico e provas de conceito.

Esta etapa é executada em paralelo às etapas operacionais, aproveitando o acesso às PNs e os dados coletados para embasar os estudos.

Atividades:

8.1. Estudo de interoperabilidade (OE8, Meses 4 a 16) - 8.1.1. Revisão bibliográfica e estado da arte: Eulynx Interface Specifications, ERTMS/ETCS, OPC-UA, MQTT e outros padrões aplicáveis - 8.1.2. Mapeamento detalhado das interfaces dos sistemas de sinalização das PNs piloto (aproveitando dados da Etapa 1) - 8.1.3. Análise de gaps: comparação entre interfaces existentes e especificações de interoperabilidade internacionais - 8.1.4. Especificação de interfaces abertas para disponibilização e intercâmbio de dados operacionais da PN Inteligente (leitura, supervisão, telemetria) e para interconexão com componentes de sinalização (controladores, dispositivos, sensores) que adotem protocolos abertos, aplicável a cenários de digitalização da sinalização ferroviária - 8.1.5. Desenvolvimento de prova de conceito: comunicação via protocolo aberto entre a plataforma PN Inteligente e um controlador comercial da bancada do Eixo 2 (não os controladores existentes nas PNs), com troca de dados em ambos os sentidos (leitura de estados do controlador e envio de mensagens de telemetria e diagnóstico, sem comando da lógica de sinalização operacional) - 8.1.6. Testes e validação da prova de conceito - 8.1.7. Elaboração do relatório de estudo de interoperabilidade e especificação de interfaces

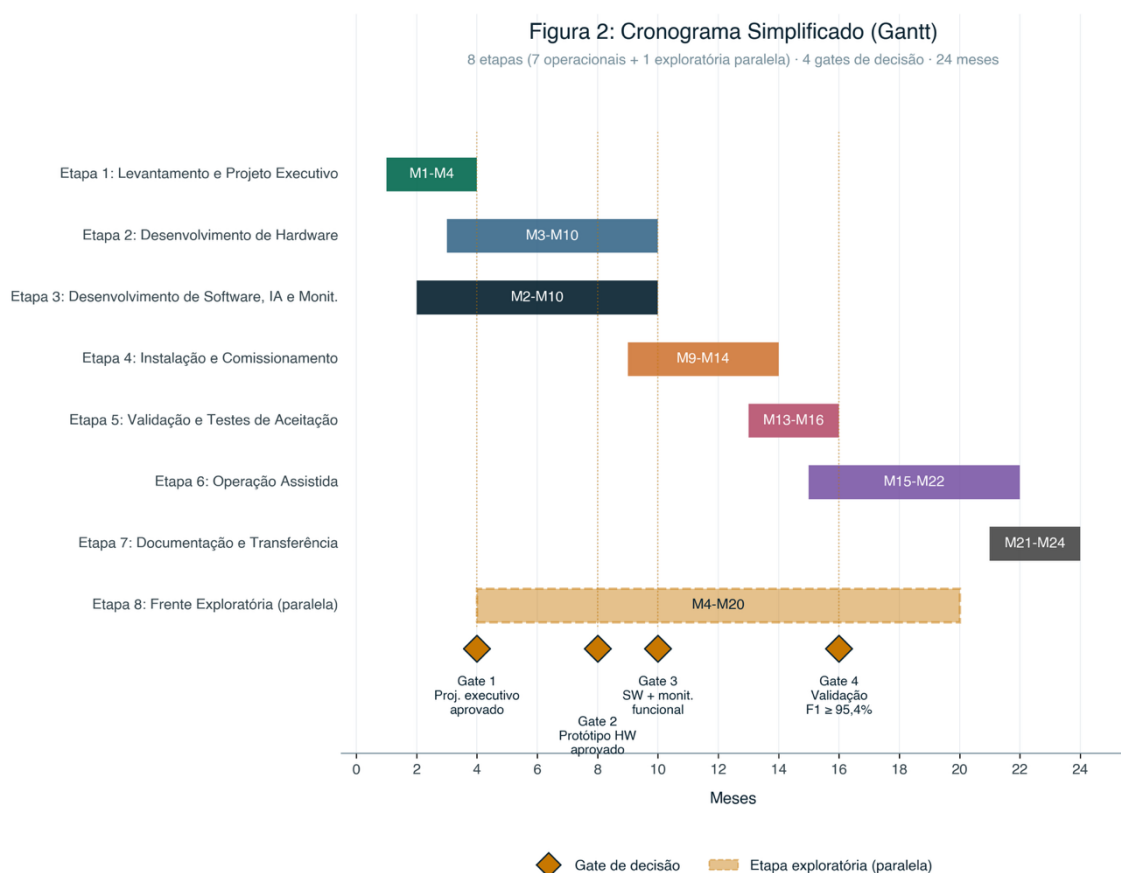
8.2. Avaliação de controladores que atendam aos requisitos de segurança ferroviária para sinalização ativa (OE9, Meses 8 a 20) - 8.2.1. Levantamento de requisitos de integridade de segurança para sinalização ativa de PNs (IEC 61508, EN 50126/50128/50129 e padrões AREMA) - 8.2.2. Estudo das especificações de controladores comerciais disponíveis no mercado que atendam aos requisitos de integridade de segurança, priorizando soluções com fornecimento e suporte técnico no Brasil - 8.2.3. Definição de cenários de teste em bancada e especificação da bancada - 8.2.4. Disponibilização da bancada de testes: sistema de demonstração com controlador comercial em conformidade com requisitos de integridade de segurança ferroviária (SIL 4) e componentes integradores que reproduzem cenários operacionais representativos de PN - 8.2.5. Execução de testes de integração em bancada - 8.2.6. Análise de resultados e avaliação de viabilidade - 8.2.7. Elaboração de roadmap para desenvolvimento de solução de sinalização ativa digital - 8.2.8. Elaboração do relatório de viabilidade técnica e relatório de testes em bancada

Desafios técnicos: O estudo buscará avaliar a aplicabilidade de padrões internacionais de interoperabilidade ao contexto brasileiro (diferenças de infraestrutura, regulamentação e práticas operacionais), identificar as barreiras técnicas e regulatórias para adoção de controladores comerciais que combinem três atributos: integridade de segurança já estabelecida (SIL 4 conforme IEC 61508/EN 50129 ou conformidade com padrões AREMA), fornecimento e suporte técnico no Brasil e capacidade de habilitar a integração com camadas digitais de monitoramento, vigilância e detecção. Essa combinação ainda não foi sistematicamente estudada no contexto brasileiro. Com base nesses estudos, o projeto buscará definir um roadmap realista considerando o estágio atual da infraestrutura de sinalização das PNs.

Resultados esperados: Relatório de estudo de interoperabilidade com especificação de interfaces abertas; prova de conceito funcional de comunicação via protocolo aberto; relatório de viabilidade técnica de controladores que atendam aos requisitos de segurança ferroviária; relatório de testes em bancada; roadmap tecnológico.

Responsável: Coordenador Geral do Projeto (Embeddo)

Critério de medição e faturamento: Relatório de interoperabilidade e especificação de interfaces entregues; prova de conceito funcional em bancada demonstrada; relatório de viabilidade e testes em bancada entregues; roadmap tecnológico entregue.



3.13. Indicadores de Impacto

Além das métricas técnicas de desempenho do sistema (F1-score, latência, disponibilidade), o projeto medirá indicadores de impacto operacional abrangendo as três camadas e a frente exploratória:

Indicador	Meta	Método de Medição	Período
Eventos de risco registrados pelo sistema	Registro sistemático de eventos, estabelecendo baseline operacional por PN em linhas e trechos sem monitoramento eletrônico automatizado prévio	Quantidade e tipologia de eventos detectados por PN, consolidados em relatório mensal	Etapa 6
Tempo de notificação de alertas	< 2 segundos no percentil 95 dos eventos, medido do instante da detecção no dispositivo de borda até a disponibilização do alerta na interface do operador, em condições normais de conectividade	Registro na plataforma com timestamp da detecção (dispositivo de borda) e timestamp da disponibilização do alerta (interface do operador); cálculo da latência por evento e consolidação em distribuição (mediana, P95, máximo)	Etapa 6
Disponibilidade da plataforma em operação real	$\geq 90\%$	Uptime mensal por PN, calculado como $(\text{horas operacionais} / \text{horas totais do mês}) \times 100$, com medição independente das três camadas (monitoramento de sinalização, vigilância e detecção) pelo autodiagnóstico; considera-se indisponibilidade a falha total de pelo menos uma camada; meta aplicada à média mensal consolidada das 4 PNs	Etapa 6
Disponibilidade do monitoramento de sinalização ativa	$\geq 95\%$ por PN	Uptime mensal por PN do sistema de monitoramento (Camada 1), calculado como $(\text{horas operacionais} / \text{horas totais do mês}) \times 100$, medido pelo autodiagnóstico da plataforma; considera-se indisponibilidade a falha na aquisição de sinais ou na integração com os controladores de sinalização de uma PN; meta aplicada a cada PN individualmente	Etapa 6
Detecção de anomalias no sistema	Sensibilidade $\geq 99\%$ na detecção de condições de light-out e de falhas de comunicação entre o	Comparação mensal entre anomalias registradas pelo sistema e anomalias identificadas pela equipe de manutenção da	Etapa 6

Indicador	Meta	Método de Medição	Período
de sinalização	sistema de monitoramento e os controladores de sinalização, aferida na janela de comparação da Etapa 6	concessionária em inspeções programadas e em chamados operacionais do período; cálculo da sensibilidade como (anomalias detectadas pelo sistema $\cap$ anomalias confirmadas pela manutenção) / (anomalias confirmadas pela manutenção), com relatório mensal por PN	
Satisfação das equipes usuárias do sistema	$\geq 80\%$ favorável	Questionário estruturado aplicado ao final da operação assistida (Etapa 6) a operadores, equipe de sinalização e equipe de TI da concessionária que interagiram com o sistema nas 4 PNs; respostas em escala Likert de 5 pontos; consideram-se “favoráveis” as respostas nas categorias “favorável” e “muito favorável”; meta aferida sobre amostra mínima de 12 respondentes (3 por PN) e reportada com intervalo de confiança de 95%	Mês 22
Classificação das PNs (GI e MC)	Aderência $\geq 90\%$ entre os valores de GI e MC calculados pelo sistema (coleta automatizada nível A, NBR 7613) e os valores obtidos por cálculo manual da concessionária para as mesmas 4 PNs, considerando-se aderência o resultado da mesma faixa de classificação (A/B/C/D) e variação relativa $\leq 10\%$ nos valores numéricos de GI e MC	Cálculo paralelo de GI e MC para as 4 PNs do projeto com (i) dados manuais fornecidos pela equipe de sinalização/operação da concessionária conforme prática corrente e (ii) dados automatizados coletados pelo sistema (nível A, NBR 7613); relatório comparativo em tabela com GI, MC, classificação de faixa e variação relativa por PN	Mês 20
Módulos de computação de borda aprovados em testes de aceitação (OE3)	5 unidades aprovadas (4 + 1 sobressalente)	Relatório de testes de aceitação por unidade, contemplando verificação funcional do módulo integrado às interfaces do sistema (câmeras IP e aquisição de sinais dos controladores de sinalização), conforme protocolo de teste definido na Etapa 2	Etapa 2
4 PNs instaladas e	100% das 4 PNs com módulo de computação de borda instalado, interfaces	Relatório de comissionamento por PN (Etapa 4 / Mês 14), com checklist de aceitação validado	Etapa 4 (Mês 14)

Indicador	Meta	Método de Medição	Período
comissionadas (OE5)	de leitura de sinais dos controladores de sinalização integradas (sem comando da lógica de sinalização operacional) e plataforma integrada de monitoramento em funcionamento nas três camadas	pelas equipes de sinalização e de TI da concessionária	
Desempenho dos modelos de IA em campo (OE6)	F1-score $\geq 95,4\%$ em condições padrão e $\geq 85\%$ em condições adversas	Relatório de validação com métricas por PN e por tipo de evento, amostra mínima de 30 eventos por tipo	Etapa 5
Conformidade com NBR 17252	100% dos requisitos DEVE dos itens 5 e 6 atendidos, e atendimento ao item 7 (facultativo) nas funcionalidades escolhidas pelo projeto	Checklist de verificação por PN: monitoramento de sinalização (item 5), cobertura de câmeras em quadrantes opostos (item 6) e funcionalidades escolhidas do item 7 (geração de alarmes críticos e não críticos)	Etapa 5
Metodologia de análise integrada de risco (OE7)	Protocolo documentado e aplicado nas 4 PNs, com demonstração em relatório final aprovado pela equipe de sinalização/operação da concessionária, contendo a correlação entre os eixos analíticos definidos no método	Relatório final (Mês 22) com correlação em quatro eixos analíticos: (i) eventos detectados pelo sistema, (ii) classificação de risco das PNs pelos índices GI e MC (NBR 7613), (iii) dados de monitoramento da sinalização ativa (Camada 1), e (iv) tempos de segurança calculados conforme NBR 17252; relatório entregue por PN, consolidado para as 4 PNs, e submetido à equipe de sinalização/operação da concessionária para validação	Mês 22
Estudo de interoperabilidade (OE8)	Prova de conceito funcional em bancada de comunicação via protocolo aberto	Demonstração de troca de dados em ambos os sentidos (leitura de estados e envio de telemetria/diagnóstico, sem comando da lógica de sinalização operacional) entre plataforma PN Inteligente e controlador comercial da bancada do Eixo 2	Mês 16
Viabilidade de	Roadmap tecnológico e relatório de testes em	Avaliação estruturada nos três atributos da meta, combinando: (i)	Mês 20

Indicador	Meta	Método de Medição	Período
controladores que atendam aos requisitos de segurança ferroviária (OE9)	bancada entregues, avaliando a combinação de três atributos: (i) integridade de segurança estabelecida conforme IEC 61508/EN 50129 ou AREMA, (ii) disponibilidade de fornecimento com suporte técnico no Brasil, e (iii) capacidade de habilitar digitalização e interoperabilidade das PNs	análise documental dos controladores candidatos (certificações, suporte local, conformidade com requisitos de segurança ferroviária), (ii) testes em bancada quantificando parâmetros técnicos, e (iii) parecer técnico final consolidando o roadmap e a recomendação de fornecedores preferenciais	

3.14. Gestão de Riscos

#	Risco	Probabilidade	Impacto	Mitigação
R1	F1-score abaixo de 95,4% em condições padrão ou abaixo de 85% em condições adversas	Média	Alto	Treino/ajuste fino com amostras locais de cada PN; dataset diversificado com cenários adversos; métricas separadas por condição ambiental; iteração de otimização durante comissionamento
R2	Vandalismo nos equipamentos de campo	Alta	Médio	Gabinete com grau de proteção IP65 e resistência a impactos IK08 ou superior; instalação em posição elevada; monitoramento remoto de saúde do equipamento; unidade sobressalente para substituição imediata
R3	Atraso na definição das PNs	Média	Alto	Iniciar desenvolvimento de hardware e software (Etapas 2 e 3) em paralelo, utilizando o acervo da Embeddo e da MRS e imagens de PNs candidatas (conforme Etapa 3.1.1), com dados sintéticos reservados a cenários raros; Etapas 1 e 4 requerem PNs definidas
R4	Conectividade insuficiente em PNs rurais	Média	Baixo	Inferência e monitoramento de sinalização realizados integralmente no dispositivo de borda; conectividade necessária apenas para transmissão de metadados e acesso remoto. Em

#	Risco	Probabilidade	Impacto	Mitigação
				modo degradado, o sistema mantém detecção, monitoramento de sinalização, alertas locais e armazenamento de evidências
R5	Dificuldade de integração com sistemas operacionais da concessionária	Média	Médio	Envolvimento da equipe de TI desde a Etapa 1; definição de interfaces e protocolos na fase de projeto executivo; testes de integração dedicados na Etapa 4
R6	Condições ambientais adversas reduzem desempenho de visão computacional	Alta	Médio	Câmeras com infravermelho para operação noturna (item 6.2c da NBR 17252); modelos treinados com cenários adversos, com meta de F1-score $\geq 85\%$ nessas condições (Indicador 10); classificadores de condições ambientais com geração de alarmes não críticos aos operadores
R7	Rotatividade de equipe técnica	Baixa	Médio	Documentação técnica detalhada durante todo o desenvolvimento; transferência de conhecimento entre membros da equipe; material EAD como backup de conhecimento
R8	Mudanças regulatórias durante a execução	Baixa	Baixo	Monitoramento de publicações da ANTT; flexibilidade na arquitetura para adaptação a novos requisitos
R9	Dados de treinamento insuficientes para eventos raros	Média	Alto	Técnicas de data augmentation e geração de dados sintéticos; transfer learning a partir de datasets internacionais; foco em classes frequentes com fallback para detecção genérica de anomalia para classes raras
R10	Variabilidade entre PNs exigindo retreinamento extensivo	Média	Médio	Arquitetura de modelo com backbone compartilhado e cabeças especializáveis por cenário; fine-tuning leve após instalação em cada PN; a diversidade de 4 PNs no projeto permite avaliar a generalização

#	Risco	Probabilidade	Impacto	Mitigação
R1 1	Model drift: degradação de desempenho ao longo do tempo	Média	Médio	Monitoramento contínuo de métricas durante operação assistida; pipeline de retreinamento periódico; alertas automáticos de degradação
R1 2	Fadiga de alerta nos operadores por excesso de falsos positivos	Média	Alto	Limiar de confiança ajustável por tipo de evento; supressão de alertas repetidos em curto intervalo; classificação de severidade para priorização; taxa de falsos positivos monitorada como KPI
R1 3	Não-conformidade com requisitos da NBR 17252	Baixa	Alto	Checklist de conformidade normativa integrado ao projeto executivo (Etapa 1), comissionamento (Etapa 4) e validação (Etapa 5); requisitos da norma como critérios de aceitação desde a fase de projeto; verificação em cada gate de decisão
R1 4	Interfaces dos controladores de sinalização inacessíveis ou incompatíveis com monitoramento não intrusivo	Média	Alto	Mapeamento detalhado na Etapa 1 antes de compromisso com abordagem; múltiplas opções de interface (leitura de sinais elétricos, protocolos industriais); definição de escopo de monitoramento por PN conforme viabilidade técnica
R1 5	Escopo ampliado (3 camadas + exploratório) excede capacidade de execução no prazo	Média	Alto	Frente exploratória (Etapa 8) executada em paralelo e com equipe parcialmente dedicada; gates de decisão condicionam avanço; monitoramento mensal de cronograma com indicadores de atraso; escopo da frente exploratória ajustável sem impacto nas camadas operacionais
R1 6	Disponibilidade limitada de controladores comerciais que atendam aos requisitos de segurança ferroviária (SIL 4	Baixa	Médio	Planejamento de aquisição antecipado (Mês 6); contato prévio com fornecedores (priorizando aqueles com suporte técnico estabelecido no Brasil); equipamento alternativo identificado preventivamente

#	Risco	Probabilidade	Impacto	Mitigação
	ou AREMA) para testes em bancada			
R1 7	Resistência da equipe de sinalização da concessionária à integração não intrusiva	Média	Médio	Envolvimento da equipe de sinalização desde o mapeamento (Etapa 1); comunicação clara de que o monitoramento é de leitura (não interfere no sistema de sinalização); demonstração de valor (manutenção proativa baseada em dados, visibilidade remota)

4. PREVISÃO DE INÍCIO, TEMPO DE EXECUÇÃO E CUSTO TOTAL

Item	Valor
Data prevista de início	01/08/2026 (estimativa, condicionada a aprovação pelo Comitê de RDT/RPMF)
Duração total	24 meses
Custo total estimado	R\$ 3.399.529,61

O custo total inclui reserva técnica (5%, conforme Art. 6º, §4º, Portaria SUFER nº 17/2023) e custos administrativos da concessionária (7,37%, conforme Art. 10, §5º, Resolução nº 6.021/2023), ambos com memória de cálculo detalhada no Orçamento Analítico (Anexo VI).

O cronograma físico-financeiro detalhado consta do Anexo II.

O custo total deste projeto será de R\$ 3.399.529,61 (três milhões, trezentos e noventa e nove mil, quinhentos e vinte e nove Reais e sessenta e um centavos), distribuídos conforme indicado:

Cronograma Execução	Ano Concessão	Recurso Ano	Recurso
Ago/26 a Jul/27	5	2	R\$ 2.865.951,90
Ago/27 a Set/27	6	4	R\$ 533.577,71

5. LOCAL DE EXECUÇÃO

5.1. Laboratório e Desenvolvimento

Local	Atividade
Sede da Embeddo, Volta Redonda/RJ	Desenvolvimento de hardware e software, treinamento de modelos de IA, montagem e teste dos módulos de computação de borda (incluindo interfaces de sinalização), integração e testes de laboratório, disponibilização da bancada de testes para a frente exploratória (Etapa 8)
SENAI CIMATEC, Salvador/BA	Consultoria científica, co-orientação de pesquisa, validação independente dos modelos e resultados

A Embeddo dispõe de laboratório de eletrônica e prototipagem, infraestrutura de servidores com GPU para treinamento de modelos e ambiente de desenvolvimento de software na sede de Volta Redonda/RJ. A bancada de testes da frente exploratória (sistema de demonstração com controlador comercial em conformidade com SIL 4 e componentes integradores) será disponibilizada na sede da Embeddo.

5.2. Passagens de Nível (Instalação e Validação)

Critérios de seleção das PNs: As 4 PNs serão selecionadas de forma a cobrir diferentes cenários operacionais, incluindo variações de: volume de tráfego rodoviário (alto/baixo), condições de conectividade, condições ambientais predominantes, tipo de proteção ativa existente e configuração dos sistemas de sinalização (tipos de controladores, dispositivos monitoráveis). Esta diversidade é fundamental para validar a robustez e replicabilidade da plataforma em condições representativas da malha nacional, incluindo a camada de monitoramento do sistema de sinalização ativa.

Justificativa para 4 PNs: O escopo considera 4 PNs com o objetivo de: (a) garantir diversidade de cenários para validação robusta dos modelos de IA e do monitoramento de sinalização; (b) testar a plataforma em diferentes condições de conectividade, clima, fluxo de tráfego e configuração de sinalização; (c) produzir resultados replicáveis e generalizáveis para o setor, em consonância com o caráter público dos produtos RDT (Art. 12, Res. 6.021/2023).

Abordagem de MVP (Produto Mínimo Viável): O projeto adota estratégia de desenvolvimento incremental. A **PN 1 funciona como piloto de desenvolvimento**: é a primeira a ser instalada e comissionada, e concentra o ciclo completo de desenvolvimento, teste, iteração e validação das três camadas operacionais. Os aprendizados da PN 1 serão sistematicamente documentados e incorporados antes da instalação nas PNs seguintes. As **PNs 2, 3 e 4 funcionam como validação de generalização**.

Nota sobre seleção das PNs: As 4 PNs somente poderão ser definidas após a conclusão da Etapa 1 (Levantamento Técnico e Projeto Executivo), uma vez que o mapeamento de infraestrutura, o inventário de sinalização ativa e as visitas técnicas produzem dados que direcionam a estratégia de seleção.

As PNs serão selecionadas na malha da concessionária, que abrange os estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo.

6. ENTIDADE E EQUIPE EXECUTORA

6.1. Identificação da Entidade Executora

Campo	Informação
Razão social	Embeddo Computação Aplicada Ltda.
CNPJ	19.710.442/0001-50
Endereço	Rua Martins Fontes, 75, sala 402, Jardim Amalia, Volta Redonda/RJ, CEP 27251-330
Telefone	+55 11 4637-6299
E-mail	daniel@embeddo.io

Histórico e qualificação:

A Embeddo é uma startup deep tech sediada em Volta Redonda, dedicada a acelerar a transformação digital na indústria brasileira. Com uma abordagem integrada entre hardware, software e inteligência artificial embarcada, desenvolve tecnologias proprietárias de alto valor agregado aplicadas à convergência entre Computação de Borda, IIoT, sensores ópticos e visão computacional, com foco em aplicações industriais.

Desde sua fundação, a Embeddo tem consolidado um histórico consistente de conversão de recursos públicos e privados em soluções de P&D de fronteira e inovação de base tecnológica. Já executou mais de 10 projetos com apoio de instituições como FAPERJ, FINEP e CNPq, além de contratos diretos com grandes empresas da indústria nacional. Como resultado, a empresa possui três patentes depositadas, além de produtos próprios que já se encontram em operação em ambientes industriais no Brasil e no exterior. Seu portfólio de clientes inclui empresas como Stellantis, CSN, Dexco, Jaguar Land Rover, Volkswagen, Grupo São Martinho, MRS Logística e Ambev, demonstrando sua capacidade de entregar soluções robustas, rastreáveis e escaláveis em contextos industriais de alta exigência técnica e operacional.

Em 2022, a Embeddo foi reconhecida como TOP 1 Autotech no ranking nacional 100 Open Startups, e em 2024 foi investida pelo fundo Oxygea, reforçando sua inserção no ecossistema de inovação aberta e indústria 4.0.

A empresa opera em sede própria com mais de 300 m² em Volta Redonda (RJ) e conta com uma equipe multidisciplinar composta por 25 profissionais. Sua atuação se ancora em princípios de inovação aberta, pesquisa aplicada, validação em campo e conexão direta com os desafios reais do setor produtivo.

Na vertical ferroviária, a Embeddo atua como parceira estratégica da MRS Logística no desenvolvimento e operação de soluções de monitoramento embarcado em locomotivas, vigilância inteligente de passagens de nível e geolocalização de vagões, além de manter iniciativas exploratórias em sinalização ativa com parceiros internacionais de segurança funcional. Essa experiência direta com o ambiente operacional ferroviário da MRS confere à equipe conhecimento prático das condições de campo, dos protocolos de segurança e dos requisitos de integração com os sistemas operacionais da concessionária, diferencial essencial para a execução do presente projeto.

6.2. Instituição de Ciência e Tecnologia Parceira

Campo	Informação
Instituição	SENAI CIMATEC (Centro Integrado de Manufatura e Tecnologia)
Razão social	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial - Departamento Regional da Bahia
CNPJ	03.795.071/0013-50
Tipo	Instituição de Ciência e Tecnologia (ICT), Unidade EMBRAPPII credenciada
Endereço	Av. Orlando Gomes, 1845, Piatã, Salvador/BA, CEP 41.650-010
Área de atuação	Visão computacional, inteligência artificial, manufatura avançada, automação industrial

Papel no projeto: O SENAI CIMATEC atuará como ICT parceira, aportando expertise acadêmica e científica em visão computacional e aprendizado de máquina. As atribuições estão organizadas em **duas frentes remuneradas** (Etapas 3 e 5) e **duas frentes como contrapartida institucional não-financeira** (Etapas 6 e 7):

Frentes remuneradas (R\$ 435.000,00):

- **Consultoria em IA e visão computacional (Etapa 3, R\$ 335.000,00):** Co-desenvolvimento e validação científica dos modelos de IA (dataset, treinamento, otimização edge, validação estatística); orientação metodológica para definição de arquiteturas e estratégias de transfer learning incremental; contribuição para a metodologia de análise integrada de risco.
- **Validação independente (Etapa 5, R\$ 100.000,00):** Revisão e verificação de conformidade com a NBR 17252 (itens 5, 6 e 7), testes e validação de modelos em campo, elaboração de relatórios de validação independentes.

Contrapartida institucional não-financeira (sem valor monetário alocado):

- **Participação em workshops e capacitação (Etapa 6):** Apoio técnico-científico aos workshops presenciais e material EAD para equipes usuárias da concessionária, como contrapartida institucional da ICT parceira, sem remuneração direta.
- **Co-autoria em publicações científicas (Etapa 7):** Participação como co-autor nas publicações previstas na seção 7.2 (ANPET, IRSE, congressos técnico-científicos) e no seminário de encerramento, como contribuição institucional ao programa RDT.

Justificativa da parceria: A combinação da experiência industrial da Embeddo (desenvolvimento e implantação em campo) com a capacidade de pesquisa do SENAI CIMATEC (metodologia científica, publicações, infraestrutura laboratorial) fortalece simultaneamente a viabilidade técnica e a credibilidade científica do projeto.

O SENAI CIMATEC será contratado diretamente pela MRS Logística, com escopo técnico definido em conjunto com a Embeddo. O custo de contratação é de R\$ 435.000,00 (14,4% do subtotal operacional do projeto), consolidado nas Etapas 3 e 5. Detalhamento no Orçamento Analítico (Anexo VI).

6.3. Identificação da Equipe Executora

- **Coordenadores**

Nome Completo	CPF	Função no Projeto	Titulação
Daniel Giacometti Amaral	055.501.517-31	Coordenador Geral do Projeto	Mestrado
Rafael Moraes Alves	111.158.377-37	Coordenador Técnico	Graduação

Currículos dos coordenadores em PDF: Anexo ao presente Plano de Trabalho (ver Seção 9, item 5).

- **Líderes Técnicos**

Nome Completo	CPF	Função no Projeto	Titulação
Gustavo Luis Furtado Vicente	852.111.337-49	Líder de Hardware	Doutorado
Giancarlo Vilela de Faria	021.234.427-71	Líder de Sistemas Embarcados	Doutorado
Luan Felipe Santos Alves	195.354.647-10	Líder de Software	Graduação

- **Pesquisadores e Desenvolvedores**

Nome Completo	CPF	Função no Projeto	Titulação
Alexandre Esposte Santos	138.180.527-27	Pesquisador em Visão Computacional	Mestrado
Pedro Carvalho Ramos	061.949.537-56	Pesquisador em Visão Computacional	Graduação + Mestrado em andamento
Julio Cesar Caldeira Moreira	195.754.227-67	Desenvolvedor Embarcado	Graduação
Lucas Silveira Nascimento	118.747.767-25	Desenvolvedor Full-Stack	Graduação

Nome Completo	CPF	Função no Projeto	Titulação
Leonardo Carlos da Silva Dias	166.236.837-20	Técnico de Campo	Graduação

- **Equipe de Gestão e Suporte**

Nome Completo	CPF	Função no Projeto	Titulação
Guilherme da Matta Mangueira	134.476.017-10	Coordenador Administrativo	Graduação
Gabriel Almeida de Oliveira	161.351.927-36	Analista de Projetos de P&D	Graduação
Bianca Campos Reis	192.534.387-11	Especialista de Arquitetura de Solução	Graduação

- **Equipe SENAI CIMATEC (ICT Parceira)**

A equipe do SENAI CIMATEC será alocada pela instituição conforme as competências requeridas pelo projeto. A definição dos pesquisadores será formalizada no contrato de parceria a ser firmado entre a MRS Logística e o SENAI CIMATEC, com escopo técnico definido em conjunto com a Embeddo, com perfis nas áreas de visão computacional, aprendizado de máquina e validação de sistemas de IA.

- **Equipe MRS Logística**

Nome Completo	Cargo	Função no Projeto
Rafaela Doro Rodrigues	Analista de Gestão da Inovação Sr.	Gestora do projeto
Janaína Cristina Rodrigues	Analista de Segurança Operacional	Líder técnico
Rhayan de Almeida Cabral	Especialista Ferroviário II	Líder técnico
Henrique Veloso	Consultor	Integrador técnico

Nota sobre suporte operacional da MRS: Além da equipe de gestão listada acima, a MRS deverá alocar, durante as Etapas 1, 4 e 6, ao menos 1 técnico de sinalização com conhecimento dos controladores instalados nas PNs selecionadas, para participação nas atividades de mapeamento de sistemas de sinalização ativa (atividade 1.2),

comissionamento do monitoramento de sinalização (atividade 4.1.2) e ajustes durante operação assistida (atividade 6.1.5). A dedicação estimada é parcial (acompanhamento durante visitas técnicas e reuniões de alinhamento).

7. PRODUTOS

7.1. Produtos do Projeto

#	Produto	Tipo	Descrição	Entrega
P1	Plataforma integrada de digitalização de PNs	Sistema (componentes intelectuais)	Software embarcado, plataforma web de monitoramento, modelos de IA treinados para as três camadas operacionais, dataset anotado de cenários reais em PNs brasileiras, integração das camadas (monitoramento de sinalização ativa, vigilância por visão computacional e detecção de obstáculos), painel de saúde da sinalização e documentação técnica de hardware e software	Mês 16
P1.1	Módulos de computação de borda	Hardware	1 protótipo + 5 unidades de produção (4 para as PNs piloto + 1 sobressalente). Cada módulo: processador edge com acelerador de inferência, 2 câmeras IP/IR IP67 em quadrantes opostos conforme NBR 17252 item 6, gabinete IP65, no-break, modem LTE, componentes e cabeamento	Mês 10
P1.2	Módulos de aquisição de sinais de sinalização ativa	Hardware	1 protótipo + 5 unidades de produção. Cada módulo: gateway industrial Modbus RTU/TCP + OPC-UA, sensores de corrente/tensão, I/O digital e cabeamento blindado, para monitoramento de saúde da sinalização ativa conforme NBR 17252 item 5	Mês 10
P1.3	Bancada de testes para interoperabilidade	Hardware (frente exploratória)	Sistema de demonstração composto por controlador comercial em conformidade com requisitos de integridade de segurança ferroviária (SIL 4) e componentes integradores que reproduzem cenários operacionais representativos de PN, para validação de lógica de controle, estudo de interfaces e prova de	Mês 9

#	Produto	Tipo	Descrição	Entrega
			conceito de comunicação via protocolo aberto	
P1.4	Servidor on-premises	Hardware	Servidor dedicado à plataforma de monitoramento, instalado na MRS, hospeda a plataforma web de monitoramento com painel de saúde da sinalização, dashboard de vigilância e gestão de alarmes	Mês 16
P2	Relatório de validação em campo	Relatório técnico	Resultados dos testes de aceitação com métricas de desempenho por PN e por tipo de evento (F1-score, latência, disponibilidade), incluindo avaliação de conformidade com os requisitos dos itens 5, 6 e 7 da NBR 17252	Mês 16
P3	Documentação técnica e material de capacitação	Documentação	Documentação de projeto (hardware, software, monitoramento de sinalização), manuais de operação e manutenção da plataforma completa, material de capacitação para equipe técnica e de sinalização, relatório de conformidade com NBR 17252 (itens 5, 6 e 7)	Mês 22
P4	Relatório técnico final	Relatório	Consolidação de metodologia, resultados, lições aprendidas e recomendações, incluindo relatório da metodologia de análise integrada de risco em PNs (OE7) com protocolo documentado e reproduzível, e análise de sinergia entre os dados de monitoramento de sinalização (Camada 1) e os resultados do estudo de interoperabilidade (OE8)	Mês 24
P5	Estudo de interoperabilidade e especificação de interfaces abertas	Relatório técnico + PoC	Relatório de estudo de protocolos abertos e interfaces de interoperabilidade para PNs (OE8), especificação de interfaces abertas para disponibilização e intercâmbio de dados operacionais da PN Inteligente e para interconexão com componentes de sinalização que adotem protocolos abertos, e prova de conceito funcional em bancada de comunicação via protocolo aberto com controlador comercial do Eixo 2,	Mês 18

#	Produto	Tipo	Descrição	Entrega
			sem comando da lógica de sinalização operacional	
P6	Estudo de viabilidade de controladores que atendam aos requisitos de segurança ferroviária e roadmap tecnológico	Relatório técnico + roadmap	Relatório de viabilidade técnica de controladores comerciais que combinem integridade de segurança ferroviária (SIL 4 ou AREMA), fornecimento e suporte técnico no Brasil e capacidade de habilitar a integração com camadas digitais para sinalização ativa de PNs (OE9), relatório de testes em bancada e roadmap para desenvolvimento de solução de sinalização ativa digital	Mês 22

Nota sobre o conjunto P1 + P1.1 a P1.4: O Produto P1 (componentes intelectuais — software, modelos de IA, dataset, integração, documentação técnica) integra os resultados de cinco objetivos específicos (OE1 a OE5) em uma plataforma funcional unificada. Os sub-itens P1.1 a P1.4 individualizam os componentes físicos de hardware da Plataforma para fins de transferência patrimonial: módulos de computação de borda, módulos de aquisição de sinais, bancada de testes da frente exploratória e servidor on-premises. O acompanhamento do progresso de cada componente é viabilizado pelos critérios de medição e faturamento definidos nas Etapas 2 a 5, que funcionam como marcos intermediários de verificação: aprovação do hardware em testes de aceitação (Etapa 2), software e modelos de IA funcionais (Etapa 3), instalação e comissionamento por PN (Etapa 4) e validação de desempenho (Etapa 5).

7.2. Publicações e Disseminação

#	Publicação	Fórum	Previsão
1	Artigo sobre arquitetura e validação da plataforma de digitalização de PNs	ANPET ou congresso equivalente	Mês 18
2	Artigo sobre otimização de modelos de IA para edge em ambiente ferroviário	Congresso internacional de ITS ou segurança ferroviária	Mês 20
3	Artigo sobre estudo de interoperabilidade e protocolos abertos para PNs	Congresso de sinalização ferroviária (IRSE, Signal+Draht ou equivalente)	Mês 22
4	Apresentação de resultados no Workshop RDT (ANTT)	Workshop RDT	Mês 24

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS / NORMATIVOS APLICÁVEIS

8.1. Regulamentação

- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. Resolução nº 6.021, de 25 de julho de 2023. Regulamenta a destinação de Recursos para Desenvolvimento Tecnológico (RDT) e Recursos para Preservação da Memória Ferroviária (RPMF). Diário Oficial da União, 2023.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. Portaria SUFER nº 17, de 2023. Estabelece procedimentos para submissão e acompanhamento de projetos de RDT e RPMF. ANTT, 2023. Alterada pelas Portarias SUFER nº 9/2024 e nº 6/2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. Deliberação nº 28, de 30 de janeiro de 2026. Estabelece temas prioritários para destinação de RDT e RPMF. ANTT, 2026.
- BRASIL. Lei nº 14.273, de 23 de dezembro de 2021. Marco Legal das Ferrovias. Diário Oficial da União, 2021.
- BRASIL. Lei nº 13.709, de 14 de agosto de 2018. Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD). Diário Oficial da União, 2018.
- BRASIL. Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997. Código de Trânsito Brasileiro (CTB).

8.2. Normas Técnicas Brasileiras

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17252:2026. Sinalização ferroviária: Sistema de sinalização de PN com proteção ativa - Requisitos funcionais. 1. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2026. 22 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7613:2020. Via férrea - Passagem de nível - Grau de importância e momento de circulação. 4. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15680:2009. Via férrea - Travessia rodoviária - Passagem em nível pública - Requisitos de projeto. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15942:2011. Via férrea - Travessia rodoviária - Passagem em nível pública - Equipamento de proteção - Classificação e requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.
- CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO. Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito, Vol. IX: Sinalização de Cruzamentos Rodoferroviários. Brasília: CONTRAN.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Manual de Estudos de Tráfego. Brasília: DNIT.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. ISF-221: Projeto de Passagem em Nível. Brasília: DNIT, [s.d.].

- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. ISF-217: Projeto de Sinalização Ferroviária. Brasília: DNIT, [s.d.].

8.3. Normas Internacionais

- AMERICAN RAILWAY ENGINEERING AND MAINTENANCE-OF-WAY ASSOCIATION. AREMA Communications & Signals Manual - Grade Crossing Warning Systems. Lanham: AREMA.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61508:2010. Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems. Parts 1-7. Geneva: IEC, 2010.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR ELECTROTECHNICAL STANDARDIZATION. EN 50126:2017. Railway applications - The specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS). Brussels: CENELEC, 2017.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR ELECTROTECHNICAL STANDARDIZATION. EN 50128:2011. Railway applications - Communication, signalling and processing systems - Software for railway control and protection systems. Brussels: CENELEC, 2011.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR ELECTROTECHNICAL STANDARDIZATION. EN 50129:2018. Railway applications - Communication, signalling and processing systems - Safety related electronic systems for signalling. Brussels: CENELEC, 2018.

8.4. Referências Técnicas e Setoriais

- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. Relatório de Acompanhamento de Acidentes Ferroviários (RAAF). Disponível em: <https://dados.antt.gov.br/dataset/relatório-de-acompanhamento-de-acidentes-ferroviários-raaf>.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTADORES FERROVIÁRIOS (ANTF). Ferrovias brasileiras cada vez mais seguras. 2024.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Programa Nacional de Segurança Ferroviária em Área Urbana (PROSEFER). Brasília: DNIT.
- EULYNX CONSORTIUM. Eulynx Interface Specifications. Disponível em: <https://www.eulynx.eu>. Acesso em: 2026.
- EUROPEAN UNION AGENCY FOR RAILWAYS. European Rail Traffic Management System (ERTMS). Luxembourg: ERA.
- UNION INTERNATIONALE DES CHEMINS DE FER (UIC). Level Crossing Safety. Paris: UIC.

8.5. Referências Acadêmicas

- AMINMANSOUR, S. et al. Computer vision-based approach for smart traffic condition assessment at the railroad grade crossing. Advanced Engineering Informatics, v. 51, p. 101477, 2022. DOI: 10.1016/j.aei.2021.101477.
- ESPINOZA, D.; ALI, G. G.; TARAWNEH, C. AI-Based Hazard Detection for Railway Crossings. In: ASME 2024 Joint Rail Conference (JRC2024), Columbia, SC, 2024. DOI: 10.1115/JRC2024-124350.
- REDMON, J. et al. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. In: IEEE/CVF CVPR, 2016. DOI: 10.1109/CVPR.2016.91.
- JOCHER, G. et al. Ultralytics YOLOv8. Disponível em: <https://github.com/ultralytics/ultralytics>. 2023.

9. ANEXOS DO PLANO DE TRABALHO

#	Anexo
1	Resumo do Plano de Trabalho
2	Cronograma Físico-Financeiro
3	Propostas técnico-comerciais de terceiros
4	Cotações comerciais
5	CVs dos coordenadores e equipe técnica
6	Orçamento Analítico
7	Lista de bens para transferência
8	Declaração da concessionária