

**ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres**

**RDT - Recurso de Desenvolvimento Tecnológico**

## **PLANO DE TRABALHO**

**TÍTULO DO PROJETO:**

**DINÂMICA LONGITUDINAL DE COMPOSIÇÕES FERROVIÁRIAS LONGAS**

**TEMA PRIORITÁRIO:**

**DESENVOLVIMENTO DE ESTUDOS E TECNOLOGIAS PARA MELHORIA DA  
OPERAÇÃO FERROVIÁRIA**

**CONCESSIONÁRIA:**

**VALE S.A. – ESTRADA DE FERRO VITÓRIA A MINAS**

**14/04/2025**

## SUMÁRIO

1. DESCRIÇÃO DO PROJETO .....	2
1.1 Título do Projeto .....	2
1.1.1 Linha de Inovação e Desenvolvimento .....	2
1.1.2. Temas .....	2
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 Objetivo Geral.....	3
1.2.2 Objetivos Específicos .....	3
2. JUSTIFICATIVA.....	4
3. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO .....	7
3.1 Métodos e técnicas utilizadas .....	7
3.2 Etapas .....	15
4. PREVISÃO DE INÍCIO, TEMPO DE EXECUÇÃO E CUSTO TOTAL .....	22
5. LOCAL DE EXECUÇÃO .....	22
6. ENTIDADE E EQUIPE EXECUTORA.....	23
6.1 Identificação da entidade .....	23
6.2 Identificação da equipe executora .....	24
7. PRODUTOS.....	25
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS / NORMATIVOS APLICÁVEIS.....	26
9. ANEXOS DO PLANO DE TRABALHO .....	27

## **1. DESCRIÇÃO DO PROJETO**

### **1.1. Título do Projeto:**

Dinâmica Longitudinal de Composições Ferroviárias Longas.

#### **1.1.1. Linha de inovação e desenvolvimento**

Em consonância com a Resolução nº 6.021, de 20 de julho de 2023, este projeto se enquadra prioritariamente na diretriz descrita na alínea II do artigo 3º. II – “Melhoria da qualidade dos serviços objeto de concessão ferroviária federal”, uma vez que permitirá o aumento da eficiência no transporte, permitindo o emprego de composições mais longas de forma segura. A partir do conhecimento a ser obtido no desenvolvimento deste projeto, tais composições serão definidas visando também a redução da energia gasta e, conseqüentemente, do combustível e da agressão ambiental decorrente. Além disso, os resultados do projeto terão forte impacto na alínea V do mesmo parágrafo, “melhoria da infraestrutura laboratorial das instituições de ensino técnico e superior, com foco ferroviário”, uma vez que o projeto será desenvolvido no Laboratório Ferroviário da UNICAMP, reconhecido como instituição que desenvolve pesquisas sobre assuntos ligados à operação ferroviária. Sendo assim, os equipamentos e o conhecimento a serem adquiridos serão agregados a um laboratório nacional de excelência em pesquisas sobre o tema e abertos para divulgação e emprego para outras aplicações.

Em conformidade com o artigo 4º. da mesma Resolução, o projeto permitirá a inovação através do desenvolvimento de “Soluções Técnicas para Problemas Específicos” (alínea III). Os resultados do projeto poderão ser empregados para o aumento da eficiência do transporte não só na VALE, mas em qualquer ferrovia brasileira de alta carga (“Heavy Haul”) que tenha em seus planos o aumento da eficiência de suas composições ferroviárias. O estudo da dinâmica longitudinal permitirá avaliar os choques entre os veículos, a interação com a dinâmica transversal dos veículos, a avaliação correta dos esforços nos contatos entre a roda e o trilho, a otimização da forma de condução e da energia consumida no transporte, além de diversos outros fatores ligados à operação e a manutenção dos sistemas ferroviários. Com o conhecimento obtido, será possível avaliar dilemas específicos das ferrovias brasileiras, tomando como exemplo e caso de estudo duas ferrovias brasileiras: Estrada de Ferro Carajás - EFC, quanto ao aumento do tamanho da composição, e a Estrada de Ferro Vitória-Minas – EFVM, quanto aumento da eficiência do transporte, verificando a possibilidade de aumento da carga, velocidade em trechos específicos, e outros. Todos os resultados obtidos poderão ser empregados para as demais ferrovias nacionais, permitindo que o conhecimento e o produto gerado com este projeto contribuam para a sociedade como um todo, não apenas para os parceiros que desenvolverão o projeto.

O fato de que o trabalho de pesquisa será apoiado pela VALE S.A. e realizado na UNICAMP, permitirá que os profissionais da empresa e eventualmente de outras operadoras se juntem ao esforço de desenvolvimento, o que levará ao seu aperfeiçoamento profissional e reforçará sua competência técnica. Alguns Engenheiros das Ferrovias, inclusive, em função de sua participação no apoio aos projetos, poderão desenvolver projetos de mestrado ou doutorado se beneficiando do conhecimento e dos resultados deste projeto. Essa possibilidade está em consonância com o item VIII do Art. 4º. da Resolução nº 6.021.

#### **1.1.2. Temas**

Aumento do número de vagões em composições ferroviárias

Dinâmica longitudinal de composições ferroviárias

Aumento da eficiência no transporte ferroviário

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo Geral:

Desenvolver modelos para a simulação da dinâmica longitudinal de composições ferroviárias de alta carga (*heavy haul*), visando prover embasamento técnico e científico para a Engenharia Ferroviária brasileira para estudos sobre aumento de produtividade, através de aumento de tamanho da composição, velocidades, adequação da carga e outros.

A pesquisa terá como estudo de caso de aplicação as ferrovias da VALE S.A., permitindo que esta e as demais ferrovias nacionais tenham embasamento científico e técnico para a tomada de decisões sobre o aumento do número de vagões, alterações na velocidade de operação de suas composições e outras decisões operacionais. Serão estudados, em especial, os esforços nos conjuntos de choque e tração em condições operacionais em vagões GDU, GDT e GDE, levando em consideração as taxas de frenagem específicas de cada veículo. Além disso, os modelos serão utilizados para avaliar os tipos de ACT e folgas, além da interação com a dinâmica do veículo para a avaliação da segurança da operação. Por fim, a avaliação da segurança quando do aumento da velocidade da composição também fará parte deste estudo.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Desenvolver modelos de simulação para a dinâmica longitudinal de composições de carga para vagões GDU e GDT, da EFC, e GDE, da EFVM;
- Avaliar o efeito das diversas configurações de lotes de vagões sobre os esforços de choque e tração levando em conta suas respectivas taxas de frenagem, incluindo lotes mistos;
- Propor estratégias para minimizar os esforços nos conjuntos de choque e tração (CCT), avaliando os tipos de ACTs, os sistemas de freio e as configurações, bem como as velocidades atuais de operação e as que poderiam ser utilizadas;
- Verificar os efeitos do aumento do tamanho da composição sobre os esforços nos CCTs em ferrovias nacionais, empregando a EFC, como estudo de aplicação.
- Verificar os efeitos do aumento e adequação da carga e outras características da operação em ferrovias nacionais, empregando a EFVM, como estudo de aplicação.
- Especificar tecnicamente as variáveis e medições necessárias para a validação dos modelos para dinâmica longitudinal, incluindo a medição de esforços nos CCTs, sistemas de freios, e outras;
- Avaliar o efeito das folgas longitudinais nas conexões dos vagões sobre os choques ao longo da composição e propor alternativas para sua minimização;
- Estudar o problema da subida das caixas dos vagões próximos às locomotivas sobre os pratos-pião dos truques em frenagens intensas ou penalizações, visando a minimização do problema.
- Desenvolver uma interface capaz de ler o arquivo de registro da locomotiva (LOG), se liberado, e as informações sobre sua construção estiverem disponíveis, e utilizá-la como entrada no cálculo dos esforços nos CCTs de cada vagão;
- Gerar conhecimento para ser compartilhado entre a academia e as empresas ferroviárias brasileiras através da formação pós-graduandos e pessoal técnico ferroviário nos assuntos tratados no projeto, reforçando a qualidade das pesquisas ferroviárias no Brasil.
- Submeter e publicar os resultados dos trabalhos de pesquisa em congressos da área e em revistas de divulgação, na forma de artigos científicos e tecnológicos.

## 2. JUSTIFICATIVA

As ferrovias brasileiras de carga são caracterizadas por operarem veículos ferroviários de alta capacidade (“Heavy Haul”), desenvolvidos para o transporte a médias e longas distâncias, que trabalham em condições ambientais severas na maior parte das aplicações. Suas composições podem conter desde algumas dezenas de vagões a até centenas, trafegando a até 90 km/h. Em aplicações como estas, que envolvem ainda grandes frotas e tráfego intenso, a segurança e a eficiência são prioridades. Um acidente com composições assim poderia causar perdas de vidas, grande custo em termos de equipamentos e a obstrução da via, o que causa prejuízos econômicos significativos, interrompendo o transporte. Um transporte ineficiente poderia causar grandes custos econômicos e ambientais, que poderiam ser evitados com o conhecimento científico e técnico adequado e sua aplicação à otimização energética do transporte.

A dinâmica longitudinal das composições ferroviárias trata das forças transmitidas entre os veículos ao longo do tempo de tráfego na via, nas diversas operações envolvidas. Seu estudo é de fundamental importância, já que envolve forças de elevada magnitude, que podem agir para desestabilizar os veículos e aumentar sua propensão ao descarrilamento, e também levar às falhas dos componentes de ligação entre os veículos. Como exemplo, a EFC hoje trafega com composições de 330 vagões (carregados) e pretende aumentar significativamente o tamanho de suas composições o que, consequentemente, ampliará a disponibilidade de transporte de minério e a eficiência global do sistema. Sob uma ótica diferente, ferrovias como a EFVM também têm composições longas e eventuais aumentos de carga ou velocidade podem impactar decisivamente nos choques transmitidos entre os vagões e na segurança da operação. Sabe-se que composições longas têm distribuições não uniformes dos esforços nos conjuntos de choque e tração e hastes, uma vez que partes do trem podem estar em situações de via completamente diferentes (curvas, rampas, ...). Já que a conexão entre todos os vagões implica necessariamente em que a condução seja única (pela locomotiva ou locomotivas) e que a redução global da velocidade não é desejável, é essencial avaliar os esforços transmitidos antes de tomar qualquer decisão que envolva maior número de vagões ou alterações na velocidade de tráfego. Para isso, é fundamental desenvolver estudos que permitam conhecer os efeitos deletérios da decisão, buscando minimizá-los.

O projeto de pesquisa proposto visa gerar conhecimento científico e técnico que possa embasar a Engenharia das operadoras brasileiras na tomada de decisão sobre o aumento do tamanho das suas composições ferroviárias para transporte de cargas, abrindo este conhecimento a todas as demais ferrovias nacionais e à sociedade, para futuras aplicações para seus próprios problemas operacionais. Como tal, significará uma completa revolução na abordagem sobre o tema, dado que não empregará pareceres sobre o assunto desenvolvidos por consultorias técnicas, normalmente do exterior, mas buscará gerar o seu próprio conhecimento sobre um assunto da maior importância para a estratégia de produção e comercialização de seus principais produtos, com benefícios diretos sobre a eficiência do transporte ferroviário em geral. Ao mesmo tempo que aprimora sua Engenharia, as ferrovias brasileiras, no caso a VALE, investirão parte de seus Recursos para Desenvolvimento Tecnológico (RDT) no aprimoramento da competência técnica no país, através de projeto de pesquisa com instituição local, neste caso a Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP.

Diversos programas comerciais já existem para a simulação aproximada da dinâmica longitudinal, dentre os quais, os mais conhecidos são o TDS-5000 ou 6000 da NYAB, o TOS - *Train Operation Simulator*, o TOES - *Train Operations and Energy Simulator*, o SimRail e o STARCO - *Simulation of Train Action to Reduce Cost of Operations*. Cada um deles tem características próprias de aplicação e recursos. No Brasil, o TDS é o mais utilizado em ferrovias de alta carga, sendo que a VALE possui dois deles em cada uma de suas ferrovias, com profissionais treinados para operá-los. Outras ferrovias possuem também versões desses programas. A grande dificuldade com

qualquer um desses sistemas é que o conhecimento do que fazem é proprietário e a aplicação deles para a avaliação das condições de cada ferrovia depende de índices e fatores de correção que não são explicados, sendo apenas ajustados para descrever o melhor possível as características de cada trecho que está sendo analisado.

A UNICAMP desenvolveu uma versão inicial limitada de seu simulador de dinâmica longitudinal para composições ferroviárias em projetos anteriores e deve agora refazê-lo, aprimorá-lo e validá-lo neste projeto, visando torná-lo uma das referências sobre o assunto no país e uma das soluções empregadas no mundo. Para isso, desenvolverá a versão para a análise das operações das ferrovias brasileiras e o validará com base nos programas comerciais reconhecidos, em especial o TDS, e com resultados de medição nas ferrovias nas próprias composições da EFC e da EFVM, em vagões de minério. Com o programa validado, desenvolverá diversos estudos que podem colaborar para a solução de problemas atuais e servirá de base para os estudos visando o aumento do tamanho da composição e velocidade, central para a estratégia de aumento de produtividade das empresas.

Será, sem dúvida, um dos mais importantes desafios já enfrentados pelos projetos de pesquisa ferroviária da empresa, pois envolverá estudo, modelagem, simulação, validação e geração de conhecimento técnico, ao mesmo tempo que aborda problemas práticos da operação das ferrovias nacionais e, como estudo de caso, das ferrovias da VALE. Partirá de uma base já desenvolvida em projetos anteriores, como dito, mas envolve conhecimentos fundamentalmente novos, aplicados a ferrovias específicas. Envolverá quatro pesquisadores na UNICAMP (Campinas), com quatro pós-doutorandos e seis mestrandos, com total de 14 membros. Além disso, será instalada uma estrutura computacional de capacidade de processamento adequada e alterações da estrutura física do Laboratório onde serão realizados os estudos, para comportar o projeto. Esses recursos serão empregados em um trabalho com apoio eventual da Engenharia da VALE, sem a qual não será possível o desenvolvimento de um projeto dessa importância.

Os resultados esperados e os ganhos econômicos a serem obtidos justificam suficientemente o desenvolvimento do projeto. Soma-se a esses o fato de que a modelagem dos esforços e a geração de um programa flexível, capaz de permitir à Engenharia das ferrovias avaliar os problemas cotidianos associados à transmissão dos esforços na composição, já justificariam tal desenvolvimento. Espera-se que, além dos objetivos listados, outros possíveis benefícios sejam ainda avaliados ao longo do desenvolvimento do projeto, tais como a possibilidade de redução de ruído em áreas urbanas e menor esforço sobre a via.

Para o setor ferroviário nacional, ter uma instituição de pesquisa que domine o conhecimento para o estudo de eficiência e segurança em sistemas de transporte de alta carga é de fundamental importância, uma vez que permite a avaliação de (a) novos projetos de veículos; (b) novos componentes dos vagões e locomotivas, como aparelhos de choque e tração e outros; (c) novas formas de operação, com maiores composições e maiores velocidades; (d) novas especificações técnicas para aquisição de componentes, dentre outros tipos de benefícios gerais do projeto; (e) novos projetos de ferrovias.

Para a União, ferrovias mais produtivas (eficientes) representam mais comércio interno e externo de produtos, que podem ir muito além dos produtos agora transportados. Além disso, ferrovias mais seguras e cuja operações sejam tecnicamente embasadas podem permitir uma regulação mais adequada e um acompanhamento das concessões mais baseado em critérios objetivos.

Por fim, a sociedade como um todo se beneficiará da geração do conhecimento, da formação de pesquisadores e profissionais técnicos das empresas, do aumento dos recursos financeiros gerados pelas operadoras, refletido em mais empregos e renda, além da maior arrecadação de impostos que podem ser investidos nos programas sociais pertinentes. Também se beneficiará em ser uma referência internacional para o estudo desse tipo de problema, podendo colaborar com países com características de transporte semelhantes.

## 2.1. Adequação ao RDT e Integração

A justificativa apresentada indica a forte relação desta proposta com as diretrizes e objetivos expressos na Resolução nº 6.021, de 2023. O projeto busca aprimorar a qualidade dos serviços prestados pelas concessionárias, através do aumento da segurança e da eficiência, uma vez que busca aumentar a número de vagões por composição e também a velocidade dessas composições, buscando a redução da propensão a acidentes, mesmo nas condições de operação atuais (Diretriz II, art. 3º). O projeto desenvolve soluções técnicas para um problema específico das ferrovias (Objetivo II, Art 4º), que é a constante necessidade do aumento da produtividade, que resulta no aumento da eficiência global do sistema.

O que será desenvolvido neste projeto é um amplo estudo sobre dinâmica longitudinal de composições ferroviárias, que passa pela avaliação dos esforços nas conexões entre os vagões e nos projetos dessas conexões, bem como nos efeitos que o aumento do tamanho das composições e das velocidades dessas tem sobre a segurança e eficiência do transporte. Um dos resultados previstos desse estudo é a geração de informação técnica para as operadoras, para que essas possam tomar decisões sobre a viabilidade de aplicar as mudanças tecnicamente possíveis em suas operações. Além disso, será desenvolvido um programa computacional específico para as avaliações deste projeto, que poderá ser empregado pela empresa e desenvolvido para outras aplicações futuras, podendo ser registrado como software.

A proposta em questão não está inserida dentro das obrigações contratuais da VALE para a sua concessão, uma vez que trata do desenvolvimento de modelos e estudos para o aumento da eficiência e segurança do transporte de aplicação geral. É notório que toda a atividade que implique em segurança e eficiência, ainda que não diretamente inserida dentre as obrigações, tem efeito sobre a qualidade da operação. Entretanto, por ser tratar de um projeto de pesquisa, não faz parte do que é requisito da concessão. Além do que, como em qualquer projeto de inovação, há riscos associados ao seu desenvolvimento, que não estão contidos nas obrigações contratuais.

Este projeto se integra a outras iniciativas atualmente em desenvolvimento com o apoio das ferrovias na própria UNICAMP e em outras instituições, para o desenvolvimento de dinâmica de veículos ferroviários, que tratam apenas do veículo e não da composição, ferrovias inteligentes, manutenção baseada na condição, gêmeos digitais, e outros.

## 2.2. Participação em Congressos e outros eventos

Por se tratar de um projeto inovador, conhecer o estado da arte associado ao desenvolvimento de modelos para a dinâmica longitudinal é fundamental. Assim, é extremamente importante que os membros da equipe possam participar de eventos especializados na área, como congresso, simpósios, feiras e outros. Tal participação pode ser para a divulgação do trabalho realizado no projeto, com a proposição de artigos científicos e tecnológicos. Como as chamadas para os eventos são feitas entre seis meses e um ano antes da sua realização, ainda não é possível definir com absoluta certeza em quais eventos a equipe participará, uma vez que serão os congressos para os quais os trabalhos científicos forem aceitos. Entretanto, desde já, foram selecionados os seguintes eventos:

- Railways 2026. Este evento é um dos mais importantes sobre o desenvolvimento de modelos para representação do comportamento de veículos e composições. É realizado na Europa e reúne pesquisadores que trabalham nas empresas que criaram os programas que hoje utilizamos para modelagem multicorpos de veículos (SIMPACK® e VAMPIRE®), bem como pesquisadores de países com forte tradição ferroviária, como a Itália e a Alemanha. Como forma de ressaltar a importância para a nossa pesquisa, no ano de 2024

o grupo do Laboratório Ferroviário apresentou cinco artigos nessa conferência e um dos pesquisadores deste projeto coordenou uma das sessões e dar uma palestra (<https://www.civil-comp.info/2024/rl/>). O primeiro código da UNICAMP para dinâmica de composições foi desenvolvido com a colaboração de pesquisadores que conhecemos nessa conferência, o que gerou ainda um convênio de cooperação e intercâmbio internacional de pesquisadores. É muito relevante poder apresentar os nossos resultados do segundo ano do projeto nessa conferência. Pretendemos apresentar dois artigos, no mínimo

- International Heavy Haul Conference 2027. É a mais importante conferência mundial sobre transporte ferroviário de carga pesada (“Heavy Haul”). Nele são apresentados os principais avanços desenvolvidos pelas ferrovias no mundo. No último evento, aqui no Brasil, foram mais de 1200 participantes, com muitos trabalhos sobre dinâmica de composições, que nos ajudaram a entender o estado da arte sobre o assunto e permitirão que apliquemos esse conhecimento no que vamos desenvolver. A conferência do IHHA é bianual e, em 2027, deverá ser realizada em um local ainda por ser confirmado. Os resultados finais deste projeto deverão ser apresentados nessa conferência, uma vez que os eventuais registros de programas já terão sido feitos. É fundamental estarmos presentes para mostrarmos os avanços que o investimento focado das ferrovias e do governo brasileiro (RDT da ANTT) podem gerar e também para continuarmos adquirindo conhecimentos que permitirão que as ferrovias e a academia nacional estejam atualizadas e mostrem sua capacidade de pesquisa científica e tecnológica.

### 3. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

#### 3.1. Métodos e técnicas utilizadas

Neste projeto serão empregadas simulações computacionais, que poderão ser feitas em programas especialmente desenvolvidos apenas ou em programas que compartilham informações com software comercial. Também serão realizadas medição nos veículos para validação das simulações, mas como parte da atividade regular das ferrovias da VALE, sem orçamento previsto neste projeto.

Para a simulação da dinâmica longitudinal ou dinâmica da composição, usualmente não são consideradas movimentações verticais ou laterais dos veículos. Esse tipo de simplificação é empregado por todos os pacotes comerciais para simulação específica de veículos ferroviários. Entretanto, no projeto atual, essas duas dinâmicas serão acopladas, uma vez que a dinâmica convencional dos veículos já foi modelada em projetos anteriores. A seguir, descreve-se resumidamente a teoria que serve como base para os estudos e que será aprofundada ao longo do desenvolvimento deste projeto.

Na dinâmica longitudinal, as equações de movimento são determinadas considerando-se massas pontuais. Ao realizar o diagrama cinético, observa-se que os veículos podem ser divididos em três grupos: condutor ( $m_l$ ), vagões internos ( $m_i$ ) e cauda ( $m_n$ ), conforme é visto na Figura 1. Todos os vagões são sujeitos a forças resistivas de rolamento, da conexão e da gravidade. Os freios dinâmicos e as forças de tração são adicionados aos veículos motorizados.

Na Equação (1), “ $a$ ” é a aceleração do veículo,  $F_{wc}$  é a função que descreve o comportamento da conexão entre os vagões,  $m$ ,  $v$  e  $x$  são a massa, velocidade e deslocamento do veículo, respectivamente.  $F_g$  é a força nos componentes provocada pela gravidade nos percursos inclinados,  $F_r$  é a soma das forças resistivas,  $F_{t/db}$  são as forças de tração e do freio dinâmico. Como base no exposto, tem-se o modelo representado pelas Equações de (1) à (3), que serão inicialmente utilizadas neste projeto como tentativa inicial para os modelos aprimorados que poderão ser desenvolvidos. As formas de determinação de cada uma das forças expressas nas equações citadas



são mostradas a seguir.

$$m_1 a_1 + f_{wc}(v_1, v_2, x_1, x_2) = F_{t/db1} - F_{r1} - F_{g1} \quad (1)$$

$$m_i a_i + f_{wc}(v_i, v_{i-1}, x_i, x_{i-1}) + f_{wc}(v_i, v_{i+1}, x_i, x_{i+1}) = F_{t/dbi} - F_{ri} - F_{gi} \quad (2)$$

$$m_n a_n + f_{wc}(v_n, v_{n-1}, x_n, x_{n-1}) = F_{t/dbn} - F_{rn} - F_{gn} \quad (3)$$

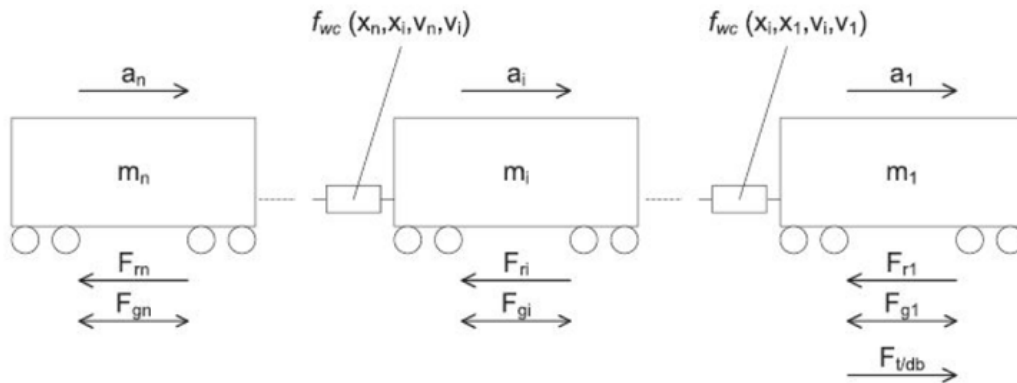


Figura 1. Diagrama cinético da composição ferroviária (COLE et al., 2017).

- **Força de tração e frenagem dinâmica ( $F_{t/db}$ )**

A modelagem das forças de tração é baseada em curvas de performance fornecida pelos fabricantes de locomotivas, como é mostrado na Figura 2. Pontos de aceleração definem o esforço disponível e a adesão define o que é transmitido ao trilho e move a composição.

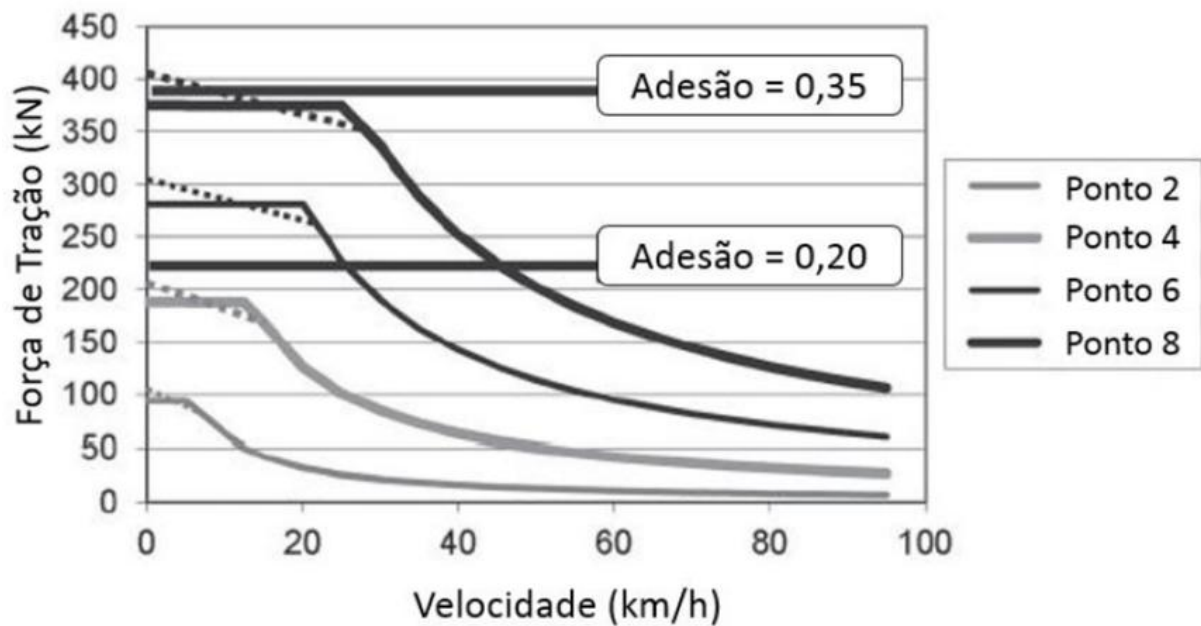


Figura 2. Curva de performance. Adaptado de COLE et al. (2017).

Essas curvas são fáceis de interpolar. Entretanto, pode-se fazer necessário que o modelo seja

modificado para levar em consideração a eficiência do sistema, a aderência, o efeito da temperatura em diferentes velocidades da composição e também algumas características de controle.

É comum que fabricantes de locomotivas divulguem a Força de Tração Máxima e a Força de Tração Máxima Contínua. Esta última representa a força de tração máxima entregue na máxima aceleração após o sistema de tração ter atingido a máxima temperatura nominal de operação. Isso deve ser levado em consideração, pois a resistência dos enrolamentos do motor diminui à medida que a temperatura aumenta. Dessa maneira, a potência máxima entregue pelo motor diminui.

Ao se tratar de forças de tração, também deve ser levada em consideração a adesão entre a roda e o trilho. À medida que os controles de tração foram melhorando, observou-se um aumento dos níveis de adesão, passando de 0,2 para 0,35, sendo que alguns fabricantes dizem ter atingido o valor de 0,52.

Os motores de tração também podem ser utilizados para desacelerar o veículo por meio da frenagem dinâmica. As forças de tração e de frenagem totais são limitadas não só pela adesão entre as rodas e trilho, mas também pela potência e performance dinâmica do sistema de transmissão. Para as simulações prévias feitas ainda antes do início deste projeto, foram interpoladas oito curvas de performance, correspondentes a oito pontos fornecidos pelo fabricante, cujos resultados são apresentados na Figura 3. Outras curvas específicas poderão ser empregadas para as análises deste projeto, a serem fornecidas pelas ferrovias empregadas no estudo de caso, a EFC e EFVM.

#### • Forças gravitacionais

As forças gravitacionais são inseridas no modelo apenas considerando suas componentes longitudinais e normais ao veículo (Figura 3). Essas forças podem tanto ter um efeito de força resistiva como também se somar à influência da força de tração na composição.

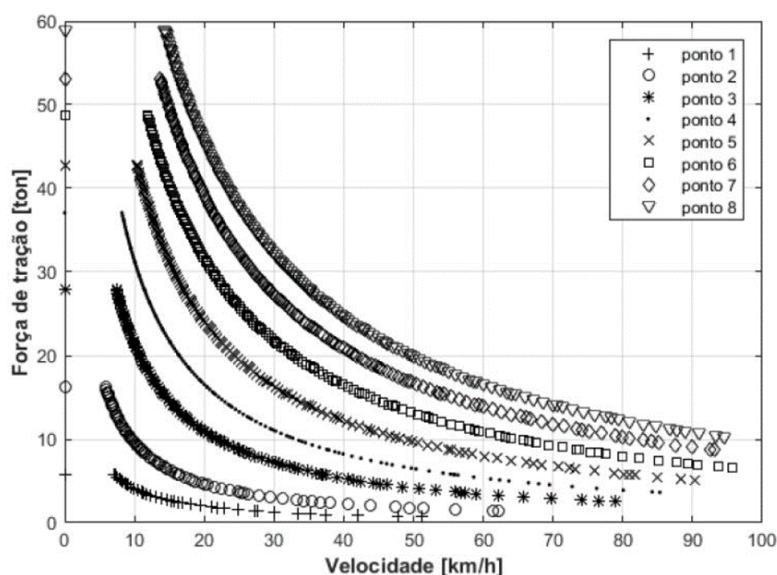


Figura 3. Curvas de aceleração de uma locomotiva GE BB40-9W (Dash 9W) em função da velocidade (Oliveira, 2017).

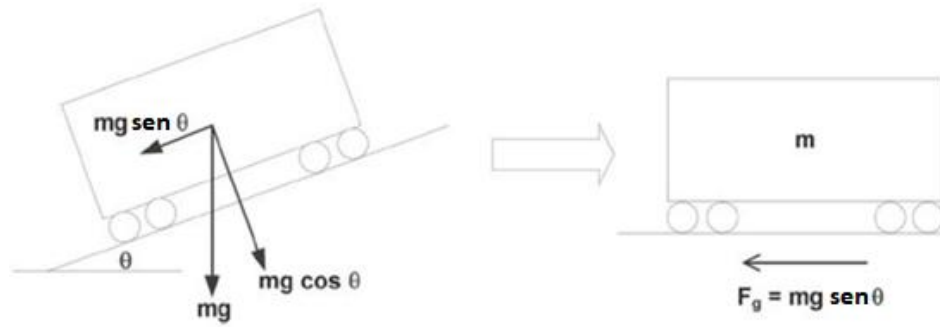


Figura 4. Consideração das forças gravitacionais.

- **Resistência à curvatura**

A resistência à curvatura é influenciada pelo projeto e condição do veículo, superelevação, raio de curva e perfil e lubrificação do trilho. Como todos esses fatores podem variar significativamente, utiliza-se uma expressão empírica em que se relaciona apenas o raio de curva com a força resistiva (Equação 4), na qual  $F_{cr}$  é a força em Newton por massa do veículo em toneladas e  $R$  é o raio de curva em metros. Ao longo do estudo, esse modelo deverá ser aprimorado para levar em conta outras condições, inclusive dados dos veículos, como distâncias entre as rodas ou condições de desgaste destas.

$$F_{cr} = \frac{6116}{R} \quad (4)$$

- **Resistência à propulsão**

A resistência à propulsão é usualmente definida como a soma das resistências de rolagem e do ar. O cálculo dessa resistência ainda é dependente de fórmulas empíricas. Normalmente, a expressão utilizada tem a forma apresentada na Equação (5)

$$R = A + BV + CV^2, \quad (5)$$

na qual, o termo  $A$  representa a resistência ao rolamento dos mancais dos truques. O termo  $B$  representa um arrasto por fricção entre a flange da roda e os trilhos durante a movimentação longitudinal. Em muitos modelos esse termo é desprezado. Finalmente, o termo  $C$  está associado ao arrasto aerodinâmico. Este trabalho partirá do modelo empírico de Davis modificado, Equação (6):

$$R = K_a(2,943 + \frac{89,2}{m_a} + 0,0306V + \frac{1,741K_{ad}V^2}{m_a n}) \quad (1)$$

na qual,  $K_a$  é um fator de ajuste dependente do tipo do truque,  $K_{ad}$  é uma constante dependente do tipo do veículo,  $m_a$  é a massa suportada pelo eixo, em toneladas,  $n$  é o número de eixos, e  $V$  é a velocidade em quilômetros por hora.

### **Aplicação dos métodos e técnicas**

Além dos métodos usuais da dinâmica longitudinal mostrados, serão empregados outros métodos

e conceitos, descritos detalhadamente nas referências citadas. Um deles está relacionado à modelagem do Aparelho de Choque e Tração (ACT), que conecta os veículos em uma composição, que foi desenvolvido em projetos anteriores da UNICAMP com a VALE (Eckert et al, 2021), para um tipo específico de ACT (Mark 50), que é o principal empregado pelas ferrovias de alta carga. Outros modelos de ACT serão desenvolvidos neste projeto, inclusive para novas propostas. O outro método está relacionado ao comportamento do sistema de freios por atrito, desenvolvido na tese de mestrado de Teodoro (2017). Há ainda métodos de lógica *fuzzy* empregados para a otimização da condução de composições ferroviárias longas, como apresentado por Eckert et al. (2024), além de computação paralela (Teodoro et al., 2019).

### **3.1.1. Justificativas e Descrição dos equipamentos, instalações e materiais necessários**

- Computadores (6). Serão necessários 6 computadores de alta capacidade de processamento para as atividades de simulação dos membros da equipe, desde o início do projeto. Isso significa a quantidade adequada de memória RAM, armazenamento e capacidade de processamento paralelo, que pode ser feito em placas de vídeo independentes.

Foi selecionado o Computador Dell XPS 8960, com placa de vídeo RTX 4060 e 64 Gb de memória RAM, além de 2 HD SSD de 1Tb cada e monitor de 32 pol, para processamento gráfico. Esse computador é o mínimo que atende as especificações dos programas para os processamentos que vamos precisar. Cotações no ANEXO IV.

- Periféricos para Upgrade: Como são 14 os membros da equipe, haverá necessidade de revezamento nesses computadores. Para minimizar o problema, outros 6 computadores antigos disponíveis serão atualizados ao longo do projeto, com a inclusão de mais 32 Gb de Memória (já têm 8), Placa de vídeo RTX 4060 (não possuem) e HD de 2Tb SSD (não possuem). Esses conjuntos devem aproximar o desempenho dos computadores novos para que possam ser usados na construção dos modelos. Entretanto, não serão suficientes processar os modelos mais complexos, com composições longas. Cotação no ANEXO IV.
- Programas de modelagem dinâmica transversal. Serão necessárias licenças dos programas SIMPACK<sup>®</sup> utilizado pela UNICAMP e mais flexível, e VAMPIRE<sup>®</sup>, utilizado pela VALE e demais ferrovias Heavy Haul. O VAMPIRE<sup>®</sup> é bastante aplicado à área ferroviária, para as modelagens que serão acopladas à dinâmica longitudinal, embora tenha limitações quanto a possibilidade de desenvolvimento de rotinas e modelos mais complexos.

Os dois programas são necessários, já que a UNICAMP desenvolve tais modelos complexos, mas precisa convertê-los com simplificações em códigos que as ferrovias possam compatibilizar com seu uso atual. Negociações prévias levaram os custos a valores bem reduzidos para universidades. Assim, uma licença anual do SIMPACK<sup>®</sup> (15 acessos simultâneos) custa R\$ 16.980,00. A licença anual do VAMPIRE<sup>®</sup> será adquirida com outros projetos em andamento, não sendo necessária sua inclusão nesta proposta. Cotação no ANEXO IV.

- Para o andamento das pesquisas, serão necessários livros e artigos científicos. A UNICAMP possui ampla biblioteca, mas os livros específicos para pesquisa nem sempre estão disponíveis. Espera-se que, ao menos, dois livros sejam comprados por membro da equipe, para o desenvolvimento do seu trabalho específico. Como não é possível saber quais serão antes do projeto se iniciar, está sendo estimado o valor médio de R\$ 700,00 por livro e estão sendo solicitados 24 livros ao longo de todo o projeto. No “Anexo IV” foram colocados três livros típicos, cujo valor médio é o solicitado. Os livros serão doados a biblioteca da Unicamp ao final do projeto.

Como nem todos os artigos que são necessários para a revisão bibliográfica são gratuitos, a maior parte não é, e nem todos os periódicos são assinados pela UNICAMP ou CAPES, está sendo solicitada a compra de 10 artigos científicos, ao custo de R\$ 400,00 por artigo, que é um número bem reduzido para as possíveis necessidades da equipe, mas que pode ser adequado se apenas os artigos mais importantes forem comprados. O valor de R\$ 400,00 se baseia nos valores atualmente encontrados (de 30 a 70 dólares por artigo). O número de artigos que estão sendo comprados baseia-se no fato de que apenas uma tese de mestrado normalmente contém de 50 a 60 referências bibliográficas, das quais 40 são artigos. Se apenas 2 desses artigos importantes para a pesquisa de cada mestrado forem de periódicos não assinados, o que é bastante provável, o número (12) já ultrapassa o número que está sendo pedido neste projeto.

Por fim, será necessário adquirir normas, manuais e catálogos dos componentes que serão modelados. Boa parte desses é gratuita e disponível, mas como os projetos dos vagões são antigos, é esperado que algumas normas podem ser agora pagas. Há manuais de manutenção e funcionamento que podem ser úteis. Assim, está prevista a compra de até 10 desses documentos e o valor estimado é o mesmo que o de um artigo científico.

- Material para a impressão 3d e de textos. Durante o desenvolvimento do projeto, para a visualização dos conceitos (soluções) que forem criadas, será necessária a construção de protótipos 3D impressos, o que vai requerer insumos. A UNICAMP já possui impressoras para essa finalidade, mas não o material para impressão. Para o projeto, estão sendo pedidos 20 kg de filamentos, que podem ser PLA, ABS ou outro. O valor está sendo estimado em R\$ 200,00/kg, com base no mercado (preço de 94 a 250 reais/kg).

A UNICAMP possui impressoras multifuncionais, mas serão necessários toners e cartuchos de tinta para a impressão dos relatórios e outros eventuais documentos para divulgação. Como os cartuchos são comprados em conjunto, assim como os toners de impressoras, e dependem do tipo de impressora que será utilizado, está sendo estimado o valor de R\$ 200,00 reais por conjunto de cartuchos ou toners e cerca de dois conjuntos por pesquisador (8) nos três anos do projeto, mais quatro conjuntos para os mestrandos, que terão suas dissertações e eventuais trabalhos científicos impressos.

- Para as visitas às ferrovias da VALE (EFC e EFVM), os valores variam significativamente. Está sendo previstos que haverá uma visita semestral de um grupo de 4 pesquisadores do projeto a cada uma das ferrovias. Assim, como são 6 semestres e 2 ferrovias, são 12 missões para apresentação dos resultados e eventuais treinamentos nos modelos desenvolvidos, bem como para o levantamento de informações relevantes para o desenvolvimento do projeto nas oficinas e vias de cada uma das ferrovias. Como 4 pesquisadores vão em cada uma das 12 missões, são necessárias 48 passagens aéreas para as visitas, 24 para cada uma das ferrovias.

O ideal é que todos os pesquisadores pudessem participar dessas visitas, ou seja, todos os 14, uma vez que a discussão na própria ferrovia é fundamental para o desenvolvimento de cada um dos projetos científicos e acadêmicos listados a seguir. Entretanto, os valores seriam significativos e, para minimizá-los, pode ser feito algum tipo de revezamento, em especial entre os pesquisadores e os pós-docs. Como são linhas muito diferentes, baseadas nos trabalhos dos pesquisadores, é essencial que ao menos um membro de cada um dos tópicos principais (Integração; Dinâmica de Veículos; Dinâmica Longitudinal; Esforços nos componentes de choque e tração) participe.

Para permitir o cálculo dos valores das passagens, foi feita uma estimativa de compra em um site, com mais de 30 dias de antecedência, e foi gerado um arquivo que mostra os valores obtidos e os cálculos feitos (ANEXO IV). Para a EFC (São Luis - MA), o valor da

passagem é R\$ 1.996,20 e para a EFVM, o valor é R\$ 1.182,00, saindo de Campinas-SP, que é o menor valor nas três cotações feitas.

Em cada uma dessas viagens, a equipe dispenderá 4 dias, entre as viagens e o tempo passado nas ferrovias, com 4 pernoites. Assim, são previstas 16 diárias em cada missão (6), ou um total de 96 para cada uma das ferrovias. Os valores das diárias estão descritos no mesmo arquivo com os cálculos citados, bem como a fonte dos valores das diárias, baseadas no Decreto nº 11.872/2023 para capitais estaduais.

- Para a participação em Congressos, foram selecionados os eventos já apresentados no item 2.III, com as justificativas pertinentes. Serão dois eventos, dos quais dois pesquisadores participarão. Para essas atividades, foram feitas cotações baseadas nas informações disponíveis atualmente. O cálculo para cada uma das viagens está descrito no mesmo ANEXO IV.

As passagens foram cotadas para viagens a, ao menos, 30 dias após a data da cotação e as cotações obtidas no anexo. As diárias foram as que são definidas pelo decreto nº 71.733, para os países onde deverão ser realizados os eventos. Congressos assim, conforme mostrado nos links apresentados, duram cinco dias e, por isso, estão sendo solicitadas cinco diárias por pesquisador participante. Nesses congressos, há uma série de sessões paralelas e os assuntos podem envolver os diversos temas que serão estudados neste projeto. Ademais, trabalhos científicos serão apresentados pela equipe e podem ser sobre assuntos fundamentalmente diferentes. Assim, ao menos dois pesquisadores participarão desses eventos.

### **3.1.2. Projetos Científicos e Acadêmicos**

As linhas principais de trabalho vão gerar Projetos Acadêmicos ou trabalhos de pesquisa ligados a cada um dos membros da equipe. A lista dos projetos de cada pesquisador é a seguinte:

- I. Pesquisador Líder: Modelagem de dinâmica longitudinal de veículos. Serão gerados trabalhos científicos e relatórios a partir dos métodos que serão utilizados para avaliação da eficiência energética das composições longas, visando avaliar se as modificações operacionais são sustentáveis. Será avaliada a possibilidade de otimização da condução a partir da simulação desenvolvida, para avaliar a redução do consumo de combustível. Coordenação técnico científica e operacional do Projeto.
- II. Pesquisador 1: Integração das Dinâmicas Longitudinal da Composição e Transversal dos veículos ferroviários. Serão gerados trabalhos científicos e relatórios a partir dessa integração. Coordenador Associado do projeto.
- III. Pesquisador 2: Modelagem Dinâmica dos Veículos. Serão gerados trabalhos científicos e relatórios a partir do desenvolvimento de modelos otimizados, adequados para o processamento da grande quantidade de veículos e que possam ser empregados para avaliar os vagões nas diversas posições na composição ferroviária.
- IV. Pesquisador 3: Avaliação dos esforços longitudinais nos componentes internos dos aparelhos de choque e tração (ACT), causados pelo processo de frenagem nas ferrovias estudadas, bem como os efeitos de folgas sobre tais choques. Serão gerados trabalhos científicos e relatórios a partir dos métodos que serão utilizados para descrever os esforços internos, visando a definição de componentes críticos, o que permitirá um refinamento das especificações desses produtos.

- V. Pós-doc 1 ou pesquisador visitante: Deverá empregar os modelos de simulação para a dinâmica longitudinal de composições de carga desenvolvidos e criar as condições para seu emprego adequado pelas equipes de engenharia da VALE. Além disso, deverá propor estratégias integradas para minimizar os esforços nos conjuntos de choque e tração (CCT), avaliando os tipos de ACTs (Power Guard, Endurance, Mark 70 e outros candidatos), os sistemas de freio e as configurações. Ainda, terá que coordenar o andamento dos trabalhos da equipe interna e a interação com profissionais da VALE. Esta pesquisa gerará trabalhos científicos e relatórios sobre a aplicação dos métodos desenvolvidos para o uso nas ferrovias com características da EFC e EFVM.
- VI. Pós-doc 2: Seus temas de estudo serão: (a) Desenvolver uma interface capaz de ler o arquivo de registro da locomotiva (LOG), se for legalmente liberado e as informações sobre sua construção estiverem disponíveis, e utilizá-la como entrada no cálculo dos esforços nos CCTs de cada vagão. (b) Aplicá-la para a comparação da eficiência energética de características de operação das ferrovias selecionadas. (c) Compatibilizar os dados de registro da locomotiva com os empregados para a simulação longitudinal com o SIMLON.
- VII. Pós-doc 3: Seus temas de estudo serão: (a) Desenvolver o estudo da influência dos perfis, altimétrico e planímetro, e avaliar como as irregularidades mais críticas encontradas na via podem contribuir para o aumento dos esforços no conjunto de choque e tração; (b) Avaliar a influência dessas características da via nos diversos tipos de ACT modelados, para a estimativa dos esforços nos CCTs de cada vagão.
- VIII. Pós-doc 4: Seus temas de estudo serão: (a) Especificar tecnicamente as variáveis e medições necessárias para a validação dos modelos para dinâmica longitudinal, incluindo a medição de esforços nos CCTs, sistemas de freios, e outras; (b) Desenvolver planejamentos de experimentos necessários para a validação do SIMLON; (c) Aplicar técnicas estatísticas e de aprendizado de máquinas para extrair dados úteis das medições já feitas nas ferrovias e da instrumentação empregada na validação.
- IX. Mestrando 1: Desenvolver modelos de simulação para a dinâmica longitudinal de composições de carga – O caso da EFC. O aluno deverá apresentar sua dissertação de mestrado sobre métodos inovadores para a simulação dinâmica longitudinal de composições ferroviárias, bem como colaborar na análise do aumento da composição ferroviária e estudar o efeito da configuração dos lotes sobre os esforços no conjunto de choque e tração, incluindo lotes mistos. Graduado em Engenharia Mecânica ou formação equivalente.
- X. Mestrando 2: Estudar o problema da subida das caixas dos vagões próximos às locomotivas sobre os pratos-pião dos truques em frenagens intensas ou penalizações, visando a minimização do problema. O aluno deverá apresentar sua dissertação de mestrado sobre modificações de design (CCT, freios, engates, ...) que possam reduzir esse problema nos vagões descarregados na parada para o carregamento. Seus estudos empregarão os tipos mais comuns de acoplamentos. Graduado em Engenharia Mecânica ou formação equivalente.
- XI. Mestrando 3: Desenvolver modelos de simulação para a dinâmica longitudinal de composições de carga – O caso da EFVM. O aluno deverá apresentar sua dissertação de mestrado sobre técnicas de processamento de alto desempenho para a simulação dinâmica longitudinal de composições. Trabalhará em temas que

terão forte relação com o estado da arte atual em processamento para programas de dinâmica. Graduado em Engenharia Mecânica ou formação equivalente.

- XII. Mestrando 4: Estudar os efeitos do aumento da carga, velocidade e outras condições de operação em composições de carga da EFVM. O aluno deverá apresentar sua dissertação de mestrado sobre a influência da velocidade e das forças advindas da dinâmica longitudinal na segurança da operação ferroviária. Graduado em Engenharia Mecânica ou formação equivalente.
- XIII. Mestrando 5: Desenvolver a interface gráfica do programa SIMLON. O aluno deverá trabalhar entendendo como os demais programas comerciais interagem com o usuário e, em conjunto com a Engenharia da VALE, propor a interface mais adequada para o uso do programa. Sua dissertação será desenvolvida sobre esse tema, com foco na parte computacional. Poderá ser um Engenheiro de Computação, Controle e Automação ou Mecânico.
- XIV. Mestrando 6: Desenvolver modelos para os diversos tipos de ACTs (Power Guard, Endurance, Mark 70 e outros candidatos), levando em conta sua curva de absorção de impacto. Seus estudos deverão permitir a avaliação da possibilidade de intercambialidade entre os modelos, fornecendo informações para que a equipe avalie a dinâmica completa da composição com ACTs diversos. O foco será no desenvolvimento de modelos computacionais que poderão ser aprimorados em função de informações de testes em escala real. Graduado em Engenharia Mecânica ou formação equivalente.

### **3.2. Etapas**

O projeto será completado em 36 meses e as etapas principais do projeto são listadas a seguir, bem como as atividades previstas para cada etapa.

As entregas serão anuais, apresentadas através de relatórios (1 a 3), que conterão em anexo os eventuais programas desenvolvidos e os manuais de uso. Os detalhes com os períodos de execução das etapas são mostrados no ANEXO II – “Cronograma de físico-financeiro”.

#### **I. Etapa 1 - Revisão Bibliográfica, Aprimoramento e Validação do programa SIMLON**

##### **a) Estabelecimento das premissas básicas da pesquisa e Revisão Bibliográfica:**

A revisão do estado da arte foi iniciada juntamente com a confecção deste projeto e continuará ao longo de todo o período deste. Cada tópico listado nos desafios será estudado, permitindo o emprego das tecnologias e informações mais atuais. Essa atividade é fundamental para que as melhores técnicas e o estado da arte nas ciências sejam aplicados no desenvolvimento do projeto. Sem saber a fundo o que é feito hoje no mundo todo, não será possível trabalhar em busca da evolução do conhecimento.

As premissas básicas da pesquisa se referem ao conhecimento profundo sobre as ferrovias de alta carga e suas operações, bem como aos limites do estudo, que estão relacionados ao que é possível e desejável que seja estudado, medido, avaliado. Essa primeira atividade do projeto está relacionada ao conhecimento inicial para que todas as demais atividades sejam realizadas e é fundamental para que o projeto se desenvolva adequadamente.

Os métodos e técnicas empregados nesta etapa serão basicamente os de revisão bibliográfica e técnica (patentes, catálogos, manuais, procedimentos, ...), buscando criar um compêndio resumido das informações que forem importantes para o projeto. A atividades serão, prioritariamente, executadas pela equipe do projeto vinculada à



UNICAMP. O resultado ou meta física desta etapa será um documento com o resumo do conhecimento obtido com a revisão bibliográfica, descrevendo também as premissas básicas da pesquisa, com base no que se conhece hoje. Será parte do Relatório Anual 1.

b) Estudo das condições de operação típicas ferroviárias – Condução e via.

Como este é um estudo geral, de ampla aplicação nas ferrovias nacionais, mas que terá como aplicação para validação as duas ferrovias da VALE para o transporte de minério, é necessário um estudo profundo sobre as tais ferrovias e suas características físicas, bem como sobre as operações que hoje são realizadas. Esse estudo envolverá todos os membros da equipe e será apoiado pela Engenharia das ferrovias. Para que os esforços transmitidos na dinâmica longitudinal e sua composição com a dinâmica do veículo sejam avaliados, é preciso que cada curva, cada superelevação, cada velocidade e cada tipo de composição e condução sejam previamente conhecidos. Sem isso, o desenvolvimento das simulações não poderá ser aplicado aos casos desejados.

Os métodos empregados nessa etapa consistirão em estudos dos manuais de operação, visitas técnicas às ferrovias, treinamento com os Engenheiros e verificação de documentação adicional que possa dar embasamento ao conhecimento mais profundo sobre as operações das ferrovias selecionadas para validação. Nas visitas técnicas, o objetivo será tirar as dúvidas sobre a operação; conhecer a realidade da operação ferroviária; avaliar a variação prevista das ações adotadas na operação, como a condução; refinar as necessidades da empresa a serem atendidas com o desenvolvimento deste projeto e contribuir para o engajamento dos profissionais nas atividades previstas.

As atividades serão desenvolvidas pela equipe da UNICAMP com apoio da Engenharia da empresa, em especial dos profissionais que trabalhem em temas ligados ao projeto. Ao final dessa etapa, o conhecimento obtido será sumarizado na forma de um documento descrevendo as informações significativas para o desenvolvimento do projeto (resultado). Os resultados serão apresentados no Relatório Anual 1.

c) Aprimoramentos e novos desenvolvimentos no programa de Simulações de Dinâmica Longitudinal de Composições Ferroviárias - *SIMLON*.

A UNICAMP iniciou o desenvolvimento de um programa acadêmico, simplificado, de simulação de dinâmica longitudinal em um projeto anterior, com nome provisório de SIMLON, concluído em 2019. Na ocasião, o programa foi aplicado para um estudo específico, visando a otimização da condução em um trecho da EFVM. Os resultados geraram alguns artigos em periódicos especializados de relevância para a área ferroviária (Eckert et al., 2021; Teodoro et al., 2018; Teodoro et al., 2019; Eckert et al., 2024), que apresentaram algumas das principais características do programa e suas aplicações naquele momento. O programa não incluía os modelos mais atuais de choque e tração e nem os recursos de otimização de condução que os sistemas das locomotivas já possuem, apenas os que eram usuais no início do projeto. Ademais, as descrições de entradas curvas, mudanças de via e da distribuição de pressão ao longo da composição não permitiam a descrição completa das ferrovias, embora já mostrassem uma evolução sobre o que era conhecido à época. Há ainda o desenvolvimento da simulação conjunta (longitudinal e transversal), que deve requerer o aumento da velocidade de processamento e estratégias para a troca de informações entre os módulos de cada uma das dinâmicas. Por fim, composições com vagões de tipos distintos não poderiam ser modeladas na versão já desenvolvida, o que é importante para o transporte de minério, uma vez que a taxa de frenagem é diferente para tipos diferentes de vagões.

Para que este projeto possa ser conduzido, será necessário refazer o programa como um

tudo, incluindo o que ainda precisa ser desenvolvido, o aprimoramento das técnicas de processamento e criando uma interface amigável para o uso futuro das ferrovias. Além disso, deve estar pronto para receber informações confiáveis de medições em campo para permitir os ajustes nos seus processos de cálculos e nas informações geradas. Pode, inclusive, servir como parte dos objetivos das Ferrovias Brasileiras de criar gêmeos digitais das suas composições ferroviárias.

Métodos de desenvolvimento avançado de softwares serão empregados nessa etapa. Em princípio, os programas serão feitos em MatLab/Simulink™, em continuidade ao que já foi desenvolvido, mas poderão ser transformados em outras linguagens para facilitar o processamento, como C ou mesmo Python. Para a estratégia de desenvolvimento poderão ser empregados metodologias ágeis a cada etapa, como *Scrum*, *Kanban* e *XP*.

Embora essa atividade deva ser desenvolvida ao longo de todo o projeto, já que o programa refeito será mais e mais aprimorado conforme novas informações forem sendo acrescentadas e novos resultados experimentais alimentem os modelos, espera-se que o principal seja desenvolvido no período estipulado no cronograma. Como meta física (resultado), o programa deverá estar funcionando adequadamente para a simulação da dinâmica longitudinal sob condições de operação usuais ao final deste tópico, com resultados apresentados no Relatório Anual 1.

- d) Desenvolvimento de especificações técnicas para variáveis de medições necessárias para a validação dos modelos para dinâmica longitudinal

Para que as análises desenvolvidas possam ser validadas, serão empregadas medições já feitas pela VALE e disponibilizadas para a UNICAMP em projetos anteriores, que as empregou para a validação dos modelos da dinâmica transversal dos veículos. Nessas medições havia dados que poderiam ser usados para a dinâmica longitudinal, mas que ainda não o foram. Ao longo deste projeto poderão ser feitas medições adicionais em campo, com foco na dinâmica longitudinal, para cada um dos tipos de vagões, em cada composição de cada ferrovia. Para que esses dados sejam adquiridos de forma a que possam ser usados em validações, especificações técnicas dos ensaios precisam ser desenvolvidas. Esta etapa foi incluída para a definição adequada dos ensaios, com base em todo o conhecimento já adquirido nas etapas anteriores.

Os custos de tais medições não fazem parte dos recursos previstos neste projeto, uma vez que não é possível estipular quantas medições ou, até mesmo, se estas serão necessárias. Se necessárias, serão executadas pela VALE ou contratadas, com recursos próprios.

Para o desenvolvimento desta etapa, o método que será usado consiste na seleção de quais variáveis dentre as que são obtidas no SIMLON podem ser medidas em campo e serviriam para validar os modelos. Por exemplo, a força nas hastes ou engates ao longo do tempo certamente é um parâmetro importante. A aceleração nas partidas e frenagens, em diversas posições ao longo da composição, também pode ser fundamental para a validação pretendida.

Ao final desta etapa deverá ser apresentada uma ou mais especificações técnicas quanto ao procedimento e detalhes das medições em campo que servirão para a validação dos modelos desenvolvidos (meta física). Essas especificações serão desenvolvidas pela UNICAMP, em consonância com os procedimentos e técnicas das ferrovias. Caso tais medições já tenham sido feitas e sejam consonantes com as especificações desenvolvidas, os dados já disponíveis poderão ser utilizados; caso não, medições serão feitas pela VALE para tal fim.

- e) Validação Teórica do Programa *SIMLON* com base em resultados do TDS-5000 ou 6000

fornecidos pela VALE

Como primeira atividade de validação dos códigos já aprimorados no item (c), os modelos serão validados e ajustados (se necessário) com base nos programas comerciais disponíveis nas ferrovias citadas. Isso será precedido de um amplo estudo sobre o programa disponível (TDS 5000 ou 6000) e quais são as variáveis que devem ser alteradas durante a criação dos arquivos que são computados por esses programas, uma vez que isso permitirá avaliar as eventuais diferenças e trabalhar nos ajustes necessários. Esta validação inicial é necessária para garantir que o programa *SIMLON* terá, no mínimo, condições de gerar o que hoje é avaliado pelos programas comerciais e ser tão flexível e rápido quanto esses, mas tendo todo o conhecimento obtido no seu desenvolvimento disponibilizado para benefício das ferrovias nacionais e da sociedade, como um todo.

Serão selecionadas diversas condições operacionais que podem ser modeladas nesse programa comercial para as ferrovias da VALE, tanto as já existentes como as que ainda devem ser implementadas após o desenvolvimento de estudos de viabilidade. O método será a comparação pura e simples dos resultados obtidos e a identificação das eventuais diferenças, buscando explicação teórica para sua existência e permitindo que as deficiências do *SIMLON* em comparação com os programas comerciais sejam sanadas. O controle de cada uma das alterações e a explicação técnica detalhada das razões das diferenças, quando existentes, permitirão o entendimento das eventuais não conformidades encontradas na fase seguinte (validação experimental). Com isso, permitirão o ajuste informado necessário para a representação das condições reais de operação.

Ao final desta etapa, a meta física será um documento contendo os resultados das comparações e dos ajustes necessários no programa em desenvolvimento, com a explicação das razões das diferenças. Esta etapa será realizada pela equipe da UNICAMP, contando com a participação dos engenheiros da empresa para a geração dos resultados no programa TDS e para a avaliação das eventuais diferenças. Parte do que for desenvolvido ao final do primeiro ano de projeto será apresentada no Relatório Anual 1.

- f) Validação do Programa *SIMLON* com base em resultados experimentais fornecidos pela VALE

Conforme explicado no item (d), já há uma série de resultados de medição compartilhados com a UNICAMP e que poderiam, ao menos parcialmente, ser empregados para a validação dos códigos desenvolvidos. Com estes e com os possíveis novos resultados que serão obtidos seguindo as novas especificações técnicas propostas no item citado, o programa será validado e os ajustes necessários serão aplicados, além dos que já tiverem sido feitos no item (e), que também serão revisitados para avaliar a adequação dos ajustes iniciais. O que será considerado válido será sempre a medição em conta, certamente levando em conta a dispersão dos dados e que a medição foi feita corretamente. Os dados serão avaliados utilizando ferramentas usuais de análise de dados para verificar se há desvios não explicáveis e se o sistema e a medição foram adequados.

O método de validação será a comparação simples, possivelmente com algum tipo de quantificação de diferenças, como RMS. Tal validação, a partir dos dados fornecidos pela VALE, será realizada pela equipe da UNICAMP. O resultado previsto para esta etapa (meta física) é a disponibilização para a execução das etapas seguintes de um programa validado e confiável, que possa ser empregado tanto para a pesquisa técnica e científica como pela VALE e outras operadoras para a análise de suas operações e das alterações desejadas na operação. Os resultados serão apresentados no Relatório Anual 2.

## II. Etapa 2 - Estudos Aplicados às Características Operacionais das Ferrovias

### g) Simulação das diversas configurações de lotes de vagões (GDU, GDE e GDT) e mistas

Uma vez aprimorado e validado o programa de simulação, as etapas posteriores consistem em aplicá-lo para estudar variações nas características operacionais das ferrovias que serão estudadas, visando aumento da eficiência operacional, e os problemas já identificados.

Um dos primeiros estudos, e que é muito significativo para a empresa, envolve a simulação de operações com lotes de vagões diferentes, em especial na EFC, onde GDU e GDT convivem em número significativo na frota atual. Como são vagões diferentes, têm características diferentes e frenagens que requerem ajustes de pressão para que trabalhem em conjunto. Como a EFC trabalha com lotes de 110 vagões e composições que hoje têm 330 vagões (três ou quatro locomotivas), mas que caminham para ter o dobro disso, quando lotes de vagões diferentes são misturados, a diferença de operação (frenagem) faz com que possa haver um aumento nos choques nos Conjuntos de Choque e Tração (CCT).

A logística que permitiria a criação de grandes composições (trens longos) com vagões iguais é extremamente complicada. Assim, é necessário avaliar previamente e com confiança qual seria o comportamento dessas composições e definir qual arranjo levaria aos menores choques. Por exemplo, pode ser que colocar os lotes de GDT na parte da frente da composição diminua os choques; ou intercalá-los; ou mesmo utilizar alguma outra distribuição. Somente com simulações confiáveis e validadas é possível realizar tais avaliações antes de testar em campo. Ademais, como as variações das cargas são cumulativas e CCTs devem sobreviver muitos anos antes que sejam substituídos ou tenham manutenção significativa, pode ser que arranjos particulares de lotes de vagões já estejam causando falha prematura, o que poderia ser minimizado, com ganhos significativas em termos de manutenção e eficiência operacional, já que não seria necessário retirar os vagões de serviço.

Esse estudo será realizado pela equipe da UNICAMP, com forte participação da operadora. Ao final do trabalho desta etapa, será gerado uma instrução técnica sobre como montar os lotes dos vagões na composição, visando reduzir os choques e aumentar a vida útil dos componentes. Os resultados estarão no Relatório Anual 2.

### h) Estudo das estratégias para redução dos esforços nos CCTs (sistemas de freios, tipos de ACT e configurações)

O programa *SIMLON* também será empregado, após a validação, para o estudo de formas de redução de choques entre os vagões, levando em conta os tipos de aparelho de choque e tração, os sistemas de freios e outras configurações. Esse estudo está diretamente ligado ao citado na etapa (g), mas o foco é avaliar o que está sendo feito hoje e se há providências operacionais ou de manutenção que possam ser empregadas para tal redução. Poderão ser avaliados também alterações em componentes do vagão (dinâmica transversal), se necessário. Como choque é energia e toda a energia usada para movimentar uma composição vem do combustível gasto, mesmo aquela ligada a energia potencial em trechos específicos, a redução dos choques deve ter reflexo no aumento da eficiência energética do sistema, reduzindo o consumo de combustíveis fósseis.

Dentro desse estudo, serão avaliados ainda a influência da variação de componentes de CCT. Como aplicação, serão desenvolvidos modelos com diferentes curvas de absorção, aplicados aos principais tipos de ACTs usados pelas ferrovias. Os modelos de comportamento serão empregados para avaliar a possibilidade de intercambialidade entre tipos de ACTs disponíveis, e as variações nos demais componentes dos CCTs com os quais são empregados. Os efeitos de características da via também serão avaliados.

Esse estudo será realizado pela equipe da UNICAMP. Ao final do trabalho desta etapa, será gerado uma recomendação técnica com as estratégias sugeridas para a redução dos choques entre veículos. Os resultados serão apresentados no Relatório Anual 2.

- i) Estudo de caso 1: Avaliação do efeito do aumento do número de vagões de minério na composição da EFC para 440 e 660 vagões e do aumento da carga e velocidade na EFVM

Como dito na descrição da etapa (g), a EFC busca aumentar gradativamente o número de vagões em suas composições. Este é um problema atualmente em estudo por diversas ferrovias nacionais. Para composições vazias, já há operação com até 660 vagões e os testes com composições de 440 vagões carregados se iniciaram. Será que é seguro manter a mesma velocidade e condução para essas novas configurações de trens? É energeticamente eficiente manter a condução proposta para 440 ou para 660 vagões?

Esta etapa da pesquisa vai avaliar se é possível, dentro de limites seguros, trafegar com composições maiores sem que as forças nas conexões sejam suficientemente elevadas para causar falhas prematuras ou contribuam para que haja maior propensão ao descarrilamento. Embora o tráfego nos aparelhos de via não esteja previsto nas análises deste projeto, poderão ser realizados estudos em função da futura disponibilidade de recursos humanos, uma vez que as demais análises estejam concluídas.

Da mesma forma que em muitas outras ferrovias, na EFVM a segurança da operação com cargas maiores e aumento nas velocidades é importante. Visando o aumento de produtividade e eficiência do sistema, serão analisadas essas condições operacionais. Como a EFVM é uma ferrovia mais antiga, o modelamento vai exigir uma interação maior com o pessoal de Via Permanente (VP) e Operação da ferrovia, a fim de selecionar trechos mais críticos, onde a alteração na velocidade possa ser mais impactante, sem correr riscos à segurança pela manutenção da via.

Esse estudo será realizado pela equipe da UNICAMP com forte participação da Engenharia da empresa, em especial da parte de operações e VP. Ao final do trabalho desta etapa, será gerado um estudo que dará subsídios para a que as ferrovias tomem a decisão de alterar ou não suas operações. O estudo estará na forma de um documento conclusivo, (produto), que trará os eventuais fatores limitantes da implantação das conclusões obtidas. Os resultados serão apresentados no Relatório Final 3.

- j) Estudo do problema da subida das caixas dos vagões próximos às locomotivas sobre os pratos-pião dos truques

O encavalamento de vagões, em especial os primeiros vagões de composições vazias em algumas situações de frenagem, representa um custo bastante elevado, mesmo que ocorra em condições bastante específicas de operação. Quando o freio dinâmico é aplicado na locomotiva, o primeiro vagão a acompanhar, mas os demais podem não reduzir sua velocidade na mesma taxa, fazendo com que tentem ultrapassar os vagões da frente e “subam” sobre estes ou descarrilem. Isso também pode ocorrer, em alguns casos, em paradas com freio de atrito.

Para estudar este problema, as frenagens nessas composições serão simuladas com o *SIMLON*, nos trechos específicos onde o problema acontece, visando buscar alternativas operacionais adequadas.

Da mesma forma, esse estudo será realizado pela equipe da UNICAMP, com participação da Engenharia. Ao final do trabalho desta etapa, será gerado um documento com a análise dos resultados e com a recomendação técnica para minimizar o problema. Os resultados serão apresentados parcialmente no Relatório Final 3.

k) Desenvolvimento de uma interface capaz de ler o arquivo de registro da locomotiva (LOG)

As simulações realizadas no programa desenvolvido partirão da condução prevista para o trecho da ferrovia sob análise. Uma das dificuldades encontradas na análise de algumas das falhas encontrada em serviço está no fato de que nem sempre o condutor (maquinista) segue literalmente as orientações para cada trecho. De fato, em muitas ocasiões, o condutor é obrigado a alterar a condução prevista para garantir a segurança das operações. Fatores como chuva (peso do veículo), contaminação nos trilhos, desgastes dos freios, umidade e outros alteram a forma que a composição longa se comporta em operação. Entretanto, todo o comportamento da composição é registrado na locomotiva, que gera um arquivo de registro (LOG) com todas essas informações. É a caixa-preta da locomotiva. Seria muito interessante se houvesse uma forma de ler essas informações e inseri-las diretamente no *SIMLON*, para que este avaliasse a dinâmica de toda a composição para as diversas situações particulares de condução.

Esta etapa do projeto se propõe a desenvolver a interface de comunicação entre este arquivo LOG e o programa de simulação. Está colocada ao final do projeto, como uma espécie de fechamento da pesquisa, porque vai depender de uma ampla negociação da VALE com as empresas fabricantes de locomotivas, para que permitam a utilização e auxiliem na descrição das informações que não for possível obter claramente. Caso isto não seja possível, esta etapa não será desenvolvida.

A equipe do projeto desenvolverá este programa. Como resultado, será gerado um programa capaz de converter o arquivo de LOG em um conjunto de informações que poderá ser inserido diretamente no *SIMLON*, permitindo a simulação dos choques entre os veículos a partir dos dados reais de operação. Os resultados serão apresentados no Relatório Final do projeto.

### **III. Etapa 3 – Transferência do Conhecimento através de Treinamentos**

l) Treinamento da Engenharia sobre os conteúdos desenvolvidos no projeto

Ao longo de todo o projeto, serão transferidas informações relativas ao que estiver sendo desenvolvido para a Engenharia da VALE. Essa transferência se dará através dos produtos previstos em cada etapa e em reuniões técnicas semestrais em cada uma das ferrovias, das quais poderão participar outras ferrovias interessadas no desenvolvimento. Nessas reuniões, que normalmente duram de três a quatro dias, o conhecimento adquirido será transferido através de minicursos de formação. Os detalhes e resultados serão apresentados no Relatório Final do projeto.

### **IV. Etapa 4 – Divulgação e Conclusão**

m) Divulgação e Conclusão: Relatório Final do Projeto e Teses: discussão global dos resultados e sistematização destes na forma do Relatório Final do projeto, que é o produto final deste projeto.

Nesse relatório estará toda a revisão de literatura, além das teorias e os métodos utilizados no desenvolvimento do programa, pesquisa e técnicas. As dissertações serão desenvolvidas ao longo do projeto, mas seus resultados serão apresentados no relatório final. Serão ainda submetidas o registro do programa desenvolvido, as eventuais patentes de propriedade da ANTT (se houverem) e os trabalhos previstos para publicação em periódicos e congressos científicos. Embora parte do previsto para a Divulgação tenha sido feito ao longo do projeto, em função do que for obtido em termos de resultados e das

conclusões das teses, esta etapa fará uma síntese de tudo o que foi estudado e gerado no período de 36 meses.

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

Este projeto será desenvolvido em 36 meses, a partir da conclusão da tramitação do projeto na instituição de pesquisa e da disponibilização dos recursos iniciais previsto. O início está previsto para 05/01/2026, quando os trabalhos dos pesquisadores e pós-doutorandos se iniciam. Para os alunos de mestrado, a admissão nos programas de pós-graduação ocorre a partir de fevereiro/26.

O custo total deste projeto será de R\$ 4.690.567,32 (quatro milhões, seiscentos e noventa mil, quinhentos e sessenta e sete reais e trinta e dois centavos), distribuídos conforme indicado:

Valor de investimento 2026: R\$ 1.673.257,18, sendo:

- Ano contratual 4: R\$ 1.026.519,26
- Ano contratual 3: R\$ 646.737,92

Valor de investimento 2027 (ano contratual 7): R\$ 1.656.572,52

Valor de investimento 2028 (ano contratual 8): R\$ 1.360.737,62

Este valor inclui a taxa de ressarcimento institucional total de 22,5% sobre o valor total do projeto. Tal percentagem inclui as despesas associadas à fundação interveniente (FUNCAMP – Fundação de Desenvolvimento da Unicamp – 6,5%). Estas taxas seguem a resolução GR 036/2008, da UNICAMP, disponível em <https://www.pg.unicamp.br/norma/1538/0>. Note-se que o Artigo 3º fixa o valor mínimo de Apoio Institucional para a Unidade (AIU) e determina que a unidade administrativa, no caso a Faculdade de Engenharia Mecânica - FEM, fixe o percentual. Na FEM o percentual é 5%.

O valor também contempla o provisionamento da concessionária para despesas administrativas (7,37%) 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.”.

O documento completo com o Cronograma Físico-Financeiro é apresentado no ANEXO II, de acordo com a Portaria que rege o RDT (17, de 6/12/2023), em base anual.

O Orçamento Analítico é mostrado no ANEXO VI, seguindo a mesma portaria, conforme o modelo disponibilizado na Portaria 9, de 9 de agosto de 2024, da ANTT.

#### **5. LOCAL DE EXECUÇÃO**

O projeto será executado na Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, no seu Laboratório Ferroviário (<https://www.lafer-fem.com.br/>), lotado no Departamento de Sistemas Integrados da Faculdade de Engenharia Mecânica. Nesse local, a UNICAMP possui um espaço para a instalação de computadores e alunos, faltando apenas as modificações previstas nesse projeto para adequação do espaço físico e bancadas para alunos.

Reuniões técnicas semestrais presenciais serão realizadas nas dependências das Ferrovias da VALE (EFVM e EFC), nas quais haverá a apresentação do andamento dos projetos, discutidos eventuais ajustes e realizado o treinamento dos profissionais da VALE no que já tiver sido desenvolvido. São previstas 12 visitas no total, com quatro membros do projeto em cada ferrovia da VALE a cada semestre. Reuniões técnicas bimestrais serão marcadas para serem realizadas online, em função da necessidade do projeto.

## 6. ENTIDADE E EQUIPE EXECUTORA

### 6.1. Identificação da Entidade Executora

A entidade executora será a Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. O projeto terá interveniência da FUNCAMP – Fundação de Desenvolvimento da UNICAMP. No caso da instrumentação que foi instalada ou que será instalada pela VALE para o desenvolvimento deste projeto, o local da instalação é um vagão ferroviário, que percorre toda a ferrovia, tanto a EFC como a EFVM. Eventualmente, veículos de inspeção de via (carros-controle) poderão fornecer informações além das disponíveis nos veículos já instrumentados, como a descrição da via.

No que se refere à competência para o desenvolvimento de pesquisas na área ferroviária, conforme já informado no item 2. Justificativas e no item 3.2.c), a UNICAMP desenvolve há muitos anos pesquisas relacionadas ao tema. Desde a década de 1990, possui um Laboratório Ferroviário, cujos objetivos principais foram o estudo do desempenho de materiais de atrito e o desenvolvimento de simulações computacionais com o antigo programa NUCARS, da Associação Americana de Ferrovias (AAR). Ao longo dos últimos 10 anos desenvolveu e tem desenvolvido os seguintes projetos de pesquisa em parceria com a VALE:

- Cátedra de Vagões. Rede de pesquisas sobre veículos ferroviários. Envolve pesquisas sobre materiais, dinâmica, design, segurança de operação. Desde 2018. Em andamento.
- Desenvolvimento e Análise do Efeito da Frenagem com modelos dinâmicos em Vampire. Envolve a modelagem dinâmica de vagões ferroviários. Desde 2019. Em andamento.
- Aprofundamento na Avaliação dos Parâmetros Medidos com o Vagão Instrumentado. Envolve o uso de ferramentas de Aprendizado de Máquina para análise de segurança com sensoramento de vagões de minério. Desde 2019. Em andamento.
- Desenvolvimento de modelos computacionais para simulação dinâmica de carros de passageiros. Envolve o desenvolvimento de modelos dinâmicos para outro tipo de vagão ferroviário, os carros de passageiros. Desde 2020. Em andamento.
- Desenvolvimento de Modelos para Simulação de Composições Ferroviárias. Envolve a base para o projeto de modelagem dos vagões com Vampire. Concluído em 2020.
- Estudo do efeito da estrutura *frame brace* sobre a dinâmica de composições ferroviárias. Envolve um novo sistema para aumento da segurança de operação de vagões. Concluído em 2018.
- Desenvolvimento de Modelos para Simulação dos Efeitos do Aparelho de Choque e Tração sobre a Dinâmica das Composições Ferroviárias. Envolve o desenvolvimento de modelo de operação de um componente chave de um vagão ferroviário, o ACT. Concluído em 2016.
- Desenvolvimento de Modelos para Simulação de Frenagem de Composições Ferroviárias de Carga. Envolve o desenvolvimento de modelos que descrevem o funcionamento dos sistemas de freio e que são usados até hoje nos projetos atuais para avaliar os esforços e segurança durante a operação. Concluído em 2016.



Como dito, especificamente sobre simulação longitudinal, os resultados geraram alguns artigos em periódicos especializados de relevância para a área ferroviária (Eckert et al., 2021; Teodoro et al., 2018; Teodoro et al., 2019; Eckert et al., 2024), que apresentaram algumas das principais características do programa *SIMLON* e suas aplicações até onde foi desenvolvido. Um grande número de trabalhos adicionais ligados aos projetos citados na área ferroviária também foi publicado, por exemplo (Pacheco et al., 2023; Correa et al., 2023; Pires et al., 2021; Lopes et al., 2021; Wu et al., 2021; Lima et al., 2020; Lopes et al., 2020; Baruffaldi & Santos, 2019) e a cerca de 10 dissertações e teses, bem como 7 pós-doutoramentos foram desenvolvidos nos últimos 10 anos.

Os resultados já obtidos e a continuidade das pesquisas mostra que o Laboratório Ferroviário da UNICAMP tem competência reconhecida para desenvolver o projeto proposto.

A fundação de apoio FUNCAMP possui a responsabilidade de prestar contas, administrar os recursos financeiros, realizar contratações, pagamentos, recolhimento de taxas, impostos e encargos, das atividades relacionadas ao projeto, dentre outras previstas no acordo de parceria.

Considerando o exposto no texto supracitado, a escolha do parceiro teve como base a análise técnica e financeira da proposta do projeto, bem como na capacidade de execução da entidade. Adicionalmente, este projeto não prevê a concessionária como executora do projeto, limitando-se ao escopo de gerir a execução do projeto pela entidade executora, de forma alinhada e aderente às obrigações regulatórias e contratuais atribuídas à concessionária pelo poder concedente.

## **6.2. Identificação da Equipe Executora**

Os pesquisadores do projeto são:

- a) Prof. Dr. Jony Javorski Eckert. Engenheiro Mecânico. Prof. Assistente Doutor na UNICAMP. Pesquisador Líder e Coordenador deste projeto. 36 meses. CPF: 014.158.010-02. Bolsa: R\$ 5.200,00
- b) Prof. Dr. Auteliano Antunes dos Santos Júnior. Engenheiro Mecânico. Professor titular UNICAMP – Pesquisador 1. Coordenador Associado. 36 meses. CPF: 069786758-73. Bolsa: R\$ 5.200,00.
- c) Prof. Dr. Paulo Roberto Gardel Kurka. Engenheiro Mecânico. Prof. Titular da UNICAMP. Pesquisador 2. CPF: 697204107-44. Bolsa: R\$ 5.200,00
- d) Prof. Dr. Tiago Henrique Machado. Engenheiro Mecânico. Professor Assistente Doutor na FEM-UNICAMP. Pesquisador 3. 36 meses. CPF: 351.118.158-56. Bolsa: R\$ 5.200,00

O pagamento de bolsa para coordenador e pesquisador(es) deste projeto baseia-se no artigo 9º da Lei nº 10.973, de 2 de dezembro de 2004, que define:

“É facultado à ICT celebrar acordos de parceria com instituições públicas e privadas para realização de atividades conjuntas de pesquisa científica e tecnológica e de desenvolvimento de tecnologia, produto, serviço ou processo.

§ 1º O servidor, o militar, o empregado da ICT pública e o aluno de curso técnico, de graduação ou de pós-graduação envolvidos na execução das atividades previstas no caput poderão receber bolsa de estímulo à inovação diretamente da ICT a que estejam vinculados, de fundação de apoio ou de agência de fomento”

Complementarmente ao artigo citado, para este projeto foi considerada a aplicação da Resolução GR-075/2020, de 15/07/2020 UNICAMP, artigo 4º.

Como referência exclusivamente de valor, está sendo adotada neste projeto a modalidade DTI-A

do CNPQ, que possui a finalidade de possibilitar o fortalecimento da equipe responsável pelo desenvolvimento de projeto de pesquisa, desenvolvimento ou inovação, por meio da incorporação de profissional qualificado para a execução de uma atividade específica.

Os valores expressos para as bolsas estão de acordo e são menores do que os valores da tabela de preços de consultoria do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte – DNIT. Na tabela de outubro de 2023, o valor do Engenheiro Coordenador é de R\$ 22.381,71 a R\$ 32.210,63, para Engenheiros de Projeto Pleno a Engenheiros de Projeto Sênior.

Todos os demais membros da equipe só poderão ser selecionados a partir da aprovação do projeto pela ANTT, uma vez que a seleção não pode ocorrer sem a garantia de bolsas para os participantes. Suas funções na pesquisa foram descritas no item 3.1 deste projeto. Suas bolsas foram atribuídas conforme os valores da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, em consonância com a Portaria 17 (6 de dezembro de 2023), Artigo 32, Item III, parágrafo 3º. Os valores das bolsas estão disponíveis em:

<https://fapesp.br/valores/bolsasnopais>

Os membros adicionais da equipe são:

- e) Pós-doutorando 1. Período: 36 meses. Bolsa: R\$ 12.000,00
- f) Pós-doutorando 2. Período: 36 meses. Bolsa: R\$ 12.000,00
- g) Pós-doutorando 3. Período: 36 meses. Bolsa: R\$ 12.000,00
- h) Pós-doutorando 4. Período: 36 meses. Bolsa: R\$ 12.000,00
- i) Mestrando 1. Período: 24 meses. Bolsa: R\$ 3.270,00 (Ano 1) e R\$ 3.450,00 (Ano 2)
- j) Mestrando 2. Período: 24 meses. Bolsa: R\$ 3.270,00 (Ano 1) e R\$ 3.450,00 (Ano 2)
- k) Mestrando 3. Período: 24 meses. Bolsa: R\$ 3.270,00 (Ano 1) e R\$ 3.450,00 (Ano 2)
- l) Mestrando 4. Período: 24 meses. Bolsa: R\$ 3.270,00 (Ano 1) e R\$ 3.450,00 (Ano 2)
- m) Mestrando 5. Período: 24 meses. Bolsa: R\$ 3.270,00 (Ano 1) e R\$ 3.450,00 (Ano 2)
- n) Mestrando 6. Período: 24 meses. Bolsa: R\$ 3.270,00 (Ano 1) e R\$ 3.450,00 (Ano 2)

## 7. PRODUTOS

Este projeto tem como objetivo estudar a viabilidade do aumento do tamanho da composição, carga e velocidade em ferrovias de carga nacionais, desenvolvendo um programa computacional aplicado a composições ferroviárias longas (mais de 30 vagões) e de alta carga (mais de 25 ton/eixo), utilizando como estudo de caso as Estrada de Ferro Carajás e a Estrada de Ferro Vitória-Minas. Assim, o produto gerado será um código validado, que pode ser usado pelas ferrovias brasileiras em suas avaliações sobre a viabilidade do aumento de suas composições.

Conforme as regras do RDT, o estudo será disponibilizado para a ANTT e as demais ferrovias e o programa desenvolvido terá código aberto, em linguagem ainda por ser definida. Ao final do projeto, um manual de utilização do programa será disponibilizado. Além disso, as etapas e os resultados da pesquisa farão parte do relatório final de pesquisa, que ficará à disposição da ANTT para divulgação e registro.

Em consonância com a pesquisa conduzida pelos quatro pesquisadores da UNICAMP, são esperadas seis dissertações de mestrado, bem como o desenvolvimento completo de quatro pós-doutoramentos. São também esperadas publicações em periódicos relacionados à área do projeto, com pelo menos seis submissões, e mais oito trabalhos em congressos, sendo pelo menos seis destes nos congressos nos quais participarão os pesquisadores deste projeto. Todo o material

gerado será de livre acesso.

### **7.1. Destinação dos bens adquiridos**

Os seguintes bens estão previstos para serem adquiridos neste projeto e usados na UNICAMP:

- 6 (seis) computadores Dell XPS 8960, com Monitores. Material Permanente.
- 24 (vinte e quatro) livros sobre assuntos ligados à pesquisa, classificados na Unicamp como Material de Permanente.
- 10 Artigos científicos

Os seis computadores serão usados no projeto na Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP e, ao final deste, serão da ANTT, que dará a destinação que aprovar à Agência, inclusive podendo doá-los à Universidade. Os livros terão acesso livre após o término do projeto e serão enviados à Biblioteca da Área de Engenharia da UNICAMP.

Além desses, serão adquiridos materiais de consumo, como:

- 6 placas de vídeo, dispositivos de armazenamento interno (SSD), pentes de memória de 32 Gb.
- Filamento para impressão 3d e cartuchos/toners para impressão de teses e relatórios
- Artigos científicos, manuais, catálogos

Os materiais de consumo serão empregados durante o projeto e, como não têm patrimônio e não são considerados bens, ficarão disponíveis no Laboratório Ferroviário para uso dos alunos, após o término das atividades. O Anexo VII descreve a destinação de todos os produtos ligados a este projeto.

## **8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS / NORMATIVOS APLICÁVEIS**

BARUFFALDI, L. B.; SANTOS, A. A. On the application of linear complementarity-based contact to study the dynamic behavior of friction dampers of railway vehicles. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 40, p. 372, 2018.

COLE, C.; SPIRYAGIN, M.; WU, Q. & SUN, Y. Q. Modelling, simulation and applications of longitudinal train dynamics, *Vehicle System Dynamics*, 55:10, 1498-1571, 2017. DOI: 10.1080/00423114.2017.1330484

CORREA, P. H. A.; RAMOS, P. G.; FERNANDES, R.; KURKA, P. R. G.; SANTOS, A. A. Effect of primary suspension and friction wedge maintenance parameters on safety and wear of heavy-haul rail vehicles. *Wear*, v. 524-525, p. 204748, 2023.

ECKERT, J. J.; TEODORO, I. P.; LOPES, M.V.; WU, Q.; SANTOS, A. A. Multi-objective optimization of electro-pneumatic braking process with fuzzy logic control for heavy haul railway applications. Accepted for publication in *International Journal of Rail Transportation*, 2024.

ECKERT, J. J.; TEODORO, I. P.; TEIXEIRA, L. H.; MARTINS, T. S.; KURKA, P. R. G.; SANTOS, A. A. A fast simulation approach to assess draft gear loads for heavy haul trains during braking. *MECHANICS BASED DESIGN OF STRUCTURES AND MACHINES*, v. 1,

p. 1-20, 2021.

- LIMA, E. A.; BARUFFALDI, L. B.; MANETTI, J. L. B.; MARTINS, T. S.; SANTOS, A. A. Effect of truck shear pads on the dynamic behaviour of heavy haul railway cars. *Vehicle System Dynamics*, p. 1-21, 2020.
- LOPES, M. V.; ECKERT, J. J.; MARTINS, T. S.; SANTOS, A. A. Multi-objective optimization of piezoelectric vibrational energy harvester orthogonal spirals for ore freight cars. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 43, p. 295, 2021.
- LOPES, M. V.; ECKERT, J. J.; MARTINS, T. S.; SANTOS, A. A. Optimizing strain energy extraction from multi-beam piezoelectric devices for heavy haul freight cars. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 42, p. 59, 2020.
- OLIVEIRA, A. J. S. de. Forças e choques na dinâmica longitudinal de composições ferroviárias. Forças e choques na dinâmica longitudinal de composições ferroviárias. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, 2017. 183 p.
- PACHECO, P. A. P.; ENDLICH, C. S.; VIEIRA, K. L. S.; REIS, T.; SANTOS, G. F. M.; SANTOS A. A. Optimization of heavy haul railway wheel profile based on rolling contact fatigue and wear performance. *Wear*, 524-52, p. 204704, 2023.
- PIRES, A. C.; MENDES, G. R.; SANTOS, G. F. M.; DIAS, A. P. C.; SANTOS, A. A. Indirect identification of wheel rail contact forces of an instrumented heavy haul railway vehicle using machine learning. *Mechanical Systems And Signal Processing*, v. 160, p. 107806, 2021.
- TEODORO, I. P.; ECKERT, J. J.; LOPES, P. F.; MARTINS, T. S.; SANTOS, A.A. Parallel simulation of railway pneumatic brake using openMP. *International Journal Of Rail Transportation*, v. 8, p. 180-194, 2019.
- TEODORO, I. P.; RIBEIRO, D. F.; BOTARI, T.; MARTINS, T. S.; SANTOS, A.A. Fast simulation of railway pneumatic brake systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, v. 7, p. 095440971879690, 2018.
- WU, Q.; COLE, C.; SPIRYAGIN, M. et al. Freight train air brake models. *International Journal of Rail Transportation*, v. 9, p. 10.1080/2324837, 2021.

## **9. ANEXOS DO PLANO DE TRABALHO**

- I      Resumo do Plano de Trabalho;
- II     Cronograma físico-financeiro;
- III    Propostas técnicas e comerciais dos terceirizados;
- 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;
- IX    Ofício 074\_2024 - Resposta à Consulta sobre a Taxa de Apoio Institucional à Unidade (AIU)\_4071442.