ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres

RDT - Recurso de Desenvolvimento Tecnológico

PLANO DE TRABALHO

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DOS IMPACTOS DA UTILIZAÇÃO DE ÓLEO DIESEL B30 EM LOCOMOTIVAS DE CARGA: DESEMPENHO, MANUTENÇÃO E GÊMEO DIGITAL DO MOTOR

OPERAÇÃO E INFRAESTRUTURA FERROVIÁRIA SUSTENTÁVEIS, COM FOCO PRINCIPAL NA DESCARBONIZAÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA, NAS SOLUÇÕES BIODEGRADÁVEIS E DE MATERIAIS RECICLADOS, ASSIM COMO NA RESILIÊNCIA DA INFRAESTRUTURA

RUMO MALHA PAULISTA S.A.

15/10/2026

SUMÁRIO

1. DESCRIÇÃO DO PROJETO 2
1.1 Título do Projeto 2
1.1.1 Linha de Inovação e Desenvolvimento 2
1.1.2. Temas 3
1.2 Objetivos 3
1.2.1 Objetivo Geral 3
1.2.2 Objetivos Específicos 3
2. JUSTIFICATIVA 4
3. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO 10
3.1 Métodos e técnicas utilizadas 10
3.2 Etapas 20
4. PREVISÃO DE INÍCIO, TEMPO DE EXECUÇÃO E CUSTO TOTAL 29
5. LOCAL DE EXECUÇÃO 30
6. ENTIDADE E EQUIPE EXECUTORA 30
6.1 Identificação da entidade executora 30
6.2 Identificação da equipe executora 32
7. PRODUTOS 33
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS / NORMATIVOS APLICÁVEIS 34
9. ANEXOS DO PLANO DE TRABALHO 37

1. DESCRIÇÃO DO PROJETO

1.1. Título do Projeto

Avaliação experimental e por simulação computacional dos impactos da utilização de óleo diesel B30 em locomotivas de carga: desempenho, manutenção e gêmeo digital do motor.

1.2. Linha de inovação e desenvolvimento

O projeto se enquadra nas seguintes diretrizes e objetivos, conforme o artigo 3º da Resolução nº 6.021, de 20 de julho de 2023.

- IV - desenvolvimento de novos centros de pesquisas tecnológicos na área ferroviária;
- V - melhoria da infraestrutura laboratorial das instituições de ensino técnico e superior, com foco ferroviário, cujo laboratório esteja vinculado a projetos de pesquisa em ferrovias;

O projeto se enquadra no seguinte objetivo, conforme o artigo 4º da Resolução nº 6.021, de 20 de julho de 2023.

- V - soluções de integração com o meio ambiente e utilização de energias alternativas aos derivados de petróleo;

1.2.1. Temas prioritários

O projeto se enquadra no tema prioritário a seguir, conforme a Deliberação ANTT n.º 28, de 30 de janeiro de 2026.

- Tema 8 - Operação e Infraestrutura ferroviária sustentáveis, com foco principal na descarbonização da matriz energética, nas soluções biodegradáveis e de materiais reciclados, assim como na resiliência da infraestrutura.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral:

Avaliar a viabilidade técnica, operacional, ambiental e econômica da utilização de óleo diesel B30 ou mais em locomotivas ferroviárias de carga, por meio da combinação de protocolo experimental de campo e modelagem computacional com gêmeo digital do motor, quantificando impactos em desempenho, manutenção, consumo energético e emissões, e desenvolvendo capacidade preditiva para cenários de percentuais de biodiesel, perfis de via e configurações de carga não testados fisicamente.

1.3.2. Objetivos Específicos

Frente 1 — Protocolo Experimental de Campo:

1. Estabelecer protocolo técnico de testes para utilização de diesel B30, conforme os aumentos estabelecidos na Lei nº 14.993/2024, incluindo certificação da fração de biodiesel e controle de qualidade do combustível desde o armazenamento até o tanque da locomotiva;
2. Comparar sistematicamente o desempenho de locomotivas dos grupos teste (B30) e

espelho (BX vigente): potência, consumo específico, eficiência energética e emissões;

3. Avaliar os impactos do B30 nos sistemas de combustível e nos componentes do motor diesel (bicos injetores, bombas, filtros, elastômeros, vedações, casquilhos e mancais), por meio de inspeções mecânicas, boroscopia e ensaios laboratoriais;
4. Avaliar os impactos e a necessidade de inserção de novos processos de manutenção e de modernização das locomotivas;

Frente 2 — Simulação e Gêmeo Digital:

5. Instrumentar locomotivas com sensores de motor, GPS e medição de emissões, coletando dados operacionais de alta frequência (potência, rotação, consumo instantâneo, temperaturas, pressões) correlacionados com posição geográfica, trecho percorrido e carga transportada;
6. Caracterizar o perfil de uso operacional de cada locomotiva monitorada — perfil de via (declividade, curvatura, extensão) e carga rebocada — construindo um índice de severidade do ciclo de uso, de modo a segregar os efeitos do combustível dos efeitos do padrão de utilização;
7. Desenvolver, calibrar e validar estatisticamente um gêmeo digital do motor diesel de locomotiva, capaz de reproduzir potência, consumo e carga térmica sob diferentes percentuais de biodiesel e perfis de uso;
8. Extrair do modelo calibrado parâmetros unitários de desempenho — consumo e emissões por tonelada transportada, por quilômetro percorrido e por classe de severidade de trecho (com destaque para aclives que impõem potência sustentada) — permitindo comparações normalizadas entre combustíveis e cenários;
9. Gerar cenários de simulação e análises de sensibilidade (B0 a B30 e acima; trechos planos versus rampas; diferentes composições de carga), antevendo as consequências da troca de combustível antes de sua adoção em escala;

Integração e suporte à decisão:

10. Cruzar os resultados simulados com os indicadores de desgaste medidos em campo, comparando ao final do projeto as situações experimentais e simuladas, e traduzindo os resultados em diretrizes de manutenção preditiva diferenciadas por perfil de rota;
11. Subsidiar decisões estratégicas da concessionária e decisões regulatórias da ANTT com base em evidências técnicas auditáveis.

2. JUSTIFICATIVA

A escolha do presente projeto decorre da necessidade estratégica de preparar o transporte ferroviário para os novos cenários energéticos, regulatórios e ambientais, em especial aqueles relacionados à ampliação do uso de combustíveis renováveis no Brasil. A publicação da Lei nº 14.993/2024 e a evolução do marco regulatório de combustíveis estabelecem diretrizes claras para o aumento progressivo do teor de biodiesel, impondo ao setor ferroviário o desafio de adaptar seus ativos, processos e sistemas de forma segura, eficiente e tecnicamente fundamentada.

Lacuna técnica e científica: Não existem dados estruturados, obtidos em ambiente operacional real, que permitam avaliar de forma integrada os impactos do B30 sobre o desempenho de locomotivas, a confiabilidade operacional, os sistemas de combustível, os planos de manutenção, o consumo específico e as emissões. A literatura internacional consolida o intervalo B10–B20

como zona de compromisso entre emissões, desempenho e durabilidade (Lv et al., 2024; Graver et al., 2016); o B30 em operação ferroviária real é fronteira científica inexplorada. A inexistência desses dados representa risco técnico e econômico para decisões futuras, justificando um projeto de desenvolvimento tecnológico específico e dedicado.

Por que a simulação é o eixo que multiplica o valor do projeto: Um protocolo experimental, por mais robusto que seja, testa uma combinação por vez — o B30, nos trechos e cargas que a operação real estabelecer, ao longo do período de campo. Qualquer pergunta fora dessa combinação (E se fosse B25? E se a locomotiva operasse apenas em trechos de serra? E se a carga média aumentasse 20%?) exigiria, em princípio, outro ciclo de testes igualmente longo e custoso. O gêmeo digital resolve essa limitação estrutural: uma vez calibrado e validado contra os dados de campo, o modelo responde a essas perguntas por simulação — em dias, não em anos. Quatro argumentos tornam a simulação indispensável neste projeto:

1. **Isolamento do efeito do combustível.** O desgaste de um motor de locomotiva não depende apenas do combustível — depende de como o motor foi solicitado. Trechos retos e planos exigem potência moderada; trechos de serra com composição carregada exigem potência sustentada próxima do limite, exatamente a condição em que a literatura aponta maior sensibilidade do biodiesel ao desgaste de bicos injetores, anéis e cilindros e maior variação de NOx (Gautam & Agarwal, 2013; Suresh et al., 2024). Sem registrar o perfil de uso, duas locomotivas podem apresentar desgastes muito diferentes simplesmente porque rodaram em trechos de severidade distinta — contaminando a conclusão do ensaio. O índice de severidade de uso, construído pela Frente 2, é a variável de controle que garante a robustez estatística da comparação experimental da Frente 1.
2. **Parâmetros unitários e comparabilidade.** A calibração do modelo para um motor permite extrair indicadores normalizados — consumo e emissões **por tonelada de carga transportada, por quilômetro percorrido e por classe de eficiência do trecho** (considerando aclives que solicitam mais da locomotiva). Esses parâmetros unitários tornam os resultados transferíveis: valem para outras locomotivas, outras malhas e outras concessionárias, ampliando o interesse público do RDT.
3. **Antecipação de consequências e redução de risco**. O modelo permite antever os efeitos da troca de combustível antes da adoção em escala — explorando cenários extremos ou inviáveis em campo (variações de carga, condições ambientais, percentuais intermediários e superiores de biodiesel) sem risco operacional e sem custo incremental de ensaio físico.
4. **Segurança energética**: o estudo permitirá à concessionária reduzir sua dependência do diesel fóssil, fortalecendo sua segurança energética por meio da diversificação da matriz de combustíveis. Além disso, proporcionará maior flexibilidade operacional em um contexto marcado pela volatilidade dos preços e pela instabilidade do mercado global de petróleo, ao mesmo tempo em que possibilitará o aproveitamento das oportunidades associadas ao desenvolvimento da cadeia produtiva da soja no país.
5. **Legado permanente**. Ao final do projeto, a concessionária e a ANTT recebem não apenas um relatório, mas um modelo de simulação paramétrica validada, reutilizável para as próximas etapas da trajetória do Combustível do Futuro (B35, B40...), transformando o investimento do RDT em capacidade analítica permanente.

Caráter de RDT: A iniciativa não se confunde com obrigações contratuais da concessionária: não se destina à manutenção rotineira nem ao atendimento de exigências regulatórias já estabelecidas, mas à geração de conhecimento novo, à validação de soluções tecnológicas e ao suporte à decisão estratégica — projeto experimental, temporário e orientado a resultados mensuráveis, em

conformidade com a Resolução ANTT nº 6.021/2023.

Replicabilidade e interesse público: Os dados, metodologias, o modelo de simulação e as conclusões poderão ser utilizados como referência para outros trechos, frotas e concessionárias, contribuindo para o avanço do conhecimento técnico do setor ferroviário nacional e para a decisão regulatória da ANTT sobre a trajetória de biodiesel na ferrovia. O potencial de contribuição científica original é elevado, com publicações previstas em periódicos como *Transportation Research Part D*, *Applied Energy* e *Fuel*.

2.1. Contexto e linha lógica do projeto

A Lei nº 14.993/2024 (Lei do Combustível do Futuro) estabelece o aumento progressivo do teor de biodiesel no óleo diesel comercializado no Brasil, com trajetória que ultrapassa o percentual atualmente utilizado pela operação ferroviária (B15) e aponta para misturas de até 25% (B25). Para o setor ferroviário, essa transição impõe uma questão técnica central e ainda sem resposta na literatura internacional: **quais são os efeitos do biodiesel em percentuais elevados - como o B30 - sobre o desempenho do motor diesel de locomotivas, sobre a integridade de seus componentes e sobre os planos de manutenção da frota, em condições reais de operação?**

A experiência das equipes de manutenção indica riscos concretos: degradação acelerada de elastômeros e vedações, entupimento de filtros, desgaste de bicos injetores, perda de eficiência energética, alteração no perfil de emissões e, como consequência, manutenções mais frequentes e custosas. A literatura científica corrobora essas preocupações — estudos recentes recomendam misturas de até B20 para preservação integral de desempenho (Lv et al., 2024), e o comportamento do B30 em operação ferroviária real permanece território inexplorado cientificamente.

Este projeto responde a essa lacuna por meio de uma estratégia integrada em duas frentes complementares e interdependentes, executadas em paralelo ao longo de 36 meses:

- Frente 1 — Protocolo Experimental de Campo: ensaio comparativo controlado entre locomotivas operando com o diesel BX vigente (grupo espelho) e locomotivas abastecidas com B30 (grupo teste), com certificação da fração de biodiesel, controle da qualidade do armazenamento, ensaios laboratoriais de combustível, lubrificante e componentes, e inspeções mecânicas periódicas.
- Frente 2 — Modelagem, Simulação e Gêmeo Digital do Motor: instrumentação de locomotivas (sensores no motor, GPS e medição de emissões), coleta contínua de dados operacionais de desempenho e construção de um gêmeo digital do motor da locomotiva, calibrado e validado com os dados reais da Frente 1, capaz de simular cenários não testados fisicamente e antever as consequências da troca de combustível.

A linha lógica que une as duas frentes é direta: o ensaio de campo gera evidência real, mas restrita às condições efetivamente testadas; o gêmeo digital multiplica o valor dessa evidência, permitindo extrapolar os resultados para qualquer percentual de biodiesel, qualquer perfil de trecho e qualquer configuração de carga — sem exigir um novo ciclo de testes físicos de dois anos para cada cenário adicional. Ao final do projeto, será possível comparar diretamente as situações medidas e simuladas, quantificando a capacidade preditiva do modelo e entregando à concessionária e à ANTT uma ferramenta permanente de análise para a transição energética ferroviária.

3. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

3.1. Métodos e técnicas utilizadas

O projeto será conduzido ao longo de 36 meses, combinando execução experimental em ambiente real de operação ferroviária (Frente 1) e modelagem computacional com validação experimental (Frente 2), em desenho quase-experimental com grupo controle.

3.1.1. Frente 1 – Protocolo experimental em campo

Esta frente será coordenada pelo Prof. Dr. André Luiz Cunha (Engenharia de Transportes — EESC/USP). A metodologia baseia-se na comparação sistemática entre um grupo teste e um grupo espelho de locomotivas, operando sob condições equivalentes e diferindo exclusivamente quanto ao combustível utilizado:

- **Grupo Espelho**: 3 locomotivas na configuração atual, abastecidas com diesel BX vigente (atualmente B15) — referência técnica e estatística;
- **Grupo Teste**: 3 locomotivas abastecidas com óleo diesel B30 ou mais.

***Nota de escalabilidade**: a configuração 3 + 3 constitui o núcleo mínimo do ensaio. O desenho experimental é diretamente escalável para a configuração ampliada prevista no protocolo interno da RUMO, caso a concessionária opte pela ampliação da amostra, sem alteração da metodologia aqui descrita.*

Os principais métodos e técnicas incluem:

- **Testes de potência e desempenho**, com registro sistemático de potência gerada, consumo específico de combustível (g/HPh) e produção de energia (MWh);
- **Testes de consumo e eficiência energética** nos marcos 0, 12 e 24 meses de campo, com metodologia que minimiza interferências externas (temperatura, condições operacionais);
- **Testes de emissões** (explicitamente: NOx, MP, CO, HC e CO_2) nos mesmos marcos, dado que a literatura aponta o NOx como principal trade-off do biodiesel em alta carga (aumento potencial de 5 a 25% — Suresh et al., 2024; Gautam & Agarwal, 2013);
- **Certificação da fração de biodiesel e análises laboratoriais de combustível**, cobrindo toda a cadeia — do armazenamento ao tanque da locomotiva — com coletas periódicas e análise de parâmetros físico-químicos: teor de biodiesel (ASTM D7371), teor de água (ASTM D6304), estabilidade à oxidação (EN 15751), viscosidade, densidade, contaminação, enxofre, índice de acidez, lubricidade, número de cetano, resíduo de carbono e destilação;
- **Controle do armazenamento do combustível**: infraestrutura de abastecimento segregado, drenagem e limpeza dos sistemas antes do início do teste, identificação física das locomotivas e pontos de abastecimento, e monitoramento periódico da qualidade nos tanques de estocagem (4 coletas/mês por lote e por tanque);
- **Análises de óleo lubrificante** com coleta periódica: viscosidade a 100 °C (ASTM D445), TBN (ASTM D4739), TAN (ASTM D664), fuligem/oxidação/sulfatação/nitração (ASTM D7889/E2412), análise elementar de metais de desgaste (ASTM D5185) e água (ASTM D6304);
- **Ensaios não destrutivos por boroscopia** semestral: cilindros, pistões, válvulas e superfícies críticas, sem desmontagem completa;
- **Ensaios mecânicos e químicos de elastômeros, polímeros e filtros de diesel**: inspeção visual, análise dimensional, dureza Shore A, tração, alongamento na ruptura, compression set, envelhecimento térmico acelerado, inchamento em combustível, FTIR e TGA;
- **Inspeções mecânicas estruturadas**: casquilhos, mancais, bicos injetores, bombas injetoras, turbocompressores, tanques, mangueiras, tubulações e vedações, com registro

fotográfico sistemático e atenção específica aos metais amarelos (ligas de cobre e latão, mais sensíveis à ação corrosiva do biodiesel);

- **Download e análise estatística dos dados operacionais** das locomotivas, com acompanhamento de KPIs: pressão de óleo lubrificante, pressão de combustível, temperaturas de operação, potência entregue e comportamento dinâmico do motor.

3.1.2. Frente 2 – Instrumentação, modelagem e gêmeo digital do motor

A Frente 2, coordenada pelo Prof. Dr. Antonio Carlos Canale (Engenharia Mecânica — EESC/USP), aplica a sequência clássica de desenvolvimento de gêmeos digitais: instrumentar → medir → modelar → calibrar → validar → simular.

a. **Instrumentação e monitoramento embarcado**. Seleção de locomotivas-piloto dentre as participantes do ensaio (idealmente uma com uso predominante em trecho plano e outra em trecho de maior severidade, para maximizar o contraste nos dados de calibração) e instalação de instrumentação complementar à telemetria existente: sensores de desempenho do motor (potência, rotação, consumo instantâneo, temperatura e pressão de óleo, temperatura de exaustão), receptor GPS para georreferenciamento contínuo e equipamento de medição de emissões. O monitoramento cobre todo o trecho de viagem, correlacionando cada registro de desempenho com posição, declividade da via e carga rebocada.

b. **Caracterização do perfil de uso e índice de severidade**. Integração dos dados embarcados com os sistemas de despacho e tração da RUMO (perfil altimétrico da malha, composição e peso dos trens), construindo para cada locomotiva e cada viagem um **índice de severidade do ciclo de uso** — variável que quantifica o quanto o motor foi solicitado (potência sustentada em rampas, tempo em regime de plena carga) e que será usada como covariável nas análises comparativas da Frente 1.

c. **Modelagem do sistema motor–trem–via**. Construção do modelo computacional integrando: mapas de desempenho do motor (curvas de torque/potência e consumo específico por regime), dinâmica longitudinal da composição (resistências ao movimento em função de rampa, curva e carga) e propriedades físico-químicas do combustível (poder calorífico, densidade, viscosidade, número de cetano — parametrizadas em função do percentual de biodiesel, com valores medidos pelos ensaios da Frente 1). Ambiente de desenvolvimento: MATLAB/Simulink.

d. **Calibração e validação estatística**. Calibração dos parâmetros do modelo para minimizar o erro entre saídas simuladas e dados medidos (potência, consumo, temperaturas), utilizando os primeiros 6–12 meses de dados de campo. Validação por **validação cruzada** em condições não usadas na calibração, com reporte formal do erro de previsão para potência, consumo específico e carga térmica sob diferentes perfis de uso — método e resultado do teste explicitados no relatório de validação.

e. **Extração de parâmetros unitários**. Do modelo calibrado serão extraídos indicadores normalizados e comparáveis entre cenários: **litros/tonelada·km**, **g CO_2/tonelada·km**, **consumo específico (g/HPh) por classe de severidade de trecho e eficiência energética em aclives** versus trechos planos — a base quantitativa para a comparação final entre B20 e B30 em condições padronizadas.

f. **Geração de cenários e análises de sensibilidade**. Simulação de cenários não testados fisicamente: percentuais de biodiesel de B0 a B30 e acima; perfis de trecho (plano/reto versus rampa/curva); configurações de carga e composição do trem — quantificando o efeito isolado de cada variável sobre desempenho, consumo, emissões e severidade térmica/mecânica imposta ao motor.

g. **Integração com os dados de desgaste**. Cruzamento do índice de severidade e das saídas do

modelo com os indicadores de desgaste medidos pela Frente 1 (análise de óleo, boroscopia, ensaios de componentes), relacionando severidade de uso × percentual de biodiesel × desgaste — permitindo estimar a necessidade de manutenção em função do trecho e da carga, e não apenas do tempo ou quilometragem, fundamentando a proposta de manutenção preditiva diferenciada por perfil de rota.

3.1.3. Síntese da complementaridade entre as frentes

Frente 1 — Protocolo físico	**Frente 2 — Gêmeo digital**
Testa uma combinação por vez (B30, nos trechos e cargas reais)	Testa virtualmente qualquer combinação, uma vez validado
Gera dados de desgaste real (óleo, boroscopia, componentes)	Usa esses dados como insumo de calibração e validação
Compara grupo teste × espelho	Adiciona trecho/carga como variável de controle, isolando o efeito do combustível
Resultado válido para as condições testadas em campo	Resultado extensível a cenários fora da amostra física
Evidência empírica	Capacidade preditiva e legado permanente

As duas frentes retroalimentam-se: o protocolo físico sem a variável de severidade corre o risco de atribuir ao combustível diferenças que são efeito do trecho; a simulação sem os dados reais não teria como validar o modelo. Juntas, produzem uma conclusão mais robusta do que qualquer uma isoladamente — e, ao final do projeto, a comparação direta entre o observado e o simulado quantifica a confiabilidade do gêmeo digital como ferramenta de decisão.

3.2. Justificativa e descrição dos equipamentos, instalações e materiais necessários

3.2.1. Justificativas e Descrição dos equipamentos, instalações e materiais necessários

- **Instrumentação embarcada (Frente 2)**: sensores de desempenho do motor (pressões, temperaturas, rotação, consumo instantâneo), receptores GPS e sistema de aquisição de dados para as locomotivas-piloto;
- **Equipamentos de medição de consumo e de emissões** (NOx, MP, CO, HC, CO_2) para os testes nos marcos definidos e para o monitoramento embarcado;
- **Infraestrutura computacional**: workstations para processamento dos dados operacionais, calibração dos modelos e execução das simulações;
- **Licenças de software**: MATLAB e Simulink, ambiente de desenvolvimento do gêmeo digital;
- **Serviços laboratoriais contratados**: ensaios de combustível, óleo lubrificante, elastômeros, polímeros e filtros, conforme quantitativos do protocolo;
- **Infraestrutura de abastecimento segregado** para o B30, incluindo identificação e controle de tanques.

3.3. Etapas

3.3.1. Etapa 1 — Planejamento Técnico, Engenharia Preparatória e Estruturação do

Projeto

Estabelece as bases técnicas, operacionais, contratuais e metodológicas do projeto.

Atividades principais: consolidação do planejamento técnico e do escopo detalhado; definição dos critérios de avaliação e indicadores de desempenho (incluindo os parâmetros unitários da Frente 2); seleção das locomotivas dos grupos teste e espelho com levantamento do perfil de uso operacional de cada unidade (trechos habituais, perfil altimétrico predominante, carga média); especificação da instrumentação embarcada; planejamento da infraestrutura de abastecimento segregado; levantamento, junto à engenharia da RUMO, dos dados disponíveis nos sistemas de despacho, tração e telemetria; estruturação e contratação de serviços laboratoriais especializados.

Entregáveis: plano técnico detalhado; relação final das locomotivas com ficha de perfil de uso operacional por unidade; especificações da instrumentação; contratos de ensaios e análises; plano de infraestrutura de abastecimento segregado.

3.3.2. Etapa 2 — Instrumentação, Adequações e Comissionamento

Atividades principais: instalação da instrumentação embarcada (sensores de motor, GPS, emissões) nas locomotivas-piloto; adequações nos sistemas de combustível; drenagem e limpeza completa dos tanques; abastecimento inicial do grupo teste com B30 certificado; identificação visual das locomotivas e pontos de abastecimento; inspeções iniciais completas e comissionamento técnico; testes de aquisição e transmissão de dados da instrumentação.

Entregáveis: relatórios de comissionamento por locomotiva; registros fotográficos e documentais das condições iniciais; sistema de aquisição de dados operacional e validado.

3.3.3. Etapa 3 — Linha de Base (Marco 0 do campo)

Início do teste de campo. Consolidação da referência de comparação com isolamento de variáveis: testes iniciais de potência; registros iniciais de consumo e emissões; coletas iniciais de diesel e óleo lubrificante; caracterização inicial do perfil de uso de cada locomotiva; consolidação da linha de base técnica.

Entregáveis: relatório de linha de base; banco de dados inicial (operacional + laboratorial + perfil de uso).

3.3.4. Etapa 4 — Operação Assistida, Monitoramento Contínuo e Testes Intermediários

Monitoramento contínuo (ambas as frentes): downloads e análises periódicas de dados operacionais; registro contínuo do trecho percorrido e da carga de cada viagem, com cálculo do índice de severidade de uso por locomotiva e por período.

O programa de amostragem de combustível totaliza 576 análises laboratoriais, dimensionadas em três componentes: (i) 288 amostras de locomotivas (6 unidades × 2 coletas mensais × 24 meses) — a frequência semanal decorre da menor estabilidade à oxidação do B30 (EN 15751) e de sua higroscopicidade, que impõem monitoramento com resolução temporal inferior ao tempo característico de degradação do combustível no tanque; do ciclo de abastecimento das locomotivas (2 a 3 dias), que renova parcialmente o combustível entre coletas e exige rastreabilidade lote a lote; e do alinhamento com a cadência semanal de download dos dados operacionais, permitindo correlacionar cada resultado físico-químico com a janela operacional correspondente; (ii) 144 amostras da cadeia de armazenamento (3 pontos - recebimento do lote, tanque segregado de estocagem e ponto de abastecimento - × 2 coletas mensais × 24 meses), assegurando o controle de qualidade do combustível do recebimento ao tanque da locomotiva e a identificação do ponto de

origem de eventual não conformidade (degradação em estocagem, contaminação por água ou proliferação microbiana — ABNT NBR 16943); e (iii) 96 amostras de marcos técnicos e reserva de contraprova (réplicas em duplicata nos marcos 0, 6, 12, 18 e 24 meses para robustez das comparações formais entre grupos teste e espelho, e reserva técnica de ~12,5% para contraprova de resultados fora de especificação e investigação de eventos anômalos). A série resultante de 48 pontos por locomotiva ao longo de 24 meses confere poder estatístico para o ajuste de modelos longitudinais de efeitos mistos e para a detecção de tendências de degradação com significância, requisito da comparação teste × espelho e da calibração do gêmeo digital.

Avaliações intermediárias (marcos de 6, 12 e 18 meses de campo): boroscopia; inspeção de filtros, tanques, mangueiras, sistemas de combustível e injetores; exames de mancais e casquilhos com registro fotográfico; testes de potência, consumo específico e emissões; remoção intermediária de componentes aos 12 meses de campo (vedações e o-rings, bicos injetores, mangueiras, filtros) com ensaios laboratoriais de elastômeros (dureza, tração, compression set, inchamento, FTIR, TGA) e de filtros (umidade, cinzas, MEV-EDX, FTIR).

Frente 2 em paralelo:

- Meses 7–18: coleta de dados de calibração; construção do modelo motor–trem–via; primeira calibração com a janela inicial de dados (6–12 meses de campo);
- Meses 18–24: validação cruzada do modelo com dados não usados na calibração; relatório de validação estatística com erros de previsão reportados;
- Meses 24–30: geração de cenários e análises de sensibilidade (percentuais de biodiesel, perfis de trecho, configurações de carga); extração dos parâmetros unitários; primeiras integrações com os indicadores de desgaste medidos.

Entregáveis parciais: relatórios técnicos aos 6, 12 e 18 meses de campo; atualizações do banco de dados; relatório de calibração do modelo; relatório de validação estatística do gêmeo digital; relatório preliminar de cenários simulados.

3.3.5. Etapa 5 — Inspeção Final de Campo

Inspeções finais aprofundadas de todas as locomotivas; testes finais de potência, consumo e emissões; encerramento da coleta de dados embarcados; preparação para desmontagem e retirada de componentes.

Entregáveis: relatório técnico final de campo; consolidação dos dados operacionais e do histórico completo de severidade de uso por locomotiva.

3.3.6. Etapa 6 — Remoção de Componentes e Ensaios Laboratoriais Conclusivos

Segregação e seleção de componentes conforme inspeções: casquilhos e mancais; conjuntos de vedações e o-rings; bicos injetores; bombas injetoras; válvulas e bombas de combustível; mangueiras; filtros de diesel. Ensaios laboratoriais conclusivos de elastômeros e filtros (mesmos protocolos das avaliações intermediárias), com análise comparativa B30 × BX vigente e avaliação conjunta com o fabricante para os grandes componentes.

Entregáveis: laudos laboratoriais conclusivos; relatórios técnicos de avaliação de componentes.

3.3.7. Etapa 7 — Consolidação Final, Comparação Experimental × Simulado e Produto Técnico do RDT

Etapa de síntese, na qual a linha lógica do projeto se fecha: os resultados experimentais consolidados (Frente 1) são confrontados com as previsões do gêmeo digital (Frente 2), quantificando a capacidade preditiva do modelo e consolidando-o como ferramenta de decisão.

Atividades: análise estatística integrada (efeito do combustível controlado pelo índice de severidade de uso); comparação formal entre resultados medidos e simulados, com métricas de erro reportadas; consolidação dos parâmetros unitários finais (por tonelada·km, por km, por classe de severidade); avaliação das necessidades de adequação e modernização da frota; elaboração das diretrizes de manutenção preditiva por perfil de rota; entrega da ferramenta de simulação paramétrica; redação do Relatório Técnico Final do RDT; defesas e publicações acadêmicas.

Entregáveis finais: ver Seção Produtos.

3.5. Teste acelerado em laboratório de Universidade (24 meses)

Durante o período de teste acelerado em laboratório de Universidade, está prevista a realização de testes acelerados em sistemas de circulação e injeção de combustível semelhantes àqueles utilizados em locomotivas de carga, tendo como principais objetivos:

- A reprodução das características de campo (condições de contorno) e o aprendizado acelerado;
- A reprodução de condições mais brandas que aquelas encontradas em campo, com o objetivo de testar o efeito de melhores condições de armazenamento e conservação do combustível sobre o sistema de injeção;
- A reprodução de condições mais severas que aquelas encontradas em campo, com o objetivo de testar o efeito de condições anômalas de fornecimento ou de armazenamento e conservação do combustível sobre o sistema de injeção.

A possibilidade de empregar um teste em laboratório de Universidade, em paralelo ao teste em campo, permitirá que docentes e alunos possam alimentar o teste em campo com informações obtidas de maneira mais consistente e controlada, além de serem retroalimentados por condições existentes em campo que deverão ser reproduzidas em laboratório, para entendimento completo dos mecanismos de degradação do combustível utilizado e dos materiais constituintes do sistema de circulação e injeção de combustível.

3.4. Congressos e Eventos

A participação nos congressos e eventos International Heavy Haul Association Conference – IHHA, Brasil nos Trilhos, InnoTrans e Congresso Brasileiro de Manutenção e Gestão de Ativos – ABRAMAN tem como objetivo divulgar os resultados do estudo “Avaliação experimental e por simulação computacional dos impactos da utilização de óleo diesel B30 em locomotivas de carga: desempenho, manutenção e gêmeo digital do motor”.

Esses eventos reúnem operadores ferroviários, fabricantes, fornecedores, pesquisadores, órgãos reguladores e especialistas nacionais e internacionais, proporcionando a troca de experiências e a discussão dos efeitos do diesel B30 no desempenho, na confiabilidade, na disponibilidade e na manutenção das locomotivas.

A participação também permitirá apresentar a aplicação do gêmeo digital no monitoramento e na previsão de falhas, conhecer novas tecnologias e fortalecer as discussões sobre descarbonização, eficiência energética e sustentabilidade no transporte ferroviário.

A participação na IHHA permitirá apresentar e discutir os resultados do projeto com especialistas internacionais em transporte ferroviário de cargas pesadas, especialmente quanto aos efeitos do diesel B30 sobre o desempenho, as emissões, a confiabilidade e a manutenção das locomotivas. O evento também contribuirá para a troca de experiências com operadores, pesquisadores e fabricantes, ampliando a divulgação e a aplicabilidade do conhecimento produzido.

A participação na InnoTrans permitirá conhecer tecnologias e soluções internacionais aplicáveis ao setor ferroviário, especialmente nas áreas de eficiência energética, combustíveis alternativos, monitoramento de ativos e digitalização. O evento também possibilitará o intercâmbio técnico com fabricantes, operadores e pesquisadores, contribuindo para o desenvolvimento e a divulgação dos resultados do projeto.

A participação no Congresso ABRAMAN contribuirá para a apresentação e discussão dos resultados relacionados à confiabilidade, ao desgaste de componentes e à manutenção preditiva das locomotivas. Também permitirá comparar as metodologias desenvolvidas no projeto com boas práticas nacionais de engenharia de manutenção e gestão de ativos.

A participação no Brasil nos Trilhos permitirá compartilhar os resultados do projeto com concessionárias, fornecedores, especialistas e representantes do poder público. O evento contribuirá para disseminar o conhecimento produzido sobre a utilização do diesel B30 em locomotivas e avaliar a possibilidade de aplicação das soluções desenvolvidas em outras frotas e malhas ferroviárias.

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

Previsão de início (dd/mm/aaaa)	Prazo (meses)	Custo total (R$)
01/01/2027	36 meses	R$ 10.485.003,57

Ano contratual de projeto	Ano contratual de débito	Custo Previstos
Ano 07	Ano contratual 07	R$ 249.259,81
Ano 08	Ano contratual 03	R$ 1.340.600,49
Ano 08	Ano contratual 08	R$ 1.900.000,00
Ano 09	Ano contratual 03	R$ 1.629.513,89
Ano 09	Ano contratual 09	R$ 4.000.000,00
Ano 10	Ano contratual 10	R$ 1.365.629,38
Custo Total		R$ 10.485.003,57

Tabela 6 – Custos previstos durante período de realização do projeto proposto.

5. LOCAL DE EXECUÇÃO

O presente projeto será executado majoritariamente nas dependências da Rumo, com foco nas oficinas de manutenção localizadas no município de Araraquara/SP, onde serão realizadas as atividades de intervenção nos motores diesel, incluindo a instalação dos kits tanto em contexto de

manutenção pesada quanto em aplicações em campo. Adicionalmente, o projeto contará com o suporte de laboratórios contratados, responsáveis pela realização de ensaios técnicos, análises de desempenho e testes específicos necessários à validação dos resultados. Haverá ainda a participação da Universidade de São Paulo (USP), por meio dos campi de São Carlos e São Paulo, além de instituições afiliadas/intervenientes, que atuarão no acompanhamento técnico-científico do projeto, contribuindo para a condução metodológica dos ensaios, análise de dados e validação dos resultados, assegurando rigor técnico e aderência às boas práticas de pesquisa e desenvolvimento.

6. ENTIDADE E EQUIPE EXECUTORA

6.1. Identificação da Entidade Executora

Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos

Identificação da Equipe Executora

Função	Responsabilidade
Prof. Dr. André Luiz Cunha (STT/EESC/USP)	Coordenação geral; análise de dados operacionais; índice de severidade de uso; coordenação da frente 1; análises estatísticas multivariadas; integração campo × simulação
Prof. Dr. Antonio Carlos Canale (SEM/EESC/USP)	Coordenação da Frente 2; modelagem do motor e da dinâmica veicular; calibração e validação do gêmeo digital
Bolsistas (doutorado, mestrado, IC, TT)	Instrumentação e coleta de dados; desenvolvimento do modelo; análises laboratoriais e estatísticas

7. PRODUTOS

Ao término do projeto, serão entregues:

1. Relatório Técnico Final do RDT — metodologia, resultados operacionais, mecânicos, laboratoriais e ambientais; análises comparativas entre grupos (controladas pelo índice de severidade de uso); comparação formal entre resultados experimentais e simulados, com quantificação da capacidade preditiva do modelo; conclusões e recomendações;

2. Gêmeo digital do motor de locomotiva — modelo de simulação calibrado e validado com dados reais de campo, com relatório de validação estatística (método e erros de previsão reportados);

3. Ferramenta de simulação paramétrica (percentual de biodiesel × perfil de trecho × carga) para uso contínuo da RUMO após o encerramento do projeto;

4. Parâmetros unitários de desempenho e emissões — consumo e emissões por tonelada transportada, por km e por classe de severidade de trecho, para B20, B30 e cenários intermediários/superiores;

5. Índice de severidade de uso operacional por locomotiva e por trecho, com metodologia documentada e replicável;

6. Avaliação Técnica das Necessidades de Adequação e Modernização dos Ativos — sistemas e componentes sensíveis, eficácia de kits de adaptação, compatibilidade de materiais (elastômeros, metais amarelos, vedações), recomendações de padronização;

7. Diretrizes Técnicas para Adequação da Frota e diretrizes de manutenção preditiva diferenciadas por perfil de rota (complementares ao plano de manutenção atual por ciclos fixos);

8. Base de dados técnica estruturada e auditável — dados operacionais, laboratoriais e de perfil de uso, apta a subsidiar decisões operacionais, estratégicas e regulatórias;

9. Subsídios técnicos para decisão regulatória da ANTT, incluindo matriz de riscos, desempenho e impactos operacionais do biodiesel em diferentes proporções;

10. Produtos acadêmicos — no mínimo 1 tese de doutorado e 2 dissertações de mestrado; artigos em periódicos internacionais (Transportation Research Part D, Applied Energy, Fuel) e em congressos (ANPET, TRB); formação de recursos humanos em transição energética ferroviária e gêmeos digitais.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS / NORMATIVOS APLICÁVEIS

Chen, Y. et al. (2023). Utilization of renewable biodiesel blends with different proportions for the improvements of performance and emission characteristics of a diesel engine. Heliyon, 9. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19196

Gautam, A., & Agarwal, A. (2013). Experimental investigations of comparative performance, emission and combustion characteristics of a cottonseed biodiesel-fueled four-stroke locomotive diesel engine. International Journal of Engine Research, 14, 354–372. https://doi.org/10.1177/1468087412458215

Graver, B., Frey, H., & Hu, J. (2016). Effect of Biodiesel Fuels on Real-World Emissions of Passenger Locomotives. Environmental Science & Technology, 50(21), 12030–12039. https://doi.org/10.1021/acs.est.6b03567

Jiang, F. et al. (2022). Study on Performance of Locomotive Diesel Engine Fueled with Biodiesel Using Two Miller Cycle Technologies. Processes. https://doi.org/10.3390/pr10020372

Kandasamy, S., Selvaraj, A., & Rajagopal, T. (2019). Experimental investigations of ethanol blended biodiesel fuel on automotive diesel engine performance, emission and durability characteristics. Renewable Energy. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.039

Lv, Y. et al. (2024). Investigation of biodiesel and its blends fueled diesel engine: An evaluation of the comprehensive performance of diesel engines. Renewable Energy. https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120918

Murta, A. et al. (2021). The use of palm oil biodiesel blends in locomotives: An economic, social and environmental analysis. Renewable Energy, 164, 521–530. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.094

Suresh, R. et al. (2024). A Numerical Study on Combustion and Emissions Characteristics of Diesel/Biodiesel Blends in a Locomotive Engine. ASME 2024 ICE Forward Conference. https://doi.org/10.1115/icef2024-140952

9. ANEXOS DO PLANO DE TRABALHO

I Resumo do Plano de Trabalho;

II Cronograma físico-financeiro do projeto;

III Propostas técnicas e comerciais dos terceirizados que irão participar do projeto;

IV Cotações comerciais;

V Currículo dos coordenadores em formato .pdf;

VI Orçamento analítico previsto;

VII Lista de bens, produtos e estudos com previsão de transferência; e

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