ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres

RDT - Recurso de Desenvolvimento Tecnológico

PLANO DE TRABALHO

PRISMA: PORTAL DE INSPEÇÃO DE MATERIAL RODANTE POR SENSORIAMENTO MULTIESPECTRAL AUTOMATIZADO

TEMA PRIORITÁRIO: 09 - APRIMORAMENTO DA MANUTENÇÃO FERROVIÁRIA, INCLUSIVE COM A INTEGRAÇÃO DE DIFERENTES TECNOLOGIAS E A AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

MRS Logística S.A.

02/10/2026

SUMÁRIO

1. DESCRIÇÃO DO PROJETO 4
1.1. Título do Projeto 4
1.2. Objetivos 4
2. JUSTIFICATIVA 6
2.1. Contexto e Relevância 6
2.2. Lacuna Tecnológica 7
2.3. Estado da Arte e Inovações Propostas 8
2.4. Contribuição ao Setor 10
2.5. Complementaridade com Outros Projetos RDT 11
2.6. Resultados Esperados e Atendimento às Diretrizes da Resolução nº 6.021/2023 15
2.7. Participação em Seminários, Congressos e Visitas Técnicas 16
3. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO 16
3.1. Métodos e Técnicas Utilizadas 16
3.2. Etapas e entregáveis 19
3.3. Etapa 1: Especificação de requisitos e plano de execução integrado (M1-M2) 22
3.4. Etapa 2: Matriz de sensoriamento e iluminação por modo de falha (M2-M7) .. 24
3.5. Etapa 3: Projeto executivo dos conjuntos de inspeção (M5-M7) 25
3.6. Etapa 4: Plataforma de software de inspeção e ferramenta de dimensionamento (M3-M15) 27
3.7. Etapa 5: Portal de inspeção implantado e integrado em campo (M8-M11 e M16-M18) 28
3.8. Etapa 6: Validação em operação e relatório de desempenho (M11-M20) 29
3.9. Etapa 7: Operação assistida e recomendação de expansão (M14-M23) 31
3.10. Etapa 8: Documentação, capacitação e transferência de tecnologia (M21-M24) 32
3.11. Estudos de modalidades de fronteira e prova de conceito (M2-M18) 33
3.12. Indicadores de Impacto 35
3.13. Gestão de Riscos 42
4. PREVISÃO DE INÍCIO, TEMPO DE EXECUÇÃO E CUSTO TOTAL 45
Prazo e condição de início 45
Custo total 45
5. LOCAL DE EXECUÇÃO 46
6. ENTIDADE E EQUIPE EXECUTORA 47
6.1. Identificação da entidade 47
6.2. Identificação da equipe executora 49

6.3. Governança e acompanhamento do projeto..... 51
7. PRODUTOS..... 51
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS / NORMATIVOS APLICÁVEIS..... 53
9. ANEXOS DO PLANO DE TRABALHO..... 54

1. DESCRIÇÃO DO PROJETO

1.1. Título do Projeto

PRISMA: Portal de Inspeção de Material Rodante por Sensoriamento Multiespectral Automatizado

1.1.1. Linha de inovação e desenvolvimento

Conforme a Resolução nº 6.021/2023 da ANTT, o presente projeto enquadra-se na seguinte diretriz e nos seguintes objetivos inovativos:

Diretriz (Art. 3º): Inciso II ("melhoria da qualidade dos serviços objeto de concessão ferroviária federal"), ao elevar a cobertura, a frequência e a rastreabilidade da inspeção de condição dos vagões em circulação.

Objetivos inovativos (Art. 4º): Inciso II ("tecnologia básica e aplicada"), por meio da pesquisa experimental de tecnologias de sensoriamento e iluminação orientadas aos modos de falha do material rodante e de métodos de predição de desempenho de sistemas de inspeção; Inciso IV ("soluções de acompanhamento e monitoramento de atividades ferroviárias em tempo real"), com detecção, medição, registro e priorização automáticas de não conformidades do material rodante com o trem em circulação.

Todos os produtos do projeto terão destinação pública, nos termos do Art. 12 da Resolução.

1.1.2. Temas

O projeto enquadra-se no seguinte tema prioritário de destinação dos RDT, estabelecido pela Deliberação ANTT nº 28, de 30 de janeiro de 2026, com vigência até 27 de junho de 2028:

Tema 09: Aprimoramento da manutenção ferroviária, inclusive com a integração de diferentes tecnologias e a automação industrial.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

Pesquisar, desenvolver e validar em ambiente operacional real três tecnologias habilitadoras para a inspeção automatizada, contínua e economicamente escalável de material rodante ferroviário em pórtico fixo: a matriz de sensoriamento e iluminação orientada a modos de falha, que determina, para cada classe de defeito, a técnica de detecção adequada; os conjuntos modulares de inspeção com processamento local, que permitem expandir a capacidade instalada sem reprojeto; e a metodologia de dimensionamento custo-desempenho, materializada em ferramenta de referência que determina, para um dado conjunto de itens inspecionáveis e metas de desempenho, a configuração de melhor compromisso entre custo e desempenho.

1.2.2. Objetivos Específicos

1. **Construir e validar experimentalmente a matriz modo de falha × modalidade de sensoriamento × iluminação × polarização**, que determina, para cada classe de defeito do material rodante, a técnica de detecção de melhor compromisso entre desempenho e custo, das modalidades de visão computacional estabelecidas em espectro visível ao sensoriamento espectral além do visível com iluminação dedicada, este investigado em complemento para os modos de falha de baixo contraste e tendo o infravermelho de ondas curtas (SWIR) como ponto de equilíbrio entre detectabilidade e custo entre as bandas candidatas.
2. **Desenvolver conjuntos modulares de inspeção com processamento local**, dotados de interfaces padronizadas (mecânica, elétrica, de dados e de sincronismo), autocalibração e pipeline de processamento reconfigurável por composição, executado em servidor local expansível e modular, permitindo adicionar, substituir ou realocar capacidade de inspeção sem reprojeto da instalação.
3. **Desenvolver e validar a metodologia e a ferramenta de referência de dimensionamento custo-desempenho** de portais de inspeção: a partir dos itens a inspecionar, das metas de desempenho e das restrições de instalação, a ferramenta recomenda a configuração de câmeras, iluminação e processamento, com estimativa de desempenho e custo, e atualiza a recomendação com os dados coletados pelo próprio portal em operação (dimensionamento evolutivo).
4. **Instalar, integrar e validar as tecnologias em operação real**, em portal de inspeção na malha da concessionária, com campanhas de avaliação em condições reais de circulação e comparação sistemática entre o desempenho previsto pela ferramenta de dimensionamento e o realizado em campo.
5. **Difundir os resultados e transferir o conhecimento**, por meio de documentação técnica, capacitação das equipes da concessionária, participação em seminários e congressos e disponibilização pública dos produtos, nos termos do Art. 12 da Resolução nº 6.021/2023.
6. **Investigar novas modalidades de sensoriamento em frente exploratória**, em profundidade de estudo e prova de conceito, nas vertentes de imagem (hiperespectral; termografia ativa e correlação térmica bi-banda SWIR×LWIR, foco da vertente; fusão multimodal) e não óptica (inspeção acústica e sensoriamento da interação roda-trilho), com avaliação documentada por modalidade em dois marcos de aplicabilidade (sétimo e décimo quinto mês) e recomendação de incorporação quando a maturidade permitir, sem gate bloqueante sobre a entrega principal.

2. JUSTIFICATIVA

2.1. Contexto e Relevância

A inspeção de condição do material rodante ferroviário é, ainda hoje, uma atividade predominantemente manual, realizada de forma amostral em pátios e oficinas, com o vagão retirado de circulação ou parado. Esse modelo tem três limitações estruturais: cobertura reduzida, baixa frequência e exposição de inspetores a ambiente operacional de risco. Componentes críticos de segurança, como rodas, molas de suspensão, engates e elementos de timoneria, podem desenvolver defeitos entre inspeções sem oportunidade de detecção antes da falha em serviço. Soluções de inspeção automatizada em pórtico fixo já existem e operam comercialmente no exterior, com iniciativas também em operadores nacionais, mas permanecem restritas a subconjuntos de componentes e modos de falha e não eliminam a dependência do processo manual para o conjunto do vagão.

A consequência aparece nas estatísticas oficiais de acidentes. Entre dezembro de 2020 e janeiro de 2026, a ANTT registrou 845 descarrilamentos nas malhas concedidas (22,8% dos acidentes ferroviários de comunicação obrigatória), dos quais 160 (18,9%) tiveram como causa direta falha de material rodante, a segunda causa direta de descarrilamento no período, atrás apenas da via permanente (contagem sobre os microdados do dataset "Acidentes Ferroviários (RAAF)" do Portal de Dados Abertos da ANTT, acesso em 01/07/2026). As causas contributivas registradas nesses eventos, entre elas fratura de eixo e de roda, deseixamento, aquecimento de rolamentos e defeitos no sistema de freio, recaem exatamente sobre os componentes passíveis de inspeção visual e dimensional em pórtico fixo.

A inspeção automatizada em pórtico fixo (wayside) inverte essa lógica: em vez de levar o vagão à inspeção, a inspeção ocorre a cada passagem do trem, em circulação normal e sem interferência na operação, com registro fotográfico rastreável por ativo e histórico de evolução de cada componente ao longo do tempo. A escala explica o potencial da tecnologia: a frota brasileira de vagões de carga em operação alcançou 102.592 unidades em 2024, das quais aproximadamente 18 mil integram a frota da MRS Logística. Um único portal instalado em ponto de passagem inspeciona todos os vagões que por ele trafegam: a cobertura deixa de ser função do efetivo disponível para a inspeção e passa a ser função da malha, e o retorno de cada ponto instalado cresce com o volume de ativos que circula por ele. A detecção passa a ser sistemática e a manutenção, orientada por condição.

Esse quadro conecta o projeto a mais de uma agenda prioritária do Comitê: além do aprimoramento da manutenção ferroviária com automação industrial (Tema 09 da Deliberação ANTT nº 28/2026, no qual o projeto se enquadra), a detecção precoce de precursores de descarrilamento com o trem em circulação adere ao objetivo de aumento da segurança ferroviária do Tema 04, cujo foco principal declarado, passagens de nível e locais críticos, não é objeto deste projeto; a redução de paradas não programadas e de retiradas desnecessárias de vagões, com elevação da disponibilidade da frota, à qualidade no serviço de transporte ferroviário (Tema 01); e o uso dos dados de condição no

planejamento da manutenção e na priorização de intervenções, à melhoria da operação ferroviária (Tema 10).

Estender a inspeção automatizada ao conjunto do material rodante, uma matriz de 39 itens inspecionáveis em 7 sistemas, com saídas qualitativas (condição) e quantitativas (medição em milímetros), não se resolve repetindo a engenharia dedicada que as soluções atuais empregam caso a caso para cada modo de falha. Exige responder a perguntas que a tecnologia disponível ainda não responde, e é esse desafio, comum às soluções wayside do mercado internacional, que este projeto ataca. As lacunas que o compõem estão detalhadas a seguir.

2.2. Lacuna Tecnológica

Existem hoje portais de inspeção automatizada em operação comercial, e eles não resolvem o problema que este projeto ataca: não cobrem o conjunto dos 39 itens inspecionáveis do vagão, não são modulares, de modo que cada extensão de escopo exige reprojeto e nova integração pelo fornecedor, e têm custo de entrada e de expansão elevados, agravado pela ausência de método que determine quanto basta instalar para uma dada meta de desempenho. Aplicar visão computacional à inspeção industrial é tecnologia madura e comercialmente estabelecida; a lacuna não está na técnica existente, e sim em três barreiras que impedem estender a inspeção wayside ao conjunto completo dos sistemas do vagão, presentes tanto no estado da prática nacional quanto nas soluções comerciais internacionais:

(i) Modos de falha de baixo contraste no espectro visível: Parte relevante dos defeitos de material rodante produz contraste fraco ou ambíguo em imagens de espectro visível: trincas finas mascaradas por sujidade, graxa ou pintura; vazamentos e contaminações sobre superfícies escuras; umidade e condição superficial que confundem a classificação. Modalidades espectrais fora do visível, combinadas com iluminação dedicada e polarização controlada, podem elevar a detectabilidade dessas classes por dois mecanismos: a rejeição da luz ambiente, pelo conjunto de banda estreita, filtro casado e iluminação pulsada, e o contraste por propriedade de material, a que bandas como o SWIR respondem. O ganho, porém, é condicionado à classe de defeito, à banda e à configuração de iluminação, e o sensoriamento espectral complementa o visível na detecção de contraste sem substituí-lo na medição dimensional, em que a resolução espacial dos sensores visíveis é superior. Não há, na literatura ou no mercado, sistematização que responda, para o domínio de material rodante, quais modos de falha são adequadamente resolvidos pelas técnicas estabelecidas de visão computacional e quais exigem modalidades espectrais, sob qual iluminação e polarização. É precisamente essa a pergunta de pesquisa que a matriz modo de falha × modalidade × iluminação × polarização se propõe a responder.

(ii) Arquiteturas monolíticas de alto investimento inicial: Os portais comerciais são sistemas integrados e fechados, dimensionados caso a caso pelo fornecedor, com forte acoplamento entre estrutura, sensores, iluminação e processamento: adicionar um novo item de inspeção implica reprojeto e nova rodada de integração. Não foi identificada, nas

soluções disponíveis, arquitetura de conjuntos modulares com interfaces padronizadas e pipeline reconfigurável por composição, que permita começar pelos casos de maior criticidade e expandir módulo a módulo conforme o retorno operacional se comprova.

(iii) Ausência de método de dimensionamento custo-desempenho: Dimensionar um portal significa decidir quantas câmeras instalar, de que tipo e em que posições, com quais lentes, iluminação e capacidade de processamento, para um dado conjunto de itens inspecionáveis e metas de desempenho. Hoje a decisão é tomada por engenharia manual, caso a caso, sem método que preveja o desempenho da configuração antes de instalá-la e sem mecanismo que a atualize com dados reais de operação, o que leva a superdimensionamento ou a subdimensionamento descoberto apenas em campo. Não foi identificada, no mercado ou na literatura aplicada ao domínio, metodologia publicada de predição de desempenho pré-implantação e de dimensionamento evolutivo para sistemas de inspeção wayside.

As três lacunas se reforçam: sem sensoriamento adequado ao modo de falha, itens críticos permanecem fora do alcance da automação; sem modularidade, cada extensão de escopo tem custo proibitivo; sem método de dimensionamento, cada decisão repete o ciclo caro de tentativa e erro em campo. O projeto ataca as três de forma integrada.

2.3. Estado da Arte e Inovações Propostas

2.3.1. Revisão do Estado da Arte

A inspeção automatizada de material rodante em pórtico fixo é segmento ativo e em expansão no mercado internacional. Diferentes fornecedores oferecem soluções comerciais para detecção de defeitos de superfície, medição dimensional e classificação de condição de componentes, entre os quais se destacam a Wabtec, com a linha de produtos KinetiX (originada da Beena Vision e ampliada pela aquisição da Track IQ), e a Duos Technologies, com o Railcar Inspection Portal (RIP). O patamar de investimento alcançado pelo setor é ilustrado pelo programa da Norfolk Southern: após o descarrilamento de East Palestine, Ohio, em fevereiro de 2023, a empresa anunciou investimento de US$ 50 milhões em dois anos para implantação de 17 Digital Train Inspection Portals; o primeiro entrou em operação em dezembro de 2023 nas proximidades do local do acidente, equipado com 38 câmeras de alta resolução e captura de aproximadamente 1.000 imagens por vagão.

Apesar da diversidade de fornecedores e de aplicações, as soluções comerciais convergem sobre a mesma base tecnológica: câmeras de espectro visível de alta resolução, iluminação LED de alta potência e triangulação a laser para reconstrução tridimensional de perfis, com portfólios que cobrem superfície e perfil de roda, sapatas de freio, componentes de truque e vistas completas do veículo. A termografia de imagem passiva complementa essa base como tecnologia igualmente comercial e estabelecida, oferecida pelos principais fornecedores do domínio para o monitoramento térmico de rolamentos e rodas. Esse consenso tecnológico, de visível, laser 3D e termografia passiva, representa o estado da técnica consolidado.

As fronteiras que o presente projeto pesquisa permanecem fora desse consenso. Nas fontes consultadas em 01/07/2026, não foi identificado produto comercial de inspeção wayside de material rodante que empregue sensoriamento espectral refletivo, como imagem SWIR, multiespectral ou hiperespectral, com iluminação dedicada e controle de polarização. A distinção em relação à termografia já em uso é relevante: a termografia passiva mede emissão térmica, ao passo que o sensoriamento espectral refletivo interroga propriedades de material e de superfície, como umidade, contaminação e contraste de descontinuidades sob sujidade, alcançando classes de defeito que a térmica não endereça. Revisão recente e abrangente da área de monitoramento wayside registra visível, laser e luz estruturada, térmico e acústico como as modalidades empregadas, sem menção a modalidades espectrais refletivas, e a patente mais próxima identificada (US 12.269.524 B2, Norfolk Southern, 2025) menciona SWIR apenas em linguagem genérica de reivindicação, sem descrição de sistema implantado.

A mesma observação se estende às demais frentes. Não foi identificada, nas soluções comerciais disponíveis, arquitetura de conjuntos modulares com interfaces padronizadas, autocalibração e pipeline reconfigurável por composição, e, no dimensionamento, o estado da prática é o projeto óptico e de iluminação caso a caso, apoiado em simulação fotométrica e ensaios, sem metodologia publicada que integre predição de desempenho pré-implantação, otimização custo-desempenho e atualização evolutiva com dados de operação no domínio de portais ferroviários.

A revisão seguiu protocolo de busca documentado, com consulta a fichas técnicas de fabricantes do domínio, arquivamentos públicos, bases de patentes e literatura técnica revisada, e termos de busca por tecnologia; a trilha completa de fontes está consolidada em nota técnica do projeto.

2.3.2. Inovações Propostas

As inovações concentram-se em contribuições metodológicas e tecnológicas na fronteira do estado da arte descrito, não na aplicação isolada de técnicas existentes. O método de desenvolvimento de cada uma, com as respectivas atividades e entregáveis, está detalhado no capítulo 3.

1. **Matriz modo de falha × modalidade de sensoriamento × iluminação × polarização.** Sistematização, construída experimentalmente e validada em operação, que associa cada classe de defeito do material rodante à combinação de banda espectral, geometria e modo de iluminação e estado de polarização com maior ganho de detectabilidade. Abrange as técnicas estabelecidas de visão computacional em espectro visível, que seguem respondendo pela maior parte dos itens inspecionáveis, e investiga as modalidades espectrais como complemento para as classes de defeito em que o visível apresenta baixo contraste. Torna-se referência metodológica de domínio público, cuja aplicação a outra malha, frota ou condição operacional requer recalibração e validação local.
2. **Conjuntos modulares de inspeção com processamento local.** Arquitetura em que cada conjunto de sensoriamento e iluminação é um módulo acoplável, com

interfaces padronizadas de fixação mecânica, alimentação, dados e sincronismo, autocalibração após instalação ou manutenção e pipeline de processamento reconfigurável por composição, executado em servidor local expansível e modular junto ao portal. Viabiliza a adoção incremental da inspeção automatizada e reduz o custo de evolução da instalação.

3. **Metodologia e ferramenta de referência de dimensionamento custo-desempenho.** Método de predição de desempenho antes da implantação e de dimensionamento evolutivo, em que a recomendação de configuração é atualizada com as estatísticas de defeito coletadas pelo próprio portal em operação. É materializado em ferramenta de software de referência e validado pela comparação sistemática entre o desempenho previsto e o realizado na implantação real.
4. **Estudos exploratórios de modalidades de fronteira.** Frente paralela, sem gate bloqueante sobre a entrega principal, que investiga em profundidade de estudo e prova de conceito modalidades ainda não estabelecidas no domínio, em duas vertentes: modalidades de imagem (imagem hiperespectral; termografia ativa e correlação térmica bi-banda SWIR×LWIR, foco da vertente, mais robusta a variações de emissividade que a termografia passiva de banda única já comercial; fusão multimodal) e modalidades não ópticas complementares ao portal (inspeção acústica de componentes em movimento e sensoriamento da interação roda-trilho, em que a via instrumentada mede o veículo). A hipótese da vertente não óptica é que a correlação entre assinatura física e evidência de imagem, no mesmo ativo e na mesma passagem, eleve a confiança de detecção de defeitos incipientes que cada modalidade isolada resolve mal.

2.4. Contribuição ao Setor

O projeto contribui para o setor ferroviário ao atacar, com pesquisa aplicada, uma fronteira tecnológica da inspeção de material rodante: as soluções automatizadas disponíveis cobrem apenas parte dos componentes e modos de falha, e estender a automação ao conjunto do vagão depende de conhecimento que ainda não existe de forma sistematizada no domínio. Para o setor ferroviário, o projeto eleva o patamar tecnológico da inspeção e disponibiliza a matriz de sensoriamento, a arquitetura modular e a metodologia de dimensionamento como referência metodológica de domínio público, reduzindo a barreira de entrada econômica para a inspeção automatizada, inclusive em malhas de menor densidade (a aplicação em outra malha ou frota requer recalibração e validação local). No plano da eficiência do sistema ferroviário, a verificação passa a ocorrer com o vagão em circulação, o que reduz a necessidade de imobilizar material rodante para inspecionar e encurta o intervalo entre verificações sucessivas de um mesmo ativo, hoje condicionado ao efetivo de inspeção disponível. No plano da objetividade, a avaliação de condição passa a apoiar-se em medida instrumentada, com critério explícito e registro rastreável por ativo e por passagem, e não apenas na apreciação visual, o que torna a evidência comparável ao longo do tempo e auditável por terceiros. Para quem executa a inspeção, o ganho é de segurança e de condições de trabalho: parte da atividade

hoje realizada presencialmente em via e em pátio desloca-se para a análise da evidência capturada pelo portal, fora do ambiente operacional. Para a União e para a ANTT, os resultados são integralmente públicos nos termos do Art. 12 da Resolução nº 6.021/2023, incluindo relatórios, metodologia, ferramenta de referência e bases de dados, que constituem base técnica objetiva para a avaliação de sistemas de inspeção automatizada de material rodante e apoiam a fiscalização baseada em evidências. Para os usuários do sistema e para a sociedade, reduz o risco de acidentes associados a falhas de material rodante, pela detecção precoce de precursores de descarrilamento, e fortalece a capacidade tecnológica nacional em visão computacional industrial e sensoriamento espectral aplicados ao transporte.

2.5. Complementaridade com Outros Projetos RDT

A concessionária proponente possui projetos de RDT aprovados nas áreas de inspeção automatizada e inteligência artificial, e o presente projeto foi concebido para complementar esse portfólio sem sobreposição de escopo. A diferenciação apoia-se em três critérios objetivos: o objeto inspecionado, a condição do vagão na captura e o paradigma de sensoriamento. O projeto de detecção de rechego da própria concessionária, que compartilha com este a captura fixa sobre vagões em circulação, é tratado em subseção própria ao final desta seção, em resposta à ressalva do Comitê de RDT e RPMF.

Projeto RDT	**O que inspeciona**	**Paradigma**	**Executor / valor aprovado**
Sistema de Inspeção Ferroviária Automatizada Multiplataforma, baseado em Visão Computacional (processo 50505.065877/2025-08)	Via permanente: trilhos, dormentes, lastro e aparelhos de mudança de via (AMVs)	Plataformas móveis (embarcadas) e aéreas (drones): o sensor se desloca sobre o ativo fixo	SENAI + NEWON / R$ 11.421.593,89
Sistema de Fiscalização e Acompanhamento de Investimentos com IA (processo 50500.028795/2025-14)	Obras e investimentos (SAFF, BIM)	Fiscalização regulatória	SENAI / R$ 8.196.618,29

Projeto RDT	O que inspeciona	Paradigma	Executor / valor aprovado
Sistema de Fiscalização Mobile para Transporte Ferroviário (processo 50500.004853/2025-14)	Ferramenta de campo para fiscais da ANTT	Aplicativo integrado ao SAFF	Global Technologies / R$ 3.500.000,00
Monitoramento Inteligente da Integridade dos Cabos de Controle das Vias Ferroviárias (MOCAB; processo 50505.003968/2025-41)	Cabos de sinalização	Processamento de sinais elétricos	UFJF / R$ 4.655.279,21
Desenvolvimento de núcleo fundido de jacaré 1:14 (processo 50505.065620/2025-48)	Componente metalúrgico de via permanente (núcleo de jacaré de AMV)	Fundição e conformação mecânica	SENAI CIMATEC / R$ 4.640.695,69
Sistema automático de detecção de rechego em vagões de minério vazios por meio de tecnologia LiDAR, processamento em borda e visão computacional, com validação em ambiente ferroviário operacional relevante	Resíduo de carga (rechego) no interior de vagões de minério vazios	Instalação fixa com LiDAR, processamento em borda e visão computacional	Projeto da concessionária, apresentado ao Comitê na mesma janela deste (título conforme a Nota Técnica SEI 9349/2026)

É natural que este projeto e o Sistema de Inspeção Ferroviária Automatizada Multiplataforma, baseado em Visão Computacional, se enquadrem no mesmo tema prioritário do Comitê: ambos respondem à mesma agenda setorial de modernização da inspeção, e a coincidência de tema reflete a convergência do setor sobre o problema, não sobreposição de escopo. A complementaridade entre os dois é estrutural. Aquele projeto inspeciona a via permanente (trilhos, dormentes, lastro e AMVs) a partir de plataformas móveis e aéreas, em que o sensor se desloca sobre o ativo fixo; o presente projeto inspeciona o material rodante a partir de pórtico fixo, em que o ativo se desloca diante do sensor estacionário. São as duas metades complementares do sistema roda-trilho: não há

item inspecionável em comum entre a via permanente e os 39 componentes do vagão, nem paradigma de captura em comum entre plataforma móvel ou aérea e instalação fixa à margem da via.

A esses dois critérios soma-se um terceiro, metodológico, no plano das ferramentas de dimensionamento: o projeto de inspeção de via permanente entrega um ambiente virtual de apoio ao posicionamento do sistema de visão daquele escopo específico, em local único; a metodologia e a ferramenta de referência deste projeto predizem desempenho de detecção por modo de falha, otimizam a relação custo-desempenho e se atualizam com as estatísticas da própria operação (dimensionamento evolutivo), com avaliação sobre partição temporal independente. Os resultados de especificação de sensores daquele projeto, quando disponíveis em domínio público, serão consultados como insumo de partida, sem repetição de esforço.

O portfólio recente da concessionária inclui ainda um segundo projeto aprovado no Tema 09, de desenvolvimento de núcleo fundido de jacaré (processo nº 50505.065620/2025-48, executado pelo SENAI CIMATEC com a MRS, R$ 4.640.695,69): objeto metalúrgico de componente de via permanente, sem interseção com a inspeção automatizada de material rodante. A coincidência de instituição executora entre aquele projeto e este se dá em competências distintas da rede (conformação e fundição lá; óptica, sensoriamento e inteligência artificial aqui).

Os projetos de Fiscalização de Investimentos com IA e de Fiscalização Mobile têm propósito distinto: são instrumentos de fiscalização regulatória (acompanhamento de obras e investimentos e ferramenta de campo para fiscais, integrados ao SAFF), não sistemas de inspeção de condição de ativo. O MOCAB, por sua vez, monitora outro ativo (cabos de sinalização) com outra física de medição (sinais elétricos, não imagem).

Em síntese, não foi identificado, nos projetos de RDT publicados pela ANTT e nos pacotes de submissão consultados até julho de 2026, projeto dedicado à inspeção de condição dos componentes mecânicos do material rodante por pórtico fixo. O projeto de detecção de rechego da concessionária, apresentado na mesma janela, compartilha a captura fixa sobre vagões em circulação, mas tem objeto, condição de captura e local distintos, como mostra a subseção seguinte. O presente projeto ocupa espaço complementar ao portfólio, cobrindo a metade do sistema roda-trilho ainda não endereçada, e soma a ele: seus produtos de destinação pública (banco de imagens rotuladas de defeitos de material rodante, matriz de sensoriamento por modo de falha, metodologia e ferramenta de dimensionamento) constituem base metodológica reaproveitável por qualquer iniciativa de inspeção automatizada do setor, incluindo as já aprovadas.

2.5.1. Complementaridade com o projeto de detecção de rechego por LiDAR

A concessionária apresentou ao Comitê de RDT e RPMF, na mesma janela deste Plano, o projeto denominado “Sistema automático de detecção de rechego em vagões de minério vazios por meio de tecnologia LiDAR, processamento em borda e visão computacional, com validação em ambiente ferroviário operacional relevante”. Os dois projetos partem

de uma base comum, a captura por instalação fixa à margem da via sobre vagões em circulação, com processamento em borda, e foi essa base que motivou a ressalva do Comitê sobre o aproveitamento da mesma infraestrutura. A partir dela, porém, os projetos divergem no que inspecionam, em como capturam e em onde precisam estar. O local de validação deste projeto fica na região de Andrelândia/MG, e o do projeto de rechego, no ponto de retorno de vazios definido pela concessionária, na região de Brisamar, em Itaguaí/RJ. Três razões, a última ligada ao local, justificam a manutenção de locais de instalação distintos:

1. **Objeto inspecionado:** o projeto de rechego detecta resíduo de carga no interior de vagões de minério vazios, um problema operacional de descarga, com a visada voltada para dentro da caçamba. O PRISMA inspeciona a condição dos componentes mecânicos do vagão (rodas, sapatas, truques, timoneria, engates, estrutura, mangueiras e válvulas), um problema de segurança e de manutenção, com visadas lateral, inferior e superior sobre o vagão carregado. Cada objeto exige a sua própria geometria de captura, e um pórtico dimensionado para um deles não atende ao outro.
2. **Condição de captura:** o rechego só existe no vagão vazio, no retorno da descarga. A inspeção de truque, mola e roda exige o vagão carregado, com os componentes sob carga e o trem próximo da velocidade máxima autorizada para a composição carregada. O local de validação deste projeto é uma das poucas tangentes da malha em que a composição carregada circula a cerca de 64 km/h, a velocidade que interessa à inspeção. A capacidade de captura é dimensionada para até 100 km/h, teto da especificação técnica da concessionária, o que assegura margem para outros trechos, e a aferição em campo se faz na faixa de velocidades praticadas no trecho de validação, como registram os Objetivos Específicos (seção 1.2.2) e o quadro de metas mínimas. No ponto de retorno de vazios, os vagões passam descarregados, sem a condição de carga e velocidade que a inspeção deste projeto exige.
3. **Infraestrutura existente no local de validação:** o ponto definido para instalação do projeto PRISMA dispõe de leitora de identificação de ativos, que este projeto reutiliza para associar cada registro ao vagão, de abrigo compatível com a instalação dos conjuntos e de infraestrutura eletroeletrônica em condição de uso, com adequações menores. A concessionária estima, em ordem de grandeza, cerca de R$ 500 mil para uma leitora de identificação nova e cerca de R$ 500 mil para um abrigo equivalente. São estimativas da concessionária, informadas para dimensionar a economia, fora do orçamento deste projeto e sem pretensão de custo referencial. Instalar o PRISMA no ponto de retorno de vazios exigiria esses dois investimentos e, ainda assim, não ofereceria a condição de captura do item anterior.

Compartilhar a infraestrutura, portanto, não reduziria custo: exigiria investir no ponto de vazios cerca de R$ 1 milhão, em ordem de grandeza pela estimativa da concessionária, para construir o que Andrelândia já tem, e renunciaria à condição de captura que o objeto

inspecionado exige. Manter duas instalações é o uso racional dos recursos da concessionária.

O que os dois projetos compartilham é o aprendizado. Ambos convergem em processamento em borda, identificação automática de ativos e integração com os sistemas de gestão da concessionária, e os produtos de destinação pública deste projeto seguem o regime do Art. 12 da Resolução ANTT nº 6.021/2023 e ficam disponíveis ao setor.

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

Ao final do projeto, esperam-se resultados em quatro planos:

- **Tecnológicos:** as três tecnologias habilitadoras construídas, validadas experimentalmente e demonstradas em operação real, a saber, a matriz de sensoriamento por modo de falha, a arquitetura de conjuntos modulares com processamento local e a metodologia e ferramenta de dimensionamento custo-desempenho, esta última validada pela comparação entre desempenho previsto e realizado.
- **Operacionais (no ambiente de validação):** inspeção automatizada estendida, pelos conjuntos do projeto, a no mínimo 12 itens da matriz de inspecionáveis, em ao menos 4 posições de captura, com detecção precoce de precursores de descarrilamento em componentes críticos de segurança e registro rastreável por ativo. Cada vagão passa a ser inspecionado a cada passagem pelo portal, em circulação e sem retirada de operação, o que eleva de forma expressiva a cobertura e a frequência em relação ao processo manual amostral e reduz a necessidade de inspeção presencial em via, hoje realizada a céu aberto, sob sol, chuva e exposição a ambiente operacional de risco. A capacidade de expandir a inspeção é demonstrada dentro do próprio projeto, na segunda fase de instalação de conjuntos, cuja configuração é recomendada pela ferramenta de dimensionamento a partir de dados reais de operação e depois confrontada com o desempenho efetivamente medido em campo.
- **Científicos e de formação:** banco de imagens rotuladas de defeitos de material rodante; relatórios técnicos públicos; capacitação de equipes; publicação técnica e participação em evento do setor, nos termos da seção de seminários.
- **Setoriais:** redução da barreira técnica e econômica para a adoção da inspeção automatizada de material rodante por outros operadores ferroviários, por meio dos resultados de domínio público.

2.6.1. Distinção de Obrigações Contratuais

O escopo financiado por este projeto distingue-se integralmente das obrigações contratuais e regulamentares da concessionária. A manutenção do material rodante e a segurança operacional são obrigações permanentes, cumpridas pelos processos convencionais de inspeção e manutenção, que não dependem das tecnologias aqui propostas: o projeto não custeia atividade de manutenção, não substitui processo

obrigatório e não financia a operação de sistema existente. Durante toda a execução, o sistema em validação opera em paralelo e de forma subordinada a esses processos, que permanecem soberanos para as decisões operacionais.

O RDT financia exclusivamente a pesquisa e o desenvolvimento das três tecnologias habilitadoras descritas nas inovações propostas, os estudos exploratórios de novas modalidades de sensoriamento e as melhorias de infraestrutura do local de validação necessárias à pesquisa (pórtico de inspeção e estrutura de cobertura e proteção). Nenhuma dessas tecnologias está disponível em prateleira no domínio de aplicação, conforme o estado da arte apresentado, integra contrato em vigor ou constitui obrigação da concessionária, e todos os seus resultados terão destinação pública. A distinção alcança inclusive o nível dos componentes: a eventual aplicação pontual, pela concessionária, de componentes comerciais de sensoriamento ou iluminação fora do espectro visível, como solução de engenharia para posições específicas, não se confunde com o objeto deste projeto, que é a investigação sistemática e generalizável de qual tecnologia responde a cada modo de falha.

2.7. Participação em Seminários, Congressos e Visitas Técnicas

O projeto prevê: (i) seminário técnico de encerramento, com apresentação dos resultados à concessionária e à ANTT; e (ii) participação em ao menos 1 (um) evento técnico-científico do setor ferroviário, com submissão de ao menos 1 (uma) publicação técnica derivada dos resultados. Os custos do seminário e da participação em evento estão nos serviços da etapa de documentação, capacitação e transferência.

3. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

3.1. Métodos e Técnicas Utilizadas

3.1.1. Maturidade Tecnológica

O projeto parte de níveis de maturidade tecnológica (TRL) distintos por eixo e converge para a demonstração em ambiente operacional real, conforme descrito a seguir.

Matriz de sensoriamento e iluminação: do TRL 3 ao TRL 7. Entra em 3, prova de conceito analítica com indícios experimentais, e sai em 7, demonstração em ambiente operacional para as configurações selecionadas. Avaliações internas e o estado da arte indicam o potencial; a validação sistemática por modo de falha é o objeto da pesquisa. O TRL 7 aplica-se às configurações selecionadas e demonstradas em campo; as células da matriz validadas apenas em bancada permanecem no nível de validação em ambiente controlado (TRL 4) e são documentadas com o respectivo nível de evidência na matriz consolidada.

Conjuntos modulares de inspeção: do TRL 4 ao TRL 7. Entra em 4, componentes validados em ambiente controlado, e sai em 7, com os conjuntos operando em campo, em operação real. A entidade executora domina os blocos de captura de imagem em aplicações industriais e ferroviárias, com componentes validados em ambiente

controlado; interfaces padronizadas, autocalibração e pipeline por composição são desenvolvimento novo.

Dimensionamento custo-desempenho: do TRL 2 ao TRL 7. Entra em 2, conceito e formulação, e sai em 7 (ferramenta demonstrada em ambiente operacional: recomendação emitida com dados reais de operação, confrontada com a execução da fase 2 e verificada em campo). A metodologia não tem equivalente identificado no domínio; nasce analítica, é calibrada com os resultados dos ensaios e os dados históricos de inspeção da concessionária e tem a capacidade preditiva aferida em campanha plena na fase 1 e em verificação confirmatória após a instalação e verificação da fase 2. O TRL de saída 7 reflete a demonstração do ciclo previsto × realizado de ponta a ponta no portal em operação real, com partição temporal independente entre calibração e verificação: a versão que emite a recomendação da fase 2 é congelada e avaliada sobre dados posteriores, conforme o protocolo da seção de indicadores. A generalização do método a outras malhas e frotas é dimensão de escala de implantação, não de maturidade tecnológica, permanece como desdobramento futuro e não é demonstrada neste projeto.

Estudos exploratórios da frente paralela: do TRL 1 a 2 até 5 (validação em ambiente relevante), com piso de 3 (prova de conceito experimental), conforme a conclusão por modalidade. São modalidades de sensoriamento novas, sem aplicação estabelecida no domínio. As vertentes avaliadas em condição real na zona do portal (inspeção acústica e sensoriamento da interação roda-trilho) e as modalidades de imagem aplicadas sobre os dados do portal podem alcançar validação em ambiente relevante (TRL 5); a conclusão por modalidade nos marcos M7 e M15 documenta o nível efetivamente atingido, incluindo o resultado negativo.

A estratégia de execução segue o princípio de fidelidade progressiva: o conhecimento é construído em ensaios controlados com bancada portátil de captura nas oficinas da concessionária e bancada da ICT para componentes de pequeno porte, evolui para validação em condição dinâmica no posto experimental de captura, em condições reais de operação, e culmina na operação em ambiente operacional real, com as decisões de configuração (gates) fundamentadas nos resultados experimentais de cada etapa e o dimensionamento atualizado pela comparação sistemática entre desempenho previsto e realizado.

3.1.2. Métodos por eixo de desenvolvimento

Matriz de sensoriamento e iluminação orientada a modos de falha: Metodologia experimental em quatro passos: (i) priorização dos modos de falha a ensaiar, a partir da matriz de 39 itens inspecionáveis, com a priorização definida pela entidade executora a partir dos dados históricos de inspeção fornecidos pela concessionária e aprovada no gate G1; (ii) ensaios controlados com componentes reais portadores de defeitos de operação, em bancada portátil de captura instalada nas oficinas da concessionária e em bancada fixa da ICT para componentes de pequeno porte, varrendo modalidades de sensoriamento (espectro visível monocromático e colorido, NIR e SWIR), configurações de iluminação (geometria de campo claro e campo escuro, iluminação difusa e direcional, modo

contínuo e pulsado) e estados de polarização (paralela e cruzada entre iluminador e câmera); (iii) validação em condição dinâmica, em posto experimental de captura instalado em ponto de passagem da malha da concessionária, em operação real e com correlação com inspeção manual como referência de verdade; (iv) consolidação da matriz com métricas objetivas de detectabilidade (contraste local, relação sinal-ruído e desempenho de modelos de detecção treinados sobre as imagens de cada configuração) e critério explícito de custo-benefício por classe de defeito.

Conjuntos modulares de inspeção com processamento local: Métodos de engenharia de sistemas: especificação das interfaces padronizadas do módulo de inspeção (fixação mecânica, alimentação elétrica, rede de dados industrial e sincronismo de disparo entre sensor de via, câmeras e iluminação); processamento local concentrado em servidor expansível e modular junto ao portal, com detecção executada localmente e transmissão de resultados e evidências; autocalibração baseada em alvos de referência e verificação geométrica automática após instalação ou manutenção; e pipeline de processamento reconfigurável por composição, em que a adição de um módulo estende a cobertura de inspeção sem alteração dos demais. Os conjuntos são prototipados e ensaiados em bancada antes da montagem para o campo.

Metodologia e ferramenta de dimensionamento custo-desempenho: O modelo preditivo é construído em níveis crescentes de fidelidade: parte de modelos analíticos de formação de imagem (campo de visão, resolução espacial, profundidade de campo, borramento de movimento em função da velocidade e do tempo de exposição) e de iluminação (fotometria da cena); avança para dados sintéticos, com exploração ampla do espaço de configurações; e é calibrado com os resultados dos ensaios e com os dados históricos de inspeção da concessionária. Sobre essa base, formula-se o problema de otimização (espaço de decisão: tipos e quantidade de módulos, posições de captura, bandas espectrais, iluminação e processamento; restrições de instalação e orçamento; função objetivo custo × desempenho), implementado em ferramenta de software de referência, com dimensionamento evolutivo, em que as estatísticas de defeito coletadas pelo portal em operação atualizam as recomendações de expansão. A validação é a comparação sistemática entre o desempenho previsto pela ferramenta e o realizado em campo.

Validação integrada em operação: Campanhas de avaliação em operação real; referência de verdade estabelecida por correlação com inspeção manual dirigida; verificação do erro e da repetibilidade das medições para os itens de saída quantitativa; e análise estatística de desempenho por caso de uso e por condição operacional (dia, noite, chuva, carga). Os requisitos de desempenho da aplicação especificados pela concessionária (taxas de falso negativo e falso positivo inferiores a 0,1% por componente e por severidade, erro absoluto de até ±2 mm nos itens de saída quantitativa, captura a até 100 km/h e grau de proteção IP66 ou superior) são adotados em dois regimes, detalhados na seção de Indicadores de Impacto: os parâmetros de engenharia do sistema constituem metas mínimas verificáveis de aceitação da instalação e da operação; os desempenhos de detecção e de medição, que são o próprio objeto da pesquisa, têm nesses valores os

referenciais da aplicação, com os limiares de aceitação por célula pré-registrados no gate G1.

Estudos exploratórios de modalidades de fronteira: Frente paralela de investigação, em profundidade de estudo e prova de conceito, em duas vertentes: as modalidades de imagem (imagem hiperespectral; termografia ativa e correlação térmica bi-banda SWIR×LWIR, foco da vertente; e fusão multimodal), ensaiadas sobre amostras em bancada até o sétimo mês, com apoio da infraestrutura óptica da ICT co-executora e dos conjuntos exploratórios do projeto, e, a partir de então, sobre as imagens coletadas pelo próprio portal; e as modalidades não ópticas (inspeção acústica e sensoriamento da interação roda-trilho), com conjuntos exploratórios de avaliação dedicados, ensaiadas em bancada e avaliadas em condição real na zona do portal, correlacionando as assinaturas acústicas e de impacto com as evidências de imagem e a referência de verdade por ativo e por passagem.

3.1.3. Correspondência entre objetivos específicos, métodos e etapas

Os seis objetivos específicos do projeto distribuem-se pelos métodos e etapas descritos acima na correspondência a seguir.

O **primeiro objetivo específico**, a matriz de sensoriamento, apoia-se nos ensaios multimodalidade nas oficinas com a bancada portátil, na bancada da ICT e no posto experimental, com métricas de detectabilidade; executa-se nas Etapas 1, 2, 6 e 7. O **segundo**, os conjuntos modulares, apoia-se na engenharia de interfaces, no processamento local, na autocalibração e na prototipagem; executa-se nas Etapas 3, 4, 5 e 7. O **terceiro**, o dimensionamento, apoia-se no modelo preditivo em níveis crescentes de fidelidade, na formulação de otimização, na ferramenta de referência e no ciclo evolutivo; executa-se nas Etapas 4, 6 e 7. O **quarto**, a validação em operação, apoia-se nas campanhas em operação real, na verificação do erro e da repetibilidade das medições e na comparação entre previsto e realizado; executa-se nas Etapas 5, 6 e 7. O **quinto**, a difusão e a transferência, apoia-se na documentação, na capacitação e na participação em eventos; executa-se na Etapa 8. O **sexto**, a frente exploratória, apoia-se nos estudos e provas de conceito de novas modalidades de sensoriamento, com avaliação por modalidade nos marcos M7 e M15; executa-se na frente exploratória.

A Etapa 4 atende a dois objetivos específicos, o segundo e o terceiro, por concentrar, no mesmo esforço de desenvolvimento, o software de aquisição e processamento local dos conjuntos e a ferramenta de dimensionamento custo-desempenho.

3.2. Etapas e entregáveis

O projeto organiza-se em 8 etapas sequenciais com sobreposições planejadas, além de uma frente exploratória paralela, em 24 meses. O desenvolvimento começa pela experimentação: as campanhas de ensaio de sensoriamento e iluminação ocorrem nas oficinas da concessionária e na bancada da ICT desde o segundo mês (Etapa 2), com o posto experimental de captura instalado no mesmo período para testes controlados e pontuais em campo. A frente exploratória corre em paralelo do segundo ao décimo oitavo

mês, com avaliações de aplicabilidade no sétimo e no décimo quinto mês, que podem incorporar resultados maduros à implantação de campo, sem gate bloqueante sobre as etapas principais. O conhecimento consolidado nesse período experimental alimenta o projeto executivo e a instalação dos conjuntos de inspeção em duas fases: a primeira, entre o oitavo e o décimo primeiro mês, conforme o projeto executivo; a segunda, entre o décimo sexto e o décimo oitavo mês, que põe a ferramenta de dimensionamento à prova, com a recomendação de expansão, emitida com dados de operação, subsidiando a decisão conjunta de configuração no Marco M15 e sendo confrontada com o realizado em campo. Os gates, identificados por G1 a G6, são marcos formais de decisão técnica, com evidência exigida, decisor e consequência definidos, que estruturam a progressão da pesquisa; o Marco M15, por sua vez, é ponto de decisão conjunta de configuração, sem interrupção da execução.

As oito etapas e a frente exploratória reúnem dezesseis entregáveis, numerados em sequência contínua ao longo do capítulo e detalhados um a um nas seções seguintes. O quadro abaixo dá a visão de conjunto: etapa, entregáveis que a compõem, período e gate.

Etapa (entregáveis)	**Período**	**Gate**
E1 Especificação de requisitos e plano de execução integrado (entregáveis 1 e 2)	M1-M2	G1: plano de execução aprovado
E2 Matriz de sensoriamento e iluminação por modo de falha (entregáveis 3 e 4)	M2-M7	G2: configurações selecionadas para campo
E3 Projeto executivo dos conjuntos de inspeção (entregáveis 5 e 6)	M5-M7	G3: projeto executivo aprovado
E4 Plataforma de software de inspeção e ferramenta de dimensionamento (entregáveis 7 e 8)	M3-M15	marco intermediário em bancada (M7); entregas acopladas a G4 e G5
E5 Portal de inspeção implantado e integrado em campo, fase 1 de instalação (entregável 9)	M8-M11	G4: fase 1 instalada e verificada em campo
E5 fase 2 de instalação: expansão decidida no Marco M15, com a ferramenta de dimensionamento posta à prova (entregável 10)	M16-M18	marco intermediário, verificado no G5
E6 Validação em operação e relatório de desempenho (entregável 11)	M11-M20	G5: dossiê de validação em operação (duas fases)
E7 Operação assistida e recomendação de expansão (entregáveis 12 e 13)	M14-M23	fecha com G6
E8 Documentação, capacitação e transferência de tecnologia (entregáveis 14 e 15)	M21-M24	G6: aceite final

Etapa (entregáveis)	Período	Gate
FE Estudos exploratórios de modalidades de fronteira (entregável 16)	M2-M18	avaliações de aplicabilidade em M7 e M15; produto próprio, sem gate bloqueante

No sétimo mês, o G2 antecede o G3: o projeto executivo aprovado no G3 incorpora exclusivamente as configurações selecionadas no G2. Cada gate é descrito a seguir pelo que autoriza, pela evidência que exige e pela consequência da não aprovação. Salvo indicação em contrário, a decisão é tomada no comitê de acompanhamento do projeto, cuja composição, cadência e responsáveis estão formalizados no capítulo de Entidade e Equipe Executora: a entidade executora apresenta a evidência e responde tecnicamente pela proposta, e a concessionária aprova ou rejeita, no exercício da fiscalização e do aceite, sem executar atividade do projeto. As referências a decisão conjunta neste Plano remetem a essa forma.

G1, no segundo mês, aprova o plano de execução e congela o plano de ensaios pré-registrado, que fixa o conjunto de modos de falha, as hipóteses, os padrões de comparação, as amostras mínimas e os limiares de decisão por célula, além do protocolo de referência de verdade e da política de curadoria dos dados públicos. A evidência exigida é o plano de execução, o plano de ensaios e as especificações do posto experimental e da bancada. Sem aprovação, a Etapa 1 é replanejada e as campanhas de ensaio não se iniciam.

G2, no sétimo mês, seleciona as configurações de sensoriamento que vão a campo e congela a configuração variável da fase 1 de instalação, à vista da matriz ensaiada, com métricas de detectabilidade por célula, e da primeira avaliação de aplicabilidade da frente exploratória, com análise da ICT. A montagem de configuração variável reprovada fica bloqueada no G3: a fase 1 avança apenas com a arquitetura comum e as configurações aprovadas, e os ensaios das células reprovadas seguem em paralelo à janela da Etapa 4, até o décimo quinto mês, com correção e expansão na fase 2.

G3, no sétimo mês, após o G2, aprova o projeto executivo, que incorpora exclusivamente as configurações selecionadas no G2, e libera a montagem dos conjuntos e a execução das melhorias de infraestrutura do local. A evidência exigida é o projeto executivo completo, com especificação de integração validada pela concessionária. Sem aprovação, o projeto executivo é revisto antes de qualquer montagem e as janelas de instalação são renegociadas.

G4, no décimo primeiro mês, declara a fase 1 de instalação instalada e verificada em campo, mediante verificação formal de autocalibração, integração e captura em regime contínuo, e libera a validação plena em operação. Sem aprovação, um plano de correção da instalação antecede a campanha plena da Etapa 6.

O Marco M15, no décimo quinto mês, congela a recomendação de expansão da fase 2, isto é, a configuração e as posições de captura, e a versão da ferramenta que a emitiu. A evidência exigida é a recomendação emitida com dados de operação e intervalos de

confiança explícitos, somada à segunda avaliação de aplicabilidade da frente exploratória. Não havendo convergência na decisão conjunta, a fase 2 é executada na configuração conservadora do projeto executivo, com a divergência registrada para a análise de previsto contra realizado.

G5, no vigésimo mês, aprova o dossiê de validação em operação (P4), que cobre as duas fases de instalação e a exposição registrada, com desempenho por caso de uso e condição operacional, erro e repetibilidade das medições e verificação confirmatória da fase 2, aferido contra os mínimos de exposição pré-registrados no G1; células sem o mínimo são documentadas com o nível de evidência alcançado, sem elevação de TRL. Sem aprovação, a coleta é estendida na operação assistida (Etapa 7), com adendo ao dossiê antes do aceite final.

G6, no vigésimo quarto mês, é o aceite final do projeto e da transferência dos produtos, entregues conforme as especificações de aceite da seção de Produtos, com verificação documental de completude antecipada no M23 (atividade 8.4) e capacitação registrada. A decisão é da concessionária. Pendências identificadas na verificação do M23 são saneadas documentalmente antes do encerramento.

A antecipação de aquisições dos equipamentos de pesquisa (atividade 1.6) restringe-se aos itens de arquitetura comum e de longo prazo de importação, destinados às unidades de ensaio e avaliação; a configuração variável, que depende dos resultados experimentais, permanece aberta até o G2, e a fase 2 de instalação utiliza itens já previstos no plano logístico do projeto: o que o Marco M15 decide é configuração e posições de captura, não novos itens.

Critério de aceite técnico. Cada entregável descrito a seguir traz o próprio critério de aceite técnico, na forma do que se entrega, da evidência que o comprova e da decisão que o verifica (gate, marco ou registro de acompanhamento). A regra vale para todos e não se repete a cada item.

3.3. Etapa 1: Especificação de requisitos e plano de execução integrado (M1-M2)

Objetivo: consolidar os requisitos de pesquisa por item inspecionável, priorizar os modos de falha a ensaiar e estabelecer o plano de execução detalhado.

Desafios técnicos: compatibilizar a priorização de pesquisa com a disponibilidade real de componentes segregados por classe de defeito e com as janelas de acesso à via e às oficinas.

Responsável: entidade executora, com a ICT na coassinatura do plano de ensaios. Concessionária no acesso ao local e às oficinas e no fornecimento dos dados históricos de inspeção.

3.3.1. Entregável 1: Plano de execução integrado

Descrição: documento que consolida os requisitos de pesquisa por sistema inspecionável, a partir da matriz de 39 itens, e organiza a execução do projeto: cronograma detalhado,

plano logístico do projeto e riscos. É a base contratual e técnica sobre a qual as demais etapas se apoiam, e o único instrumento que autoriza o início das campanhas de ensaio.

Como será desenvolvido:

- 1.1 Consolidação dos requisitos por sistema inspecionável, a partir da matriz de 39 itens (1.1.1 revisão da matriz e das saídas esperadas por item; 1.1.2 priorização dos modos de falha a ensaiar, executada pela entidade executora a partir dos dados históricos de inspeção fornecidos pela concessionária).
- 1.2 Levantamento de campo no local do portal e nas oficinas da concessionária (infraestrutura disponível, pontos de instalação do posto experimental, logística de acesso a componentes segregados).
- 1.5 Consolidação do plano de execução (cronograma detalhado, plano logístico do projeto, riscos).
- 1.6 Antecipação das aquisições críticas dos equipamentos de pesquisa: especificação e disparo dos processos de compra dos itens de importação com prazo de entrega longo (câmeras e iluminadores de avaliação, incluindo as modalidades NIR e SWIR).

Produtos e resultados esperados: plano de execução aprovado, com a priorização dos modos de falha aprovada pela concessionária no gate G1 e as aquisições críticas disparadas. Estudo com previsão de transferência, relacionado na Lista de bens, produtos e estudos (Anexo VII).

Critério de aceite técnico: 01 plano de execução integrado aprovado no gate G1, contendo o cronograma detalhado, o plano logístico do projeto e a análise de riscos, com a lista nominal dos modos de falha priorizados aprovada pela concessionária no gate G1 e os processos de compra dos itens de importação de prazo longo formalmente disparados.

3.3.2. Entregável 2: Plano de ensaios pré-registrado e projeto do posto experimental

Descrição: define, antes de qualquer coleta, o conjunto fechado de modos de falha a ensaiar e o critério pelo qual cada célula da matriz será julgada, o que dá validade metodológica aos resultados da pesquisa. Inclui o projeto do posto experimental de captura e da bancada portátil, meios físicos das campanhas da etapa seguinte.

Como será desenvolvido:

- 1.3 Elaboração do plano de ensaios pré-registrado (conjunto fechado de modos de falha a ensaiar; hipótese, padrão de comparação, evidência mínima e limiar de decisão por célula; modalidades, configurações de iluminação e polarização) e do protocolo de referência de verdade (rotulagem, dupla leitura independente e adjudicação), além da política de curadoria e exclusão dos dados de destinação pública.
- 1.4 Projeto do posto experimental e da bancada portátil de captura.

Produtos e resultados esperados: plano de ensaios e protocolo de referência de verdade congelados no G1; especificações do posto experimental e da bancada portátil prontas para montagem. Estudos com previsão de transferência, relacionados na Lista de bens, produtos e estudos (Anexo VII), cujos resultados alimentam os produtos de destinação pública das etapas seguintes.

Critério de aceite técnico: 01 plano de ensaios pré-registrado e 01 protocolo de referência de verdade congelados no gate G1, e 02 especificações de projeto aprovadas para montagem, do posto experimental de captura e da bancada portátil.

3.4. Etapa 2: Matriz de sensoriamento e iluminação por modo de falha (M2-M7)

Objetivo: construir experimentalmente a matriz modo de falha × modalidade × iluminação × polarização e selecionar as configurações de sensoriamento para implementação em campo.

Desafios técnicos: obtenção de amostras representativas por classe de defeito; transposição dos resultados de bancada para a condição dinâmica (velocidade, vibração, iluminação ambiente variável).

Responsável: entidade executora. ICT nos ensaios de pequeno porte e na análise. Concessionária no acesso a oficinas, componentes e via.

3.4.1. Entregável 3: Infraestrutura de ensaio implantada

Descrição: conjunto de meios que viabiliza a experimentação dentro do próprio ambiente ferroviário: a bancada portátil de captura, operada nas oficinas sobre componentes segregados pela manutenção, e o posto experimental instalado em ponto de passagem da malha, que permite capturas controladas em condição dinâmica desde os primeiros meses do projeto.

Como será desenvolvido:

- 2.1 Montagem da infraestrutura de ensaio (2.1.1 recebimento e integração das câmeras e iluminadores de avaliação adquiridos na Etapa 1; 2.1.2 montagem da bancada portátil de captura; 2.1.3 instalação e verificação do posto experimental de captura em ponto de passagem da malha da concessionária).

Produtos e resultados esperados: bancada portátil e posto experimental instalados e verificados, com as câmeras e iluminadores de avaliação integrados e prontos para as campanhas. Os equipamentos aqui empregados integram os bens transferidos ao final do projeto.

Critério de aceite técnico: 01 bancada portátil de captura e 01 posto experimental de captura instalados e verificados em funcionamento, com as câmeras e os iluminadores de avaliação integrados, e o registro da verificação consignado no acompanhamento mensal do projeto.

3.4.2. Entregável 4: Matriz de sensoriamento ensaiada e configurações selecionadas

Descrição: primeira das três tecnologias habilitadoras do projeto. Associa cada classe de defeito do material rodante à combinação de banda espectral, geometria e modo de iluminação e estado de polarização com maior ganho de detectabilidade, com métricas objetivas por célula. É o insumo direto do projeto executivo dos conjuntos e a base do relatório técnico de destinação pública.

Como será desenvolvido:

- 2.2 Campanhas de ensaio nas oficinas da concessionária, com componentes reais segregados pela manutenção e portadores de defeitos de operação, caracterizados e classificados por classe de defeito pela entidade executora conforme o protocolo do G1, varrendo as combinações do plano de ensaios.
- 2.3 Ensaios de componentes de pequeno porte em bancada da ICT.
- 2.4 Captura em condição dinâmica no posto experimental, em operação real.
- 2.5 Processamento e análise (métricas de detectabilidade, treinamento de modelos de detecção de referência sobre as imagens de cada configuração).
- 2.6 Consolidação da matriz e seleção das configurações para o projeto executivo, incorporando a avaliação de aplicabilidade dos resultados da frente exploratória disponível no mesmo marco (M7).

Produtos e resultados esperados: P1.1 Relatório técnico dos ensaios de sensoriamento e iluminação, consolidado no M8, com a matriz ensaiada e as métricas de detectabilidade por célula; configurações de sensoriamento e iluminação selecionadas para campo; banco de imagens rotuladas em sua versão inicial, que evolui até o **P1.2**, entregue no M22.

Critério de aceite técnico: 01 decisão de configuração aprovada no gate G2, com a lista nominal das configurações de sensoriamento e iluminação selecionadas para campo, e 01 relatório técnico dos ensaios de sensoriamento e iluminação (P1.1) consolidado no M8, com as métricas de detectabilidade por célula ensaiada e os resultados negativos documentados.

3.5. Etapa 3: Projeto executivo dos conjuntos de inspeção (M5-M7)

Objetivo: projetar os conjuntos modulares de inspeção para montagem e implantação, incorporando as configurações selecionadas na Etapa 2.

Desafios técnicos: compatibilizar a padronização das interfaces com requisitos distintos por posição de captura; proteção ambiental para operação contínua em campo; acessibilidade para manutenção.

Responsável: entidade executora. Concessionária na validação da integração com a infraestrutura.

3.5.1. Entregável 5: Projeto executivo dos conjuntos de inspeção

Descrição: materializa em engenharia a segunda tecnologia habilitadora, a arquitetura de conjuntos modulares: interfaces padronizadas de fixação, alimentação, dados e sincronismo, e o subsistema de processamento local em servidor expansível. É o projeto que a frente de campo executa e a condição para que a capacidade de inspeção possa ser expandida depois sem reprojeto da instalação.

Como será desenvolvido:

- 3.1 Especificação das interfaces padronizadas do módulo (fixação mecânica, alimentação elétrica, rede de dados e sincronismo de disparo).
- 3.2 Projeto mecânico, elétrico e óptico dos conjuntos.
- 3.3 Projeto do subsistema de processamento local (servidor expansível e modular e sua integração com os conjuntos).

Produtos e resultados esperados: projeto executivo aprovado, pronto para execução, incorporando exclusivamente as configurações selecionadas no G2. Estudo com previsão de transferência, relacionado na Lista de bens, produtos e estudos (Anexo VII). Os conjuntos dele decorrentes integram os bens transferidos ao final do projeto.

Critério de aceite técnico: 01 projeto executivo dos conjuntos de inspeção aprovado no gate G3, apto para execução e incorporando exclusivamente as configurações selecionadas no G2, com a especificação de integração validada pela concessionária.

3.5.2. Entregável 6: Projeto das melhorias de infraestrutura do local de validação

Descrição: projeto do pórtico de inspeção e da estrutura de cobertura e proteção que recebem os conjuntos no local de validação, com a especificação da integração à infraestrutura existente e o plano de instalação em janelas de intervenção compatíveis com a operação ferroviária.

Como será desenvolvido:

- 3.4 Projeto das melhorias de infraestrutura do local (pórtico de inspeção e estrutura de cobertura e proteção), especificação da integração com a infraestrutura do local e plano de instalação.

Produtos e resultados esperados: projeto das melhorias de infraestrutura aprovado, com plano de instalação acordado com a operação da concessionária. As melhorias executadas integram os bens transferidos ao final do projeto.

Critério de aceite técnico: 01 projeto das melhorias de infraestrutura do local, com o pórtico de inspeção e a estrutura de cobertura e proteção, aprovado no gate G3, acompanhado de 01 plano de instalação acordado com a operação da concessionária, cuja aprovação libera a execução.

3.6. Etapa 4: Plataforma de software de inspeção e ferramenta de dimensionamento (M3-M15)

Objetivo: desenvolver o software de aquisição e processamento local dos conjuntos de inspeção e a ferramenta de referência de dimensionamento custo-desempenho.

Desafios técnicos: processamento em velocidade de linha na plataforma local; generalização dos modelos de detecção entre configurações de captura; calibração dos modelos preditivos com dados experimentais heterogêneos.

Responsável: entidade executora; ICT nos modelos preditivos, na simulação e nos dados sintéticos.

3.6.1. Entregável 7: Plataforma de software de inspeção

Descrição: software que opera os conjuntos em campo: captura sincronizada, detecção executada no servidor local, autocalibração após instalação ou manutenção e transmissão de resultados e evidências aos sistemas de gestão e manutenção da concessionária. É o que torna a arquitetura modular operável, com o pipeline reconfigurável por composição de módulos.

Como será desenvolvido:

- 4.1 Pipeline de aquisição e processamento local (captura sincronizada, detecção no servidor local, transmissão de resultados e evidências).
- 4.2 Autocalibração dos conjuntos (alvos de referência, verificação geométrica automática).
- 4.3 Modelos de detecção por caso de uso, treinados sobre os dados dos ensaios e refinados com dados de campo.
- 4.6 Integração com os sistemas de gestão e manutenção da concessionária.

Produtos e resultados esperados: software de aquisição e processamento local operacional em campo, com a integração com os sistemas da concessionária estabelecida. É componente embarcado dos bens transferidos e acompanha a transferência ao final do projeto.

Critério de aceite técnico: 01 demonstração do pipeline de aquisição e processamento local em bancada, no marco intermediário do M7, e 01 verificação em campo no gate G4, com o processamento local operacional, a integração com os sistemas da concessionária estabelecida e a captura operando em regime contínuo.

3.6.2. Entregável 8: Ferramenta de dimensionamento custo-desempenho

Descrição: terceira tecnologia habilitadora. Ferramenta de referência que, a partir dos itens a inspecionar, das metas de desempenho e das restrições de instalação, recomenda a configuração de câmeras, iluminação e processamento com estimativa de desempenho e custo. O modelo preditivo é construído em níveis crescentes de fidelidade, dos modelos analíticos aos dados sintéticos, e calibrado com os resultados dos ensaios da Etapa 2.

Como será desenvolvido:

- 4.4 Modelos preditivos de formação de imagem e iluminação; geração de dados sintéticos; calibração com os resultados da Etapa 2.
- 4.5 Ferramenta de dimensionamento (versão 1): recomendação de configuração com estimativa de desempenho e custo.

Produtos e resultados esperados: ferramenta em versão apta a emitir a recomendação de expansão com dados de operação, congelada no Marco M15 para a avaliação de capacidade preditiva. A versão final é entregue como **P3.2 Ferramenta de referência de dimensionamento**, no M22.

Critério de aceite técnico: 01 recomendação de expansão emitida no Marco M15, com intervalos de confiança explícitos e a versão da ferramenta que a emitiu congelada, e 01 validação da capacidade preditiva no gate G5, na comparação entre o desempenho previsto e o realizado.

3.7. Etapa 5: Portal de inspeção implantado e integrado em campo (M8-M11 e M16-M18)

Objetivo: montar, implantar, integrar e verificar funcionalmente os conjuntos modulares de inspeção no portal, em duas fases de instalação: a primeira conforme o projeto executivo e a segunda conforme a decisão do Marco M15, que põe à prova a recomendação de expansão emitida pela ferramenta de dimensionamento no ciclo evolutivo (Etapa 7).

Desafios técnicos: execução das instalações sem interferência na operação ferroviária; robustez ambiental dos conjuntos desde a entrada em operação; execução da fase 2 dentro da janela M16-M18, mitigada pela antecipação dos itens de longo prazo (atividade 1.6) e pelo uso de itens já previstos.

Responsável: entidade executora, que responde pelos meios de execução, pela montagem, pela implantação, pela verificação funcional e pela responsabilidade técnica da instalação em via em operação. Concessionária no acesso, nas janelas de intervenção e na infraestrutura de campo.

3.7.1. Entregável 9: Portal de inspeção instalado e integrado, fase 1 (M8-M11)

Descrição: primeira instalação de campo do projeto. Os conjuntos projetados na Etapa 3 são montados, ensaiados em bancada e instalados no local de validação, junto com as melhorias de infraestrutura, e integrados aos sistemas da concessionária, passando a capturar em regime contínuo com o trem em circulação.

Como será desenvolvido:

- 5.1 Montagem dos conjuntos conforme o projeto executivo.
- 5.2 Ensaios de bancada pré-campo (integração, autocalibração, desempenho de captura).

- 5.3 Instalação em campo, nas janelas de intervenção acordadas com a operação, incluindo a montagem das melhorias de infraestrutura do local (pórtico de inspeção e estrutura de cobertura e proteção) e a fixação dos conjuntos.
- 5.4 Integração com a infraestrutura de campo e os sistemas de gestão e manutenção da concessionária, com verificação formal da instalação (autocalibração e captura em regime contínuo).

Produtos e resultados esperados: fase 1 instalada e verificada em campo, cobrindo ao menos 4 posições de captura e capturando em regime contínuo, em operação real. Entrega do **P2 Relatório de integração dos conjuntos em campo**, no M11. Os conjuntos montados e instalados, com a instrumentação e as unidades de processamento associadas, integram os bens transferidos, entregues ao final do projeto após os ensaios em ambiente relevante.

Critério de aceite técnico: 01 verificação formal da instalação no gate G4, cobrindo autocalibração, integração e captura em regime contínuo em ao menos 4 posições de captura, e 01 relatório de integração dos conjuntos em campo (P2) entregue no M11.

3.7.2. Entregável 10: Expansão instalada e integrada, fase 2 (M16-M18)

Descrição: execução da expansão decidida no Marco M15, que é a prova prática do ciclo evolutivo: a configuração e as posições de captura vêm da recomendação emitida pela ferramenta de dimensionamento com dados reais de operação, e a instalação demonstra que a capacidade de inspeção se amplia sem reprojeto da instalação.

Como será desenvolvido:

- 5.5 Detalhamento executivo da expansão conforme a decisão do Marco M15, informada pela recomendação da ferramenta de dimensionamento, com itens já previstos no plano logístico do projeto (a decisão define configuração e posições de captura, não novos itens).
- 5.6 Montagem, implantação e integração dos conjuntos da fase 2, repetindo o procedimento de autocalibração e verificação.

Produtos e resultados esperados: fase 2 instalada e verificada conforme a decisão do Marco M15, demonstrando a expansão incremental sem reprojeto da instalação. Os conjuntos da fase 2 integram os bens transferidos ao final do projeto.

Critério de aceite técnico: 01 registro de instalação e verificação da fase 2, executada conforme a decisão do Marco M15, com o mesmo procedimento de verificação da fase 1; é marco intermediário, verificado no dossiê de validação aprovado no gate G5.

3.8. Etapa 6: Validação em operação e relatório de desempenho (M11-M20)

Objetivo: validar o desempenho das tecnologias em operação real e a capacidade preditiva da ferramenta de dimensionamento.

Desafios técnicos: raridade de defeitos reais em circulação (estatística de validação), mitigada pela priorização de itens de maior frequência e pela correlação com as inspeções de oficina; variação sazonal e ambiental ao longo da campanha.

Responsável: entidade executora, inclusive na inspeção manual dirigida de referência, executada por inspetores próprios sob o protocolo do G1. ICT na análise estatística e nos ensaios complementares. Concessionária no acesso aos ativos, às oficinas e aos componentes segregados e na disponibilização do histórico de inspeção.

3.8.1. Entregável 11: Dossiê de validação em operação

Descrição: consolida a evidência de que as tecnologias funcionam em operação real. Reúne o desempenho por caso de uso e condição operacional, o erro e a repetibilidade das medições nos itens de saída quantitativa e a comparação sistemática entre o desempenho previsto pela ferramenta e o realizado em campo, cobrindo as duas fases de instalação e aferido contra os mínimos de exposição pré-registrados no G1.

Como será desenvolvido:

- 6.1 Campanhas de coleta e avaliação de desempenho por caso de uso e por condição operacional (dia, noite, chuva, carga).
- 6.2 Estabelecimento da referência de verdade por inspeção manual dirigida, executada pela entidade executora com inspetores próprios, conforme o protocolo de rotulagem definido no G1 (dupla leitura independente, adjudicação de discordâncias por inspetor sênior e rastreabilidade por ativo), e verificação do erro e da repetibilidade das medições nos itens de saída quantitativa.
- 6.3 Ajuste fino de modelos e configurações a partir dos resultados.
- 6.4 Comparação sistemática entre o desempenho previsto pela ferramenta e o realizado em campo: campanha plena na fase 1 e, após a instalação e verificação da fase 2, verificação confirmatória da capacidade preditiva, com continuidade documentada na operação assistida (Etapa 7); a verificação confirmatória usa a versão da ferramenta congelada no marco M15, avaliada sobre dados posteriores ao congelamento e comparada com a configuração de referência do projeto executivo definida antes da observação dos resultados.
- 6.5 Validação da matriz de sensoriamento em condição operacional.

Produtos e resultados esperados: P4 Dossiê de validação em operação, entregue no M20, com adendo da operação assistida no M23; ferramenta de dimensionamento calibrada com dados reais e matriz de sensoriamento validada em condição operacional.

Critério de aceite técnico: 01 dossiê de validação em operação (P4) aprovado no gate G5, cobrindo as duas fases de instalação, com o desempenho por caso de uso e condição operacional, o erro e a repetibilidade das medições nos itens de saída quantitativa e a exposição aferida contra os mínimos pré-registrados no G1.

3.9. Etapa 7: Operação assistida e recomendação de expansão (M14-M23)

Objetivo: operar os conjuntos com acompanhamento sistemático e demonstrar o ciclo evolutivo do dimensionamento de ponta a ponta: recomendação emitida, posta à prova na fase 2 e validada em operação.

Desafios técnicos: prazo entre a emissão da recomendação e a execução da fase 2 dentro da janela prevista, mitigado pela decisão restrita a configuração e posições de captura, com materiais já previstos e itens de longo prazo antecipados (atividade 1.6); qualidade estatística da janela inicial de dados de operação que fundamenta a recomendação (tratada na Gestão de Riscos).

Responsável: entidade executora, inclusive na condução da operação assistida do sistema em validação. Concessionária no acesso, no fornecimento de energia e conectividade e na operação ferroviária do trecho, que permanece sob sua exclusiva responsabilidade.

3.9.1. Entregável 12: Recomendação de expansão e ciclo evolutivo demonstrado

Descrição: demonstração de ponta a ponta do dimensionamento evolutivo. As estatísticas de defeito coletadas pelo portal em operação alimentam a ferramenta, que emite a recomendação de expansão com intervalos de confiança explícitos no Marco M15; a versão que a emitiu é congelada, a expansão é executada na fase 2 e o previsto é depois confrontado com o realizado em campo.

Como será desenvolvido:

- 7.1 Operação assistida do sistema em validação, conduzida pela entidade executora, com acompanhamento de desempenho, disponibilidade e diagnóstico.
- 7.2 Atualização evolutiva do dimensionamento: incorporação das estatísticas de defeito coletadas em operação e emissão da recomendação de expansão (no Marco M15, com intervalos de confiança explícitos e congelamento da versão da ferramenta que a emitiu), que subsidia a decisão da fase 2 da Etapa 5, considerando também a segunda avaliação de aplicabilidade da frente exploratória (M15); segunda atualização evolutiva após a entrada em operação da fase 2.
- 7.4 Ajustes finais de software e configuração.

Produtos e resultados esperados: recomendação de expansão emitida com dados reais de operação e posta à prova na fase 2; segunda atualização evolutiva registrada. Entrega do **P3.3 Relatório previsto contra realizado**, no M20, com adendo no M23.

Critério de aceite técnico: 01 recomendação de expansão emitida no Marco M15, com a decisão conjunta registrada, e 01 relatório previsto contra realizado (P3.3) entregue no M20, com adendo da operação assistida no M23, verificado na aceitação final (G6).

3.9.2. Entregável 13: Resultados de pesquisa consolidados

Descrição: consolidação final dos resultados científicos do projeto, na forma em que serão transferidos ao domínio público: a matriz de sensoriamento validada em operação,

a metodologia de dimensionamento em sua versão final, a ferramenta de referência e o banco de imagens rotuladas com a política de curadoria aplicada.

Como será desenvolvido:

- 7.3 Consolidação dos resultados de pesquisa (matriz final validada em operação, entregue como P1.3, e metodologia final de dimensionamento).

Produtos e resultados esperados: P1.2 Banco de imagens rotuladas, **P1.3 Matriz de sensoriamento consolidada e validada em operação**, **P3.1 Metodologia de dimensionamento custo-desempenho** e **P3.2 Ferramenta de referência de dimensionamento**, todos entregues no M22, com destinação pública nos termos do Art. 12 da Resolução nº 6.021/2023.

Critério de aceite técnico: 04 produtos de destinação pública entregues no M22, a saber, banco de imagens rotuladas (P1.2), matriz de sensoriamento consolidada e validada em operação (P1.3), metodologia de dimensionamento custo-desempenho (P3.1) e ferramenta de referência de dimensionamento (P3.2), conferidos na aceitação final (G6) contra as especificações de aceite da seção de Produtos.

3.10. Etapa 8: Documentação, capacitação e transferência de tecnologia (M21-M24)

Objetivo: documentar, capacitar e transferir os resultados do projeto.

Responsável: entidade executora, com a ICT. Concessionária como destinatária da capacitação e responsável pelo aceite final (G6).

3.10.1. Entregável 14: Relatório final do projeto, documentação final e capacitação

Descrição: relatório final do projeto e documentação técnica completa do que foi desenvolvido, com os manuais necessários ao uso autônomo da ferramenta e dos conjuntos, e a capacitação das equipes da concessionária em operação, manutenção e uso da ferramenta. Inclui a difusão dos resultados no setor, por seminário de encerramento e participação em evento técnico-científico.

Como será desenvolvido:

- 8.1 Documentação final (relatórios técnicos, metodologia de dimensionamento, manuais da ferramenta).
- 8.2 Capacitação das equipes da concessionária (operação, manutenção e uso da ferramenta).
- 8.3 Seminário de encerramento e participação em evento do setor, com submissão de publicação técnica derivada dos resultados.

Produtos e resultados esperados: P5 Relatório final do projeto, documentação final e capacitação, entregue no M24, com registros nominais de treinamento e materiais entregues; publicação técnica submetida e participação em evento do setor realizadas.

Critério de aceite técnico: 01 relatório final do projeto, com a documentação final e a capacitação (P5), entregue no M24, com os relatórios técnicos, os manuais da ferramenta

e dos conjuntos e os registros nominais de treinamento das equipes da concessionária, somado a 01 seminário de encerramento realizado, 01 participação em evento do setor e 01 publicação técnica submetida. O aceite é dado no gate G6.

3.10.2. Entregável 15: Transferência dos produtos e dos bens

Descrição: ato final do projeto: a consolidação da lista de transferência e a disponibilização formal, conforme a Lista de Transferência (Anexo VII), dos produtos de destinação pública e dos bens de hardware adquiridos ou desenvolvidos com recursos do RDT, precedida de verificação documental de completude.

Como será desenvolvido:

- 8.4 Consolidação da lista de transferência e entrega dos produtos, com destinação pública, incluindo a verificação documental de completude no M23, prévia ao aceite final (G6).

Produtos e resultados esperados: produtos e bens transferidos conforme a Lista de Transferência anexa, com termo de transferência que registra configuração, documentação técnica e estado de conservação; os conjuntos de inspeção e o subsistema de processamento local são transferidos operacionais, integrados e verificados em campo.

Critério de aceite técnico: 01 lista de transferência consolidada e 01 termo de transferência dos produtos e dos bens, com configuração, documentação técnica e estado de conservação registrados, precedidos da verificação documental de completude no M23 e aceitos no gate G6. Pendências identificadas na verificação do M23 são saneadas documentalmente antes do encerramento.

3.11. Estudos de modalidades de fronteira e prova de conceito (M2-M18)

Objetivo: investigar, em profundidade de estudo e prova de conceito, modalidades de sensoriamento ainda não estabelecidas no domínio, nas duas vertentes da frente (modalidades de imagem: hiperespectral, termografia ativa e correlação térmica bi-banda SWIR×LWIR, foco da vertente, e fusão multimodal; modalidades não ópticas: inspeção acústica e sensoriamento da interação roda-trilho a partir da via), com avaliação objetiva de aplicabilidade ao portal nos marcos do projeto. Na vertente não óptica, o objeto medido é o material rodante (impacto, carga e assinatura de roda e rolamento por passagem), não a condição da via: não há sobreposição com o projeto RDT de inspeção de via permanente, que inspeciona a própria via.

Janela e encerramento. A frente corre do segundo ao décimo oitavo mês, encerrando-se seis meses antes do término do projeto. A janela é deliberada: permite que resultados maduros ainda sejam incorporados à implantação de campo nas avaliações do sétimo e do décimo quinto mês, e reserva os seis meses finais à validação em operação, à consolidação e à transferência dos resultados. A exploração, assim, não concorre com o encerramento do projeto, e nenhuma decisão de implantação fica dependente de investigação ainda em curso.

Responsável: entidade executora com a ICT.

3.11.1. Entregável 16: Estudo de modalidades de fronteira com prova de conceito

Descrição: investigação das cinco modalidades de fronteira da frente, com conclusão obrigatória e documentada por modalidade nos marcos de avaliação: incorporar à implantação, seguir em estudo ou arquivar com o resultado registrado, incluindo o negativo. A frente corre em paralelo às etapas principais e sem gate bloqueante sobre elas.

Como será desenvolvido:

- FE.1 Estudo aprofundado do estado da arte das modalidades investigadas pela frente.
- FE.2 Ensaios exploratórios em bancada, dentro da janela de ensaios do projeto (até M7), com os conjuntos exploratórios de avaliação da frente (sensoriamento SWIR e ópticas avançadas para a investigação espectral de fronteira, cujas câmeras respondem também pela banda SWIR da correlação térmica bi-banda; inspeção acústica; e inspeção inferior, para a avaliação do sensoriamento da interação roda-trilho a partir da via) e o apoio da bancada óptica da ICT e dos meios de imagem constituídos na quarta macroentrega da sua proposta técnica (Anexo III) para as modalidades de imagem, incluindo a termografia ativa e a banda LWIR da correlação térmica bi-banda; a vertente hiperespectral é investigada em estudo dirigido, com os conjuntos exploratórios e meios de imagem do próprio projeto.
- FE.3 Avaliação de aplicabilidade e recomendação de incorporação: no encerramento da janela de bancada (M7, em alinhamento com os gates G2 e G3), avaliação objetiva da maturidade dos resultados exploratórios, com recomendação de incorporação à matriz de sensoriamento e ao projeto executivo da fase 1 quando a maturidade permitir; segunda avaliação no M15, em alinhamento com a recomendação de expansão da Etapa 7, podendo alimentar a configuração da fase 2. As avaliações são por modalidade: cada uma das cinco modalidades da frente recebe, nos marcos, conclusão obrigatória e documentada (incorporar à implantação, seguir em estudo ou arquivar com resultado registrado, incluindo o negativo). A incorporação é oportunidade, não compromisso: a frente permanece sem gate bloqueante. A infraestrutura laboratorial da ICT para as modalidades de imagem da frente exploratória é constituída no âmbito da quarta macroentrega da proposta técnica da instituição (Anexo III), combinando a bancada óptica da instituição com os conjuntos exploratórios e os meios de imagem previstos no projeto.
- FE.4 Análise das modalidades sobre as imagens e dados coletados pelo portal e pelos conjuntos exploratórios avaliados na zona do portal (a partir de M8, cobrindo a fase 1 e, quando disponíveis, os dados da fase 2), incluindo a correlação das assinaturas acústicas e de impacto com as evidências de imagem por ativo e por passagem.
- FE.5 Relatório de estudos e prova de conceito, consolidando a conclusão documentada de cada modalidade.

Produtos e resultados esperados: P6 Estudo de modalidades de fronteira com prova de conceito, entregue no M18, podendo alcançar validação em ambiente relevante (TRL 5) para as modalidades avaliadas em condição real na zona do portal, conforme a conclusão por modalidade; avaliações de aplicabilidade registradas nos marcos M7 e M15, com recomendações de incorporação quando a maturidade permitir.

Critério de aceite técnico: 01 relatório de estudos e prova de conceito (P6) entregue no M18, com conclusão documentada para cada uma das 5 modalidades da frente, incluindo os resultados negativos, e 02 avaliações de aplicabilidade registradas nos marcos M7 e M15. As avaliações são marcos de acompanhamento, não de medição, e a frente não tem gate bloqueante sobre as etapas principais.

3.12. Indicadores de Impacto

O acompanhamento do projeto combina perguntas de pesquisa explícitas por etapa, que orientam a avaliação do progresso científico-tecnológico, critérios quantitativos de aceitação por etapa, metas mínimas de desempenho de engenharia do sistema, indicadores mensuráveis de execução e difusão e um protocolo de avaliação por tipo de saída, com padrões de comparação, evidência mínima e limiares de decisão pré-registrados no G1. Os requisitos de desempenho especificados pela concessionária são adotados no regime duplo definido na seção de métodos: os parâmetros de engenharia do sistema entram como metas mínimas diretamente verificáveis; os desempenhos de detecção e de medição entram como referenciais da aplicação, com os limiares de aceitação por célula pré-registrados no G1, pela justificativa metodológica registrada nesta seção.

O universo experimental é controlado em três níveis, com denominadores fixados antes da execução: **(1) cobertura analítica** dos 39 itens da matriz, assegurada pela matriz de sensoriamento (técnica recomendada por item) e pela ferramenta de dimensionamento (configuração recomendada), em que "não recomendado para inspeção automatizada no estágio atual" é saída válida e documentada da pesquisa; **(2) ensaio experimental de um conjunto fechado de modos de falha**, definido nominalmente no plano de ensaios aprovado no G1 a partir de regra objetiva de priorização (criticidade de segurança, frequência de ocorrência e disponibilidade de amostras), aplicada pela entidade executora aos dados históricos de inspeção fornecidos pela concessionária e aprovada no G1, de modo que "100% dos modos priorizados" refere-se a esse conjunto fechado, listado antes do primeiro ensaio, com redocumentação registrada no próprio plano para modo cuja amostra se inviabilize durante a execução; e **(3) validação em operação real** de um subconjunto de no mínimo 12 itens em ao menos 4 posições de captura. A priorização protege o atingimento desse piso de demonstração; a segunda fase de instalação, decidida no Marco M15 e executada ainda dentro do projeto, amplia a cobertura validada em operação; e a extensão aos demais itens da matriz fica habilitada, além do horizonte do projeto, pelos mesmos conjuntos, pela matriz e pela ferramenta.

Os pisos experimentais são complementares: a ICT co-executora compromete ensaios de bancada e provas de conceito para ao menos 15 itens inspecionáveis, conforme as

macroentregas 1 e 3 da sua proposta técnica (Anexo III), e a validação em operação real pelos conjuntos do portal tem piso de 12 itens em ao menos 4 posições de captura.

Critérios de aceitação por etapa. A aceitação de cada etapa é objetiva e verificável: o quadro a seguir consolida, por etapa, o instrumento de aceitação (gate ou marco) e os critérios quantitativos correspondentes, detalhados nos critérios de medição dos entregáveis e nas descrições dos gates.

Etapa	**Instrumento de aceitação**	**Critérios quantitativos de aceitação**
E1 (M1-M2)	Gate G1	01 plano de execução integrado aprovado; 01 plano de ensaios pré-registrado com 100% das células com hipótese, padrão de comparação, evidência mínima e limiar de decisão; 01 protocolo de referência de verdade; 02 especificações aprovadas (posto experimental e bancada portátil)
E2 (M2-M7)	Gate G2	100% dos modos de falha do conjunto fechado ensaiados nas modalidades e configurações do plano de ensaios; modo cuja amostra se inviabilize durante a execução é redocumentado no plano de ensaios, com registro da causa, sem prejuízo da aceitação da etapa; métricas de detectabilidade documentadas por célula, incluindo resultados negativos; 01 decisão de configuração aprovada
E3 (M5-M7)	Gate G3	01 projeto executivo apto para execução, incorporando exclusivamente as configurações selecionadas no G2, com especificação de integração validada pela concessionária; 01 projeto das melhorias de infraestrutura com plano de instalação acordado
E4 (M3-M15)	Marco M7, Gate G4 e Marco M15	01 demonstração do pipeline em bancada no M7; processamento local e integração com os sistemas da concessionária verificados em campo no G4, com captura em regime contínuo; 01 recomendação de expansão emitida no M15, com intervalos de confiança explícitos e a versão da ferramenta congelada
E5, fase 1 (M8-M11)	Gate G4	Conjuntos da fase 1 instalados e verificados em campo (autocalibração, integração e captura em regime contínuo) em ao menos 4 posições de captura; 01 relatório de integração (P2) entregue no M11
E5, fase 2 (M16-M18)	Verificação no Gate G5	01 registro de instalação e verificação da fase 2, executada conforme a decisão do Marco M15, com o mesmo procedimento de verificação da fase 1

Etapa	Instrumento de aceitação	Critérios quantitativos de aceitação
E6 (M11-M20)	Gate G5	01 dossiê de validação em operação com no mínimo 12 itens validados em ao menos 4 posições de captura; erro e repetibilidade documentados por item de saída quantitativa; exposição aferida contra os mínimos pré-registrados no G1
E7 (M14-M23)	Gate G6	Metas mínimas de engenharia do sistema aferidas mensalmente na operação assistida, conforme o quadro seguinte; 01 relatório previsto contra realizado (P3.3) no M20, com adendo no M23; 04 produtos de destinação pública entregues no M22
E8 (M21-M24)	Gate G6	Os 10 produtos entregues e transferidos; registros nominais de capacitação; 01 seminário de encerramento; 01 participação em evento do setor; 01 publicação técnica submetida
FE (M2-M18)	Avaliações de aplicabilidade em M7 e M15	As cinco modalidades da frente com conclusão documentada no relatório de estudos (P6, M18), incluindo resultados negativos

Metas mínimas de desempenho de engenharia do sistema. Os parâmetros de engenharia do sistema têm metas mínimas fixadas desde já, porque a sua verificação não depende do desfecho das questões de pesquisa: dependem de projeto, instalação e operação corretos. Os quatro primeiros parâmetros do quadro derivam da especificação técnica da concessionária e são verificados no projeto executivo e na verificação formal da instalação; os três últimos são aferidos mensalmente durante a operação assistida (Etapa 7) e consolidados no dossiê de validação e na documentação de encerramento.

Parâmetro	Meta mínima	Verificação
Velocidade de captura	capacidade de captura dimensionada para trens a até 100 km/h, conforme a especificação técnica da concessionária	projeto executivo (G3) e verificação da instalação (G4); em operação, aferição na faixa de velocidades praticadas no trecho de validação
Borramento de movimento na captura	até 1 pixel	verificação da instalação (G4)
Grau de proteção dos equipamentos de campo	IP66 ou superior	projeto executivo (G3) e verificação da instalação (G4)

Parâmetro	Meta mínima	Verificação
Iluminação nas regiões de inspeção	acima de 100 lux em condição estática, conforme a especificação da concessionária	verificação da instalação (G4)
Disponibilidade do sistema	ao menos 90% ao mês na operação assistida, excluídas as indisponibilidades programadas e as causas externas à instalação (fornecimento de energia e rede da concessionária)	apuração mensal na Etapa 7, consolidada no G6
Associação de registros ao ativo	ao menos 95% das passagens com registro associado ao vagão, por associação automática ou por reconciliação pela composição do trem	apuração mensal na Etapa 7, consolidada no G6
Tempo de disponibilização dos resultados	até 2 horas entre a passagem e a disponibilização dos resultados na plataforma, durante a operação assistida (Etapa 7)	apuração mensal na Etapa 7, consolidada no G6

A iluminância mínima refere-se à condição estática da especificação técnica; a exposição de captura em movimento é assegurada por iluminação pulsada dedicada, dimensionada no projeto executivo e verificada pelo critério de borramento.

Meta mínima não atingida na verificação de instalação enseja plano de correção antes da liberação da campanha plena; meta de apuração mensal abaixo do mínimo em dois ciclos consecutivos aciona plano de correção formal no comitê de acompanhamento, e a consolidação no G6 considera a série mensal com as correções registradas.

Referenciais de desempenho da aplicação e limiares pré-registrados. Para os desempenhos de detecção e de medição, que constituem o próprio objeto da pesquisa, a especificação técnica da concessionária estabelece os referenciais da aplicação: taxas de falso negativo e falso positivo inferiores a 0,1% por componente e por severidade e erro absoluto de até ±2 mm nos itens de saída quantitativa. Esses referenciais orientam o projeto das soluções e a avaliação de maturidade para uso operacional. Os limiares de aceitação da pesquisa, por sua vez, são fixados por célula da matriz no plano de ensaios pré-registrado do gate G1, pelos motivos que seguem: (i) o limiar por célula depende do denominador experimental (modos de falha priorizados, amostras disponíveis por classe de defeito e condição operacional), que a entidade executora consolida na Etapa 1, a partir dos dados fornecidos pela concessionária, e submete à aprovação no G1; (ii) o pré-registro

antes do primeiro ensaio impede o ajuste de critérios a posteriori e é metodologicamente mais rigoroso do que a fixação antecipada de um número único para células heterogêneas; (iii) o plano pré-registrado é documento formal aprovado, auditável no acompanhamento e nos relatórios de acompanhamento anuais, contra o qual o cumprimento é aferido nos gates G2 e G5; e (iv) o resultado que não atinge o referencial da aplicação permanece resultado válido de pesquisa, documentado com o nível de evidência alcançado, sem comprometer a aceitação das etapas, que se dá pelos critérios do quadro de aceitação por etapa.

Protocolo de avaliação por tipo de saída. Cada célula ensaiada da matriz tem registro prévio, no plano de ensaios do G1, de hipótese (modalidade candidata e ganho esperado sobre o padrão de comparação), padrão de comparação, métrica primária, evidência mínima e limiar de decisão; os valores são fixados antes do início dos ensaios da célula correspondente e não se alteram depois, e o resultado negativo (modalidade sem ganho sobre o padrão de comparação) é registrado como resultado de pesquisa. O protocolo aplica-se a seis tipos de saída:

Detecção qualitativa (condição). O padrão de comparação é a melhor técnica estabelecida em espectro visível para o mesmo modo de falha, e a métrica primária é a detectabilidade por célula (contraste local, relação sinal-ruído e desempenho de modelo de detecção de referência), com conjunto de teste separado do de treinamento. A evidência mínima é a amostra por célula fixada no plano de ensaios (G1), com validação em campo estratificada por condição operacional (dia, noite, chuva, carga). O critério de decisão é o ganho sobre o padrão de comparação no limiar pré-registrado da célula, com intervalo de confiança explícito; sem o ganho, a célula é documentada como coberta pela técnica estabelecida.

Medição dimensional. O padrão de comparação é a medição manual de referência e a métrica primária é o erro de medição e a repetibilidade. A evidência mínima são os ensaios de medição com peças, operadores e procedimento de referência definidos no protocolo do G1, e o critério de decisão é o erro e a repetibilidade dentro da tolerância pré-registrada por item de medição.

Predição da ferramenta de dimensionamento. O padrão de comparação é a configuração de referência do projeto executivo, definida antes da observação dos resultados, e a métrica primária é o erro de predição por caso de uso, com intervalos de confiança explícitos. A evidência mínima é a partição temporal independente, com a versão da ferramenta congelada no marco M15 e avaliada sobre os dados posteriores ao congelamento. O critério de decisão é o erro documentado por caso de uso e a redução demonstrada entre a versão calibrada em ensaios e a calibrada em campo, sem compromisso de significância estatística pré-fixado, uma vez que a raridade de defeitos reais é tratada na Gestão de Riscos.

Modularidade e integração. O padrão de comparação é a primeira integração realizada no projeto, registrada como contrafactual, e a métrica primária é o tempo de integração, as horas de engenharia, a necessidade de recalibração e as alterações de interface por conjunto integrado. A evidência mínima é o registro de instalação e verificação de todos

os conjuntos das duas fases de instalação, e o critério de decisão é a redução documentada em relação ao contrafactual da primeira integração.

Autocalibração. O padrão de comparação é a calibração manual pós-intervenção e a métrica primária é o sucesso da recalibração automática e o desvio geométrico residual. A evidência mínima são os ensaios repetidos pós-intervenção, conforme o protocolo do G1, e o critério de decisão é a recalibração demonstrada sem equipe especializada em campo, com repetibilidade registrada.

Estudos exploratórios da frente de fronteira. O padrão de comparação é a técnica estabelecida para o modo de falha alvo e a métrica primária é o ganho de detectabilidade ou a viabilidade da medição em prova de conceito. A evidência mínima é a prova de conceito em bancada e, quando aplicável, os dados da zona do portal. O critério de decisão é a conclusão obrigatória por modalidade nos marcos M7 e M15: incorporar à implantação, seguir em estudo ou arquivar com resultado registrado.

Perguntas de pesquisa por etapa. Cada etapa de pesquisa responde a uma pergunta explícita, que orienta a avaliação do progresso científico-tecnológico:

- **Etapa 2:** quais modos de falha do material rodante apresentam ganho de detectabilidade em modalidades fora do espectro visível, sob qual configuração de iluminação e polarização?
- **Etapas 3 e 5:** que conjunto de interfaces padronizadas permite compor capacidade de inspeção de forma incremental, mantendo o desempenho de captura em cada posição?
- **Etapa 4:** com que erro é possível prever, antes da implantação, o desempenho de detecção de uma configuração de sensoriamento?
- **Etapa 6:** o desempenho previsto confirma-se em operação real, por caso de uso e por condição operacional?
- **Etapa 7:** as estatísticas coletadas em operação sustentam recomendações de expansão com melhor compromisso custo-desempenho que o dimensionamento inicial?
- **Frente exploratória:** alguma das novas modalidades demonstra maturidade que justifique a incorporação ao portal nos marcos de avaliação ou ciclo futuro de pesquisa aplicada?

Indicadores mensuráveis. O projeto é acompanhado por treze indicadores, cada um com meta e forma de medição definidas:

- **Pré-registro do plano de ensaios:** 100% das células ensaiadas com hipótese, padrão de comparação, evidência mínima e limiar de decisão registrados no G1, antes do ensaio. Medição pelo plano de ensaios (G1) e pelo relatório dos ensaios (P1.1).
- **Cobertura experimental da matriz de sensoriamento:** 100% dos modos de falha do conjunto fechado definido no G1 ensaiados nas modalidades e

configurações do plano de ensaios. Medição pelo registro dos ensaios por célula da matriz, contra a lista nominal do G1.

- **Documentação de resultados da matriz:** 100% dos modos de falha ensaiados com resultado documentado, incluindo resultados negativos. Medição pelo relatório técnico dos ensaios (P1.1) e pela matriz consolidada (P1.3).
- **Erro de predição da ferramenta de dimensionamento:** erro documentado por caso de uso, com intervalos de confiança explícitos e redução demonstrada entre a versão calibrada em ensaios e a versão calibrada em campo, sob partição temporal independente (versão congelada no marco M15). Medição pela comparação previsto × realizado (P3.3).
- **Tempo de integração de novo conjunto de inspeção:** documentado por conjunto e reduzido em relação ao contrafactual da primeira integração (horas de engenharia, tempo de parada, recalibração e alterações de interface). Medição pelo registro de instalação e verificação por conjunto.
- **Recalibração automática pós-intervenção:** demonstrada sem necessidade de equipe especializada em campo, com repetibilidade verificada em ensaios repetidos pós-intervenção. Medição pelos ensaios de autocalibração registrados.
- **Cobertura analítica do portal completo:** 100% dos 39 itens da matriz contemplados pela matriz de sensoriamento (técnica recomendada por item) e pela ferramenta de dimensionamento (configuração recomendada). Medição pelo relatório dos ensaios (P1.1), pela matriz consolidada (P1.3) e pela metodologia de dimensionamento (P3.1).
- **Itens validados em operação pelos conjuntos do projeto:** no mínimo 12 itens da matriz, distribuídos em ao menos 4 posições de captura distintas. Medição pelo dossiê de validação em operação (P4).
- **Ciclo evolutivo de dimensionamento executado de ponta a ponta:** recomendação de expansão emitida com dados de operação, posta à prova na fase 2 e confrontada em campo pela comparação previsto × realizado, com a decisão do Marco M15 registrada. Medição pelo relatório previsto × realizado (P3.3) e pelo dossiê de validação em operação (P4).
- **Capacitação:** equipes de operação e manutenção da concessionária capacitadas nos produtos do projeto. Medição pelos registros de treinamento.
- **Difusão:** participação em ao menos 1 evento do setor e submissão de ao menos 1 publicação técnica. Medição pelos comprovantes de participação e submissão.
- **Estudo de modalidades de fronteira (P6):** as cinco modalidades da frente com estudo documentado e conclusão de aplicabilidade registrada nas avaliações dos marcos M7 e M15 e consolidada no relatório da frente exploratória (M18), incluindo resultados negativos. Medição pelo relatório P6 e pelas avaliações de aplicabilidade da frente exploratória.

- **Produtos de destinação pública:** os 10 produtos entregues e transferidos (P1.1 a P6). Medição pela lista de transferência.

Além dos treze indicadores, o impacto setorial esperado é a redução da barreira técnica e econômica de adoção da inspeção automatizada de material rodante, mensurada pela própria ferramenta de dimensionamento (custo estimado por item inspecionado nas configurações recomendadas, ante o paradigma de sistemas monolíticos), com disponibilização pública do conjunto completo de resultados.

3.13. Gestão de Riscos

Cada risco é apresentado a seguir com a probabilidade e o impacto estimados, a mitigação preventiva, o gatilho objetivo que aciona a resposta e a contingência, com o responsável por executá-la. Os dezesseis riscos identificados estão organizados em quatro grupos: riscos de pesquisa e de evidência experimental, riscos de logística, instalação e operação em campo, riscos de segurança operacional e cibernética e riscos de recursos, acesso e governança de dados.

3.13.1. Riscos de pesquisa e de evidência experimental

Modalidades espectrais sem ganho relevante para parte dos modos de falha priorizados. Probabilidade média, impacto médio. A mitigação preventiva é a triagem preditiva por modelos analíticos antes das aquisições; a matriz inclui o espectro visível, e o resultado negativo documentado também orienta o setor, uma vez que a inspeção do item permanece coberta pela técnica estabelecida. A resposta é acionada por células com resultado abaixo do limiar pré-registrado ao longo da Etapa 2, e a contingência, a cargo da entidade executora, é a cobertura do item pela técnica estabelecida, com o resultado negativo documentado como produto da pesquisa.

Seleção de configurações com base em janela experimental limitada (gate G2 no M7). Probabilidade baixa, impacto médio. A mitigação preventiva reúne a janela de ensaios de seis meses, a segunda fase de instalação (M16-M18), que permite corrigir e expandir configurações com base em dados reais de operação sem reprojeto da instalação, e o posto experimental, que antecipa dados de condição dinâmica desde os primeiros meses. O gatilho é a evidência insuficiente, no G2, para célula candidata à fase 1; a contingência, decidida pela entidade executora em conjunto com a concessionária, é restringir a fase 1 às configurações com evidência suficiente, com correção e expansão na fase 2.

Raridade de defeitos reais em circulação durante as campanhas de validação. Probabilidade alta, impacto médio. A mitigação preventiva combina a priorização de itens de maior frequência de ocorrência, a correlação com as inspeções de oficina como fonte adicional de casos, o aproveitamento dos registros históricos de inspeção da concessionária, a emissão da recomendação do ciclo evolutivo com intervalos de confiança explícitos e a janela de validação de dez meses (M11-M20), com variação sazonal ampla e duas fases de instalação. O gatilho é a contagem de ocorrências por classe abaixo do plano de validação nas revisões mensais de campanha. A contingência,

conduzida pela entidade executora, é a coleta dirigida com componentes segregados e registros de inspeção de oficina disponibilizados pela concessionária e a ampliação da correlação com essas inspeções; se os mínimos de exposição do G1 não forem atingidos até o G5, cabe adendo pela operação assistida (M23) antes do aceite final ou rebaixamento documentado do nível de validação da célula.

Recomendação de expansão da fase 2 fundamentada em janela inicial de dados de operação (M11-M15). Probabilidade média, impacto médio. A mitigação preventiva é a emissão da recomendação com intervalos de confiança explícitos, a decisão de configuração da fase 2 tomada em conjunto com a concessionária e a previsão dos itens da fase 2 no plano logístico do projeto, com os itens de longo prazo antecipados na Etapa 1, já que a recomendação define configuração e posições de captura, não novos itens. O gatilho são intervalos de confiança da recomendação acima do patamar pré-acordado no G4, e a contingência, de decisão conjunta, é executar a fase 2 na configuração conservadora do projeto executivo, com a divergência registrada para a análise de previsto contra realizado.

Qualidade e consistência da referência de verdade (rotulagem e inspeção manual). Probabilidade média, impacto alto. A mitigação preventiva é o protocolo de rotulagem do G1, com dupla leitura independente, adjudicação de discordâncias e rastreabilidade por ativo, somado ao treinamento dos inspetores no protocolo. O gatilho é a taxa de discordância entre leitores acima do patamar do protocolo; a contingência, a cargo da entidade executora com análise da ICT, é a re-adjudicação por inspetor sênior distinto do da adjudicação original, a reciclagem do treinamento e a reavaliação das células afetadas.

Deriva de desempenho entre famílias de vagões e condições não representadas nos ensaios. Probabilidade média, impacto médio. A mitigação preventiva é a amostragem de validação estratificada por família de vagão e condição operacional, com monitoramento de desempenho por estrato nas campanhas. O gatilho é a diferença de desempenho entre estratos acima do esperado nos relatórios de campanha, e a contingência, executada pela entidade executora com a ICT, é a coleta dirigida do estrato deficitário e a recalibração dos modelos, com registro na matriz consolidada.

3.13.2. Riscos de logística, instalação e operação em campo

Atraso na importação de câmeras e iluminadores de avaliação. Probabilidade média, impacto alto, concentrado no início do cronograma. A mitigação preventiva é a antecipação dos itens críticos ainda na Etapa 1 (atividade 1.6), o mapeamento de alternativas de fornecimento no plano logístico do projeto, o sequenciamento dos ensaios priorizando as modalidades disponíveis e o monitoramento de descontinuidade de modelos junto aos fornecedores. O gatilho é o desvio de prazo de fornecedor em item do caminho crítico do plano logístico, e a contingência, a cargo da entidade executora, é o acionamento das alternativas de fornecimento mapeadas e o resequenciamento dos ensaios.

Janelas de intervenção restritas para instalação em via ativa. Probabilidade média, impacto médio. A mitigação preventiva é o planejamento das janelas com a operação

desde a Etapa 1 e a concepção modular da instalação, própria para intervenções curtas e incrementais. O gatilho é a janela prevista negada ou reduzida pela operação, e a contingência, conduzida pela entidade executora com a operação da concessionária, é o replanejamento modular das instalações em janelas curtas subsequentes.

Dependências de integração com a infraestrutura do local e os sistemas de gestão e manutenção da concessionária. Probabilidade baixa, impacto médio. A mitigação preventiva é a especificação de integração formalizada no projeto executivo (Etapa 3) e a verificação da instalação por etapas, com critérios objetivos. O gatilho é a não conformidade de integração na verificação da instalação, e a contingência, a cargo da entidade executora, é a correção a cada etapa antes do avanço, conforme os critérios do projeto executivo.

Degradação óptica dos conjuntos em campo (sujidade, oclusão, intempéries). Probabilidade alta, impacto médio. A mitigação preventiva é o projeto dos conjuntos com grau de proteção adequado, janelas ópticas substituíveis e rotina de autoverificação de qualidade de imagem. O gatilho é a queda sustentada das métricas de qualidade de imagem (foco, contraste, oclusão) na autoverificação, e a contingência, executada pela entidade executora com acesso concedido pela concessionária, é a limpeza ou troca da janela óptica na janela de manutenção seguinte, com registro do período degradado nas análises.

Falha de associação entre registro de inspeção e ativo na passagem. Probabilidade média, impacto médio. A mitigação preventiva é o sincronismo do disparo com sensor de via e a identificação automática de ativos, com verificação de consistência pela composição do trem. O gatilho é a taxa de registros sem ativo associado acima do patamar definido no G1, e a contingência, conduzida pela entidade executora, é a reconciliação retroativa pela composição do trem, com os dados de composição fornecidos pela concessionária, e a exclusão dos registros irreconciliáveis das análises.

3.13.3. Riscos de segurança operacional e cibernética

Tratamento das detecções com potencial de segurança durante o período de validação. Probabilidade média, impacto alto. A mitigação preventiva é estrutural: o sistema em validação opera em paralelo e de forma subordinada ao processo convencional de inspeção e manutenção da concessionária, que permanece soberano para as decisões operacionais, incluindo a retirada de vagão de operação; as detecções têm caráter de dado de pesquisa e correlação, não de laudo de manutenção, e nenhuma decisão de circulação depende do sistema em validação. O gatilho é qualquer detecção de não conformidade com potencial de segurança pelo sistema em validação, e a contingência, a cargo da concessionária, é o encaminhamento imediato ao processo convencional, que decide, com registro como dado de pesquisa e correlação.

Segurança cibernética da instalação de campo (rede industrial e dados de operação). Probabilidade baixa, impacto alto. A mitigação preventiva é a segregação de rede, o acesso autenticado, o tráfego cifrado e o princípio do menor privilégio na integração com os sistemas de gestão e manutenção da concessionária, sendo que o sistema em validação

não comanda nenhuma função operacional. O gatilho é evento ou alerta de segurança na rede da instalação de campo, e a contingência, conduzida pela entidade executora com a área de tecnologia da concessionária, é o isolamento do segmento afetado, sem impacto à circulação, e a análise conjunta antes da reconexão.

3.13.4. Riscos de recursos, acesso e governança de dados

Descontinuidade de acesso a oficinas, componentes segregados e ativos para a inspeção manual de referência. Probabilidade baixa, impacto alto. A mitigação preventiva é a formalização das contrapartidas de acesso no plano de execução aprovado no gate G1. O gatilho é a indisponibilidade de oficina, componentes ou acesso aos ativos por período que comprometa campanha prevista, e a contingência, a cargo da entidade executora, é a reprogramação da campanha e o uso de componentes segregados e do histórico de inspeção como fontes alternativas, com o acesso restabelecido pela concessionária.

Escassez de recursos humanos especializados na interseção visão computacional, óptica e domínio ferroviário. Probabilidade baixa, impacto médio. A mitigação preventiva é o núcleo técnico já constituído na entidade executora, a complementação pela ICT e a capacitação interna contínua. O gatilho é a vacância em posição-chave por mais de um ciclo mensal de acompanhamento, e a contingência, a cargo da entidade executora, é o remanejamento do núcleo técnico e a complementação pela ICT.

Governança dos dados de destinação pública (imagens e dados de operação). Probabilidade baixa, impacto médio. A mitigação preventiva é a política de curadoria e exclusão definida no G1, que mantém dados operacionais sensíveis fora das bases públicas, com revisão de curadoria antes de cada entrega. O gatilho é a identificação de dado sensível em lote candidato à publicação, e a contingência, executada pela entidade executora com aprovação da concessionária, é a quarentena do lote e nova revisão de curadoria antes da entrega.

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

Prazo e condição de início

01 de janeiro de 2027 observada a comunicação formal do início do projeto à ANTT.

Tempo de execução.

O projeto tem duração de 24 (vinte e quatro) meses, com início previsto em janeiro de 2027, condicionado à aprovação da ANTT e à subsequente celebração dos instrumentos contratuais.

Custo total

O custo total do projeto é de R$ 7.880.615,14 (sete milhões, oitocentos e oitenta mil, seiscentos e quinze reais e quatorze centavos).

Cronograma Execução	Ano Concessão	Recurso Ano	Recurso
ago/26 a jul/27	5	2	R$ 505.792,07
ago/26 a jul/27	5	3	R$ 377.140,27
ago/26 a jul/27	5	4	R$ 1.578.677,54
ago/27 a jul/28	6	4	R$ 5.098.934,25
ago/28 a jul/29	7	7	R$ 320.071,01

O detalhamento por etapa, atividade e item consta do Cronograma Físico-Financeiro (Anexo II) e do Orçamento Analítico (Anexo VI).

5. LOCAL DE EXECUÇÃO

O projeto será executado em quatro ambientes complementares: (i) instalações da entidade executora, na Rua Martins Fontes, 75, sala 402, Jardim Amália, Volta Redonda/RJ, CEP 27251-330, onde se concentram o desenvolvimento de software, a integração dos conjuntos e a gestão do projeto; (ii) instalações da ICT co-executora (SENAI CIMATEC), para simulação, dados sintéticos, ensaios de componentes de pequeno porte e os ensaios exploratórios das modalidades de imagem da frente exploratória (termografia ativa e correlação térmica bi-banda SWIR×LWIR, com imagem multiespectral, conforme a quarta macroentrega da proposta técnica da instituição, Anexo III, que compreende a implantação da infraestrutura laboratorial das modalidades de fronteira; a vertente hiperespectral apoia-se em estudo dirigido e nos conjuntos exploratórios e meios de imagem do próprio projeto); (iii) oficinas de manutenção de vagões da concessionária, com as unidades definidas no plano de execução aprovado no G1, conforme a disponibilidade de componentes segregados por classe de defeito e a logística das campanhas, para os ensaios com componentes reais; e (iv) o local de validação na malha da concessionária, na região de Andrelândia/MG, em tangente com circulação de trens carregados e com leitora de identificação de ativos, abrigo e alimentação elétrica já existentes (seção 2.5), que receberá o posto experimental de captura, as melhorias de infraestrutura do projeto (pórtico de inspeção e estrutura de cobertura e proteção), a instalação dos conjuntos e as campanhas de validação.

A presença da equipe da entidade executora no local de validação e nas oficinas ocorre em duas camadas. A primeira são as viagens de marco, uma por marco verificável de campo (levantamento inicial em M1, abertura e fecho das campanhas de ensaio da Etapa 2, instalação e verificação da fase 1 em M8 e M11, implantação e verificação da fase 2 em M16 e M18, abertura e fecho das campanhas de validação da Etapa 6, abertura e fecho da operação assistida da Etapa 7 e seminário de encerramento em M24), doze ao todo, cada uma vinculada no Orçamento Analítico à etapa e à atividade que atende e detalhada na Memória de Cálculo das Despesas de Viagem (Anexo XI). A segunda é a presença de

campo contínua durante as campanhas de ensaio (Etapa 2), de validação (Etapa 6) e a operação assistida (Etapa 7), que integra o escopo de serviço dessas etapas e é remunerada nas respectivas linhas de serviço, sem linha própria de viagem.

6. ENTIDADE E EQUIPE EXECUTORA

6.1. Identificação da entidade

Entidade executora: Embeddo Computação Aplicada Ltda., CNPJ 19.710.442/0001-50, com sede na Rua Martins Fontes, 75, sala 402, Jardim Amália, Volta Redonda/RJ, CEP 27251-330, entidade executora dos serviços de engenharia de desenvolvimento, teste e validação das tecnologias de inspeção, em dois escopos de natureza distinta (desenvolvimento de engenharia e software, com os equipamentos de pesquisa adquiridos como insumo do serviço, e engenharia de infraestrutura e aplicação em campo, para a montagem, a implantação, a integração e a verificação funcional do portal no local de validação), responsável pela coordenação geral e técnica, pelos ensaios de sensoriamento, pelo projeto e desenvolvimento dos conjuntos modulares, pelo software, pela ferramenta de dimensionamento, pela execução de campo e pelos componentes que integram os conjuntos de inspeção, o subsistema de processamento local e as melhorias de infraestrutura do local de validação. A entidade tem histórico de desenvolvimento e validação de sistemas de visão computacional e sensoriamento aplicados a ambientes industriais e ferroviários, conforme os currículos da equipe técnica (Anexo V).

Histórico e qualificação:

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

Desde sua fundação, a empresa consolidou histórico de conversão de recursos públicos e privados em soluções de P&D e inovação de base tecnológica: executou mais de 10 projetos com apoio de instituições como FAPERJ, FINEP e CNPq, além de contratos diretos com grandes empresas da indústria nacional; possui três patentes depositadas e produtos próprios 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. Em 2022, foi reconhecida como TOP 1 Autotech no ranking nacional 100 Open Startups e, em 2024, foi investida pelo fundo Oxygea. A empresa opera em sede própria com mais de 300 m² em Volta Redonda/RJ e conta com equipe multidisciplinar de 25 profissionais.

Na vertical ferroviária, a Embeddo atua como parceira da MRS Logística no desenvolvimento e na operação de soluções de monitoramento embarcado em locomotivas, vigilância inteligente de passagens de nível e geolocalização de vagões. Essa experiência direta com o ambiente operacional ferroviário confere à equipe

conhecimento prático das condições de campo, dos protocolos de segurança e dos requisitos de integração com os sistemas operacionais da concessionária.

Escopo da entidade executora:

O escopo da entidade executora compreende serviços de engenharia para desenvolvimento, teste e validação de tecnologias de inspeção de componentes, em dois escopos de natureza distinta, e não prevê aquisição de materiais ou equipamentos pela concessionária. O primeiro, de desenvolvimento de engenharia e software, compreende o levantamento de requisitos, os ensaios de sensoriamento, o projeto executivo, o software e a ferramenta de dimensionamento, a validação em operação, a operação assistida, a documentação e a frente exploratória, com os equipamentos de pesquisa adquiridos pela entidade executora como insumo do serviço. O segundo, de engenharia de infraestrutura e aplicação em campo, compreende a montagem, a implantação, a integração e a verificação funcional do portal no local de validação, com todos os meios de execução incluídos. O objeto do escopo é a capacidade de inspeção em funcionamento, e não a soma de componentes: a escolha de cada câmera, óptica, iluminador, unidade de processamento e elemento estrutural decorre dos resultados experimentais da matriz de sensoriamento e do projeto executivo aprovado no gate G3, de modo que especificação, logística, montagem, calibração e integração formam um só encadeamento técnico.

Cada escopo inclui projeto, meios de execução, integração, calibração, sobressalentes, garantias e responsabilidade técnica, e não apenas os componentes. Nas melhorias de infraestrutura do local de validação, o pórtico de inspeção e a estrutura de cobertura e proteção, o escopo de campo compreende ainda o projeto estrutural, a anotação de responsabilidade técnica e a montagem em ambiente ferroviário operacional, executada nas janelas de intervenção acordadas com a operação e sem interrupção da circulação. Parte relevante dos equipamentos de pesquisa é de venda restrita ou sob encomenda, como câmeras e ópticas SWIR e iluminação especializada, cujos prazos de importação a entidade executora antecipa na Etapa 1 (atividade 1.6) e cujo risco logístico assume, na forma da Gestão de Riscos.

Os resultados são aferidos pelo desempenho do conjunto em campo, não pelo item isolado. Durante a execução, os equipamentos de pesquisa e os conjuntos aplicados em campo permanecem sob responsabilidade da entidade executora, aplicados no local de validação. Ao término do projeto, os bens relacionados na Lista de Transferência anexa serão transferidos, observado o Art. 12 da Resolução ANTT nº 6.021/2023 (Entregável 15). O pórtico de inspeção e a estrutura de cobertura, incorporados à infraestrutura do local de validação, seguem o Art. 13 da mesma Resolução.

ICT co-executora: Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, Departamento Regional da Bahia (SENAI CIMATEC), CNPJ 03.795.071/0013-50, Av. Orlando Gomes, 1845, Piatã, Salvador/BA, CEP 41650-010, responsável por simulação e modelos preditivos, geração de dados sintéticos, ensaios de componentes de pequeno porte em bancada, análise estatística das campanhas e ensaios complementares, com atuação concentrada nos primeiros 18 meses do projeto, conforme as quatro macroentregas da proposta técnica da instituição (Anexo III).

Concessionária: MRS Logística S.A., responsável pelo acesso ao ambiente de validação (portal, via e oficinas), pelas janelas de intervenção, pelo fornecimento de energia, conectividade e dados e pela gestão, fiscalização e aceite do contrato. A concessionária não executa etapa nem atividade do projeto, e o único valor a ela destinado é o dos custos administrativos da contratação, nos termos do § 5º do Art. 10 da Resolução ANTT nº 6.021/2023.

As condições de acesso e acompanhamento asseguradas pela concessionária, já refletidas nos campos de responsável das etapas, consolidam-se no quadro a seguir:

Condição de acesso ou acompanhamento	**Etapas / meses**
Acesso ao local de validação e instalação do posto experimental de captura	E1-E2, M1-M7 (posto instalado no início da Etapa 2)
Acesso às oficinas e disponibilização de componentes segregados pela manutenção, portadores de defeitos de operação (a caracterização e a classificação por classe de defeito são da entidade executora)	E2, M2-M7; sob demanda nas campanhas de validação e na operação assistida (E6-E7), para coleta dirigida conforme a Gestão de Riscos
Janelas de intervenção para instalação dos conjuntos de inspeção	E5: fase 1 M8-M11; fase 2 M16-M18
Acesso aos ativos, às oficinas e aos registros necessários à inspeção manual dirigida de referência, executada pela entidade executora conforme o protocolo de rotulagem do G1	E6, M11-M20
Gestão e fiscalização do contrato (gestora e fiscal do contrato), acompanhamento no comitê e formalização das aprovações dos gates	Contínuo, M1-M24
Fornecimento de energia elétrica e conectividade no local de validação	Contínuo, da instalação da fase 1 ao término (M8 a M24)
Disponibilização dos dados de composição dos trens e do histórico de inspeção	Etapas 1, 4 e 6
Acesso e interface aos sistemas de gestão e manutenção para a integração	Etapas 3 a 5

6.2. Identificação da equipe executora

6.2.1. Equipe da entidade executora (Embeddo)

A equipe da entidade executora alocada ao projeto é composta por treze profissionais, identificados a seguir por nome completo, CPF, função no projeto e titulação:

- **Daniel Giacometti Amaral**, CPF 055.501.517-31, coordenador geral do projeto, mestrado.
- **Rafael Morais Alves**, CPF 111.158.377-37, coordenador técnico, graduação.
- **Gustavo Luis Furtado Vicente**, CPF 852.111.337-49, líder de hardware e sensoriamento, doutorado.
- **Giancarlo Vilela de Faria**, CPF 021.234.427-71, pesquisador em sistemas embarcados e óptica, doutorado.
- **Luan Felipe Santos Alves**, CPF 195.354.647-10, líder de software, graduação.
- **Alexandre Esposte Santos**, CPF 138.180.527-27, pesquisador em visão computacional, mestrado.
- **Pedro Carvalho Ramos**, CPF 061.949.537-56, pesquisador em visão computacional, graduação, com mestrado em andamento.
- **Julio Cesar Caldeira Moreira**, CPF 195.754.227-67, líder de sistemas embarcados, graduação.
- **Lucas Silveira Nascimento**, CPF 118.747.767-25, desenvolvedor full-stack, graduação.
- **Leonardo Carlos da Silva Dias**, CPF 166.236.837-20, engenheiro de aplicação de campo, graduação.
- **Guilherme da Matta Mangueira**, CPF 134.476.017-10, coordenador administrativo, graduação.
- **Gabriel Almeida de Oliveira**, CPF 161.351.927-36, analista de projetos de P&D, graduação.
- **Bianca Campos Reis**, CPF 192.534.387-11, líder de operações, graduação.

6.2.2. Equipe da ICT co-executora (SENAI CIMATEC)

A equipe do SENAI CIMATEC será alocada pela instituição conforme as competências requeridas pelo projeto, com perfis nas áreas de sensoriamento óptico, visão computacional, aprendizado de máquina e validação experimental. A definição nominal dos pesquisadores será formalizada na proposta técnica da instituição e no instrumento de parceria a ser firmado.

No arranjo de execução, a ICT tem responsabilidade técnica definida e verificável: conduz a análise estatística das campanhas; coassina o plano de ensaios pré-registrado no G1 (protocolo de avaliação, evidência mínima e limiares de decisão) e os relatórios analíticos das campanhas (P1.1, P3.3 e P4), com atuação analítica e apoio remoto às campanhas de campo, cuja execução é da entidade executora; e responde pelos modelos preditivos, pela geração de dados sintéticos (Etapa 4) e pelos ensaios de componentes de pequeno porte (Etapa 2). O esforço por etapa e a equipe nominal constam da proposta

técnica da instituição, que integra o pacote de submissão (Anexo III) e o instrumento de parceria.

6.3. Governança e acompanhamento do projeto

A governança do projeto é exercida por papéis nomeados nas equipes desta seção. Pela concessionária, a gestão do contrato cabe a Jessica Camila Costa Pinto, gestora do contrato, responsável pela gestão técnica e administrativa do instrumento contratual, e a fiscalização cabe a Raquel de Freitas Oliveira, fiscal do contrato, responsável pelo acompanhamento da execução, pela conferência dos critérios de aceite técnico e pelo encaminhamento das aprovações. Pela entidade executora, a coordenação geral é de Daniel Giacometti Amaral e a coordenação técnica é de Rafael Morais Alves. Pela ICT co-executora, responde o coordenador designado pela instituição no instrumento de parceria; os currículos da equipe indicada pela instituição constam do Anexo V.

Comitê de acompanhamento. O comitê de acompanhamento do projeto, referido no capítulo de Desenvolvimento do Projeto, é composto, pela concessionária, pela gestora do contrato e pela fiscal do contrato; pela entidade executora, pelo coordenador geral e pelo coordenador técnico; e, pela ICT co-executora, pelo coordenador da instituição, sempre que a pauta envolver as responsabilidades dela. O comitê reúne-se ordinariamente uma vez por mês e, extraordinariamente, na janela de decisão de cada gate e do Marco M15, com registro em ata das deliberações, das evidências apresentadas e das pendências.

Responsáveis pelas decisões dos gates. As decisões dos gates G1 a G5 e do Marco M15 são tomadas no comitê de acompanhamento: a entidade executora apresenta a evidência exigida pelo gate e responde tecnicamente pela proposta, a ICT co-executora subscreve as análises de sua responsabilidade e a concessionária aprova ou rejeita, com a aprovação formalizada em ata pela gestora do contrato e pela fiscal do contrato. O gate G6, aceite final do projeto e da transferência dos produtos, é decisão da concessionária, formalizada pela gestora do contrato com a conferência da fiscal do contrato.

7. PRODUTOS

O projeto gera dez produtos, todos com destinação pública nos termos do Art. 12 da Resolução nº 6.021/2023 e todos base da Lista de Transferência anexa. Cada um é descrito a seguir, com o tipo, o conteúdo e o mês de entrega.

P1.1 Relatório técnico dos ensaios de sensoriamento e iluminação (relatório técnico, entregue no M8). Matriz modo de falha × modalidade × iluminação × polarização, com resultados documentados por classe de defeito, incluindo resultados negativos.

P1.2 Banco de imagens rotuladas (base de dados, componente intelectual, entregue no M22). Imagens dos ensaios e das campanhas, rotuladas por item, defeito, modalidade e configuração de captura. O corte de dados é o fim do M21; os registros posteriores da operação assistida integram o adendo de P4, no M23.

P1.3 Matriz de sensoriamento consolidada e validada em operação (relatório técnico, entregue no M22). Versão final da matriz modo de falha × modalidade × iluminação ×

polarização, consolidada com os dados das campanhas em operação das duas fases de instalação. O corte de dados é o fim do M21; as atualizações da operação assistida são documentadas no adendo de P4, no M23.

P2 Relatório de integração dos conjuntos em campo (relatório técnico, entregue no M11). Integração dos conjuntos da fase 1 à infraestrutura do portal e resultados da verificação da instalação; a integração da fase 2 é documentada no dossiê de validação (P4).

P3.1 Metodologia de dimensionamento custo-desempenho (metodologia, na forma de relatório técnico, entregue no M22). Método completo: modelos preditivos, procedimento de dimensionamento e critérios de decisão. Os dados sintéticos e os cenários de simulação produzidos pela ICT co-executora na Etapa 4 integram, respectivamente, o banco de dados de ensaios (P1.2) e a metodologia de dimensionamento (P3.1), com a mesma destinação pública.

P3.2 Ferramenta de referência de dimensionamento (ferramenta, entregue no M22). Ferramenta que recomenda configuração de sensoriamento, iluminação e processamento com estimativas de desempenho e custo.

P3.3 Relatório previsto × realizado (relatório técnico, entregue no M20, com adendo da operação assistida no M23; a versão transferida inclui o adendo). Comparação sistemática entre o desempenho previsto pela ferramenta e o realizado em operação: campanha plena na fase 1 e verificação confirmatória na fase 2, sob partição temporal independente, com a versão da ferramenta congelada no marco M15 e a continuidade documentada na operação assistida.

P4 Dossiê de validação em operação (relatório técnico, entregue no M20, com adendo da operação assistida no M23, que traz a exposição adicional da fase 2; a versão transferida inclui o adendo). Desempenho por caso de uso e condição operacional, erro e repetibilidade das medições e validação da matriz em campo, cobrindo as duas fases de instalação: a fase 1 em campanha plena e a fase 2 em verificação confirmatória do ciclo evolutivo.

P5 Relatório final do projeto, documentação final e capacitação (relatório final, documentação e capacitação, entregue no M24). Relatório final do projeto, manuais da ferramenta e dos conjuntos e registros de capacitação das equipes.

P6 Estudo de modalidades de fronteira (estudo com prova de conceito, entregue no M18). Modalidades de imagem (hiperespectral, termografia ativa e correlação térmica bi-banda SWIR×LWIR, e fusão multimodal) e modalidades não ópticas (inspeção acústica e sensoriamento da interação roda-trilho): estudo aprofundado e prova de conceito experimental, incluindo a correlação entre assinatura física e evidência de imagem.

Bens de hardware transferidos. Além dos produtos documentais e intelectuais relacionados acima, o projeto transfere, em linha de produto, o sistema de inspeção de material rodante em pórtico fixo instalado e operacional, que reúne os conjuntos modulares de inspeção, o subsistema de processamento local, a instrumentação de metrologia e os conjuntos exploratórios, e a infraestrutura do local de validação (pórtico

de inspeção e estrutura de cobertura e proteção), descritos na linha da Etapa 5 da Lista de Transferência anexa, cujos valores são agregados por etapa. Esses bens são entregues ao final do projeto, após os ensaios e a validação em ambiente relevante, no aceite final (G6), operacionais, integrados e verificados em campo. A plataforma de software de inspeção é componente embarcado do sistema e acompanha a transferência com a documentação técnica necessária à sua operação e manutenção. Os equipamentos de pesquisa são adquiridos pela entidade executora como insumo do serviço e os conjuntos da fase de campo são produzidos no escopo de engenharia de infraestrutura e aplicação em campo, todos custeados com recursos do RDT, aplicados no local de validação a partir da implantação e transferidos ao final do projeto conforme a Lista de Transferência anexa (Art. 12 da Resolução ANTT nº 6.021/2023), acompanhados da documentação técnica, das garantias e dos sobressalentes incluídos no escopo. A infraestrutura do local de validação segue o Art. 13 da Resolução ANTT nº 6.021/2023.

Especificações de aceite dos produtos de destinação pública. A entrega de cada produto observa especificação de aceite verificável, consolidada no plano de execução (G1) e conferida no aceite final (G6): (i) relatórios técnicos e metodologia (P1.1, P1.3, P2, P3.1, P3.3, P4, P6): documento em formato aberto, com os dados e parâmetros necessários à leitura independente dos resultados; (ii) banco de imagens rotuladas (P1.2): imagens em formato aberto, esquema de rotulagem documentado (dicionário de dados por item, defeito, modalidade e configuração de captura), metadados de captura por imagem e política de curadoria e exclusão de dados operacionais sensíveis aplicada antes da publicação; (iii) ferramenta de referência de dimensionamento (P3.2): ferramenta entregue com documentação de uso e demonstração de funcionamento registrada; (iv) capacitação (P5): registros nominais de treinamento e materiais entregues. Os bens físicos da Lista de Transferência acompanham termo de transferência com configuração, documentação técnica e estado de conservação; os conjuntos de inspeção e o subsistema de processamento local são transferidos operacionais, integrados e verificados em campo.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS / NORMATIVOS APLICÁVEIS

Fontes citadas no texto e normativos aplicáveis:

- ANTT. Resolução nº 6.021, de 2023 (regulamento do RDT).
- ANTT. Superintendência de Transporte Ferroviário. Portaria SUFER nº 17, de 6 de dezembro de 2023 (procedimentos e instruções complementares à Resolução nº 6.021/2023), com as alterações das Portarias SUFER nº 9, de 9 de agosto de 2024, e nº 6, de 22 de setembro de 2025.
- ANTT. Deliberação nº 28, de 30 de janeiro de 2026 (temas prioritários de destinação dos RDT, com vigência até 27 de junho de 2028).
- ANTT. Portal de Dados Abertos, dataset “Acidentes Ferroviários (RAAF)”. https://dados.antt.gov.br/dataset/relatorio-de-acompanhamento-de-acidentes-ferroviarios-raaf. Acesso em 01/07/2026.

- INFRA S.A. / ONTL. Panorama do Sistema Ferroviário Brasileiro com Foco em Carga Geral. 2025.
- WABTEC. Fichas técnicas dos sistemas de inspeção wayside (ThermalCAM, WheelView, TreadView). Acesso em 01/07/2026.
- DUOS TECHNOLOGIES. Form 10-K (exercício 2023) e comunicado de 16/05/2022. SEC EDGAR. Acesso em 01/07/2026.
- MERMEC. Train Temperature measurement system (documentação de produto). Acesso em 01/07/2026.
- AAR. How Freight Rail Wayside Detectors Work; padrões AAR S-6001 e S-6031 (conforme documentação de fabricante). Acesso em 01/07/2026.
- MOSLEH, A. et al. Recent advances in wayside condition monitoring for railways: a comprehensive review. Railway Engineering Science, 2026.
- NORFOLK SOUTHERN. Patente US 12.269.524 B2. 2025.
- IDEASTREAM PUBLIC MEDIA. Norfolk Southern deploys high-speed inspection portal near East Palestine. 15/12/2023. Acesso em 23/07/2026.
- NORFOLK SOUTHERN. Safety enhancements align with NTSB East Palestine final recommendations (release via PRNewswire). Junho de 2024. Acesso em 23/07/2026.
- ENSCO (KLD Labs). WheelScan (documentação de produto). Acesso em 01/07/2026.

9. ANEXOS DO PLANO DE TRABALHO

Deverão ser apensados os anexos listados a seguir, e outros que se fizerem necessários:

I - Resumo do Plano de Trabalho;

II - Cronograma físico-financeiro do projeto;

III - Proposta técnica e comercial;

IV - Orçamento analítico;

V - Currículos;

VI - Lista de bens, produtos e estudos com previsão de transferência;

VII - Justificativa de Contratação da Entidade Executora e Comprovação de Preços;

VIII - Justificativa de Contratação da ICT Co-executora;

IX - Memória de Cálculo das Despesas de Viagem da Entidade Executora Justificativa de escolha do fornecedor;

X - Declaração de observância ao disposto na Resolução nº 6.021, de 2023, e na Portaria nº 17, de 2023.