

ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres
RDT - Recursos para Desenvolvimento Tecnológico

PLANO DE TRABALHO

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS COM
NANOCATALISADORES PARA REDUÇÃO DE EMISSÕES DE GASES DE
EFEITO ESTUFA E AUMENTO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM
MOTORES FERROVIÁRIOS DE GRANDE PORTE**

**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**

VALE S.A. – ESTRADA DE FERRO CARAJÁS

28/03/2026

SUMÁRIO

1	DESCRIÇÃO DO PROJETO.....	3
1.1	Título do Projeto.....	3
1.1.1	Linha de inovação e desenvolvimento.....	3
1.1.2	Temas prioritários.....	4
1.2	Objetivos	5
1.2.1	Objetivo Geral	5
1.2.2	Objetivos Específicos.....	5
2	JUSTIFICATIVA	7
3	DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	13
3.1	Métodos e técnicas utilizadas	13
3.2	Etapas	25
4	PREVISÃO DE INÍCIO, TEMPO DE EXECUÇÃO E CUSTO TOTAL	34
5	LOCAL DE EXECUÇÃO	35
6	ENTIDADE E EQUIPE EXECUTORA.....	36
6.1	Identificação da entidade.....	36
6.2	Identificação da equipe executora	37
7	PRODUTOS	38
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS / NORMATIVOS APLICÁVEIS.....	41
9	ANEXOS DO PLANO DE TRABALHO	48

1 DESCRIÇÃO DO PROJETO

1.1 Título do Projeto

Estudo da aplicação de biocombustíveis com nanocatalisadores para redução de emissões de gases de efeito estufa e aumento de eficiência energética em motores ferroviários de grande porte.

1.1.1 Linha de inovação e desenvolvimento

O presente projeto visa aprimorar o desempenho de motores de ignição por compressão ferroviários de grande porte (potência igual ou superior a 4.400hp) por meio do uso de biocombustíveis alternativos, como biodiesel, emulsões de água e/ou etanol em diesel, bem como da aplicação de nanocatalisadores. O objetivo da pesquisa é demonstrar o potencial de redução de emissões de gases de efeito estufa e do consumo de combustível com essas tecnologias.

Desta forma, a proposta está alinhada à Resolução nº 6.021, de 20 de julho de 2023, enquadrando-se nas seguintes diretrizes estabelecidas em seu art. 3º:

- **Inciso II – *"melhoria da qualidade dos serviços objeto de concessão ferroviária federal, inclusive relacionada aos atributos de regularidade, continuidade, eficiência, segurança, atualidade, generalidade, cortesia na sua prestação e modicidade das tarifas"***

O projeto busca a redução do consumo de combustível fóssil, o que impacta nos custos operacionais e consequentemente na continuidade e atualidade dos serviços, ao incorporar soluções tecnológicas alinhadas às melhores práticas de descarbonização e eficiência energética, posicionando o setor ferroviário nacional em linha com as tendências globais de inovação e sustentabilidade.

- **Inciso IV – *"desenvolvimento de novos centros de pesquisas tecnológicos na área ferroviária"***

A proposta fortalece o Centro de Tecnologia da Mobilidade da UFMG (CTM-UFMG) e consolida sua atuação como referência nacional em pesquisas aplicadas a motores ferroviários e tecnologias de descarbonização no setor.

- **Inciso 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"***

Está prevista a aquisição e instalação de bancada dinamométrica para motores ferroviários de grande porte, inédita na América Latina, bem como a atualização da infraestrutura computacional da Escola de Engenharia da UFMG, viabilizando a realização de ensaios experimentais e simulações avançadas aplicadas ao setor ferroviário.

Adicionalmente, o projeto atende aos objetivos de inovação definidos no art. 4º da mesma Resolução, conforme detalhado a seguir:

- **Inciso II – *"tecnologia básica e aplicada"***

O projeto envolve a avaliação experimental e a modelagem computacional preditiva (1D/3D) aplicada à estabilidade de nanoemulsões, cinética química e uso de biocombustíveis.

- **Inciso III – “soluções técnicas para problemas específicos”**

Serão estabelecidas rotas tecnológicas com soluções do tipo *drop-in* para promover a descarbonização e mitigação de poluentes locais sem a necessidade de substituição da frota ferroviária atual.

- **Inciso V – “soluções de integração com o meio ambiente e utilização de energias alternativas aos derivados de petróleo”**

Este é o eixo central do projeto, que busca substituir parcialmente o diesel fóssil por biocombustíveis (biodiesel) e emulsões de diesel com água e/ou etanol para descarbonização da matriz energética.

- **Inciso VII – “estruturação de centros de pesquisas tecnológicas na área ferroviária”**

O projeto contribui diretamente para a estruturação e fortalecimento do CTM-UFG, ampliando sua capacidade de pesquisa, experimentação e desenvolvimento tecnológico no setor ferroviário.

- **Inciso VIII – “formação e aperfeiçoamento profissional”**

A proposta contempla a formação de recursos humanos qualificados, com a participação de alunos de graduação e pós-graduação em atividades de pesquisa, contribuindo para a capacitação de engenheiros, mestres e doutores com especialização em tecnologias ferroviárias.

1.1.2 Temas prioritários

Em conformidade com a Deliberação ANTT nº 28/2026, que estabelece os temas prioritários para a destinação dos Recursos para Desenvolvimento Tecnológico (RDT), o presente projeto enquadra-se no seguinte tema:

- **“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”**

O projeto busca a descarbonização e redução do consumo de óleo diesel na matriz energética brasileira através de rotas tecnológicas inovadoras (biodiesel, nanocatalisadores e emulsões de água e/ou etanol em diesel), favorecendo a sustentabilidade da operação ferroviária a partir da redução da dependência de combustíveis fósseis.

O projeto também está alinhado aos seguintes temas.

- **“Aprimoramento da manutenção ferroviária, inclusive com a integração de diferentes tecnologias e a automação industrial”**

A proposta promove a integração de sistemas avançados de gerenciamento eletrônico (ECU) para ajustes em tempo real do processo de combustão em face das novas misturas de combustíveis, otimizando o funcionamento e preservando a integridade mecânica do motor.

- **“Desenvolvimento de estudos e tecnologias para melhoria da operação ferroviária”**

O projeto visa, por meio da implementação de uma ECU programável, analisar parâmetros operacionais e estabelecer novas estratégias de calibração eletrônica otimizadas para o uso de combustíveis alternativos. Operacionalmente, isso provoca

a redução do consumo específico de combustível, aumentando a autonomia das locomotivas e diminuindo o tempo de inatividade para abastecimento. Além disso, a redução das emissões de particulados e gases tóxicos promove melhorias diretas na qualidade ambiental nas áreas de operação.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O presente projeto tem como objetivo avaliar, desenvolver e otimizar rotas tecnológicas baseadas na utilização de combustíveis renováveis e alternativos para motores de ciclo diesel no transporte ferroviário. Dessa forma, a pesquisa visa minimizar o impacto ambiental da frota ferroviária por meio da redução das emissões diretas de GEE¹ e da redução do consumo de combustível, contribuindo assim diretamente para a descarbonização da matriz energética nacional e para a redução da dependência de fontes fósseis.

1.2.2 Objetivos Específicos

O projeto será conduzido com base em objetivos específicos inter-relacionados, direcionados para a avaliação termodinâmica e ambiental do motor em dinamômetro de bancada, que contribuirão para o alcance do objetivo geral. Os objetivos estabelecidos são:

1. Avaliar o impacto no desempenho e nas emissões de poluentes obtido com a utilização de misturas de biodiesel e diesel convencional em diferentes proporções, estabelecendo uma linha de base comparativa;
2. Determinar as formulações ótimas de emulsões de água e/ou etanol em diesel para comparar os potenciais ganhos termodinâmicos e ambientais em relação ao diesel fóssil e ao biodiesel;
3. Analisar a sinergia e a eficácia da adição de diferentes nanocatalisadores como aditivos aos combustíveis alternativos testados, determinando as proporções ideais que maximizem o desempenho e/ou a mitigação de emissões de poluentes;
4. Estabelecer correlações diretas entre a aplicação combinada das tecnologias testadas (biodiesel, emulsões e nanocatalisadores) e a efetiva mitigação da emissão de poluentes, avaliando seu potencial para a descarbonização da matriz energética do modal ferroviário;
5. Caracterizar a projeção do spray de combustível por meio de ensaios de velocimetria em injetores, analisando de maneira preliminar os impactos dos diferentes combustíveis e nanocatalisadores na atomização, a fim de correlacionar esses dados com o desempenho da combustão no motor;
6. Otimizar a calibração dos mapas operacionais do motor, com apoio de equipe técnica especializada no controle eletrônico (ECU programável), ajustando os parâmetros operacionais para otimização das variáveis de controle com os combustíveis e aditivos testados;

¹ Contabilizadas pelo Programa Brasileiro GHG Protocol no escopo 1 sendo por definição “provenientes de fontes que pertencem ou são controladas pela organização, como, por exemplo, as emissões de combustão em caldeiras, fornos, veículos da empresa ou por ela controlados (...)”.

7. Desenvolver modelos computacionais preditivos para otimizar de maneira assertiva as rotas tecnológicas de interesse reduzindo a carga experimental e, consequentemente, os custos do projeto;
8. Estabelecer infraestrutura tecnológica e consolidar conhecimento aplicado para utilização de modelos computacionais preditivos no desenvolvimento de tecnologias voltadas aos motopropulsores da matriz ferroviária;
9. Validar a viabilidade tecnológica da transição da matriz energética ferroviária para alternativas mais renováveis, avaliando o uso de biocombustíveis e emulsões sem a necessidade de modificações estruturais ou físicas no motopropulsor;
10. Monitorar qualitativamente a integridade mecânica do motor operando com os diferentes combustíveis testados, identificando e registrando eventuais anomalias ou desgastes anormais durante os ciclos de ensaio;
11. Promover a disseminação do conhecimento e a qualificação de recursos humanos a partir de:
 - a) Integração dos pesquisadores do CTM-UFMG e profissionais do setor ferroviário por meio de reuniões técnicas;
 - b) Formação de mão de obra especializada, pós-graduandos (Mestrado, Doutorado e Pós-Doutorado) e alunos de Iniciação Científica, com conhecimento em temas inovadores relacionados ao transporte ferroviário;
 - c) Fomento a produção acadêmica, incluindo dissertações de mestrado, teses de doutorado, pesquisas de pós-doutorado e projetos de iniciação científica alinhados aos objetivos do projeto;
 - d) Submissão e publicação dos resultados em congressos especializados e revistas científicas e tecnológicas.
12. Contribuir para o avanço das metas globais de sustentabilidade, alinhando as atividades do projeto aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial:
 - i) ODS 7 (Energia Limpa e Acessível): Reforçando a pesquisa em tecnologias de combustíveis mais limpos e na diversificação da matriz energética global (Metas 7.2 e 7.a).
 - ii) ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura): Modernizando os processos com tecnologias ambientalmente corretas e fortalecendo a pesquisa científica e a capacidade tecnológica do setor de transporte de carga (Metas 9.4 e 9.5).
 - iii) ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis): Promovendo a gestão sustentável de recursos e o fortalecimento científico para padrões mais sustentáveis de consumo de combustível (Metas 12.2, 12.6 e 12.a).

2 JUSTIFICATIVA

Operações ferroviárias para transporte de carga pesada normalmente utilizam motores a combustão de grande porte (tipicamente com potências iguais ou superiores a 4.400hp) como forma de gerar energia para motores elétricos realizarem a tração das composições. Estes motores possuem um consumo relevante de diesel (média de 4.500l/h) e, por consequência, altas emissões de gases de efeito estufa e de poluentes atmosféricos associados à combustão.

Essas emissões se enquadram principalmente no Escopo 1, que corresponde às emissões diretas geradas por fontes que a Companhia opera ou controla (por exemplo, a queima de diesel das locomotivas em operação). Para contextualização, o Escopo 2 refere-se às emissões indiretas associadas à energia comprada (como eletricidade adquirida da rede), e o Escopo 3 abrange outras emissões indiretas na cadeia de valor (fornecedores, transportes contratados, bens e serviços adquiridos etc.).

Diante do avanço de compromissos climáticos corporativos e nacionais e do amadurecimento de instrumentos regulatórios e de financiamento de inovação no setor ferroviário, a modernização energética na tração ferroviária deixa de ser apenas uma agenda de eficiência e passa a integrar o núcleo de competitividade e conformidade regulatória.

O projeto ora apresentado possui como foco rotas tecnológicas compatíveis com a realidade brasileira de biocombustíveis e em estratégias de melhoria de combustão e redução de emissões sem a necessidade de reprojeto estruturais extensivos do parque atual.

Razões da escolha do tema

O setor de transportes é crítico para a redução de emissões no Brasil, pois é responsável por cerca de 11% das emissões brutas nacionais (260 Mton em 2023, visão poço a roda). Considerando o crescimento natural previsto pelos planos setoriais e pelo Plano Nacional de Logística até 2050, se não houver atuação na redução de emissões, o valor aumentará 63% (de 260 Mton para 424 Mton).

Um estudo recente coordenado pelo CEBDS (Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável), CNT (Confederação Nacional dos Transportes) e o Observatório de Mobilidade do Insper e realizado pela Coalizão dos Transportes indicou o caminho para a descarbonização deste setor, contribuindo ativamente para a redução das emissões brasileiras e ajudando o Brasil a se posicionar como líder global de descarbonização.

O estudo indica 3 vetores críticos para a descarbonização: mudança da matriz de transportes, expansão do uso de biocombustíveis e eletrificação e Power to X (soluções disruptivas). Juntos, estes vetores respondem por cerca de 60% da redução das emissões. Para além destes vetores há a eficiência energética e otimizações com um papel relevante. O setor ferroviário é peça chave para 2 dos 3 vetores. Ele emite 5 a 6 vezes menos que o rodoviário, que corresponde por cerca de 90% das emissões. Deste modo, mudar a matriz de rodoviário para ferroviário é uma solução lógica, principalmente considerando as dimensões continentais do país e o potencial de expansão da malha ferroviária ainda não explorados. O estudo considera um aumento da participação do transporte por ferrovia e cabotagem de 31% para 55% até 2050. Deste modo, teremos aumento do uso de locomotivas como solução para descarbonização. Ao mesmo tempo, para que a solução

seja efetiva, esta expansão deverá ser acompanhada de soluções que reduzam as emissões dos motores destas locomotivas. Neste ponto, o segundo vetor e a eficiência energética passam a ser relevantes. O estudo prevê um aumento na demanda de 25b de litros de biocombustíveis (SAF, diesel verde, etanol etc.) em 2050.

Desta forma, o tema de estudo para aplicação de biocombustíveis com nanocatalisadores para descarbonização e eficiência energética para motores ferroviários de grande porte é de extrema importância pois está no centro da discussão como solução viável para redução de emissão de gases de efeito estufa no curto e médio prazo. Neste período, motores a combustão ainda serão a tecnologia dominante devido às limitações técnicas, econômicas e de infraestrutura. Soluções disruptivas como hidrogênio e eletrificação são vistos como possibilidades de longo prazo.

Vale ressaltar que mesmo como solução de curto prazo, a transição energética via biocombustíveis deverá ser incremental e escalável: (i) substituição gradual do conteúdo fóssil por biocombustíveis; (ii) estratégias de melhoria da combustão e do rendimento térmico; e (iii) mitigação de poluentes regulados (particulados e óxidos de nitrogênio), com ganhos ambientais e operacionais. Essa abordagem acelera decisões filtrando soluções pouco efetivas, otimiza e potencializa combinações de soluções isoladas (catalisadores, etanol, biodiesel e controles de combustão por exemplo), reduz riscos ao ativo ferroviário, preserva a disponibilidade operacional e permite decisões baseadas em evidência (custo total, compatibilidade de materiais, performance e emissões). Em especial, biocombustíveis e estratégias de aditivação avançada devem e podem ser avaliados de forma modular, a partir de protocolos de teste e critérios de aprovação técnico-operacionais. Sua adoção, portanto, deverá ser estudada e conduzida por etapas, com validações progressivas em bancada, em condições controladas, tendo como última etapa validações em campo.

Viabilidade técnica e operacional: rotas combustíveis e aditivação avançada

A viabilidade técnica, em motores ferroviários de alta potência, exige atenção a fenômenos de injeção, atomização, estabilidade de mistura, formação de depósitos, lubrificidade (capacidade do combustível de reduzir atrito e desgaste em componentes), compatibilidade com elastômeros (vedações/mangueiras), e comportamento em diferentes regimes de carga. O projeto propõe investigar rotas com racional técnico claro, privilegiando alternativas com maior maturidade de cadeia produtiva nacional e potencial de implantação gradual.

Biodiesel (B30, B50, B100)

Misturas com biodiesel podem contribuir para redução do conteúdo fóssil e, dependendo do regime de operação e do controle de qualidade do combustível, trazer benefícios ambientais. Contudo, concentrações elevadas podem demandar avaliação rigorosa da redução do potencial calorífico do combustível, da estabilidade oxidativa (tendência do combustível a degradar e formar compostos que favorecem depósitos) e comportamento de viscosidade/densidade sob variações de temperatura e carga, especialmente em sistemas de injeção e em operação intensiva.

Emulsões água e/ou etanol em diesel na combustão

A incorporação de etanol em motores de ciclo diesel é tecnicamente desafiadora por propriedades intrínsecas (como número de cetano e miscibilidade), mas pode ser viabilizada mediante emulsificação (mistura estável de dois líquidos que normalmente não se misturam) com pacotes de aditivos apropriados. Em paralelo, combustíveis emulsionados com água (sob condições controladas) podem atuar como estratégia de mitigação de temperatura de pico, com potencial de redução de NO_x (óxidos de nitrogênio) e ajuste do balanço entre material particulado e óxidos de nitrogênio, desde que a estabilidade da emulsão e a proteção anticorrosiva sejam atendidas por especificação.

Essa linha de investigação exige protocolo robusto de segurança e integridade do motor, com desenho experimental progressivo e critérios de descarte/aceite que impeça danos a componentes críticos e assegurem rastreabilidade.

Importante enfatizar que a utilização de combustíveis alternativos sem a necessidade de grandes alterações no projeto do motor é uma trajetória prioritária na busca da redução das emissões de poluentes, pois evita-se grandes investimentos em adequações de ativos (reprojeto de câmaras de combustão, sistema adicional de injeção para etanol, alteração de elastômeros, tanques de combustível adicionais etc.). O presente projeto de estudo visa tornar possível a operação flexfuel entre o diesel e o etanol atuando eminentemente na mistura e o mínimo possível no motor, criando uma opção interessante para a redução das emissões de carbono, que poderá ser replicada com relativa facilidade para uma ampla gama de tipos de motores de diferentes fabricantes.

Nanocatalisadores como agentes de eficiência e mitigação de emissões

O uso de nanocatalisadores (materiais em escala nanométrica, tipicamente 1-100nm, capazes de favorecer reações químicas) busca influenciar a cinética e a estabilidade da combustão, potencialmente favorecendo uma oxidação mais completa, reduzindo formação de fuligem e contribuindo para ganhos de eficiência de combustão em condições específicas. Contudo, por se tratar de fronteira tecnológica, essa rota exige cuidado adicional quanto a: (i) estabilidade e dispersão; (ii) compatibilidade com sistemas de filtragem e pós-tratamento; (iii) efeitos sobre desgaste e depósitos; e (iv) implicações ambientais e ocupacionais associadas ao manuseio de nanomateriais.

Assim, o projeto adota a premissa de que qualquer alegação de benefício deverá ser sustentada por evidência experimental rastreável (concentração, tipo de nanopartícula, condições de teste, repetibilidade e significância), com validação incremental até o contexto ferroviário.

Contribuição para a concessionária, União e sociedade

A execução do projeto tem potencial de gerar benefícios simultâneos (ambientais, econômicos e institucionais) ao (i) reduzir emissões associadas ao consumo de combustível; (ii) reduzir o consumo de combustível e, portanto, redução de custo operacional relativo e; (iii) estimular a cadeia nacional de biocombustíveis e inovação aplicada.

Benefícios para a concessionária e para o setor ferroviário

Para a concessionária, o combustível é insumo central de operação e uma das alavancas mais diretas para ganhos de eficiência e mitigação de riscos de custo. Além disso, o desenvolvimento de protocolos de teste, critérios de aceitação e rotinas de monitoramento (desempenho, manutenção e emissões) tende a elevar a maturidade do setor e reduzir assimetria técnica na adoção de novas rotas de combustível. Para o setor ferroviário nacional, a geração de evidências em escala e em contexto real de operação é particularmente relevante, pois reduz barreiras à adoção e eleva a previsibilidade regulatória e técnica.

No Brasil, pode-se adotar como referência o consumo de combustível na Estrada de Ferro Vitória a Minas, uma das ferrovias mais eficientes do Brasil. Administrada pela Vale S.A., o custo do combustível na EFVM é de, aproximadamente, 35% dos custos totais. Um estudo realizado pelo Grupo de Pesquisa e Extensão em Logística Agroindustrial relata que “especificamente para o transporte ferroviário, a parcela do custo do combustível representa em geral de 20 a 30% do custo total, dependendo da rota, volume movimentado e quantidade de vagões utilizados”.

Benefícios para a União

A dependência de combustíveis fósseis e a volatilidade de preços e oferta podem representar vulnerabilidades estratégicas, sobretudo quando há necessidade de importação e exposição a choques externos. Ao avaliar rotas de substituição parcial do diesel fóssil por biocombustíveis com cadeia nacional e ao explorar estratégias de eficiência, o projeto contribui para ampliar a resiliência energética, com efeitos potenciais sobre a balança comercial e previsibilidade de custos de transporte.

A evolução do preço médio de revenda do óleo diesel e do diesel S10 no Brasil, entre 2019 e o início de 2026, apresenta uma trajetória marcada por volatilidade influenciada pela pandemia de Covid-19, choques geopolíticos internacionais, alterações na política de preços da Petrobras e mudanças na tributação. Entre janeiro de 2019 e maio de 2020, o preço médio do diesel registrou uma queda significativa, passando de R\$3,54/litro para R\$3,11/litro. Essa redução de aproximadamente 12% foi impulsionada pela queda drástica nos preços do produtor (-31%) e redução no ICMS, decorrentes da retração da demanda global por petróleo no início da pandemia de Covid-19.

Após a queda brusca promovida pelo início do período pandêmico, o preço do diesel voltou a escalar. Em março de 2022, o preço médio atingiu R\$6,73/litro. O pico desse período ocorreu em julho de 2022, quando o diesel chegou a R\$7,57/litro, em um cenário agravado pela guerra da Ucrânia e pela manutenção da política de Preço de Paridade de Importação (PPI) como a Lei Complementar nº 192/2022 que zerou alíquotas de PIS/COFINS, tentaram conter a alta, mas a redução foi parcialmente absorvida por margens de distribuição e revenda. Em maio de 2023, o preço médio registrado foi de R\$5,16/litro. Neste mês, a Petrobras alterou sua estratégia comercial, abandonando a exclusividade do PPI em favor de uma política que considera custos internos e condições de mercado, o que contribuiu para uma relativa estabilidade de preços ao longo do ano, apesar das oscilações externas.

Os dados mais recentes indicam uma retomada gradual de alta entre 2025 e o início de 2026:

- Janeiro de 2025: o preço médio situava-se em R\$5,42/litro.

- Dezembro de 2025: o preço encerrou o ano em R\$6,08/litro.
- Janeiro de 2026: na semana de 04 a 10 de janeiro de 2026, o preço médio de revenda do diesel S10 alcançou R\$6,12/litro, com uma variação semanal positiva de 0,82%.

Em 2024, as importações brasileiras de óleo diesel ultrapassaram US\$8,3 bilhões, tornando-o o segundo produto mais importado do país, superado apenas pelos óleos brutos de petróleo (US\$8,6 bilhões). Este cenário evidencia a acentuada dependência nacional face a fornecedores externos, deixando o mercado interno vulnerável a instabilidades geopolíticas (como a guerra da Ucrânia) e à incerteza dos preços internacionais. Neste cenário, a redução de consumo de diesel é importante para garantir a competitividade do transporte ferroviário brasileiro.

É importante destacar que o Brasil possui grandes extensões territoriais e uma malha ferroviária ainda tímida, sobretudo quando comparada à dimensão do país. Nações como os EUA e a Rússia dispõem de uma malha superior a 300 mil km, ao passo que o Brasil, segundo a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT, 2013b), possui aproximadamente 30 mil quilômetros de vias, considerando-se conjuntamente o transporte de cargas e de pessoas. Dessa forma, os Estados Unidos contam com mais de 270 mil quilômetros de linhas a mais do que o Brasil, ainda que a extensão territorial e a população de ambas as nações sejam semelhantes (BRASIL/ANTT, 2014d; CNT, 2013b). Nesse contexto, é imperativo que a otimização do consumo de diesel no transporte ferroviário acompanhe o potencial de expansão da malha, de modo a assegurar competitividade, especialmente no segmento de cargas que, inclusive, é predominante no Brasil. Assim, considerando que o etanol e o biodiesel são combustíveis regulares da matriz energética brasileira, o presente projeto reveste-se de extrema importância para o desenvolvimento de novas tecnologias nacionais aplicadas a motores de combustão interna, apresentando consonância com as diretrizes internacionais voltadas ao desenvolvimento de tecnologias sustentáveis.

Enquadramento na Resolução nº 6.021, de 2023

O projeto está alinhado às diretrizes e objetivos previstos na Resolução nº 6.021, de 2023, artigos 3º e 4º, especialmente no que se refere à melhoria da qualidade do serviço ferroviário, ao desenvolvimento tecnológico e à promoção de soluções energéticas sustentáveis, conforme detalhado na seção 1.1.1.

O presente projeto também está em consonância com o disposto no inciso I, do artigo 8º, da Resolução nº 6.021, de 2023, não se destinando ao cumprimento das obrigações contratuais regulares atribuídas à concessionária. Trata-se de iniciativa de pesquisa, desenvolvimento e inovação, com caráter experimental e tecnológico, voltada à geração de conhecimento e avaliação de rotas energéticas alternativas, não configurando investimento obrigatório previsto no contrato de concessão.

Dessa forma, o projeto configura-se integralmente como iniciativa de PD&I no âmbito do RDT, em conformidade com os dispositivos regulatórios vigentes.

Participação em eventos e divulgação dos resultados

A participação em eventos científicos e tecnológicos desempenha um papel primordial no sucesso deste projeto, proporcionando não apenas a divulgação dos resultados, mas

também a troca de experiências entre técnicos, alunos e pesquisadores, além de incentivar as discussões mais recentes da área e fortalecer as redes de colaboração científica. Os eventos elencados representam um ambiente propício para debates com especialistas, aprendizado sobre novas tecnologias e metodologias, além da oportunidade de estabelecer parcerias estratégicas com instituições de referência nacional e internacional. A interação com pesquisadores de diversas instituições e setores da indústria ferroviária interessados na descarbonização da matriz energética brasileira permitirá à equipe do projeto aprofundar conhecimentos, identificar desafios emergentes e alinhar suas pesquisas às tendências globais do setor. Além disso, a participação ativa da equipe do projeto nesses congressos garante a inserção do projeto no contexto da inovação tecnológica, promovendo a validação científica e a disseminação dos avanços alcançados.

Dentre os eventos estratégicos para a disseminação dos resultados e o fortalecimento da colaboração científica, destacam-se:

- **COBEM** (Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica)

Página oficial: <https://eventos.abcm.org.br/cobem2025>

Público médio estimado: 1200 a 1500 participantes

Relevância: O COBEM é um dos maiores eventos da engenharia mecânica no Brasil, abrangendo temas como dinâmica de sistemas, materiais avançados e sustentabilidade. O evento se consolidou como o fórum mais relevante do país para discussão de avanços em engenharia, promovendo forte integração entre academia e indústria. A participação proporcionará imersão nas discussões mais atuais sobre inovação em engenharia mecânica e suas aplicações no setor ferroviário, fortalecendo o impacto do projeto por meio do compartilhamento de resultados e do diálogo com profissionais da área.

- **THIESEL** – Conference on Thermo-and Fluid Dynamic Processes in Direct Injection Engines (Espanha)

Página Oficial: cmt.upv.es

Público médio estimado: 250 – 350 especialistas.

Relevância: O THIESEL é um dos principais eventos internacionais dedicados aos processos termo-fluidodinâmicos em sistemas de propulsão, com foco em tecnologias para transporte limpo e eficiente. O congresso aborda temas de ponta, como combustão avançada, redução de emissões, combustíveis renováveis (e-fuels, hidrogênio, amônia) e otimização energética em motores. A participação possibilita interação direta com especialistas de referência mundial, além de acesso às mais recentes tendências em descarbonização, sendo altamente estratégico para aprimoramento do conhecimento e compartilhamento internacional das soluções desenvolvidas no projeto.

- **ENCIT – Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering**

Página Oficial: abcm.org.br

Público médio estimado: 500 – 700 participantes.

Relevância: O ENCIT é um dos principais congressos científicos da América Latina nas áreas de ciências térmicas e engenharia de fluidos, promovendo a integração entre academia, centros de pesquisa e indústria. O evento constitui um fórum consolidado para apresentação de avanços em termodinâmica, transferência de calor e massa, combustão e sistemas energéticos. Sua relevância para o projeto está na discussão aprofundada de fenômenos térmicos e fluidodinâmicos associados ao desempenho de motores e ao uso de combustíveis alternativos, fundamentais para a análise de eficiência energética e redução de emissões.

- **SAE BRASIL**

Página Oficial: saebrasil.org.br

Público médio estimado: 8.000 – 12.000 participantes

Relevância: O Congresso SAE BRASIL é o principal evento nacional voltado à tecnologia da mobilidade, reunindo representantes da indústria, academia e governo em um ambiente colaborativo para discussão de soluções inovadoras. O evento promove a disseminação de conhecimento técnico, com forte foco em eficiência energética, descarbonização, novos combustíveis e transformação da mobilidade, sendo estratégico para demonstrar a viabilidade do uso de biocombustíveis nacionais e tecnologias de eficiência em frotas locais.

Como as chamadas para os eventos são realizadas com antecedência de seis meses a um ano, a participação da equipe poderá sofrer ajustes decorrentes do aceite dos trabalhos científicos submetidos, priorizando-se os congressos nos quais houver aprovação das produções vinculadas ao projeto.

3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

3.1 Métodos e técnicas utilizadas

O projeto tem como objetivo central avaliar, desenvolver e otimizar tecnologias inovadoras para a redução das emissões de gases de efeito estufa e do consumo de combustível em motores de tração ferroviária de ciclo diesel de grande porte (potência igual ou superior a 4.400hp). A inovação proposta baseia-se na alteração físico-química do processo de combustão através de quatro vetores tecnológicos principais, que serão combinados para determinar o ponto ótimo de operação termodinâmica.

O primeiro vetor é a incorporação de nanocatalisadores ao diesel, uma abordagem que visa aprimorar a cinética química da combustão sem exigir modificações mecânicas drásticas. Devido às suas dimensões nanométricas e elevada área superficial específica, esses materiais promovem uma oxidação mais eficiente e estável do combustível, resultando em maior eficiência térmica e redução de emissões de monóxido de carbono, hidrocarbonetos e material particulado.

O segundo e terceiro vetores envolvem o desenvolvimento de combustíveis emulsionados. O projeto utilizará a tecnologia do HydroDiesel™ (água emulsificada em diesel) que reduz as temperaturas de pico, principal mecanismo de formação de óxidos de nitrogênio (NOx), e promove a microexplosão das gotículas, melhorando a atomização e reduzindo material particulado. Paralelamente, será testado o uso de etanol emulsificado no diesel. Embora o etanol apresente desafios de miscibilidade que exigem o uso de surfactantes e aditivos para corrigir a viscosidade e lubricidade, sua presença oxigenada na mistura e a menor cadeia de carbono favorecem a redução drástica de material particulado e a pegada de carbono global do ciclo.

O quarto vetor está voltado ao uso de biodiesel em altas concentrações (B30, B50 e B100), aproveitando o maior teor de oxigênio molecular, o elevado índice de cetano e a excelente lubricidade deste biocombustível para promover uma queima mais completa e reduzir a dependência fóssil.

A execução do projeto está prevista para um período de 48 meses e fundamenta-se em uma abordagem científica híbrida que integra experimentação intensiva e simulação numérica avançada, conduzida pelo Centro de Tecnologia da Mobilidade da Universidade Federal de Minas Gerais.

A espinha dorsal da infraestrutura experimental será a aquisição e instalação de uma bancada dinamométrica específica para motores até 9.000hp. Esta infraestrutura permitirá a realização de ensaios controlados para quantificar a eficiência de conversão de combustível e as emissões de poluentes, utilizando instrumentação de ponta como velocimetria (PIV, LDA), análise de spray (PDA) e analisadores de gases (FID, CDL e NDIR).

Paralelamente aos ensaios, será executada a modelagem computacional do motor para prever o comportamento dos fluidos e da combustão. A equipe utilizará software especializado para simulações tridimensionais do escoamento e spray e para simulações unidimensionais (1D) do ciclo termodinâmico. A metodologia prevê que os dados reais obtidos na bancada dinamométrica sejam utilizados para validar e ajustar a sensibilidade dos modelos numéricos. Uma vez calibrados, estes modelos permitirão extrapolar os resultados otimizando o tempo de desenvolvimento e a definição das condições de contorno para os testes. O desenvolvimento inclui ainda uma etapa crítica de calibração do sistema de controle eletrônico do motor. Como as novas misturas (especialmente com etanol e água) alteram propriedades como viscosidade e atraso de ignição, será necessário remapear os parâmetros de injeção.

Como exposto acima, a metodologia combina ensaios em bancada dinamométrica, instrumentação e modelagem computacional 1D/3D. A validação da pesquisa realizada exige comparar sistematicamente variáveis medidas e simuladas, quantificar desvios, ajustar sensibilidades e iterar a calibração até atingir aderência satisfatória. Nesse contexto, a eficiência do projeto passa a depender diretamente da capacidade de transformar grandes volumes de dados experimentais e numéricos em parâmetros de calibração e decisões de engenharia de forma rápida, objetiva e reprodutível.

Aquisições previstas

Para a realização das atividades de pesquisa previstas, o projeto mobilizará uma infraestrutura híbrida que combina a aquisição de novos bens de grande porte com a utilização de laboratórios avançados já existentes.

A principal aquisição do projeto, fundamental para a consecução dos resultados, consiste na implementação de uma sala de testes equipada com bancada dinamométrica específica

para testes de motores até 9.000hp, inédita na América Latina, a qual deverá ser instalada nas dependências da UFMG, exigindo obras de instalação e adequação da sala de testes. Serão adquiridos também um motor de locomotiva de 4.400hp e um transformador com potência igual ou superior a 1500 KVA. Serão adquiridos consumíveis (filtros de ar, de óleo e de combustível) para suportar os ensaios ao longo do projeto.

Os itens do sistema de injeção (injetores, eixos de comando, bombas e o conjunto de força) foram estrategicamente inseridos no escopo de aquisição para compor a construção da bancada de velocimetria além do motor trifásico, inversor e sistema de redução. Esta bancada possibilita a execução de ensaios para caracterizar o comportamento dinâmico do sistema de injeção quando submetido aos novos fluidos.

Será contratado serviço de desenvolvimento de uma Unidade de Controle Eletrônico do tipo aberta (Open ECU) dedicada ao controle do motopropulsor em bancada dinamométrica. Essa solução é essencial para viabilizar a calibração dos parâmetros operacionais do motor frente ao uso de combustíveis alternativos, cujas propriedades físico-químicas diferem significativamente do diesel convencional, exigindo ajustes dinâmicos nas estratégias de injeção e combustão.

Complementarmente, será necessária a aquisição e instalação de um novo cluster computacional destinado ao treinamento da equipe de simulação e à execução de cálculos numéricos complexos. O cluster será constituído por servidores de processamento, sistema de arrefecimento e softwares especializados.

Para viabilizar o tratamento, análise e modelagem dos dados gerados no projeto, serão utilizadas ferramentas computacionais especializadas. A operação do cluster de simulação, instalado em ambiente com acesso controlado devido à natureza sensível das informações e à sua alta complexidade, será suportada por um software de acesso remoto seguro. Essa solução permitirá o acesso simultâneo e controlado dos pesquisadores, além do monitoramento contínuo das simulações numéricas de longa duração, sem a necessidade de presença física permanente da equipe, aumentando a eficiência operacional e a disponibilidade da infraestrutura.

Serão adquiridas licenças de softwares de engenharia e simulação essenciais ao desenvolvimento do projeto. O SOLIDWORKS será utilizado para modelagem tridimensional e análise estrutural de componentes, possibilitando o desenvolvimento e validação de peças e sistemas. O GT-SUITE será empregado na modelagem termodinâmica unidimensional do motopropulsor, permitindo a previsão do desempenho e das emissões a partir de dados experimentais. Complementarmente, o AVL CONCERTO será utilizado para o pós-processamento dos dados obtidos em bancada dinamométrica, possibilitando a análise detalhada dos parâmetros de combustão e garantindo consistência com práticas consolidadas de engenharia. Essas ferramentas são fundamentais para garantir a integração entre os ensaios experimentais e a modelagem computacional, permitindo maior assertividade na análise dos resultados e na otimização das rotas tecnológicas avaliadas no projeto.

Três notebooks adquiridos para o projeto farão parte da infraestrutura de operação e aquisição de dados da sala dinamométrica, sendo cruciais para utilização dos programas de controle e monitoramento dos parâmetros do motor e dos outros componentes da estrutura de ensaios. Outros dois notebooks serão utilizados na pesquisa e disponibilizados à ANTT ao término do projeto.

A infraestrutura pré-existente disponibilizada pela UFMG complementa os novos investimentos com sistemas de alta precisão cruciais para a caracterização física dos

fenômenos. Isso inclui sistemas de ar comprimido, velocimetria por imagem de partícula (PIV), análise de dinâmica de partículas (PDA), anemometria laser doppler (LDA), câmaras de alta velocidade e câmara de spray para caracterização da injeção de combustível em bancada. Para a análise de emissões e combustão, serão adquiridos analisadores de gases e sistemas de análise de combustão, além dos insumos (N₂, O₂ e gases de calibração) necessários aos analisadores.

Dentre os materiais de consumo, o projeto contempla a aquisição e utilização de combustíveis (diesel, biodiesel e etanol), bem como aditivos como nanocatalisadores, necessários à execução dos ensaios, além de óleo lubrificante.

Complementarmente, o projeto requer a aquisição de HydroDiesel™ produzido sob demanda, garantindo o suprimento necessário aos testes. O HydroDiesel™ é definido tecnicamente como uma nanoemulsão termodinamicamente estável de água em diesel, composta majoritariamente por diesel e água, estabilizada por um pacote de aditivos proprietário denominado HDAS™ (HydroDiesel™ Additive Solution). Diferente das misturas tradicionais (macroemulsões), em que as gotas de água são grandes, ocorre separação de fases e aumentam-se riscos como corrosão, no HydroDiesel™ as gotículas de água são reduzidas para 10 a 200 nanômetros. O resultado alcançado impede que as gotas “decantem” por gravidade, mantendo a água dispersa por tempo indefinido sem necessidade de agitação contínua. Por isso, o produto se comporta como potencial solução que pode ser utilizada em motores existentes sem modificações estruturais relevantes.

A detentora da tecnologia HydroDiesel™ é a Trillion, LLC, uma startup de tecnologia de combustíveis verdes sediada em Houston, Texas, fundada pelo inventor Alexander Gomez. A empresa validou sua tecnologia através de parcerias com a Universidade de Houston e em testes de alto estresse. É imperativo distinguir a Trillion, LLC (voltada para emulsões e refino downstream) da Trillion Energy International Inc. (empresa canadense de exploração de gás natural e petróleo na Turquia). Embora compartilhem o nome, são entidades com operações, ativos e naturezas jurídicas totalmente distintas. O projeto ferroviário em questão utiliza a tecnologia da empresa americana (Trillion, LLC).

Os volumes dos combustíveis, nanocatalisadores e óleo lubrificante foram calculados conforme memórias de cálculos apresentadas abaixo:

Tabela 1 - Volume de combustíveis

MEMÓRIA DE CÁLCULO - CONSUMO DE COMBUSTÍVEL						
1. TABELA DE TEMPO DE ENSAIO						
	N de ensaios	Duração Ensaios	Condicionamento /Amaciamento	Calibração	Comentarios	Legenda
Referência	1	9 horas*	80 horas	40 horas	*São 3 ensaios de 3 horas de duração	Descrição da composição do Combustível
Baseline	1	9	80	40		Diesel com 15% de Biodiesel
B30	1	9		40		Diesel com 30% de Biodiesel
B50	1	9		10	Calibração com base nos ensaios de B30	Diesel com 50% de Biodiesel
B100	1	9		40		Diesel com 15% de Biodiesel
N1 B30	1	9	80	10	Calibração com base nos ensaios de B30	Diesel com 30% de Biodiesel e Nanopartícula 1
N2 B30	1	9	80	10	Calibração com base nos ensaios de B30	Diesel com 30% de Biodiesel e Nanopartícula 2
Dis+Et	4	36		70	Ensaio com diferente proporções de etanol	Emulsão de diesel com etanol
Dis+H2O	4	36		70	Ensaio com diferente proporções de água	Emulsão de Diesel com água
Total		126	240	290		
2. TEMPO TOTAL DE OPERAÇÃO			656 horas			
3. CONSUMO MÉDIO DO MOTOR			5,1 L/min		Consumo Médio Estimado do Motor	
			2		Fator de segurança	
			10,1 L/min		Consumo Médio Considerado	
			606 L/h		Consumo Médio Considerado	
4. CONSUMO TOTAL DE DIESEL			397536 L			
4.1 HydroDiesel			128472 L			
4.2 Baseline			78174 L			
4.3 Ensaios da Rotas			190890 L			
5. CONSUMO TOTAL DE ETANOL			19270,8 L			

A quantidade de combustível a receber a diluição foi calculada com base na estimativa da quantidade de horas de teste utilizando nanopartículas a partir do consumo médio do motor 7FDL de 16 cilindros. Para o cálculo do volume total de nanocatalisador necessário, aplicou-se um fator de segurança de 1,35, garantindo a margem operacional necessária para os ensaios, conforme apresentado no memorial de cálculo.

Tabela 2 - Volume de nanopartículas

MEMORIA DE CÁLCULO - CONSUMO DE NANOPARTÍCULAS			
Fornecedor	Diluição	Volume Necessário(L)	Quantidade (L)
Nanum	0,0002000	35,34	35
Green Plus	0,0000500	8,84	9
2. TEMPO TOTAL DE OPERAÇÃO			
216 horas			
3. CONSUMO DE DIESEL			
606 L/h			
4.3 Ensaios Nanopartículas			
130896 L/h			

Tabela 3 - Volume de óleo lubrificante

MEMORIA DE CÁLCULO - CONSUMO DE ÓLEO LUBRIFICANTE				
1. Especificações de Consumo de Óleo Lubrificante				
Descrição	Volume Necessário (L)	Qtd prevista	Subtotal (L)	Comentários
Enchimento a seco	1552	1	1552	Capacidade total do sistema
Troca Padrão	1552	3	4656	Troca de óleo com substituição dos filtros
Durante a operação	0,5	3975,36	1987,68	Gasto estimado de 0,5 L de lubrificante a cada 100 L de Diesel consumidos.
Volume Total de Óleo Lubrificante (L)			8195,68	Valor considerado no plano de trabalho: 8000 L

Para garantir a confiabilidade dos ensaios e a integridade do motopropulsor ao longo da execução do projeto, serão realizadas análises laboratoriais periódicas de óleo lubrificante e de combustível. No caso do óleo, as análises têm como objetivo monitorar a condição do lubrificante e avaliar a integridade mecânica do motor, permitindo a identificação precoce de desgaste anormal, contaminações e degradação do fluido, especialmente em função da utilização de combustíveis alternativos, como biodiesel em altas concentrações e emulsões de água e etanol. Estão previstas 23 análises de óleo lubrificante:

Tabela 4 - Análise Laboratorial de Óleo

Especificação		Quantidade
Baseline	Novo na embalagem	1
	Pós-troca	1
	Antes do ensaio Baseline	1
	Pós-ensaio Baseline	1
Ensaios com Misturas de Biodiesel	Novo na embalagem	1
	Pós-troca	1
	Pós-teste B30	1
	Pós-teste B50	1
	Pós-teste B100	1

Especificação		Quantidade
Ensaio com Emulsões de Água e Etanol em Diesel	Novo na embalagem	1
	Pós-troca	1
	Pós-teste Emulsão H1, H2 e H3	3
	Pós-teste Emulsão E1, E2 e E3	3
Ensaio com Nanopartículas e Emulsões Otimizadas	Novo na embalagem	1
	Pós-troca	1
	Pós-teste B30 + N1 e B30 + N2	2
	Pós-teste Emulsão H4 e E4	2
Total de amostras		23

De forma complementar, as análises de combustível serão conduzidas com duas finalidades: (i) controle de qualidade dos insumos utilizados, assegurando a conformidade das misturas e a ausência de contaminantes, e (ii) caracterização físico-química detalhada das formulações experimentais, em conformidade com normativas aplicáveis, garantindo a validade científica dos resultados obtidos. Tais procedimentos são essenciais para assegurar a rastreabilidade dos dados experimentais, minimizar vieses decorrentes de variações na qualidade dos insumos e fornecer subsídios técnicos para a interpretação dos resultados e validação das rotas tecnológicas avaliadas. Estão previstas 39 análises de combustível para controle de qualidade e 8 análises para caracterização físico-química:

Tabela 5 - Análise Laboratorial de Combustível

Abordagem de Análise: Controle de Qualidade	
Especificação	Quantidade
Insumos Recebidos	27
Verificação pré-ensaio	12
Subtotal	39
Abordagem de Análise: Caracterização Físico-química (conforme ANP)	
Especificação	Quantidade
Verificação de Emulsões com Água	4
Verificação de Emulsões com Etanol	4
Subtotal	8

O projeto também prevê a aquisição de equipamentos de proteção individual (EPIs) para a equipe, como: botas de segurança, óculos de proteção, protetores auriculares tipo plug e concha, luvas nitrílicas e multitato.

O desenvolvimento tecnológico resultará em produtos tangíveis e intangíveis de alto valor agregado. No âmbito experimental, serão entregues resultados de desempenho para cada

uma das rotas tecnológicas: motores operando com Nanocatalisadores (Rota 2), com altas concentrações de Biodiesel B30, B50 e B100 (Rota 1) e com emulsões de água e/ou etanol em diesel (Rota 3). No âmbito da simulação numérica, serão desenvolvidos os modelos unidimensionais e tridimensionais do motor ferroviário para extrapolação dos resultados. Além disso, serão desenvolvidos modelos de cinética química para melhor entendimento da combustão com cada uma das rotas tecnológicas.

Atuação da equipe do projeto

A equipe sênior (formadores) será composta pela coordenação geral do projeto e chefias operacionais dedicadas aos laboratórios, apoiadas por pesquisadores e profissionais técnico especializados com experiência em modelagem numérica e atividades experimentais, garantindo alinhamento metodológico entre (i) aquisição e qualidade do dado experimental, (ii) validação e calibração de modelos 1D/3D e (iii) otimização do remapeamento. Essa camada sênior será responsável por definir critérios de avaliação dos resultados obtidos e dos modelos (métricas de erro, incerteza, robustez e generalização), assegurando consistência técnica entre os ensaios ao longo dos 48 meses de execução. Complementarmente, podem ser aplicadas técnicas de otimização para propor estratégias de controle e mapas de calibração, respeitando restrições operacionais (limites térmicos, estabilidade de combustão e metas de emissões), com validação sistemática em bancada e retroalimentação contínua dos modelos 1D/3D.

Por fim, a equipe atuará ainda na integração entre as disciplinas do projeto, assegurando que cada ensaio resulte, de forma sistemática, em ativos reutilizáveis: bases de dados estruturadas, rotinas automatizadas de tratamento de dados, modelos preditivos calibrados, relatórios reprodutíveis e recomendações objetivas para o remapeamento. Essa organização é condição necessária para que a abordagem híbrida (experimento + simulação) seja efetivamente preditiva, escalável e capaz de acelerar a convergência do desenvolvimento tecnológico com o nível de rigor requerido em um projeto de PD&I.

Adicionalmente, a formação de capital intelectual é um pilar central do projeto, visando a qualificação de profissionais para operar no setor ferroviário, indústria e Instituições de Ciência e Tecnologia (ICTs). A equipe executora sênior (formadores) indicada pela UFMG foi selecionada com base na excelência técnica e experiência comprovada, verificável através do Currículo Lattes. O Centro de Tecnologia da Mobilidade (CTM/UFMG) possui mais de 20 anos de experiência em combustíveis alternativos e simulação CFD. Os Coordenadores e Pesquisadores Doutores (Prof. José Guilherme Coelho Baêta, Prof. Ramón Molina Valle, Prof. Fabrício Pujatti, Prof. Oscar Sandoval e Profa. Rita Sebastião) cobrem áreas como medições óticas, controle de motores e química de combustíveis.

Serão capacitados 20 bolsistas vinculados à UFMG, distribuídos em: 2 alunos de Pós-Doutorado, 2 alunos de Doutorado, 4 alunos de Mestrado, 12 alunos de Graduação (Iniciação Científica), além de 2 técnicos especialistas nas áreas de mecânica e tecnologia da informação.

A transferência de conhecimento ocorrerá através da metodologia "learning by doing" (aprender fazendo), envolvendo a execução direta de ensaios experimentais e modelagem numérica. Os alunos de pós-graduação (mestrado e doutorado) terão dedicação integral de 40 horas semanais, atuando nas simulações, acompanhamento de ensaios e tratamento de dados. Os alunos de graduação atuarão em tempo parcial de 20 horas semanais, dando suporte a estas atividades sob supervisão dos pesquisadores. A capacitação técnica inclui o treinamento no novo cluster computacional e na operação da bancada dinamométrica.

O projeto científico visa transformar o desenvolvimento empírico em conhecimento formalizado. A produção acadêmica esperada inclui a elaboração de teses de doutorado e dissertações de mestrado com enfoque na modelagem numérica de motores ferroviários e no estudo experimental das novas rotas de combustíveis (biodiesel, nanocatalisadores e emulsões). Como resultado direto para a comunidade científica, está prevista a publicação de um Relatório Técnico Consolidado contendo metodologia, resultados e análises, bem como a submissão de artigos científicos a revistas indexadas e congressos internacionais sobre combustão e descarbonização. Essa produção visa disseminar os resultados, fortalecer a base tecnológica nacional e garantir que os modelos numéricos desenvolvidos sejam capazes de prever melhorias futuras com confiabilidade.

Projetos acadêmicos e trabalhos de pesquisa

As linhas principais de trabalho gerarão projetos acadêmicos ou trabalhos de pesquisa desenvolvidos por cada membro da equipe. Todos os alunos de Graduação, Pós-Graduação e Pós-Doutorado serão orientados e supervisionados pelos pesquisadores do projeto nos respectivos assuntos envolvidos. Estes Orientadores serão definidos posteriormente, de acordo com as atribuições no projeto. A seguir, são detalhadas as atividades específicas de todos os integrantes.

- **Coordenador do Projeto:** Coordenação geral das atividades no âmbito da UFMG, incluindo a definição da equipe de projeto e a revisão e aprovação de todos os relatórios, garantindo a integração entre os eixos de pesquisa. Como líder técnico, é responsável pela definição das estratégias de controle eletrônico, calibração e ajuste do processo de combustão. Suas atividades englobam a revisão bibliográfica, o planejamento experimental detalhado, a aprovação da adequação da infraestrutura física e a da preparação das bancadas experimentais. Adicionalmente, atuará como especialista na condução dos ensaios práticos, na análise de viabilidade das tecnologias, na interpretação dos resultados e na orientação acadêmica dos discentes acompanhando a elaboração de publicações técnicas e científicas.
- **Coordenador de Logística:** Responsável por assegurar o cumprimento de todas as exigências administrativas da RDT, garantindo o rigor técnico da pesquisa e realizando a coordenação do backoffice. Atuará de forma direta no diligenciamento da adequação civil e mecânica do laboratório, coordenando a montagem e o comissionamento das bancadas experimentais em conjunto com os fornecedores e a equipe técnica.
- **Auxiliar de Pesquisa:** Condução e suporte administrativo do projeto de pesquisa, atuando nas atividades de backoffice. Atuará nos processos de seleção, contratação e organização de reuniões gerais e visitas técnicas. Realizará o monitoramento das compras identificando pendências e o controle rigoroso da documentação para a prestação de contas e composição dos relatórios técnicos. Também prestará suporte documental na aquisição e importação dos equipamentos e no contato com fornecedores para solicitação de suporte técnico quando necessário.
- **Chefe de Operações do Laboratório de Velocimetria:** Será responsável pelas atividades pertinentes ao Laboratório de Velocimetria que fará a caracterização do spray dos injetores. Dessa forma participará da revisão bibliográfica, realizando o planejamento e monitoramento do aprendizado dos bolsistas sob sua supervisão. Também será o responsável pelo projeto da adequação da bancada de velocimetria ao injetor do motor em estudo. Atuará no planejamento experimental detalhado, na coordenação e execução dos ensaios de velocimetria, abrangendo tanto a fase de

baseline quanto a avaliação das novas rotas tecnológicas. Em conjunto com os demais especialistas do projeto, realizará análise de viabilidade técnica das tecnologias estudadas, da validação experimental das rotas otimizadas e da consolidação do relatório técnico final. Como professor especialista, assumirá o papel de orientação de alunos de IC, Mestrando e Doutorando e acompanhará a elaboração de publicações técnicas e científica via revistas e congressos.

- **Chefe de Operações do Laboratório de Ensaio em Motores:** Será responsável pelas atividades pertinentes ao Laboratório de Ensaio em motores que executará os testes em bancada dinamométrica para obtenção de resultados experimentais. Dessa forma participará da revisão bibliográfica, realizando o planejamento e monitoramento do aprendizado dos bolsistas sob sua supervisão. Atuará na elaboração e revisão de material técnico-científico sobre o motor de pesquisa, em colaboração com o corpo técnico. Também será responsável pela montagem do motor na sala de testes e pela adequação das bancadas dinamométricas a pesquisa. Atuará também no planejamento experimental detalhado e na execução dos ensaios de baseline e das rotas tecnológicas, assegurando o rigor metodológico das operações. Por fim, participará do estudo de viabilidade das rotas tecnológicas a partir da análise crítica dos dados experimentais e da elaboração do relatório técnico final do projeto. Como professor especialista, assumirá o papel de orientação de alunos de IC, Mestrando e Doutorando e acompanhará a elaboração de publicações técnicas e científica via revistas e congressos.
- **Chefe de Operações do Laboratório de Combustão:** Será responsável pelas atividades pertinentes ao Laboratório de Combustão que fará a caracterização da cinética química da combustão. Dessa forma participará da revisão bibliográfica, realizando o planejamento e monitoramento do aprendizado dos bolsistas sob sua supervisão. Atuará no desenvolvimento dos modelos de cinética química da combustão com o emprego de redes neurais e contribuirá na análise de viabilidade das rotas tecnológicas, contextualizando o impacto do uso de biodiesel, emulsões e nanocatalisadores segundo sua especialidade. Como professor especialista, assumirá o papel de orientação de alunos de IC, Mestrando e Doutorando e acompanhará a elaboração de publicações técnicas e científica via revistas e congressos.
- **Chefe de Operações do Laboratório de Simulação Numérica:** Será responsável pelas atividades pertinentes ao Laboratório de Simulação Numérica que fará a modelagem computacional e otimização das rotas tecnológicas. Dessa forma participará da revisão bibliográfica, realizando o planejamento e monitoramento do aprendizado dos bolsistas sob sua supervisão. Orienta a estruturação e o setup da infraestrutura digital e do banco de dados. Coordenará o desenvolvimento, a parametrização e a validação dos modelos 1D e 3D frente aos resultados experimentais e participará do estudo de viabilidade técnica das rotas tecnológicas. Como professor especialista, assumirá o papel de orientação de alunos de IC, Mestrando e Doutorando e acompanhará a elaboração de publicações técnicas e científica via revistas e congressos.
- **Técnico em Mecânica:** Presta o suporte técnico-operacional essencial à integridade da infraestrutura física e sucesso na execução dos experimentos. Atua na montagem das bancadas experimentais, com a execução dos projetos de adequação, e na montagem mecânica do motopropulsor com acoplamento ao dinamômetro. Também será responsável pela instrumentação do motor e garantir a segurança operacional durante os ensaios, conduzindo e solicitando as manutenções preventivas/corretivas e

aplicando as rotinas de checklist. Por fim, prestará suporte na elaboração de documentação técnica para o treinamento da equipe na operação do motor e dos planos de manutenção.

- **Técnico em Informática:** Responsável pela adequação da infraestrutura digital e pelo fluxo seguro das informações. Atuará na instalação do *cluster*, dos programas computacionais e no suporte técnico ao longo de todo o projeto. Será responsável por estruturar a arquitetura hierárquica e estabelecer uma base de dados automatizada para a integração fluida entre os dados gerados pelos experimentos e pelos modelos computacionais, garantindo o *backup* e a comunicação de alto volume de arquivos entre as frentes de pesquisa.
- **Doutorando 1:** Atuará como pesquisador na frente experimental, conduzindo os ensaios de baseline e das rotas tecnológicas. Nas etapas iniciais, auxiliará na revisão bibliográfica com ênfase no estado da arte de tecnologias para descarbonização de motores diesel. Ao longo do projeto, é responsável por estruturar o planejamento experimental detalhado junto aos professores especialistas e liderar a execução dos testes. Acompanha e supervisiona as atividades dos alunos de Mestrado e Iniciação Científica, garantindo o rigor metodológico da aquisição de dados e a segurança das operações. Contribui para as análises de viabilidade e elaboração das publicações científicas com a análise dos resultados experimentais. A sua tese será experimental e será definida posteriormente, a partir do andamento do projeto. Este aluno será responsável pela publicação de pelo menos um artigo da parte experimental do projeto em revista ou em congresso.
- **Doutorando 2:** Atuará como pesquisador na frente de simulação numérica, conduzindo o desenvolvimento computacional para extrapolação de resultados e otimização das rotas tecnológicas. Nas etapas iniciais, auxiliará na revisão bibliográfica com ênfase no estado da arte da modelagem termodinâmica e fluidodinâmica (1D e 3D) de motores a diesel. Ao longo do projeto, é responsável por desenvolver, parametrizar e validar os modelos computacionais de acordo com os dados experimentais. Acompanha e supervisiona as atividades dos alunos de Mestrado e Iniciação Científica da equipe de simulação, garantindo o rigor das análises. Contribui para as análises de viabilidade e elaboração das publicações científicas da equipe. A sua tese será em simulação numérica e será definida posteriormente, a partir do andamento do projeto. Este aluno será responsável pela publicação de pelo menos um artigo da parte de simulação do projeto em revista ou em congresso.
- **Pós-Doutorando 1:** Atuará como pesquisador especialista na frente experimental, sendo a referência técnica na execução dos ensaios e na análise termodinâmica dos resultados. Realizará conforme necessário a atualização da revisão bibliográfica. Ao longo da pesquisa, prestará suporte à equipe na interpretação dos dados e discussão dos resultados. Será responsável pela elaboração dos relatórios parciais no período em que fizer parte do projeto e será o responsável pela revisão consolidada do relatório final. Este pesquisador será responsável pela publicação de pelo menos um artigo científico de alto impacto.
- **Pós-Doutorando 2:** Atuará como pesquisador especialista na frente de simulação numérica, sendo a referência técnica na aplicação dos modelos computacionais e otimização das rotas tecnológicas. Realizará conforme necessário a atualização da revisão bibliográfica. Ao longo da pesquisa, prestará suporte à equipe na integração dos resultados experimentais com os parâmetros simulados. Será responsável pela

elaboração dos relatórios parciais no período em que fizer parte do projeto e será o responsável pela revisão consolidada do relatório final. Este pesquisador será responsável pela publicação de pelo menos um artigo científico de alto impacto.

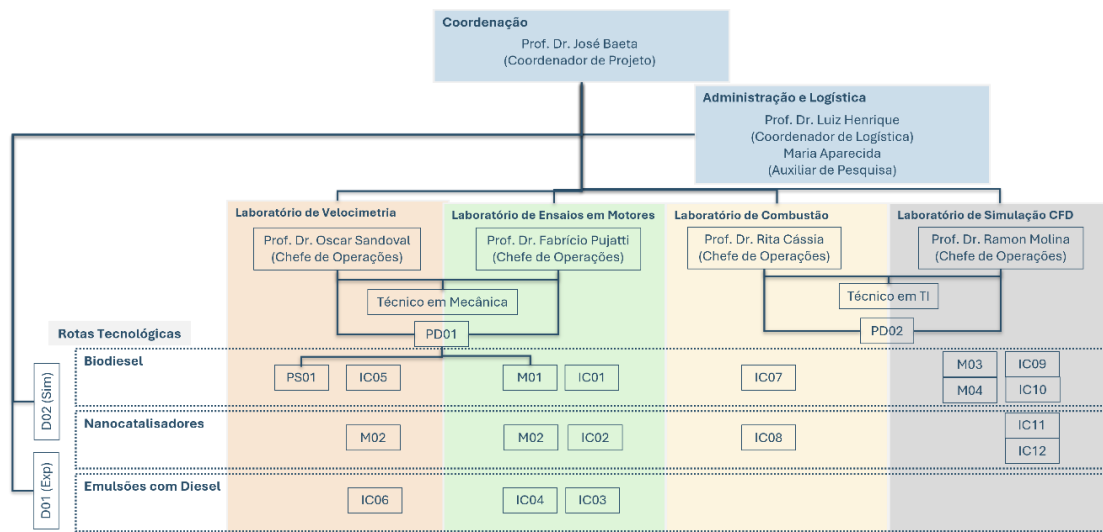
- **Pesquisador 1:** Atuará como especialista em caracterização mecânica e fluidodinâmica de injetores. Nas etapas iniciais, será o responsável pela elaboração do projeto de adequação e adaptação da bancada de velocimetria para receber o injetor do motor em estudo. Conduzirá o comissionamento técnico dessa infraestrutura e a execução dos primeiros ensaios práticos de avaliação da projeção do spray das novas formulações, orientando e acompanhando a equipe de Iniciação Científica nestas atividades para garantir a confiabilidade da bancada.
- **Mestrando 1:** Atuará como pesquisador na frente experimental, conduzindo ensaios dinamométricos com foco na avaliação do biodiesel. Nas etapas iniciais, auxiliará na revisão bibliográfica com enfoque no estudo da utilização de biocombustíveis como forma de descarbonizar a matriz ferroviária. Ao longo do projeto, estudará as condições e proporções das misturas de biodiesel, avaliando os limites operacionais nos testes práticos. Atuará em todas as atividades experimentais de preparação, execução e manutenção da sala de provas, acompanhando os alunos de Iniciação Científica em sua frente. Contribui para as análises de viabilidade e elaboração das publicações científicas. A sua dissertação será experimental e será definida posteriormente, a partir do andamento do projeto. Este aluno será responsável por uma publicação científica em congresso ou revista.
- **Mestrando 2:** Atuará como pesquisador na frente experimental, com foco no uso de nanocatalisadores. Nas etapas iniciais, auxiliará na revisão bibliográfica voltada para a utilização de nanocatalisadores como aditivos de combustível em motores diesel. Ao longo do projeto, estudará as proporções e avaliará os limites de uso das nanopartículas nos testes em bancada. Atuará nas atividades experimentais de preparação, execução e manutenção do laboratório, acompanhando os alunos de Iniciação Científica na velocimetria e dinamometria. Contribuirá para as análises de viabilidade e elaboração das publicações científicas. A sua dissertação será experimental e será definida posteriormente, a partir do andamento do projeto. Este aluno será responsável por uma publicação científica em congresso ou revista.
- **Mestrando 3:** Atuará como pesquisador na frente de simulação numérica, com foco no desenvolvimento de modelos termodinâmicos unidimensionais (1D). Nas etapas iniciais, auxiliará na revisão bibliográfica com enfoque na simulação computacional de motores a diesel. Acompanhará os alunos de Iniciação Científica alocados em sua frente para estruturar nos programas computacionais os modelos e posteriormente validar utilizando os dados experimentais obtidos no *baseline*. Contribuirá para a documentação dos modelos e elaboração das publicações científicas. A sua dissertação será voltada à simulação numérica e será definida posteriormente, a partir do andamento do projeto. Este aluno será responsável por uma publicação científica em congresso ou revista.
- **Mestrando 4:** Atuará como pesquisador na frente de simulação numérica, com foco no desenvolvimento de modelos fluidodinâmicos tridimensionais (3D). Conforme necessário realizará uma atualização da revisão bibliográfica. Acompanhará os alunos de Iniciação Científica alocados em sua frente para validar a geração de malhas e estruturar nos programas computacionais os modelos que serão posteriormente validados utilizando os resultados do *baseline*. Contribuirá para a documentação dos modelos e elaboração das publicações científicas. A sua dissertação será voltada à

simulação numérica e será definida posteriormente, a partir do andamento do projeto. Este aluno será responsável por uma publicação científica em congresso ou revista.

- **Iniciação Científica 1 a 4 (IC1, IC2, IC3 e IC4):** Atuam nas frentes operacionais dos ensaios em bancada dinamométrica com operação supervisionada dos equipamentos e tratamento primário dos dados de combustão. Nas etapas iniciais do projeto auxiliarão na revisão bibliográfica junto aos professores especialistas. Como parte da equipe experimental realizarão os checklists operacionais e registrarão as atividades em relatórios simplificados de ensaios. Serão responsáveis pela coleta, identificação e envio das amostras de fluidos (combustível e óleo) para análises externas. Junto ao restante da equipe auxiliarão no monitoramento dos equipamentos e na manutenção preventiva e corretiva.
- **Iniciação Científica 5 e 6 (IC5 e IC6):** Atuarão principalmente no Laboratório de Velocimetria para caracterização do spray dos injetores. Nas etapas iniciais do projeto auxiliarão na revisão bibliográfica junto aos professores especialistas. Atuarão na adequação da bancada de velocimetria para, em seguida, executarem os ensaios de caracterização. Durante as baterias de ensaios dinamométricos, prestam suporte transversal nas atividades de preparação e condicionamento do motor e acompanham a execução dos experimentos podendo operar os equipamentos sob supervisão.
- **Iniciação Científica 7 e 8 (IC7 e IC8):** Atuarão principalmente no Laboratório de Combustão nas frentes de desenvolvimento dos modelos de cinética química. Nas etapas iniciais do projeto auxiliarão na revisão bibliográfica junto aos professores especialistas. Ao longo da execução do projeto, serão responsáveis pelo tratamento primário e processamento dos dados gerados nos ensaios experimentais para integração nas redes neurais. Dessa forma, utilizarão a base de dados estruturada para executar o treinamento das redes neurais junto ao Chefe de Operações.
- **Iniciação Científica 9 a 12 (IC9, IC10, IC11 e IC12):** Atuam principalmente no Laboratório de Simulação Numérica prestando suporte direto à elaboração dos modelos computacionais unidimensionais (1D) e tridimensionais (3D). Nas etapas iniciais do projeto auxiliarão na revisão bibliográfica junto aos professores especialistas. Como parte da equipe de simulação, atuarão na construção de geometrias virtuais, geração de malhas e inserção de parâmetros de contorno nos softwares específicos. Junto aos pesquisadores de pós-graduação, contribuirão de forma contínua com o tratamento de dados estatísticos para a validação iterativa dos modelos frente aos resultados experimentais.

A Figura 1 representa organograma funcional do projeto adequado a estrutura hierárquica do laboratório conciliando com uma gestão horizontal da pesquisa. Esta estratégia visa o intercâmbio de conhecimento para pleno desenvolvimento acadêmico de todos os integrantes. Cabe destacar que, apesar das atuações dedicadas a tecnologias distintas, a equipe é essencialmente interdisciplinar e operará de forma colaborativa, fornecendo suporte técnico conjunto em todas as etapas.

Figura 1 - Estrutura Hierárquica e Organograma Funcional



3.2 Etapas

O projeto será desenvolvido em etapas complementares e interdependentes subdivididas em atividades.

A seguir, detalha-se a proposta de cada etapa, seus métodos, atividades, produtos esperados e o envolvimento de terceiros.

Etapla 1: Início do Projeto

Período previsto: Mês 1 ao 12

Descrição: Esta etapa está voltada ao alinhamento estratégico, administrativo e acadêmico da pesquisa. Ocorre a estruturação do quadro de pesquisadores, a consolidação do plano de aprendizado dos bolsistas conforme suas formações e o aprofundamento do estado da arte tecnológico para embasar os testes práticos.

Resultados Esperados:

- Equipe de pesquisa formalmente constituída;
- Ata de Reunião de Kick-off;
- Plano de Aprendizado dos bolsistas;
- Relatório Técnico de Revisão Bibliográfica.

Atividade 1.1 – Definição da equipe de projeto

- **Descrição:** Seleção e contratação de toda a equipe de bolsistas (Iniciação Científica, Mestrado, Doutorado, Pós-Doutorado e Técnicos). Após a consolidação do quadro de pesquisadores, será realizada a reunião oficial de kick-off do projeto. Este marco servirá para o alinhamento inicial do projeto, garantindo que todos os membros compreendam o trabalho que será desenvolvido, as responsabilidades individuais e coletivas, além de promover a integração técnica e interpessoal da equipe.
- **Métodos e técnicas:** Processos seletivo com análise de currículo.

Atividade 1.2 – Revisão bibliográfica

- Descrição: Levantamento de informações para compor o embasamento das frentes técnico-científicas do projeto. O escopo abrange a compreensão da aplicação operacional de motores de grande porte em locomotivas e o estudo das rotas tecnológicas de combustíveis e aditivos propostas. Esta atividade atuará como o gatilho para o desmembramento das prospecções específicas de cada laboratório envolvido.
- Métodos e técnicas: Pesquisa e revisão sistemática da literatura em bases de dados científicas globais, estruturação do repositório documental do projeto e reuniões de alinhamento técnico entre as chefias de operações.

Atividade 1.3 - Estudo da Cinética Química e Mapeamento de Fatores Reacionais

- Descrição: Atividade de cunho analítico, sob liderança do Laboratório de Combustão, destinada ao estudo aplicado das propriedades físico-químicas e dos fatores reacionais das novas formulações de combustíveis. O escopo abrange a investigação aprofundada da cinética química da combustão para misturas multicomponentes, levantando os dados, mecanismos e variáveis termodinâmicas que fornecerão o referencial para a construção dos modelos computacionais e otimização das formulações dos combustíveis.
- Métodos e técnicas: Pesquisa avançada em bases de dados de patentes (INPI, WIPO, Espacenet), revisão sistemática de mecanismos cinéticos na literatura especializada e análise crítica de parâmetros reacionais para combustíveis multicomponentes.

Atividade 1.4 - Estruturação do Referencial de Modelagem e Simulação Numérica

- Descrição: Atividade conduzida pelo Laboratório de Simulação Numérica para estabelecer o embasamento da modelagem termodinâmica do motopropulsor. O escopo compreende a formulação fenomenológica do domínio computacional, incluindo a seleção e a definição das equações governantes, condições de contorno (pressão, temperatura) e estados iniciais. Serão mapeados e parametrizados os submodelos matemáticos exigidos para a operação de motores ferroviários de grande porte com misturas combustíveis complexas, o que inclui: modelos de turbulência, transferência de calor nas fronteiras sólidas, cinética de queima e dinâmica do spray de injeção (modelagem de quebra de gota e evaporação). Esta parametrização constitui a arquitetura teórica que antecede a utilização dos softwares, garantindo a representatividade das simulações nas etapas subsequentes.
- Métodos e técnicas: Revisão de publicações científicas relacionadas a simulação numérica de motores diesel, seleção de algoritmos numéricos, análise de equações de estado e avaliação técnica de softwares de simulação disponíveis para a aplicação ferroviária.

Atividade 1.5 - Estudo do Motopropulsor e Desenvolvimento da Metodologia de Ensaaios

- Descrição: Atividade conduzida pelo Laboratório de Ensaaios em Motores direcionada ao levantamento técnico e operacional de informações sobre o motopropulsor e sobre os protocolos para ensaios dinamométricos. Será realizado um

mapeamento dos subsistemas do motopropulsor (arrefecimento, lubrificação, admissão, exaustão, injeção e controle), visando a compreensão da montagem, do funcionamento e da manutenção. A partir deste estudo, será desenvolvida a metodologia de preparação e execução dos ensaios dinamométricos, as rotinas para o tratamento dos dados e o planejamento de manutenção preventiva dos equipamentos. O objetivo da etapa é estabelecer os parâmetros técnicos necessários para a futura operação segura e reprodutível com as rotas tecnológicas propostas.

- Métodos e técnicas: Análise de documentação técnica do fabricante, mapeamento de normas internacionais de testes para motores de grande porte e formulação de algoritmos para o processamento de dados experimentais.

Atividade 1.6 - Mapeamento de Técnicas de Instrumentação e Diagnóstico de Injeção

- Descrição: Atividade para elaboração do projeto da bancada de velocimetria e para validação da metodologia de aquisição de dados. O escopo dessa atividade abrange o projeto conceitual, dimensionamento e especificação técnica integral da bancada de velocimetria óptica, dedicada ao acionamento e análise isolada de uma unidade injetora do motopropulsor. Em paralelo, serão realizados o mapeamento e a especificação técnica da instrumentação necessária para a velocimetria e para a sala dinamométrica. Esta etapa estabelece a matriz de rastreabilidade e incerteza de medição, alinhando as variáveis físicas experimentais (geometria do spray, diâmetro de gota e pressões instantâneas) com a confiabilidade exigida para validar as condições de contorno dos modelos virtuais.
- Métodos e técnicas: Projeto mecânico e dimensionamento fluidodinâmico; especificação técnica de sensores; e estatística para cálculo de incertezas.

Atividade 1.7 - Gestão do conhecimento e desenvolvimento dos planos de aprendizado

- Descrição: Com base no referencial teórico e tecnológico levantado nas frentes de estudo, será elaborado um plano de aprendizagem e consolidada uma base de conhecimento técnico compartilhada. O objetivo é assegurar o nivelamento técnico dos pesquisadores bolsistas de acordo com seu nível de formação e sua trilha de atuação no projeto, garantindo a qualificação necessária para a operação de equipamentos e para a condução padronizada dos experimentos. Este repositório atua como ferramenta estratégica de gestão do conhecimento para o projeto, preservando registros que viabilizam a integração ágil e eficaz de novos pesquisadores ao longo do ciclo de vida do projeto.
- Métodos e técnicas: Aplicação de metodologias ativas de ensino, elaboração de documentação interna e estruturação de base de conhecimento.

Etapa 2: Preparação da infraestrutura de pesquisa

Período previsto: Mês 1 ao 23

Descrição: Esta etapa é crítica para viabilizar a execução do projeto. Engloba a adequação da infraestrutura física e digital do CTM-UFMG para desenvolver tecnologias em motores ferroviários.

Resultados Esperados:

- Sala de testes comissionada;
- Motopropulsor instalado com a ECU programável e operacional para os testes;
- Infraestrutura computacional ativa;
- Arquitetura de Banco de Dados para resultados implementada;
- Modelos iniciais de simulação;
- Primeira versão dos procedimentos e checklists para execução dos experimentos.

Atividade 2.1 – Preparação da infraestrutura física

- Descrição: Contratação de empresa especializada no fornecimento de salas de ensaios dinamométricos para motores de grande porte. Dada a alta complexidade desta infraestrutura, a contratada será responsável por todo o planejamento, projeto executivo e execução da obra, o que inclui a subcontratação de uma empreiteira especializada para a preparação do terreno e a construção civil da sala técnica. Concluída a etapa civil, a fornecedora conduzirá a montagem e a instalação de todas as redes mecânicas, elétricas e hidráulicas, bem como a implantação e o comissionamento dos subsistemas operacionais do laboratório. Isso engloba: o dinamômetro; o sistema de controle, automação e aquisição de dados; o sistema de análise de emissões, o sistema de abastecimento e condicionamento de fluidos/combustível; o sistema de arrefecimento e os sistemas de segurança. Os professores especialistas atuarão no diligenciamento, suporte técnico e na fiscalização de todas as etapas, assegurando que a infraestrutura entregue atenda aos requisitos operacionais e metodológicos da pesquisa. Além disso, a equipe do projeto atuará na validação e no comissionamento da sala de ensaio como um todo e de cada um de seus subsistemas. A montagem do motor na base ocorrerá simultaneamente à instalação eletromecânica da sala para otimizar o cronograma.
- Métodos e técnicas: Gerenciamento de projetos e protocolos de diligenciamento de projetos de instalações industriais.
- Atividades de Terceiros: Fornecimento integral (*turnkey*) da sala de provas englobando a elaboração do projeto executivo, construção civil estrutural (via subcontratação) e a instalação eletromecânica completa do dinamômetro e de todos os subsistemas de suporte, medição, automação e segurança.

Atividade 2.2 – Preparação das bancadas experimentais

- Descrição: Nesta atividade será realizada a montagem das bancadas experimentais na configuração necessária para os ensaios. A instalação do motor na bancada dinamométrica requer um planejamento logístico de movimentação de carga pesada para além da instalação mecânica e dos procedimentos de inicialização recomendados pela fabricante. A equipe do projeto também fará a instrumentação do motopropulsor assegurando presença de sensores em todos os pontos de interesse para garantir que todos os parâmetros termodinâmicos necessários sejam monitorados e registrados de forma sincronizada pelo sistema de aquisição. Por fim a montagem experimental dinamométrica contará com a implementação e calibração

inicial de uma ECU programável. Em paralelo, será executado o projeto de adequação da bancada de velocimetria, conforme projeto elaborado nas atividades predecessoras, para viabilizar a montagem e a operação isolada do injetor de combustível do motor em estudo. A atividade finalizará com o comissionamento de toda a infraestrutura experimental. Ao longo desta fase de validação, a equipe elaborará as primeiras versões dos Procedimentos Operacionais Padrão (POPs) e dos *checklists* operacionais e de segurança, fundamentais para garantir a repetibilidade e a execução dos ensaios com metodologia padronizada.

- Métodos e técnicas: Sistemas de aquisição de dados de alta velocidade e alta precisão; calibração e rastreabilidade de sistemas de medição; protocolos de comissionamento de instalações industriais e mapeamento de processos.
- Atividades de Terceiros: Aquisição e importação de itens relacionados a sala de ensaios incluindo hardwares de controle, licenças, sensores e serviços de instalação/integração fornecidos pelos fabricantes e representantes oficiais; instalação e comissionamento dos subsistemas relacionados ao funcionamento da sala de testes; implementação da ECU programável no motopropulsor.

Atividade 2.3 – Preparação da Infraestrutura Digital

- Descrição: Estruturação e montagem do setup computacional, contemplando a instalação do novo cluster, dos softwares de simulação e o treinamento da equipe na utilização das ferramentas. Em paralelo, será desenvolvida e implementada a arquitetura do banco de dados do projeto. Será definida rigorosamente a lógica de armazenamento (nomenclaturas, hierarquia de pastas e parâmetros de indexação) para comportar o alto volume de dados gerados, garantindo confiabilidade no tratamento de informações e agilidade na entrega de resultados entre as equipes de ensaios, de análise de combustão e de simulação numérica ao longo de toda a pesquisa.
- Métodos e técnicas: Gestão da informação e do conhecimento estruturado, arquitetura de banco de dados e TI, parametrização de rede de alta capacidade e ativação de licenças de softwares de simulação.

Atividade 2.4 – Preparação do modelo de simulação inicial e coleta de dados

- Descrição: Construção da malha geométrica e termodinâmica do motor no ambiente virtual. A preparação deste modelo inicial demanda uma atuação conjunta e sincronizada entre as frentes de modelagem 1D e 3D. Esse rigor garante que os modelos virtuais formem uma base sólida, madura e confiável para suportar as etapas subsequentes de extrapolação dos resultados.
- Métodos e técnicas: Modelagem computacional fluidodinâmica (CFD 3D), modelagem de sistemas térmicos (1D) e engenharia reversa de componentes.

Etapa 3: Caracterização do baseline

Período previsto: Mês 22 ao Mês 32

Descrição: Nesta etapa serão obtidos os resultados de referência do funcionamento do motor para comparação com as rotas tecnológicas. Os testes serão realizados

exclusivamente com o diesel comercial (B15) para obter dados de desempenho e de emissões em condições convencionais. Os resultados também serão utilizados para a validação dos modelos de simulação e estudo da cinética química da combustão.

Resultados Esperados:

- Guia de provas;
- Relatório Técnico do Baseline;
- Laudos de Análises de Óleo e Combustível;
- Modelo Computacional validado experimentalmente;
- Análise da Cinética Química da Combustão.

Atividade 3.1 – Planejamento experimental detalhado

- Descrição: Definição do guia de provas do projeto para testes no dinamômetro contemplando os pontos de operação (rotação e carga) que reproduzam as condições de operação das locomotivas. O planejamento definirá os protocolos específicos para realização dos ensaios e aquisição de dados além de definir o procedimento para a coleta de amostras de fluidos, garantindo a validade estatística de todo o ensaio.
- Métodos e técnicas: Planejamento de experimentos (DoE).

Atividade 3.2 – Ensaio Baseline

- Descrição: Nesta atividade serão realizados os ensaios nas bancadas experimentais utilizando o combustível padrão (B15) para aquisição de dados operacionais e de desempenho de referência do funcionamento do motopropulsor. Os dados empíricos incluem a curva de pressão no cilindro, o consumo de combustível e a medição contínua das emissões de gases de exaustão (CO, CO₂, NO_x, THC). Na bancada de velocimetria será realizada a caracterização da projeção do *spray* do para fundamentar as atividades de modelagem computacional. As rotinas de ensaio serão executadas em equipe, sob a liderança de um pesquisador da pós-graduação, com o suporte dos alunos de iniciação científica e do corpo técnico do laboratório. Durante toda a atividade, será mantido um controle de qualidade dos insumos, lubrificante e combustível, e a calibração periódica dos instrumentos de medição para assegurar a confiabilidade dos resultados obtidos. A equipe seguirá o cronograma de manutenção preventiva da sala de testes e implementará a estratégia de manutenção preditiva por meio do monitoramento do óleo lubrificante do motor. O envio regular de amostras de óleo para análises laboratoriais de espectrometria e parâmetros físico-químicos possibilitará a detecção precoce de desgastes internos. Todas as atividades experimentais seguirão os Procedimentos Operacionais Padrão (POPs) estabelecidos nas atividades predecessoras e serão documentados em relatórios simplificados de ensaio. A integridade de toda a operação será resguardada pela definição e aplicação de protocolos de Segurança, Meio Ambiente e Saúde (SMS), o que abrange treinamentos constantes e a realização de simulações de cenários de emergência com a equipe do projeto.
- Métodos e técnicas: Ensaios dinamométricos estacionários, caracterização da projeção do *spray* do injetor, análise dos gases de exaustão com sistema de resposta rápida, técnicas de manutenção preventiva e preditiva, controle de qualidade de

insumos, análises físico-químicas de combustível e óleo lubrificante, padronização de processos, gestão da qualidade e melhoria contínua, e processamento de dados experimentais.

- Atividades de terceiros: Análises físico-químicas e de espectrometria de fluidos das amostras de óleo lubrificante e combustível coletadas.

Atividade 3.3 – Validação dos modelos com dados experimentais

- Descrição: Análise comparativa entre os resultados obtidos nos ensaios (curvas de pressão no cilindro, taxa de liberação de calor e emissões) e os resultados gerados pelos modelos iniciais construídos na etapa anterior. A equipe de simulação fará o ajuste fino e a parametrização dos modelos computacionais (1D e 3D) até que atinjam aderência aos dados reais, validando a ferramenta para simular os novos combustíveis com confiabilidade.
- Métodos e técnicas: Simulação numérica iterativa e métodos de minimização de erro estatístico.

Etapa 4: Desenvolvimento das rotas tecnológicas

Período previsto: Mês 27 ao 48

Descrição: Esta etapa consolida a inovação tecnológica do projeto. As rotas tecnológicas com as novas formulações de combustíveis (biocombustíveis, emulsões e nanocatalisadores) serão testadas e otimizadas para potencializar os resultados e, com isso, reduzir o consumo de combustível e as emissões de poluentes na malha ferroviária.

Resultados Esperados:

- Relatório Técnico Final do projeto;
- Laudos de Análises de Óleo e Combustível;
- Mapas de Calibração da ECU otimizados por rota;
- Modelo Computacional validado experimentalmente;
- Análise da Cinética Química da Combustão;
- Análise de Viabilidade Técnica da Transição Energética;
- Publicações Científicas.

Atividade 4.1 – Planejamento experimental detalhado

- Descrição: Descrição do estudo das rotas tecnológicas definindo especificamente todas as formulações de combustíveis que serão testadas, incluindo os diferentes percentuais de água e etanol na emulsão do diesel. Nesta atividade, será determinada a sequência de experimentos e, para cada um deles, o detalhamento de subatividades incluindo, por exemplo, o condicionamento do motor para testes com nanopartículas. Os ensaios seguirão o mesmo guia de provas definido no *baseline* para garantir a comparabilidade dos resultados.
- Métodos e técnicas: Planejamento de experimentos (DoE).

Atividade 4.2 – Execução dos Ensaios Experimentais

- **Descrição:** Nesta atividade, serão realizados os ensaios para a aquisição de dados empíricos que fundamentam a análise das três rotas tecnológicas aplicadas ao motopropulsor, englobando o teste de 3 concentrações de biodiesel, 3 concentrações de água em diesel (emulsão), 3 concentrações de etanol em diesel (emulsão) e a aditivação de pelo menos dois tipos de nanopartículas catalisadoras ao B30. A execução seguirá um ciclo padronizado, que será repetido a cada nova formulação testada. Primeiramente, realiza-se a preparação do *setup*, que inclui a verificação da integridade dos equipamentos, além da purga e ambientação das linhas de abastecimento, certificando a ausência de contaminação cruzada. Com o sistema apto, a equipe prosseguirá para a otimização da calibração do motor, buscando extrair o melhor desempenho com cada combustível. Esta calibração terá maior duração e complexidade na primeira concentração de cada nova rota tecnológica, porém o tempo será otimizado para os teores subsequentes uma vez que a equipe utilizará o mapeamento anterior como referência para a continuidade do trabalho. A dinâmica experimental funcionará em um fluxo contínuo e integrado com as frentes de análise da cinética química (Atividade 4.3) e de otimização das rotas (Atividade 4.4). Assim que os experimentos de uma formulação forem concluídos, tanto no dinamômetro quanto na bancada de velocimetria, os dados serão disponibilizados para as demais equipes, enquanto a equipe experimental avança para o teste do próximo combustível. As rotinas de ensaio serão sempre executadas em equipe, sob a liderança de um pesquisador da pós-graduação, contando com o apoio de alunos de iniciação científica e do corpo técnico do laboratório. Durante a atividade, serão mantidos o controle de qualidade dos insumos e a calibração periódica dos instrumentos de medição, a fim de assegurar a confiabilidade dos resultados obtidos. A equipe experimental também seguirá o cronograma de manutenção preventiva dos equipamentos, executando intervenções corretivas sob demanda. Um pilar estratégico é a implementação da manutenção preditiva baseada no monitoramento do óleo lubrificante do motor. As amostras passarão por análises laboratoriais frequentes de espectrometria e de parâmetros físico-químicos, o que não apenas indica a necessidade de troca do óleo, mas também permite a identificação de anomalias operacionais, como desgastes prematuros de componentes internos, antes que evoluam para uma falha crítica. Todas as atividades experimentais seguirão os Procedimentos Operacionais Padrão (POPs) estabelecidos nas atividades predecessoras, com registro em relatórios simplificados de ensaio. A integridade da operação será resguardada pela definição de protocolos de Segurança, Meio Ambiente e Saúde (SMS), incluindo treinamentos contínuos e simulações de cenários de emergência com toda a equipe.
- **Métodos e técnicas:** Ensaios dinamométricos estacionários, caracterização da projeção do spray do injetor, análise dos gases de exaustão com sistema de resposta rápida, técnicas de manutenção preventiva e preditiva, controle de qualidade de insumos, análises físico-químicas de combustível e óleo lubrificante, padronização de processos, gestão da qualidade e melhoria contínua, e processamento de dados experimentais.
- **Atividades de terceiros:** Análises físico-químicas e de espectrometria de fluidos das amostras de óleo lubrificante e combustível coletadas.

Atividade 4.3 – Desenvolvimento dos modelos de cinética química

- Descrição: Nesta atividade serão empregadas redes neurais para a determinação do triploto cinético. Por meio da discussão dos resultados com a equipe, pretende-se estabelecer correlações entre a utilização de biodiesel, emulsões e nanocatalisadores e os efeitos detectados na combustão.
- Métodos e técnicas: Simulação computacional preditiva com foco em cinética química avançada de combustão.

Atividade 4.4 – Otimização da aplicação das rotas tecnológicas

- Descrição: Esta atividade visa estabelecer as diretrizes sólidas para a otimização das rotas com base nos resultados experimentais e nas simulações. A análise consistirá em identificar e otimizar a formulação química ideal dos combustíveis. O objetivo é mapear as combinações que entregam o menor consumo específico de combustível e a máxima redução de poluentes locais.
- Métodos e técnicas: Simulação numérica unidimensional e tridimensional e otimização de formulações químicas de combustíveis.

Atividade 4.5 – Análise de viabilidade das tecnologias selecionadas

- Descrição: Avaliação técnica de todas as rotas tecnológicas testadas. Os resultados obtidos em bancada serão consolidados e contextualizados com a realidade operacional da concessionária ferroviária para mensurar o impacto da adoção de cada uma das tecnologias em campo. A análise tem como objetivo descrever como se dá o balanço (*trade-off*) entre os ganhos ambientais devido à redução de emissões e os eventuais impactos causados na autonomia das locomotivas e nas rotinas de manutenção da frota.
- Métodos e técnicas: Análise multicritério técnica (*benchmarking*) e avaliação de viabilidade técnica.

Atividade 4.6 – Validação experimental das rotas otimizadas

- Descrição: Execução de uma bateria final de ensaios dinamométricos utilizando a formulação ótima da emulsão determinada pelas simulações e as estratégias de calibração definidas nas atividades anteriores.
- Métodos e técnicas: Ensaios físicos de validação tecnológica em banco de provas dinamométrico.

Atividade 4.7 – Relatório final

- Descrição: Consolidação de todos os dados gerados nas simulações e nos ensaios práticos em um relatório técnico. A análise dos resultados será conduzida por meio de um estudo comparativo do desempenho do motor com as rotas tecnológicas e o baseline, com ênfase primariamente na eficiência de conversão de combustível e nas emissões de poluentes.

- Métodos e técnicas: Metodologia de pesquisa científica e consolidação de Relatório Técnico Final para submissão e aprovação dos entes reguladores (ANTT).

Etapa 5: Congressos & Eventos

Período previsto: 2028 e 2029

Descrição: Esta etapa tem como objetivo promover a divulgação dos resultados do projeto e fomentar a troca de conhecimentos entre pesquisadores, profissionais e instituições do setor. Por meio da participação em eventos científicos e tecnológicos, a equipe poderá discutir avanços recentes e acompanhar tendências relacionadas à descarbonização e inovação ferroviária. Além disso, essa etapa contribui para o fortalecimento de parcerias estratégicas, ampliação das redes de colaboração e inserção do projeto no contexto nacional e internacional de pesquisa e desenvolvimento. Foram previstas participações nos seguintes eventos:

- SAE Brasil: participação de 10 pessoas.
- COBEM: participação de 4 pessoas.
- ENCIT: participação de 4 pessoas.
- THIESEL: participação de 2 pessoas.

Resultados Esperados:

- Produção de artigos técnicos e científicos em periódicos e congressos especializados

4 PREVISÃO DE INÍCIO, TEMPO DE EXECUÇÃO E CUSTO TOTAL

O projeto será desenvolvido em **48 meses** com início previsto para **01/08/2026**.

O custo total deste projeto será de **R\$ 57.978.133,85** (cinquenta e sete milhões, novecentos e setenta e oito mil, cento e trinta e três reais e oitenta e cinco centavos).

- Valor de investimento 2026: R\$ 15.940.584,41, sendo:
 - Ano contratual 6: R\$ 1.349.856,59
 - Ano contratual 3: R\$ 14.590.727,82
- Valor de investimento 2027: R\$ 15.063.379,32, sendo:
 - Ano contratual 7: R\$ 7.686.418,90
 - Ano contratual 3: R\$ 4.147.245,96
 - Ano contratual 4: R\$ 3.229.714,46
- Valor de investimento 2028: R\$ 19.784.786,80, sendo:
 - Ano contratual 8: R\$ 9.766.824,73
 - Ano contratual 4: R\$ 10.017.962,07
- Valor de investimento 2029 (ano contratual 9): R\$ 5.991.875,40
- Valor de investimento 2030 (ano contratual 10): R\$ 1.197.507,92

A tabela abaixo resume a distribuição do orçamento prevista para o projeto.

Ano contratual	Execução prevista (R\$)					Alocação por ano contratual
	2026	2027	2028	2029	2030	
3	14.590.727,82	4.147.245,96				18.737.973,78
4		3.229.714,46	10.017.962,07			13.247.676,53
6	1.349.856,59					1.349.856,59
7		7.686.418,90				7.686.418,90
8			9.766.824,73			9.766.824,73
9				5.991.875,40		5.991.875,40
10					1.197.507,92	1.197.507,92
Total	15.940.584,41	15.063.379,32	19.784.786,80	5.991.875,40	1.197.507,92	57.978.133,85

O valor total inclui as taxas da UFMG – Administração Central (2% sobre o valor total do projeto), Escola de Engenharia (12% sobre o total de bolsas de servidores) e Fundação Christiano Ottoni – FCO (7,5% sobre o valor total do projeto).

O valor também contempla o provisionamento da concessionária para despesas administrativas (2%) e reserva técnica (5%), conforme § 5º do art. 10. da Resolução nº 6.021, de 2023 e § 4º do art. 6 da Portaria nº 17, de 06 de dezembro de 2023 respectivamente. A concessionária fundamenta-se no exercício legítimo da prerrogativa de alocação de recursos à Reserva Técnica, em razão da complexidade e da amplitude do projeto, bem como das incertezas inerentes a fatores externos que podem impactar sua execução. Tal previsão encontra respaldo no § 4º do art. 6º da Portaria nº 17, de 6 de dezembro de 2023, com redação conferida pela Portaria nº 9, de 9 de agosto de 2024, nos seguintes termos: “A concessionária poderá prever um valor de até 5% do projeto para Reserva Técnica, com a finalidade de atender a despesas imprevistas e diretamente relacionadas à execução do projeto.”

Desta forma, o valor total do projeto divide-se em:

- Parcela entidade executora: R\$ 54.185.171,83.
- Provisionamento da concessionária: R\$ 3.792.962,02.

A gestão financeira será realizada conforme as normativas institucionais e em conformidade com as diretrizes de prestação de contas estabelecidas para projetos de pesquisa.

O Cronograma Físico-Financeiro detalhado pode ser consultado no ANEXO II, enquanto o Orçamento Analítico está apresentado no ANEXO VI, seguindo os padrões estabelecidos pela Portaria nº 17 de 2023 da ANTT.

5 LOCAL DE EXECUÇÃO

O projeto será executado nas dependências da Universidade Federal de Minas Gerais, no Centro de Tecnologia da Mobilidade, em Belo Horizonte / MG, incluindo Laboratório de Combustão, Laboratório de Velocimetria, Laboratório de Fluidodinâmica Computacional.

6 ENTIDADE E EQUIPE EXECUTORA

6.1 Identificação da entidade

A entidade executora será a Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG com interveniência da Fundação Christiano Ottoni - FCO.

A metodologia híbrida do projeto (ensaio físico + simulação 1D/3D) e a necessidade de uma frente transversal capaz de transformar grandes volumes de dados em parâmetros de calibração e decisões de engenharia com rastreabilidade e reprodutibilidade reforçam o arranjo institucional. O modelo de execução se apoia em ICTs executoras com papéis complementares: a UFMG/CTM concentra o núcleo científico-experimental e a validação técnico-metodológica.

A Universidade Federal de Minas Gerais se posiciona entre os principais polos nacionais de pesquisa aplicada, inovação tecnológica e transferência de conhecimento, com evidências objetivas no campo da propriedade intelectual. Em 2024, a UFMG figurou entre os maiores depositantes residentes de patentes de invenção no Brasil, com destaque público para 77 pedidos no ano e um acúmulo histórico de aproximadamente 1.500 patentes desde 1992, segundo informações institucionais e rankings oficiais do INPI. Esse desempenho é consistente com seu histórico recente de reconhecimento, como o Prêmio de Inovação Universidades (Clarivate Analytics) pelo maior número de depósitos no INPI no período 2010–2019, reforçando a maturidade da instituição em transformar pesquisa em ativos tecnológicos protegidos e transferíveis.

O know-how institucional em inovação é operacionalizado pela Coordenadoria de Transferência e Inovação Tecnológica (CTIT), núcleo de inovação da UFMG, criada em 1997, responsável por gerir o portfólio de tecnologias, fomentar a cultura de proteção do conhecimento e estruturar a interlocução com parceiros externos para licenciamento e transferência. A trajetória de inovação da Universidade também se reflete em resultados e reconhecimentos associados a tecnologias desenvolvidas em suas unidades acadêmicas, como o desenvolvimento de tecido inteligente de controle térmico, premiado nacionalmente na categoria de patente, e iniciativas tecnológicas vinculadas ao enfrentamento da COVID-19 com pedidos de patentes relacionados a soluções de proteção e monitoramento.

No recorte específico deste projeto, a capacidade executiva da UFMG se materializa por meio do Centro de Tecnologia da Mobilidade (CTM-UFMG), vinculado à Escola de Engenharia/DEMEC, que reúne infraestrutura e experiência em ensaios de motores e veículos, desenvolvimento de combustíveis e análise/modelagem de combustão. O CTM dispõe de um conjunto de laboratórios e competências que suportam diretamente a espinha dorsal metodológica do projeto, incluindo laboratórios dedicados a combustíveis e combustão, ensaios de motores, ensaios de veículos, análise da combustão em motores, além de capacidades associadas à simulação e CFD e à avaliação de componentes como turbocompressores. Na prática, isso o habilita a liderar a execução do núcleo experimental (protocolos, instrumentação, aquisição de dados e campanhas de ensaio) e a condução/validação dos modelos 1D/3D com base em dados reais, assegurando rigor, consistência e defensabilidade técnica dos resultados.

A Fundação Christiano Ottoni (FCO), por sua vez, se insere como fundação de apoio à execução, conferindo suporte administrativo-financeiro e operacional aos instrumentos firmados, nos termos do regime jurídico das fundações de apoio aplicável às IFES e ICTs.

A atuação das fundações de apoio é prevista na Lei nº 8.958/1994, que define sua finalidade de apoiar projetos de ensino, pesquisa, extensão e desenvolvimento institucional, científico e tecnológico, e é operacionalmente disciplinada por normas de credenciamento/atuação conjunta MEC/MCTI, como a Portaria Interministerial nº 191/2012, entre outras disposições correlatas. Nesse contexto, a FCO viabiliza contratações, aquisições, execução orçamentária e rotinas de conformidade e prestação de contas, permitindo que a governança científica permaneça no núcleo técnico (UFMG/CTM), com suporte administrativo-financeiro especializado.

Em síntese, o arranjo institucional se ancora em uma lógica de complementaridade: a UFMG/CTM lidera o núcleo científico-experimental e a validação dos modelos; e a FCO assegura a sustentação administrativo-financeira sob o marco legal da inovação, garantindo fluidez executiva e conformidade.

O projeto não contempla a participação da concessionária como parte executora, restringindo-se à gestão da execução por parte da entidade responsável, em conformidade com as exigências regulatórias e contratuais estabelecidas pelo poder concedente.

6.2 Identificação da equipe executora

Nome	Formação	Função	CPF
José Guilherme Coelho Baeta	Doutor	Coordenador de Projeto	737.019.206-72
Luiz Henrique Machado	Doutor	Coordenador de Logística	013.272.766-82
Oscar Ricardo Sandoval Rodriguez	Doutor	Chefe de Operações (Lab. Velocimetria)	020.948.726-70
Fabício José Pacheco Pujatti	Doutor	Chefe de Operações (Lab. Ensaios em Motores)	036.604.046-40
Ramon Molina Valle	Doutor	Chefe de Operações (Lab. Simulação Numérica)	227.491.876-72
Rita Cássia de Oliveira Sebastião	Doutor	Chefe de Operações (Lab. Combustão)	033.681.376-70
Maria Aparecida Fernandes	Graduada	Auxiliar de Pesquisa	003.078.756-44
Aluno de Mestrado (4)	Graduado	Mestrando	-
Aluno de Graduação (12)	Estudante	Iniciação Científica	-
Aluno de Doutorado (2)	Mestre	Doutorando	-

Nome	Formação	Função	CPF
Pesquisador Junior (1)	Graduado	Pesquisador Júnior	-
Residente de Pós-Doutorado (2)	Doutor	Pesquisador Pós-Doutoral	-
Técnico em Mecânica (1)	Especialista	Técnico	-
Técnico em TI (1)	Especialista	Técnico	-

Os CPFs dos bolsistas serão informados previamente à execução, após conclusão dos processos seletivos.

A experiência de cada pesquisador participante do projeto pode ser analisada através do respectivo currículo no Anexo V deste Plano de Trabalho. Todos os doutores envolvidos cobrem todas as áreas e o conhecimento necessário para o desenvolvimento da pesquisa.

7 PRODUTOS

▪ **Infraestrutura Experimental para pesquisas em motores ferroviários**

Descrição:

Implantação de infraestrutura laboratorial avançada para ensaios em motores ferroviários, incluindo:

- Bancada dinamométrica instrumentada;
- Sistema de análise de combustão;
- Sistema de análise de gases;
- Bancada de velocimetria de spray.

Origem no projeto:

Etapa 2 – Atividades 2.1 e 2.2

Impactos:

- Consolidação de capacidade nacional em pesquisa ferroviária;
- Ativo estratégico de longo prazo (infraestrutura estruturante);
- Plataforma para futuros projetos e inovação contínua para o setor ferroviário.

▪ **Protocolos Experimentais Padronizados e Procedimentos Operacionais**

Descrição:

Conjunto de documentos técnicos contendo:

- Procedimentos padronizados de ensaio em dinamômetro;
- Protocolos de aquisição e tratamento de dados;

- Procedimentos de coleta e análise de amostras (óleo e combustível);
- Rotinas de operação e segurança da bancada.

Origem no projeto:

Etapas 2, 3 e 4

Impactos:

- Maior reprodutibilidade da metodologia;
- Transferência de conhecimento operacional.

▪ **Modelos Computacionais do Motor (1D e 3D)**

Descrição:

Modelos computacionais desenvolvidos e validados para simulação do motor operando com diferentes combustíveis.

Inclui:

- Modelos calibrados com dados experimentais;
- Documentação técnica completa.

Origem no projeto:

Etapas 2, 3 e 4

Impactos:

- Redução de custos experimentais;
- Aceleração do desenvolvimento tecnológico;
- Ferramenta para tomada de decisão e extrapolação de cenários.

▪ **Relatório Técnico de Resultados – Rota 1: Biodiesel**

Descrição:

Relatório técnico com resultado dos experimentos incluindo:

- Avaliação de desempenho do motor comparado ao baseline;
- Determinação do consumo específico;
- Análise das emissões de poluentes.

Origem no projeto:

Etapas 4

Impactos:

- Suporte à tomada de decisão operacional.

▪ **Relatório Técnico de Resultados – Rota 2: Nanocatalisadores**

Descrição:

Relatório técnico com resultado dos experimentos avaliando o impacto da adição de nanocatalisadores nos combustíveis testados incluindo:

- Avaliação de desempenho do motor comparado ao baseline;
- Determinação do consumo específico;
- Análise das emissões de poluentes.

Origem no projeto:

Etapas 4

Impactos:

- Suporte à tomada de decisão operacional.

▪ **Relatório Técnico de Resultados – Rota 3: Emulsões (água/etanol/diesel)**

Descrição:

Relatório técnico com resultado dos experimentos avaliando o desempenho do motor operando com emulsões de diesel incluindo:

- Avaliação de desempenho do motor comparado ao baseline;
- Determinação do consumo específico;
- Análise das emissões de poluentes.

Origem no projeto:

Etapas 4

Impactos:

- Avaliação de rota promissora para descarbonização;
- Redução potencial de NOx e material particulado;
- Aplicabilidade sem modificações estruturais no motor.

▪ **Relatório Técnico Final do Projeto**

Descrição:

Documento consolidado contendo todos os resultados experimentais, computacionais e análises do projeto.

Inclui:

- Estudo de viabilidade técnica para transição energética;
- Análise comparativa de todos os resultados obtidos;
- Estudo do potencial de descarbonização proveniente da adoção das rotas tecnológicas.

Origem no projeto:

Etapas 4

Impactos:

- Suporte a tomada de decisões estratégicas da concessionária;
- Redução de riscos na transição da matriz energética;
- Base para tomada de decisão regulatória e operacional.

▪ **Produção Acadêmica e Publicações Científicas**

Descrição:

Produção acadêmica vinculada às atividades de pesquisa do projeto, incluindo dissertações de mestrado, teses de doutorado e publicação de artigos técnicos e científicos em periódicos e congressos especializados.

Origem no projeto:

Etapas 1 a 5

Impactos:

- Disseminação do conhecimento;
- Fortalecimento da pesquisa nacional;
- Validação científica dos resultados.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS / NORMATIVOS APLICÁVEIS

1. ABU-ZAID, M. Performance of single cylinder direct injection diesel engine using water fuel emulsions. *Energy Conversion and Management*, v. 45, n. 5, p. 697–705, 2004.
2. ALAHMER, A.; YAMIN, J.; SAKHRIEH, A.; HAMDAN, M. A. Engine performance using emulsified diesel fuel. *Energy Conversion and Management*, v. 51, p. 1708–1713, 2010.
3. ARAMAS, O.; BALLESTEROS, R.; MARTOS, F. J.; AGUDELO, J. R. Characterization of light duty diesel engine pollutant emissions using water-emulsified fuel. *Fuel*, v. 84, p. 1011–1018, 2005.
4. ARANG, B.; ESTATE, I. Properties of palm oil-in-water emulsions stabilized by nonionic emulsifiers. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 181, p. 595–604, 1996.
5. ARSLAN, Esenay et al. A study on the effects of nanoparticle addition to a diesel engine operating in dual fuel mode. *Fuel*, v. 326, p. 124847, 2022.
6. ASHOK, M. P. Identification of best additive using the selected ratio of ethanol–diesel-based emulsified fuel. *International Journal of Sustainable Energy*, v. 31, n. 3, p. 203–212, 2012.
7. ASHOK, M. P. Effect of best emulsified fuel: with and without water addition for the reduction of automobile CO and NOx emissions in human life. *International Journal of Sustainable Energy*, v. 31, n. 5, p. 327–335, 2012.
8. ASHOK, M. P.; SARAVANAN, C. G. Combustion characteristics of compression engine driven by emulsified fuel under various fuel injection angles. *ASME Journal of Energy Resources Technology*, v. 129, p. 325–331, 2007.

9. ATTIA, A. M. A.; KULCHITSKIY, A. R. Influence of the structure of water-in-fuel emulsion on diesel engine performance. *Fuel*, v. 116, p. 703–708, 2014.
10. AVINASH KUMAR AGARWAL. Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology, Kanpur, 2006.
11. AVULAPATI, M. M.; GANIPPA, L. C.; XIA, J.; MEGARITIS, A. Puffing and micro-explosion of diesel-biodiesel-ethanol blends. *Fuel*, v. 166, p. 59–66, 2016.
12. BARNAUD, F.; SCHMELZLE, P.; SCHULZ, P. Aquazole: An original emulsified water-diesel fuel for heavy duty applications. SAE Technical Paper 2000-01-1861, p. 95–101, 2000.
13. BASHA, J. S.; ANAND, R. B. An experimental study in a CI engine using nanoadditive blended water–diesel emulsion fuel. *International Journal of Green Energy*, v. 8, p. 332–348, 2011.
14. BERTOLA, A.; LI, R.; BOULOCHOS, K. Influence of water-in-diesel emulsions and EGR on combustion and exhaust emissions of heavy duty DI-diesel engines equipped with common-rail injector system. SAE Technical Paper 2003-01-3146, 2003.
15. BIDITA, B. S.; AIEN, N.; SURAYA, A. R.; SALLEH, M. A.; IDRIS, A. Effect of experimental variables on the combustion characteristics of water-in-diesel emulsion fuels. *Journal of Dispersion Science and Technology*, v. 35, p. 185–192, 2014.
16. ANTT. *Acompanhamento das concessões ferroviárias – Relatório anual*. Brasília: ANTT, 2013b. Disponível em: <http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/4994/Relatorios_Anuais.html>. Acesso em: 14 jul. 2015.
17. CANFIELD, C. A. Effects of diesel-water emulsion combustion on diesel engine NOx emissions. Thesis (M.S.) – State University System of Florida, 1999.
18. CASTELLANELLI, Marcio; SOUZA, Samuel N. M. de; SILVA, Suedêmio L. e KAILER, Euro K. Desempenho de motor ciclo Diesel em bancada dinamométrica utilizando misturas diesel/biodiesel. *Eng. Agríc.* [online]. 2008. Disponível em: . Acesso em: 12/05/2016.
19. CHEN, G.; TAO, D. An experimental study of stability of oil–water emulsion. *Fuel Processing Technology*, v. 86, p. 499–508, 2005.
20. CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT (Brasil). O sistema ferroviário brasileiro: Transporte e economia. Brasília: CNT, 2013b. Disponível em: . Acesso em: 15 jul. 2015.
21. CORRÊA, I. M.; MAZIERO, J. V. G.; ÚNGARO, M. R.; BERNARDI, J. A.; STORINO, M. Desempenho de motor diesel com misturas de biodiesel de óleo de girassol. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 32, n. 3, p. 923-928, 2008.
22. CORTEZ, Luís Augusto Barbosa (Ed.). *Proálcool 40 anos: Universidades e empresas: 40 anos de ciência e tecnologia para o etanol brasileiro*. Editora Blucher, 2018.
23. CROOKES, R. J.; KIANNEJAD, F.; NAZHA, M. A. A. Systematic assessment of combustion characteristics of biofuels and emulsions with water for use as diesel engine fuels. *Energy Conversion and Management*, v. 38, p. 1785–1795, 1997.
24. CROOKES, R. J.; KIANNEJAD, F.; NAZHA, L. Seed-oil biofuel of low cetane number: the effect of water emulsification on diesel-engine operation and emissions. *Journal of the Institute of Energy*, v. 68, p. 142–151, 1995.

25. COSTA, A. O. A inserção do biodiesel na matriz energética nacional: aspectos socioeconômicos, ambientais e institucionais. 2017. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: http://www.ppe.ufrj.br/images/publicações/doutorado/Angela_Oliveira_da_Costa.pdf. Acesso em: 25 fev. 2022.
26. C. Rakopoulos, K. Antonopoulos, D. Rakopoulos, D. Hountalas, E. Giakoumis, Comparative performance and emissions study of a direct injection diesel engine using blends of diesel fuel with vegetable oils or bio-diesels of various origins Progress and recent trends in biodiesel fuels Energy Convers Manage, 50 (1) (2009), pp. 14-34.
27. DALE, J. G. et al. Transformation of Cerium Oxide Nanoparticles from a Diesel Fuel Additive during Combustion in a Diesel Engine. Environmental Science & Technology, v. 51, n. 4, p. 1973–1980, 21 fev. 2017.
28. DINESHA, P.; KUMAR, S.; ROSEN, M. A. Combined effects of water emulsion and diethyl ether additive on combustion performance and emissions of a compression ignition engine using biodiesel blends. Energy, v. 179, p. 928–937, 2019.
29. DRYER, F. L. Water addition to practical combustion systems – concepts and applications. Proceedings of the Symposium (International) on Combustion, v. 16, n. 1, p. 279–295, 1977.
30. DUDA, K. et al. Comparison of performance and emissions of a CRDI Diesel engine fuelled with biodiesel of different origin. Fuel, v.212, p.202-222, 2018.
31. GAD, M. S.; JAYARAJ, S. A comparative study on the effect of nano-additives on the performance and emissions of a diesel engine run on jatropha biodiesel. Fuel, v. 267, 117168, 2020.
32. GHANNAM, M. T.; SELIM, M. Y. E. Stability behavior of water-in-diesel fuel emulsion. Petroleum Science and Technology, v. 27, n. 4, p. 396–411, 2009.
33. HAMID, M. F.; IDROAS, M. Y.; MOHAMED, M.; SA, S.; HENG, T. Y.; MAT, S. C.; MISKAM, M. A. Numerical investigation of the characteristics of the in-cylinder air flow in a compression-ignition engine for the application of emulsified biofuels. Processes, v. 8, 1517, 2020.
34. HAMID, M. F.; MOHAMAD YUSOF, I.; SAIFUL BAHRI, A. J.; SA'AD, S.; ZAINAL, Z. A. Experimental study of the effect of surfactant agent formulation to the spray characteristics of emulsified biofuel. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, v. 11, p. 7451–7456, 2016.
35. HEDGE, R. R. et al. Factors affecting emissions from diesel fuel and water-in-diesel emulsion. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, v. 38, n. 12, p. 1771–1778, 2016.
36. IBP – Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis – “Divisão da demanda de gás na União Europeia”, <https://www.ibp.org.br>, 2022
37. ISIHADA, M.; CHEN, Z. L. An analysis of the added water effect on NO formation in DI diesel engines. SAE Paper 941691, 1994.
38. ISHIDA, M.; UEKI, H.; SAKAUGUO, D. Prediction of NO_x reduction rate due to port water injection in a DI diesel engine. SAE Paper 972961, 1997.

39. JAYAPRABAKAR, J. et al. Synthesis and characterization of calcium oxide nano particles obtained from biowaste and its combustion characteristics in a biodiesel operated compression ignition engine. *Fuel*, v. 350, p. 128839, out. 2023.
40. JHALANI, A.; SHARMA, D.; SONI, S. L.; SHARMA, P. K.; SHARMA, S. A comprehensive review on water-emulsified diesel fuel: chemistry, engine performance and exhaust emissions. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 26, n. 5, p. 4570–4587, 2019. DOI: 10.1007/s11356-018-3958-y.
41. JHALANI, A.; SHARMA, D.; SONI, S. L.; SHARMA, P. K. Effects of process parameters on performance and emissions of a water-emulsified diesel-fueled compression ignition engine. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, p. 1–13, 2019. DOI: 10.1080/15567036.2019.1669739.
42. JIAQIANG, E.; ZHANG, Z.; CHEN, J.; PHAM, M.; ZHAO, X.; PENG, Q.; ZHANG, B.; YIN, Z. Performance and emission evaluation of a marine diesel engine fueled by water biodiesel-diesel emulsion blends with cerium oxide nanoparticle additive. *Energy Conversion and Management*, v. 169, p. 194–205, 2018.
43. JIAQIANG, E. et al. Effect of different technologies on combustion and emissions of the diesel engine fueled with biodiesel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.80, p.620-647, 2017.
44. KADOTA, T.; YAMASAKI, H. Recent advances in the combustion of water fuel emulsion. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 28, n. 5, p. 385–404, 2002.
45. KALLIGEROS, S. et al. An investigation of using biodiesel/marine diesel blends on the performance of a stationary diesel engine. *Biomass and Bioenergy*, v. 24, n. 2, p. 141–149, 2003.
46. KANNAN, D.; PACHAMUTHU, S.; NABI, M. D. N.; HUSTAD, J. E.; LØVÅS, T. Theoretical and experimental investigation of diesel engine performance, combustion and emissions analysis fuelled with blends of ethanol, diesel and jatropha methyl ester. *Energy Conversion and Management*, v. 53, n. 1, p. 322–331, 2012.
47. KANNAN, G. R.; ANAND, R. Experimental investigation on diesel engine with diestrole-water micro-emulsions. *Energy*, v. 36, p. 1680–1687, 2011.
48. KERIHUEL, A.; KUMAR, M. S.; BELLETTRE, J.; TAZEROUT, M. Ethanol animal fat emulsions as a diesel engine fuel – Part 1: formulations and influential parameters. *Fuel*, v. 85, p. 2640–2645, 2006.
49. Küçükosman, R., Akçay, A., Yontar, A. A., Ünlü, C. G., & Ocakoglu, K. (2023). Atomization and combustion behavior of nanofuel droplets containing perovskite-type nanoparticles. *Journal of the Energy Institute*, 111(September).
50. KUMAR, M. S.; BELLETTRE, J.; TAZEROUT, M. The use of biofuel emulsions as fuel for diesel engines: a review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, v. 223, p. 729–742, 2009.
51. KUMAR, N.; RAHEMAN, H.; MACHAVARAM, R. Performance of a diesel engine with water emulsified diesel prepared with optimized process parameters. *International Journal of Green Energy*, v. 16, n. 9, p. 687–701, 2019.
52. LEACH, F. C. P.; DAVY, M.; TERRY, B. Combustion and emissions from cerium oxide nanoparticle dosed diesel fuel in a high speed diesel research engine under low temperature combustion (LTC) conditions. *Fuel*, v. 288, p. 119636, mar. 2021.

53. LEITE, R. C.; CORTEZ, L. A. B. E. O Etanol Combustível no Brasil. In: BRASIL. Ministério das relações exteriores - MRE (Org.). Biocombustíveis no Brasil: realidades e perspectivas. Brasília: Arte Impressora Gráfica LTDA, 2007.p. 60-75.
54. LEUNG, P.; TSOLAKIS, A.; WYSZYNSKI, M. L. Performance, emissions and exhaust-gas reforming of an emulsified fuel: a comparative study with conventional diesel fuel. SAE International, Warrendale, PA, 2009.
55. LIKOS, B.; CALLAHAN, T. J.; MOSES, C. A. Performance and emissions of ethanol and ethanol-diesel blends in direct-injected and pre-chamber diesel engines. SAE Paper 821039, 1982.
56. LIN, C. Y.; LIN, C. M.; CHEN, C. S. Emulsification characteristics of marine fuel oils with water. Journal of Ship Research, v. 39, n. 1, p. 86–94, 1995.
57. LUPION, B. - Aposta da Europa em hidrogênio verde abre janela ao Brasil. <https://www.dw.com/pt-br/aposta-da-europa-emhidrog%C3%AAnio-verde-abre-janela-ao-brasil/a-55214431>, 2020
58. MARCHITTO, L. et al. Optical investigations in a CI engine fueled with water in diesel emulsion produced through microchannels. Experimental Thermal and Fluid Science, v. 95, p. 96–103, 2018.
59. M. Balat, H. Balat. A critical review of bio-diesel as a vehicular fuel. Energy Conversion and Management, 49 (10) (2008), pp. 2727-2741.
60. MENG, K.; FU, W.; LI, F.; LEI, Y.; LIN, Q.; WANG, G. Comparison of ignition, injection and micro-explosion characteristics of RP-3/ethanol and biodiesel/ethanol mixed drops. Journal of Energy Institute, v. 93, p. 152–164, 2020.
61. MOKA, S.; PANDE, M.; RANI, M.; GAKHAR, R.; SHARMA, M.; RANI, J.; BHASKARWAR, A. N. Alternative fuels: an overview of current trends and scope for future. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 32, p. 697–712, 2014.
62. MONDAL, P. K.; MANDAL, B. K. A comprehensive review on the feasibility of using water emulsified diesel as a CI engine fuel. Fuel, v. 237, p. 937–960, 2019.
63. MONTEIRO L. de A.; PIANOVSKI JÚNIOR, G.; VELÁSQUEZ, J. A.; ROCHA, D. S. , BUENO, A. V. Performance Impact of the Application of Castor Oil Biodiesel in Diesel Engines. Engenharia Agrícola., Jaboticabal, v. 33, n. 6, p. 1165-1171, 2013.
64. MUHSIN, A.; NOGE, H.; ABDUL, H. An overview of utilizing water-in-diesel emulsion fuel in diesel engine and its potential research study. Journal of Energy Institute, v. 87, p. 273–288, 2014.
65. MURAYAMA, T.; TSUKAHARA, M.; MORISHIMA, Y.; MIYAMOTO, N. Experimental reduction in NOx, smoke and BSFC in a diesel engine using uniquely produced water (0–80%) to fuel emulsion. SAE Paper 780224, 1978.
66. MUSCULUS, M. P.; DEC, J. E.; TREE, D. R.; RYAN III, T. W.; MATHEAUS, A. C.; DALY, D.; LANGER, D. Effects of water-fuel emulsions on spray and combustion processes in a heavy-duty DI diesel engine. SAE Paper 2002-01-2892, 2002.
67. NADEEM, M.; RANGKUTI, C.; ANUAR, K.; HAQ, M. R. U.; TAN, I. B.; SHAH, S. S. Diesel engine performance and emission evaluation using emulsified fuels stabilized by conventional and gemini surfactants. Fuel, v. 85, p. 2111–2119, 2006.

68. OCHOTERENA, R.; LIF, A.; NYDÉN, M.; ANDERSSON, S.; DENBRATT, I. Optical studies of spray development and combustion of water-in-diesel emulsion and microemulsion fuels. *Fuel*, v. 89, p. 122–132, 2010.
69. Pang, X. Shi, Y. Mu, H. He, S. Shuai, H. Chen, et al. Characteristics of carbonyl compounds emission from a diesel-engine using biodiesel–ethanol–diesel as fuel. *Atmos Environ*, 40 (36) (2006), pp. 7057-7065.
70. Pang, X. Shi, Y. Mu, H. He, S. Shuai, H. Chen, et al. Characteristics of carbonyl compounds emission from a diesel-engine using biodiesel–ethanol–diesel as fuel. *Atmos Environ*, 40 (36) (2006), pp. 7057-7065.
71. PARK, J. W.; HUH, K. Y.; LEE, J. H. Reduction of NO_x, smoke and brake specific fuel consumption with optimal injection timing and emulsion ratio of water-emulsified diesel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, v. 215, n. 1, p. 83–93, 2001.
72. PERIN, G. F. et al. Emissions of agricultural engine using different diesel types and biodiesel concentrations in the fuel mixture. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.50, n.12, p.1168- 1176, 2015.
73. QI, D. H.; CHEN, H.; MATTHEWS, R. D.; BIAN, Y. Z. H. Combustion and emission characteristics of ethanol–biodiesel–water micro-emulsions used in a direct injection compression ignition engine. *Fuel*, v. 89, p. 958–964, 2010.
74. RAO, N. D.; PREMKUMAR, B.; YOHAN, M. Performance and emission characteristics of straight vegetable oil-ethanol emulsion in a compression ignition engine. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, v. 7, p. 447–452, 2012.
75. RAVIKKUMAR, T. S.; BASAR, P. D.; ATTFIELD, M. J. Emulsified diesel – an immediate and effective solution for diesel exhaust emission reduction. *SAE Paper 2001-28-0037*, 2001.
76. REIS, E. F.; CUNHA, J. P. B.; MATEUS, D. L. S.; DEMOND, J. G.; COUTO, R. F. Desempenho e emissões de um motor-gerador ciclo diesel sob diferentes concentrações de biodiesel de soja. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, n. 5, p. 565–571, 2013.
77. REYES, J. S. D. L.; CHARCOSSET, C. Preparation of water-in-oil and ethanol-in-oil emulsions by membrane emulsification. *Fuel*, v. 89, p. 3482–3488, 2010.
78. ROMERO, G. A. Viabilidade técnica e operacional de biodiesel em motores marítimos. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte*, Natal, 2013.
79. SAWA, N.; KAJITANI, S. Physical properties of emulsion fuel (water-oil-type) and its effect on engine performance under transient operation. *International Congress and Exposition, Detroit*, 1992.
80. SAMEC, N.; KEGL, B.; DIBBLE, R. W. Numerical and experimental study of water/oil emulsified fuel combustion in a diesel engine. *Fuel*, v. 81, p. 2035–2044, 2002.
81. SARAVANKUMAR, P. T. et al. Ecological effect of corn oil biofuel with SiO₂ nano-additives. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, v. 41, n. 23, p. 2845–2852, 2 dez. 2019.

82. SERDYUK, V. In search of the fuel of the future: in the near future, usual types of motor fuel will be replaced by water-fuel emulsions. *Oil of Russia*, n. 3, Lukoil, 2008.
83. SELIM, M. Y. E.; GHANNAM, M. T. Combustion study of stabilized water-in-diesel fuel emulsion. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, v. 32, p. 256–274, 2009.
84. SHAHIR, S. A.; MASJUKI, H. H.; KALAM, M. A.; IMRAN, A.; ASHRAFUL, A. M. Performance and emission assessment of diesel–biodiesel–ethanol/bioethanol blend as a fuel in diesel engines: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 48, p. 62–78, 2015.
85. SILVA, F. C.; ARANHA, F. N.; ANGELKORTE, G. B.; GUARDIOLA, J. F. H.; TEIXEIRA, L. P.; CORREIA, R. C. B. Measurement and qualification of exhaust gases in diesel engine operating with biodiesel mixtures. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 23, n. 10, p. 794–799, 2019.
86. SILVA, M. J.; SOUZA, S. N. M.; SOUZA, A. A.; MARTINS, G. I.; SECCO, D. Motor gerador ciclo diesel sob cinco proporções de biodiesel com óleo diesel. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, n. 3, p. 320–326, 2012.
87. SONG, K. H.; LEE, Y. L.; LITZINGER, T. A. Effects of emulsified fuels on soot evolution in an optically-accessible DI diesel engine. *SAE Paper 2000-01-2794*, 2000.
88. SOUZA, L. S. A.; GUARIEIRO, L. L. N.; SANTOS, A. A. B. Avaliação experimental do desempenho de motores do ciclo diesel utilizando misturas biodiesel/diesel marítimo. *Revista Virtual de Química*, v. 8, n. 4, p. 1192–1203, 2016. Disponível em: : <https://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/view/1803>.
89. TAN, D. et al. Utilization of renewable and sustainable diesel/methanol/n-butanol (DMB) blends for reducing the engine emissions in a diesel engine with different pre-injection strategies. *Energy*, v. 269, 126785, 2023.
90. TEIXEIRA, C. V. Análise de emissões e desempenho de motores diesel utilizando óleo diesel comercial, biodiesel de palma (B100) e misturas (Bx). 2010. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2010.
91. TSUKAHARA, M.; MURAYAMA, T.; YOSHIMOTO, Y. Influence of fuel properties on the combustion in diesel engine driven by emulsified fuel. *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers*, v. 25, p. 612–619, 1982.
92. TSUKAHARA, M.; YOSHIMOTO, Y. Reduction of NO_x, smoke, BSFC and maximum combustion pressure by low compression ratio in a diesel engine fuelled by emulsion fuel. *SAE Publication*, Detroit, 1992.
93. VELLAIYAN, S. Enhancement in combustion, performance, and emission characteristics of a biodiesel-fueled diesel engine by using water emulsion and nanoadditive. *Renewable Energy*, v. 145, p. 2108–2120, 2020.
94. VELLAIYAN, S.; AMIRTHAGADESWARAN, K. S. The role of water-in-diesel emulsion and its additives on diesel engine performance and emission levels: a retrospective review. *Alexandria Engineering Journal*, v. 55, p. 2463–2472, 2016.
95. Verhelst S., Turner ,WG. J., Sileghem L. and Vancoillie J. - Metanol como combustível para motores de combustão interna. *Progresso na Ciência da Energia e da Combustão*, Volume 70 ,janeiro de 2019, páginas 43-88

96. WEI, Jiangjun et al. The combustion, performance and emissions investigation of a dual-fuel diesel engine using silicon dioxide nanoparticle additives to methanol. *Energy*, v. 230, p. 120734, 2021.
97. WEI, J. et al. The combustion, performance and emissions investigation of a dual-fuel diesel engine using silicon dioxide nanoparticle additives to methanol. *Energy*, v. 230, p. 120734, set. 2021^a.
98. WEI, J. et al. The combustion, performance and emissions investigation of a dual-fuel diesel engine using silicon dioxide nanoparticle additives to methanol. *Energy*, v. 230, p. 120734, set. 2021^b.
99. WILKINSON, J.; HERRERA, S. Biofuels in Brazil: debates and impacts, *The Journal of Peasant Studies*, v. 37, n. 4, p. 749-768, 2010.
100. ZHANG, W.; CHEN, Z.; SHEN, T.; HAN, W.; WANG, J. Effects of ethanol–diesel–water microemulsion on spray and combustion characteristics in a constant volume chamber. *Fuel*, v. 179, p. 247–253, 2016.
101. ZHANG, Y.; HU, E.; HUANG, Z.; HE, J.; ZHENG, J.; ZUO, Y. Effects of water content on combustion and emission characteristics of a diesel engine fueled with water emulsified diesel. *Fuel*, v. 141, p. 70–77, 2015.
102. ZHANG, Z.; JIAQIANG, E.; ZHANG, Y.; PHAM, M.; SHANG, Y.; FANG, Q.; PENG, Q.; YIN, Z.; CHEN, J. Combustion and emission characteristics of diesel engine fueled with water emulsion diesel. *Fuel*, v. 227, p. 394–405, 2018.
103. ZHANG, Zhichao et al. Comparative study of using multi-wall carbon nanotube and two different sizes of cerium oxide nanopowders as fuel additives under various diesel engine conditions. *Fuel*, v. 256, p. 115904, 2019.
104. ZHOU, L.; HU, E.; HUANG, Z.; ZHANG, J.; ZHENG, J.; ZUO, Y. Effects of water content on combustion and emission characteristics of a diesel engine fueled with water emulsified diesel. *Fuel*, v. 141, p. 70–77, 2015.
105. VALE. Decarbonization strategy and management. Rio de Janeiro, 2024. Seção: Our emissions reduction strategy. Disponível em: <https://vale.com/esg/decarbonization-strategy-and-management>. Acesso em: 28 jan 2026.

9 ANEXOS DO PLANO DE TRABALHO

- I - Resumo do Plano de Trabalho;
- II - Cronograma físico-financeiro;
- III - Propostas técnicas e comerciais;
- IV - Cotações comerciais;
- V - Currículo dos coordenadores;
- VI - Orçamento analítico;
- VII - Lista de bens, produtos e estudos com previsão de transferência;
- VIII - Declaração de observância ao disposto na Resolução nº 6.021, de 2023, e na Portaria nº 17, de 2023.