



METODOLOGIA TÉCNICO-OPERACIONAL PARA CONCEPÇÃO, VALIDAÇÃO E PADRONIZAÇÃO DE DESENHOS DE TRENS LONGOS COM TRAÇÃO DISTRIBUÍDA POR BLOCOS

Camila C. G. T. L. Moscibroeki¹; Paulo Giovanni Buba¹; Bruno Mochiutti¹; Vinicius Rocha¹

¹Rumo S.A. — Brasil

RESUMO

Este artigo apresenta uma metodologia técnico-operacional para concepção, validação e padronização de desenhos de trens longos com tração distribuída organizada em blocos. A abordagem parte da premissa de que o aumento de comprimento e tonelagem só é sustentável quando o desenho resulta do equilíbrio entre esforço trator disponível, resistências ao movimento, limites de engates e via, sincronismo entre locomotivas distribuídas e restrições operacionais. O método combina equacionamento preliminar de forças de tração, rampa e curvatura; simulações longitudinais em FTS para avaliar envelopes de tração, compressão, choques e comportamento do ACT; simulações multicorpos em VAMPIRE para análise de esforços laterais, L/V e estabilidade dinâmica; validação em campo por engates instrumentados, telemetria embarcada, instrumentação de via e rodeiro instrumentado; e governança interáreas para consolidação de critérios de homologação. A aplicação ao trem graneleiro de 135 vagões mostrou que a redistribuição da tração em três blocos reduz zonas extensas sob compressão, melhora a previsibilidade longitudinal e diminui a severidade dos carregamentos sobre engates e via. Os resultados indicaram redução de 47,5% na amplitude de variação dos esforços de engate, diminuição de 60% nos esforços médios e máximos observados, aumento da vida útil projetada dos componentes e ganhos de eficiência energética e segurança. Conclui-se que a padronização por blocos é replicável a diferentes carteiras, desde que sustentada por simulação, instrumentação e validação operacional integrada.

Palavras-chave: Trens longos, Tração distribuída, Dinâmica longitudinal, VAMPIRE, FTS, Padronização por blocos.

1. INTRODUÇÃO

O aumento da produtividade ferroviária por trem depende, em corredores de topografia severa, de uma solução que vá além do acréscimo de vagões. Em trens muito longos, o esforço longitudinal não se distribui de forma uniforme; ao contrário, a composição responde em ondas, com regiões distintas de tração, compressão e transição, fortemente influenciadas por rampa, curvatura, condução, sincronismo entre locomotivas e propagação do freio, conforme apresentado na figura 1. Nesse contexto, desenhos que aparentam ser equivalentes do ponto de vista de tonelagem total podem produzir respostas mecânicas muito diferentes para engates, longarinas, ACTs e via permanente.

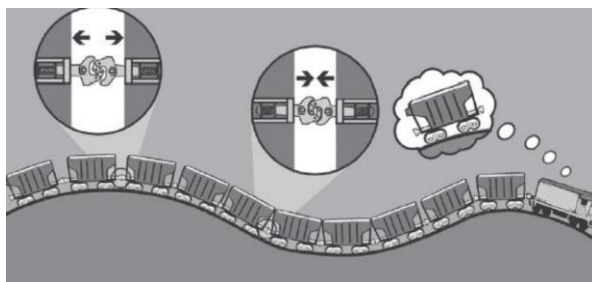


Figura 1. Resposta dos veículos de uma composição ferroviária em função da variação de perfil altimétrico. Fonte: Hungria, 2018.

A literatura sobre very long trains (VLTs) demonstra a importância da potência distribuída, da comunicação confiável entre locomotivas e da validação por simulação, testes estacionários e testes em movimento (SWAMY; BOOTH; PRABHAKARAN, 2024a, 2024b, 2024c; CANTONE, 2022). Entretanto, em aplicações corporativas reais, o problema assume uma camada adicional de complexidade: além do desempenho dinâmico, o desenho precisa respeitar pátios, abastecimento, helper, disponibilidade de frota, carteira atendida, tempos de manobra e aderência ao plano operacional. Assim, a discussão sobre desenhos de trem precisa ser tratada como metodologia de engenharia e governança, e não apenas como escolha isolada de composição.

Este trabalho tem por objetivo descrever uma metodologia técnico-operacional para concepção, validação e padronização de desenhos de trens longos com tração distribuída por blocos, destacando o racional de equacionamento das forças, o critério de posicionamento das locomotivas, o papel das simulações longitudinais e laterais, a validação com instrumentação e o entrosamento entre as áreas envolvidas na homologação. O foco recai especialmente sobre a lógica de 'tricotrolização', entendida aqui como redistribuição estruturada da tração em três blocos (*Distributed Power – DP*), aplicada como referência para expansão de desenhos em diferentes carteiras, conforme figura 2:

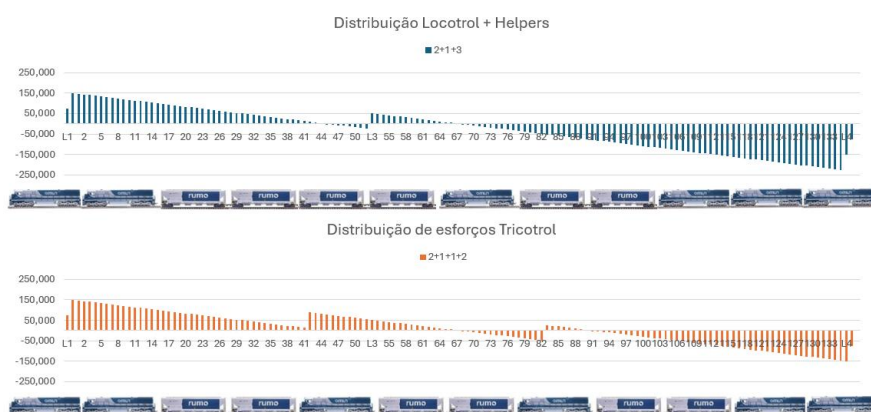


Figura 2. Comparativo de esforços entre distribuição DP Locotrol e Tricotrol. Fonte: Autores, 2026.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Fundamentos de concepção do desenho de trem



A concepção de um desenho de trem longo começa pela definição do problema físico que se deseja resolver. Em regime simplificado, a força líquida disponível para movimentar a composição pode ser escrita conforme equação 1:

$$F_{liq}(t) = \sum T_j(t) - \sum R_i(t) - B(t) \quad (1)$$

$T_j(t)$, $R_i(t)$, $B(t)$ em que $T_j(t)$ representa o esforço trator fornecido pelas locomotivas j , $R_i(t)$ representa as resistências ao movimento dos veículos i e $B(t)$ representa a resultante de frenagem (IKEDA; ESVELT, 2006; SWAMY; BOOTH; PRABHAKARAN, 2024a). Por sua vez, para cada veículo ou bloco, a resistência total é decomposta na equação 2:

$$R_i(t) = R_{rol,i}(v) + R_{rampa,i}(\theta) + R_{curva,i}(k) \quad (2)$$

onde $R_{rol,i}(v)$ é a resistência ao rolamento associada à velocidade, $R_{rampa,i}(\theta)$ é a parcela gravitacional vinculada à inclinação do perfil e $R_{curva,i}(k)$ é a resistência adicional associada à curvatura e às condições de contato roda-trilho (IKEDA; ESVELT, 2006). Em trechos de transição topográfica severa, a soma dessas parcelas varia fortemente ao longo do comprimento do trem, o que torna inadequada uma análise baseada somente no esforço total na cabeça.

Para fins de projeto, o que interessa não é apenas a resultante global, mas a força transmitida em cada região da composição. Em termos conceituais, a força no engate k é a diferença entre a potência inserida a montante e a demanda resistiva acumulada do conjunto correspondente (IKEDA; ESVELT, 2006; COLE et al., 2017; WU; SPIRYAGIN; COLE, 2016). Assim, grandes trechos sem inserção intermediária de tração tendem a desenvolver gradientes acentuados de esforço, com formação de regiões extensas sob compressão em rampas descendentes, especialmente na presença de locomotivas helper ou de mudanças abruptas de perfil. A correlação entre os gradientes elevados de esforço e a variação altimétrica do perfil pode ser observada na Figura 3:

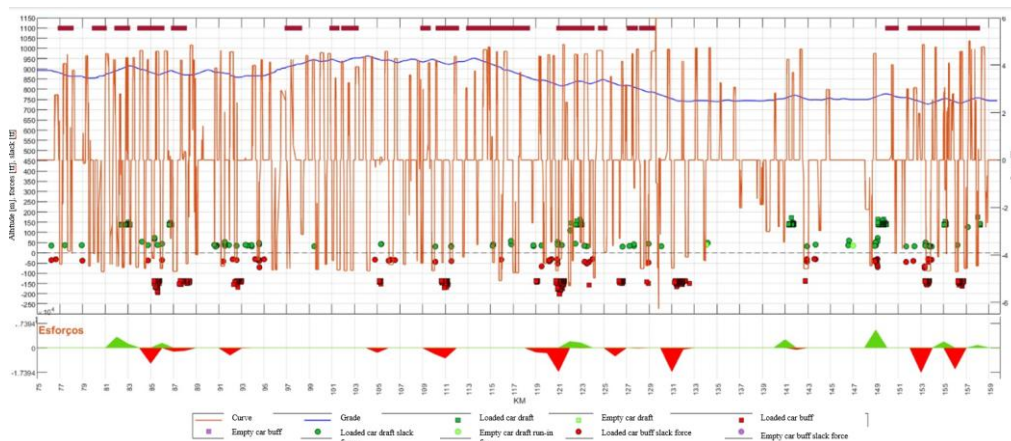


Figura 3. Variação de altimetria (linha azul) e curva (linha laranja) em função da distribuição de esforços de tração (pontos verdes) e compressão (pontos vermelhos) acima de ± 136.000 kgf.

Fonte: Autores, 2026.



A metodologia adota como critério principal de concepção, a minimização do envelope de esforços transmitidos ao longo da composição, e não apenas a garantia de que a tração total seja suficiente para vencer a rampa crítica. Em termos de formulação, busca-se selecionar posições x_j para as locomotivas distribuídas de modo a minimizar $F_{max}|F_{c,k}(t)|$ ao longo do trem, respeitando restrições de operação, frota e infraestrutura. Na prática, isso equivale a inserir potência em pontos capazes de reduzir o gradiente da curva acumulada de esforços, evitando longas zonas sob compressão e mantendo predominância de tração na maior parte da composição. Ao estruturar a composição em blocos, o problema passa a ser tratado de forma espacial: cada bloco possui massa, comprimento, comportamento dinâmico e demanda resistiva próprios; cada locomotiva injeta tração em um ponto específico; e cada fronteira entre blocos passa a ser um local crítico de observação para esforços, choques, curso de ACT e transientes de condução.

2.2. Critério de posicionamento das locomotivas e racional da tração por blocos

O primeiro passo para definição de posicionamento consistiu em mapear o esforço trator contínuo disponível por locomotiva, o comprimento total admissível, a tonelagem de cada carteira (produto, tipo), os trechos com maior demanda de rampa e as restrições reais de circulação, abastecimento e anexação de helpers (locomotivas auxiliares anexadas à composição em trechos curtos específicos). Em seguida, foi construída a distribuição teórica de esforços por veículo para cenários candidatos, comparando desenhos concentrados com alternativas de potência distribuída, seguindo a progressão aritmética da equação 3 para a distribuição de esforço por veículo:

$$vg_n = vg_1 + (n_{vg} - 1) \cdot E_{T_{vg}} \quad (3)$$

A equação 3 serve como fundamento para construção do diagrama que tem por abscissa o número de vagões e por ordenada o esforço trator (kgf). O esforço trator considerado é o máximo conseguido quando a locomotiva está em oitavo ponto e na velocidade mínima contínua. A Figura 4 apresenta um comparativo dos esforços para os trens de açúcar, celulose, líquidos e grãos:

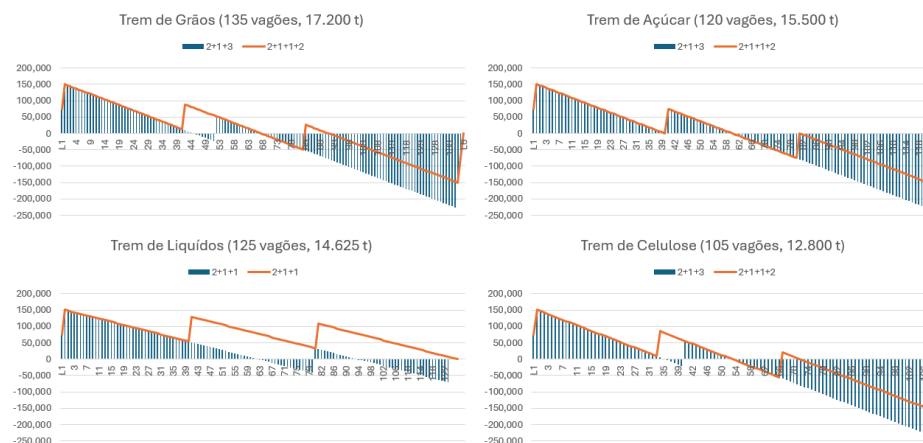


Figura 4. Comparativo de distribuição de esforços para diferentes tipos de trem, para Locotrol convencional (azul) e Tricotrol (laranja). Fonte: Autores, 2026.

No caso do trem granel 135, o desenho convencional 2AC + 53 vagões + 1AC + 82 vagões produzia uma curva de esforços com queda prolongada em direção à cauda, ampliando o número de veículos submetidos à compressão e elevando a criticidade nos trechos de maior demanda. Já a redistribuição 41 + 41 + 53, com tração aplicada em três blocos, introduziu degraus



intermediários de potência capazes de 'rearmar' a curva acumulada de esforços e reduzir a extensão das regiões comprimidas (MOSCIBROCKI et al., 2025). Em termos conceituais, a tricotrolização atua como mecanismo de quebra do gradiente longitudinal, espalhando a inserção de potência de forma mais coerente com a distribuição da resistência ao longo do trem.

O posicionamento das locomotivas passou, portanto, a obedecer aos seguintes critérios combinados: (i) proximidade entre a inserção de tração e os pontos de maior acúmulo de resistência; (ii) redução de trechos longos com resultante próxima de zero ou sob compressão; (iii) limitação dos degraus de potência entre blocos adjacentes; (iv) respeito aos limites estruturais de engates e ACTs; e (v) viabilidade operacional do desenho em pátios, margens, origens, abastecimento e socorro. Esse conjunto de critérios é o que diferencia uma simples divisão geométrica de vagões de uma padronização efetiva por blocos.

2.3. Simulação longitudinal em FTS: variáveis de entrada, cenários e saídas

Após a definição preliminar dos blocos, a metodologia avança para a simulação longitudinal no Freight Train Simulator (FTS), ferramenta utilizada para antecipar o comportamento dinâmico do trem em cenários representativos e limites operacionais, conforme práticas consolidadas de modelagem de dinâmica longitudinal ferroviária (COLE et al., 2017; WU; SPIRYAGIN; COLE, 2016). A modelagem incorpora a composição completa do trem, a massa e o comprimento de cada veículo, a posição exata das locomotivas, as curvas de esforço trator e de freio, os parâmetros relevantes de engate/ACT, os tempos de propagação do freio, o perfil altimétrico do trecho e as regiões críticas de operação.

Além das variáveis do trem, a simulação inclui diferentes regimes de condução: regime permanente em rampa crítica, aceleração, desaceleração, transições de potência, aplicação e liberação de freio e condições operacionais limite, como maior massa e menor velocidade em trechos severos. A análise não se restringe a um único cenário médio; ao contrário, busca construir envelopes de esforço capazes de revelar as condições mais severas a que cada região da composição pode ser submetida.

As principais saídas observadas no FTS são: envelopes de tração e compressão por veículo ou por região do trem; identificação de zonas com tendência a compressão elevada; choques longitudinais; comportamento do ACT; gradientes de velocidade entre blocos; e recomendações preliminares para condução e restrições. Em materiais do projeto, essa etapa foi aplicada em centenas de horas de simulação, servindo como filtro técnico antes da realização de testes de campo. A figura 5 ilustra um exemplo de trem tricotrol simulado no FTS inscrito sob perfil de rampa descendente com aplicação de freio dinâmico:





Figura 5. Interface de simulação no FTS. Fonte: Autores, 2026.

A figura 6 apresenta uma parcela dos resultados de simulação do trem tanqueiro, exemplificando o controle e gestão de esforços, dentro das condições pré-estabelecidas no projeto:

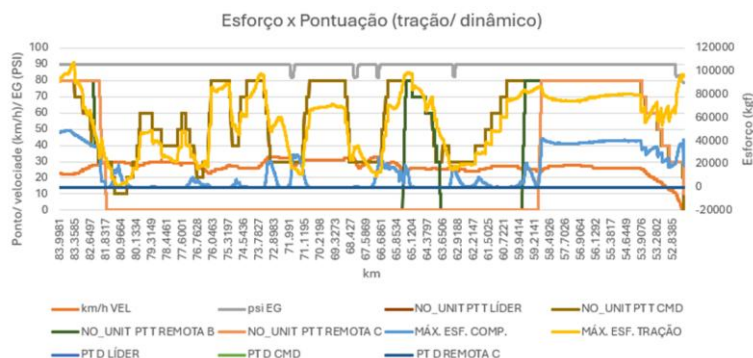


Figura 6. Esforços longitudinais no trem tanqueiro.

Do ponto de vista metodológico, o FTS cumpriu dois papéis complementares. O primeiro foi comparar cenários candidatos de desenho, permitindo selecionar configurações mais promissoras sob o ponto de vista de esforços. O segundo foi apoiar a definição de testes e de condução padrão, direcionando a atenção para trechos, eventos e transientes mais críticos.

2.4. Validação longitudinal com engates instrumentados e telemetria embarcada

As simulações em FTS foram validadas por campanhas com vagões instrumentados e telemetria embarcada, utilizadas para monitorar o comportamento mecânico do sistema de engate e do aparelho de choque e tração sob condições reais de operação. No caso estudado, os vagões instrumentados HPT e HTT foram equipados com extensômetros (SG1, SG2 e SG3), sensor de deslocamento do ACT, medição da pressão do encanamento geral (PEG) e GPS para registro de velocidade, posição, latitude e longitude, conforme Figura 7.

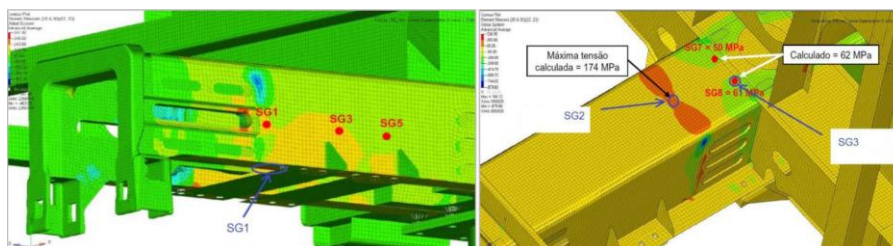


Figura 7. Sensores instalados na longarina e no engate.

A posição desses vagões ao longo da composição foi definida de modo a capturar regiões mais sensíveis do trem, como transições entre blocos, proximidade de locomotivas distribuídas e zonas de maior gradiente de esforço.

Os dados adquiridos refletem o histórico temporal completo da força longitudinal $F(t)$, incluindo Esforços médios associados ao regime de tração e resistência ao movimento; Variações transitórias decorrentes de ajustes de folga, acelerações diferenciais e frenagens; Eventos impulsivos de curta duração, caracterizados como choques longitudinais;

Considerando o objetivo de avaliar impactos altamente influentes na contagem de dano em fadiga, foram aplicados critérios de filtragem que isolam apenas os eventos acima dos parâmetros estabelecidos. Com essa amostragem, é possível identificar diretamente os locais ou



padrões de condução que oferecem potenciais riscos extremos. Foram adotados dois critérios principais de filtragem:

- Eventos de esforço longitudinal elevado: $|F| > 136 \text{ tf}$. Esses eventos representam solicitações acima de um limiar estruturalmente relevante, associado a níveis elevados de tensão nos componentes do sistema de choque e tração.
- Eventos de choque longitudinal: $\Delta F > 30 \text{ tf em } \Delta t < 0,44 \text{ s}$. Esse critério identifica variações impulsivas de força, típicas de choques associados ao fechamento de folgas, saturação do ACT ou eventos operacionais abruptos. A Figura 8 apresenta dados da série temporal de instrumentação de uma viagem completa, indicando pontos de extremo esforço/choque:



Figura 8. Dados da série temporal de instrumentação de uma viagem completa. Fonte: Autores (2026).

Do ponto de vista da metodologia de dano, esses eventos correspondem às faixas superiores do espectro Rainflow, que tendem a dominar o valor do dano acumulado (ASTM INTERNATIONAL, 2017).

Os sinais adquiridos passaram por sincronização temporal, checagem de integridade, tratamento de offsets e padronização de unidades. Com exceção da pressão do encanamento geral, os sinais foram filtrados em passa-baixa de 40 Hz para remoção de ruído de alta frequência sem perda da dinâmica principal dos esforços. A base tratada foi então utilizada para análise estatística, identificação de eventos de choque, classificação de esforços críticos e construção de mapas geográficos e histogramas capazes de indicar onde e com que frequência ocorreram os eventos mais severos ao longo da rota.

A comparação entre teoria e campo não foi conduzida apenas pela conferência de picos isolados, mas pela leitura conjunta de envelopes, amplitudes, frequências e localização dos eventos críticos. Essa abordagem permitiu verificar se a lógica de distribuição de esforços prevista em simulação era reproduzida em operação real, além de fornecer subsídios para ajustes de condução, posicionamento de locomotivas e definição de critérios de aceitação do desenho, conforme Figura 9:

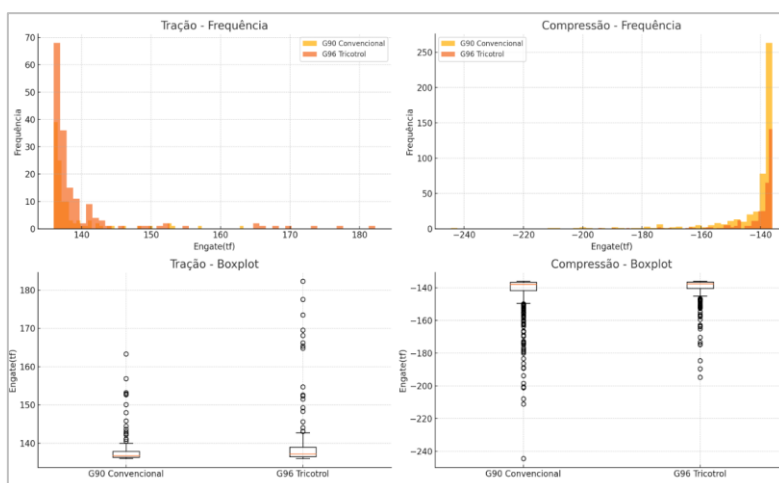




Figura 9. Distribuição dos esforços por faixa e frequência.

Nota-se que a Figura 9 apresenta os resultados das instrumentações obtidas para o Tricotrol, comparando dois trens de granel e enfatizando a amplitude de esforços entre o desenho convencional e o desenho Tricotrol. Como complemento à validação longitudinal, os espectros de força medidos em campo foram utilizados em análises de fadiga dos componentes críticos do vagão. A metodologia partiu da conversão dos históricos de esforço de engate em faixas de tensão representativas da estrutura, seguida da decomposição dos ciclos pelo algoritmo Rainflow e da estimativa do dano acumulado pela regra de Palmgren-Miner, expressa pela Equação 4 (MINER, 1945):

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{N_{fi}} \quad (4)$$

Com isso, tornou-se possível estimar a vida esperada dos componentes em número de ciclos, quilometragem e anos de serviço, considerando não apenas a magnitude máxima dos esforços, mas também sua repetitividade ao longo da operação.

Essa etapa foi decisiva para conectar o desenho do trem à sustentabilidade de manutenção. Ao integrar dados instrumentados, tratamento estatístico e análise de fadiga, a metodologia passou a avaliar não só a resposta instantânea da composição, mas também o impacto acumulado dos carregamentos sobre engates, ACTs e estrutura dos vagões, fortalecendo a validação técnica das configurações propostas.

2.5. Simulação multicorpos em VAMPIRE e análise de esforços laterais

Embora o desenho por blocos tenha sido concebido a partir da dinâmica longitudinal, a metodologia adotada considera que alterações na distribuição de tração também afetam a interação roda-trilho, especialmente em trechos de curvatura fechada e variação topográfica. Por isso, a validação técnica incluiu simulações multicorpos em VAMPIRE para avaliar estabilidade dinâmica e esforços laterais sobre a via.

Os modelos foram alimentados com dados representativos de geometria da via, parâmetros de massa e suspensão dos veículos, condição de carregamento e cenários de velocidade compatíveis com a operação. As principais saídas analisadas foram esforço lateral, razão L/V , descarregamento de roda e indicadores de instabilidade dinâmica, conforme exemplificado na Figura 10, em linha com critérios clássicos de avaliação da estabilidade veículo-via (IKEDA; ESVELT, 2006; KISH; SAMAVEDAM; JEONG, 1985).



IX Simpósio de Engenharia Ferroviária

24 e 25 de junho de 2026 – Campinas/SP

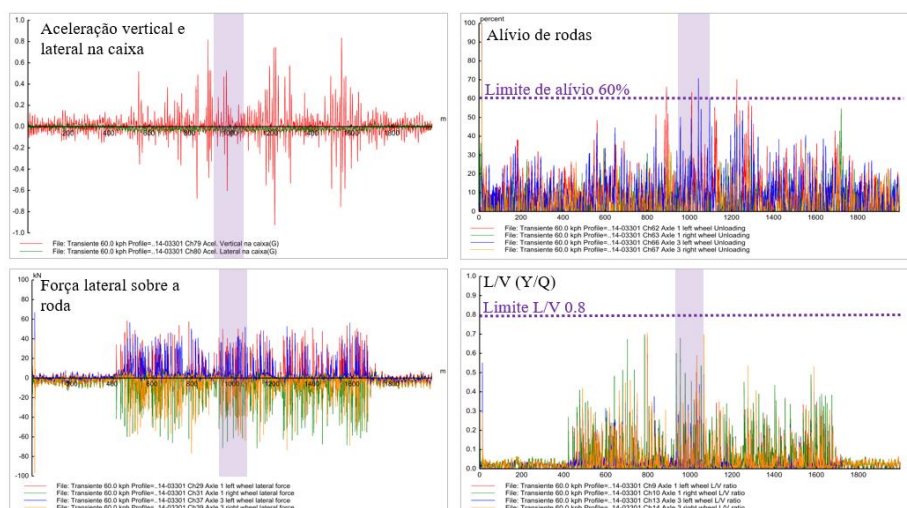


Figura 10. Análise de forças laterais no VAMPIRE. Fonte: Autores, 2026.

Para validar os parâmetros adotados nas simulações, foram conduzidas campanhas complementares de campo com duas frentes de medição: instrumentação de via e rodeiro instrumentado.

A instrumentação de via foi instalada em curva de raio restrito, selecionada por concentrar elevados esforços longitudinais e laterais. O arranjo experimental utilizou extensômetros na alma e no patim do trilho para estimativa dos esforços verticais e laterais, enquanto as características da superestrutura no ponto instrumentado são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características do trecho da via instrumentada. Fonte: Autores, 2026.

Parâmetro	Especificação
Tipo de dormente	Madeira
Raio da curva	212 m
Fixação	Grampo tipo Pandrol e-Clip & Deenik
Perfil do trilho	TR 68
Altura de lastro (aprox.)	32 cm
Espaçamento entre dormentes	54 cm (eixo a eixo)

Após a definição dos parâmetros da Tabela 1, iniciou-se a instalação da instrumentação de via. A Figura 11 apresenta a disposição e o roteamento do cabeamento do sistema de aquisição fixado no trilho; ao centro, o detalhe da instalação dos extensômetros na alma e no patim para a captura de deformações; à direita, o procedimento de calibração em campo das pontes de extensometria, realizado por meio de um aparato com pistões hidráulicos para a aplicação controlada de carga nos dois sentidos transversais.



Figura 11. Instrumentação de via: instalação, extensometria e calibração em campo. Fonte: Autores, 2026.

Durante a campanha de instrumentação, foi conduzido um estudo comparativo entre as formações Locotrol Convencional (2 locomotivas + 52 vagões + 1 locomotiva + 83 vagões + 1 helper) e Tricotrol (2 locomotivas + 41 vagões + 1 locomotiva + 41 vagões + 1 locomotiva + 53 vagões). A avaliação concentrou-se em três métricas principais: esforços laterais, razão L/V e aderência ao critério de Prud'homme.

Os esforços laterais foram utilizados para quantificar a agressão mecânica transferida à superestrutura da via. Já a razão L/V foi empregada como indicador da relação entre as forças laterais e verticais no contato roda-trilho, permitindo avaliar a severidade da interação dinâmica. Como complemento, adotou-se o critério de Prud'homme para verificar a estabilidade lateral da grade de via a partir dos esforços transversais atuantes no rodeiro. Esse critério foi calculado dinamicamente para cada roda no estudo de caso, permitindo comparar a proximidade dos carregamentos observados em relação ao limite de estabilidade lateral. O limite lateral foi calculado conforme a Equação 5, na qual P representa a carga vertical estática do rodeiro e k o fator empírico associado às condições da via e de sua manutenção.

$$L = k \cdot \left(1 + \frac{P}{3}\right) \quad (5)$$

Para o ponto analisado, adotou-se $k = 0,85$, compatível com a condição de manutenção local. A comparação entre as formações foi então realizada a partir dos esforços laterais máximos por veículo e da relação desses valores com o limite dinâmico obtido. Os resultados da via instrumentada evidenciaram redução dos esforços laterais com a configuração Tricotrol, em especial no trilho externo da curva, além de menor incidência de violações ao limite associado ao critério de Prud'homme, conforme ilustrado na Figura 12.

De forma complementar, a avaliação da razão L/V, apresentada na Figura 12, indicou mitigação das solicitações mais severas na interface roda-trilho, reforçando que a redistribuição da tração em três blocos contribuiu não apenas para a dinâmica longitudinal do trem, mas também para a estabilidade lateral do veículo. A instrumentação de via permitiu analisar a passagem de todos os veículos em um ponto específico da malha. Para ampliar a avaliação espacial da interação veículo-via, a metodologia também incorporou medições por meio de rodeiro instrumentado.



Figura 12. Comparativo da razão L/V por veículo entre as formações Locotrol Convencional e Tricotrol. Fonte: Autores, 2026.

O rodeiro instrumentado foi instalado no rodeiro de ataque de um vagão graneleiro HTT, com aquisição contínua de esforços laterais, verticais e razão L/V ao longo da circulação. No



estudo de caso, o vagão instrumentado foi posicionado atrás da segunda locomotiva tanto na composição convencional quanto na configuração Tricotrol. Essa estratégia complementa a leitura pontual obtida na via instrumentada, pois permite observar o comportamento dinâmico do veículo em diferentes condições geométricas e operacionais da malha.

A Figura 13 apresenta as etapas de montagem e aquisição de dados do rodeiro instrumentado no vagão HTT. Da esquerda para a direita: detalhe do sistema de telemetria fixado no rodeiro de ataque; posicionamento da antena GPS na caixa do vagão; processo de calibração do rodeiro instrumentado em laboratório.



Figura 13. Instrumentação do rodeiro instrumentado utilizado na campanha de campo. Fonte: Autores, 2026.

As distribuições estatísticas dos dados coletados foram apresentadas por meio de boxplots, utilizados para comparar os níveis médios e os extremos registrados nas duas formações. Os boxplots de força lateral total indicaram redução expressiva das cargas transversais acumuladas ao longo da viagem na configuração Tricotrol. Para a razão L/V, apresentada na Figura 14, também se observou diminuição dos valores médios e atenuação dos picos de instabilidade, evidenciando melhoria contínua da interação trem-via sob diferentes condições de operação.

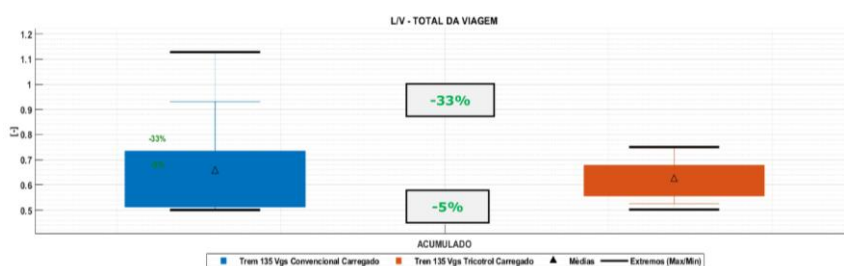


Figura 14. Boxplot da razão L/V acumulada durante a viagem para as formações Convencional e Tricotrol. Fonte: Autores, 2026.

A leitura consolidada dos resultados de simulação e instrumentação indica que as condições mais severas de esforço lateral se concentram em regiões críticas da via e tendem a ser amplificadas em composições com comportamento longitudinal menos equilibrado. Nesse sentido, a tração distribuída em três blocos mostrou potencial para reduzir simultaneamente solicitações longitudinais e transversais.

Assim, a inserção do VAMPIRE na metodologia teve papel decisivo ao impedir que um desenho aparentemente satisfatório sob a ótica longitudinal fosse homologado sem a correspondente verificação de seus efeitos sobre a via permanente e a estabilidade do veículo. A



integração entre FTS, VAMPIRE e dados de campo constitui, portanto, um dos principais diferenciais técnicos do método proposto.

2.6. Testes de engenharia, testes operacionais e governança interáreas

Superada a etapa de modelagem e instrumentação, o método avança por campanhas estruturadas em dois níveis. No primeiro, realizam-se testes de engenharia com foco em envelopes técnicos, manobras controladas e critérios objetivos de interrupção. Nessa fase, o objetivo é confirmar a coerência do comportamento observado com as previsões de simulação e refinar regras preliminares de condução. No segundo nível, são conduzidos testes operacionais, cuja função é demonstrar repetibilidade, aderência ao ambiente real de circulação e compatibilidade com pátios, manobras, janelas de tráfego e rotina dos terminais.

A homologação do desenho exige entrosamento entre Engenharia de Operações, Operação, PCO/CCO, Via Permanente, Engenharia de Vagões, Telecom e áreas de campo. Em termos metodológicos, isso significa que cada campanha produz não só gráficos e tabelas, mas também restrições, condicionantes, lições de condução, critérios de uso de helper, exigências de frota e regras de mudança controlada.

Ao final desse processo, cada desenho é classificado em um gate de maturidade: aprovado, aprovado com restrições ou não recomendado. O produto final não é apenas uma composição desenhada, mas um pacote completo de premissas técnicas, evidências de campo, restrições operacionais e critérios de replicação.

2.7. Síntese metodológica

A Tabela 2 sintetiza o encadeamento da metodologia proposta.

Tabela 2. Síntese metodológica. Fonte: Autores, 2026.

Etapa	Pergunta central	Principais entradas	Saídas esperadas
Concepção física do desenho	Onde inserir tração para equilibrar resistências?	Tonelagem, comprimento, esforço trator, rampas, curvas, restrições operacionais	Cenários candidatos de blocos e posição das locomotivas
Simulação longitudinal - FTS	Como o trem responde em tração, compressão, choque e freio?	Perfil altimétrico, parâmetros do trem, regimes de condução e freio	Envelopes de esforço/choque, zonas críticas, recomendações de condução
Validação longitudinal	A resposta prevista se confirma em campo?	Engates instrumentados, ACT, PEG, telemetria e logs	Comparação teoria x campo, distribuição estatística dos esforços, critérios de aceitação
Simulação lateral - VAMPIRE	O desenho é estável do ponto de vista trem-via?	Geometria da via, parâmetros do veículo, velocidade, carga	L/V, esforço lateral, descarregamento de roda, trechos de atenção
Testes e governança	O desenho é repetível e operacionalmente viável?	Resultados de engenharia, áreas operacionais, restrições de malha	Homologação, restrições, condução padrão e critérios de replicação

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. O ganho técnico da tricotrolização

O principal resultado técnico evidenciado pelos materiais analisados foi a comprovação de que a redistribuição da tração em três blocos altera de maneira estrutural a forma como o



esforço se distribui ao longo do trem. Em vez de uma curva única com queda prolongada em direção à cauda, típica de desenhos mais concentrados, o arranjo em blocos introduz novos patamares de inserção de potência e reduz o comprimento dos trechos submetidos à compressão. Os resultados de instrumentação indicaram menor amplitude de variação nos engates, menor intensidade média e máxima dos esforços e redução da severidade dos transientes. Sob a ótica de manutenção, nota-se um aumento expressivo da vida útil projetada dos componentes quando comparado ao desenho anterior de 135 vagões com distribuição menos equilibrada.

A relevância metodológica desse achado é que a tricotrolização passou a ser tratada como premissa de desenho replicável, e não como solução pontual para um corredor específico. Ou seja, a experiência com o granel 135 constituiu um caso-prova de que o conceito de blocos pode ser expandido para outras carteiras, desde que refeito o equacionamento físico e operacional correspondente.

3.2. Relação entre resultados longitudinais, via permanente e segurança

Outro resultado importante foi a demonstração de que o problema longitudinal e o problema lateral não são independentes. O desenho convencional apresentava além de maior criticidade de tração/compressão, maior severidade nos esforços laterais observados em trechos críticos da via. A avaliação multicorpos e os dados de campo mostraram que reduzir zonas comprimidas e transientes severos também contribui para aliviar solicitações laterais e reduzir a exposição a faixas mais críticas de L/V.

Isso reforça o caráter sistêmico da metodologia: um desenho que aparenta ser atrativo do ponto de vista de produtividade pode transferir custo e risco para vagões, engates, ACTs, grade de via e estabilidade do veículo. A integração FTS + VAMPIRE + instrumentação é justamente o mecanismo utilizado para evitar esse tipo de otimismo local.

3.3. Ganhos associados e desdobramentos para a padronização

Além do ganho técnico direto, os materiais do caso granel apontam efeitos positivos em capacidade, segurança e eficiência. Entre os principais indicadores reportados estão economia da ordem de 3,5% de diesel e aumento substancial da vida útil estimada dos ativos críticos quando comparado ao arranjo base. Observou-se que a vida útil projetada associada ao desenho em três blocos evolui de 11,2 anos para patamares superiores a 20 anos e, em cenários mais favoráveis, para aproximadamente 43 anos.

Os ganhos surgem porque o desenho passou a ser concebido com base em critério físico, verificado por simulação, confrontado com instrumentação e depurado com as áreas operacionais. É essa sequência que transforma um bom resultado pontual em padrão corporativo padronizável. A partir dessa consolidação, o método passou a orientar a exploração de carteiras como combustíveis, celulose e açúcar. Em todas elas, a lógica metodológica é partir do esforço trator e das resistências, construir alternativas por blocos, simular cenários limite, verificar impactos longitudinais e laterais, validar em campo e, só então, definir regras de formação e operação.

3.4. Síntese comparativa entre desenhos convencionais e desenhos por blocos

Tabela 3. Comparativo síntese entre desenhos convencionais e desenhos por blocos. Fonte: Autores, 2026.

Carteira	Desenho convencional / proposta inicial	Desenho por blocos (DP)	Ganhos associados	Pontos de atenção e soluções
----------	---	-------------------------	-------------------	------------------------------



Granel 135 vagões	2 AC + 53 VGS + 1 AC + 82 VGS (+ helpers por trecho).	41 + 41 + 53, com redistribuição de potência em três blocos e helpers apenas onde necessário.	Redução de 11% de PDT, economia aproximada de 3,5% de diesel e aumento relevante de vida útil dos engates/ativos.	Exige governança de condução, sincronismo entre locomotivas e gestão de comunicação/apoio operacional em trechos críticos.
Tanqueiro longo 14.625 TB	[2 AC44] + 45 HTT + [1 AC44] + 80 HTT + [1 AC44].	[2 AC44] + 40 TCT + 40 TCS + [1 AC44] + 45 TCT + [1 AC44 na cauda] no estágio final.	Aumento de volume por viagem e potencial ganho de eficiência energética, com melhor equilíbrio longitudinal e menor criticidade na cauda.	Restrições de vagões manga R/S e manobra/abastecimento em postos de abastecimento.
Açúcar longo 120 vagões	[2 AC44] + 40 HTT + [1 AC44] + 80 HTT + [1 AC44] + [2 AC44] helper.	[2 AC44] + 40 HTT + [1 AC44] + 40 HTT + [1 AC44] + 40 HTT + [2 AC44] helper.	Ganho estimado de cerca de 0,15% em eficiência energética, com redução de faixa no TI e menor exposição a esforços concentrados.	Aumento de frequência e impactos de recebimento no porto exigem coordenação fina de formação e recebimento, sobretudo em pontos de abastecimento.
Celulose	[2 AC44] + 40 FLT + [1 AC44] + 66 FLT + [1 AC44] + [2 AC44] helper.	[2 AC44] + 33 FLT + [1 AC44] + 33 FLT + [1 AC44] + 40 FLT + [2 AC44] helper.	Ganho estimado de cerca de 0,07% em eficiência energética e melhor disponibilidade de faixa, com baixo risco incremental.	Depende de adequações da no porto e acompanhamento das obras/inserções de infraestrutura para capturar o ganho previsto.

3.5. Desafios de manobra, abastecimento e aderência operacional

Sob a ótica metodológica, esse ponto reforça a importância do entrosamento entre engenharias, operação, terminais e manutenção. A homologação evolui para incorporação de tempos e movimentos, restrições físicas, limitações de vagões, condições de recebimento e robustez do processo de campo. É essa integração que transforma um desenho promissor em um desenho replicável. Entre as alternativas possíveis estão: definição de janelas dedicadas, segregação de trilhos de atendimento, revisão do processo de formação por trecho e, quando a logística local justificar, abastecimento por TRR como mitigador para reduzir interferência sobre a manobra principal. Mais do que escolher uma solução única, o método propõe comparar o ganho técnico do desenho com o custo operacional adicional que ele impõe ao corredor.

Esse aspecto ficou evidente no trem de 135 vagões, cuja implementação já nasceu condicionada por ciclo e disponibilidade de locomotivas, carregamento nas origens, descarga no porto e abastecimento em posto intermediário, e reaparece com força no pipeline de 2026 para tanque, açúcar e celulose. No tanqueiro longo, por exemplo, a etapa final com locomotiva na cauda aumenta a robustez do desenho, mas impõe discussão específica sobre estratégia de abastecimento e sobre como evitar que o ganho dinâmico seja perdido por aumento excessivo do tempo de permanência em pátio.

Em vários casos, a restrição dominante passou a ser operacional: pátios com comprimento limite, janelas de abastecimento, tempos de manobra, recebimento em terminal e compatibilidade entre formação teórica e realidade do posto de abastecimento. Assim, o desenho tecnicamente ótimo só é escalável quando também é operacionalmente executável.



4. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou uma metodologia técnico-operacional para concepção, validação e padronização de trens longos com tração distribuída por blocos. O estudo mostrou que a definição do desenho deve considerar, de forma integrada, as forças atuantes na composição, o posicionamento das locomotivas, os esforços longitudinais e laterais, as restrições operacionais e a integridade dos ativos.

No caso dos trens graneleiros de 135 vagões, a tricotrolização demonstrou reduzir regiões críticas sob compressão, melhorar o comportamento dinâmico do trem e gerar ganhos de segurança, vida útil e eficiência. Os resultados também evidenciaram o papel central do FTS e do VAMPIRE na seleção de cenários, definição de testes e validação técnica do arranjo proposto.

As campanhas de instrumentação em campo corroboraram essa abordagem, confirmando a redução dos esforços laterais e a manutenção dos limites de segurança, tanto por meio da instrumentação de via quanto do rodeiro instrumentado. Dessa forma, verificou-se que o arranjo Tricotrol não apenas melhora a dinâmica longitudinal, mas também reduz as agressões mecânicas transmitidas à via, promovendo uma interação trem-via mais segura e estável.

Conclui-se, portanto, que a evolução dos trens longos deve ser tratada como um problema de engenharia de sistemas ferroviários, no qual a padronização por blocos constitui uma base metodológica robusta para expansão a outras carteiras, desde que sustentada por simulação, instrumentação, testes de campo e governança interáreas.

5. REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Resumos: NB-88. Rio de Janeiro, 1987. 3 p.
- ASTM INTERNATIONAL. ASTM E1049-85(2017): Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017. DOI: 10.1520/E1049-85R17.
- CANTONE, L. Simulation of freight trains with up to three traction units in radio communication. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, v. 1214, 012039, 2022. DOI: 10.1088/1757-899X/1214/1/012039.
- COLE, C.; SPIRYAGIN, M.; WU, Q.; SUN, Y. Q. Modelling, simulation and applications of longitudinal train dynamics. Vehicle System Dynamics, v. 55, n. 10, p. 1498-1571, 2017. DOI: 10.1080/00423114.2017.1330484.
- IKEDA, M.; ESVELT, C. A. (Ed.). Handbook of Railway Vehicle Dynamics. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- KISH, A.; SAMAVEDAM, G.; JEONG, D. Y. Influence of vehicle-induced loads on the lateral stability of CWR track. [S.l.]: [s.n.], 1985.
- MINER, M. A. Cumulative damage in fatigue. Journal of Applied Mechanics, v. 12, p. A159-A164, 1945.
- MOSCIBROCKI, C. C. G. T. L.; BUBA, P. G.; LOPES, A.; MOCHIUTTI, B.; HUNGRIA, L. H.; KUBIAK, C. I.; SALOMÃO, M. J. P. Strategy for 17,200-ton train: addressing operational and maintenance challenges. IHHA WCCR, 2025.
- PRUD'HOMME, A. La résistance de la voie aux efforts transversaux exercés par le matériel roulant. Revue Générale des Chemins de Fer, v. 86, p. 1-23, 1967.
- SWAMY, S.; BOOTH, G. F.; PRABHAKARAN, A. Very Long Trains - Phase II: Rack Tests. Washington, DC: U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, 2024a. DOT/FRA/ORD-24/18.
- SWAMY, S.; BOOTH, G. F.; PRABHAKARAN, A. Very Long Trains - Phase III: Stationary Train Tests. Washington, DC: U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, 2024b. DOT/FRA/ORD-24/19.
- SWAMY, S.; BOOTH, G. F.; PRABHAKARAN, A. Very Long Trains - Phase IV: Moving Train Tests. Washington, DC: U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, 2024c. DOT/FRA/ORD-24/20.



WU, Q.; SPIRYAGIN, M.; COLE, C. Longitudinal train dynamics: an overview. *Vehicle System Dynamics*, v. 54, n. 12, p. 1688-1714, 2016. DOI: 10.1080/00423114.2016.1228988.

METHODOLOGY FOR THE CONCEPTION, VALIDATION AND STANDARDIZATION OF VERY LONG TRAIN DESIGNS WITH BLOCK-BASED DISTRIBUTED POWER

ABSTRACT

This paper presents a technical-operational methodology for the conception, validation and standardization of very long train designs with block-based distributed power. The approach assumes that increasing train length and tonnage is sustainable only when the design balances available tractive effort, motion resistances, coupler and track limits, synchronization between distributed locomotives and real operational constraints. The method combines preliminary force balance for traction, grades and curves; longitudinal simulations in FTS to assess draft, buff, shocks and draft gear behavior; multibody simulations in VAMPIRE to evaluate lateral forces, L/V and dynamic stability; field validation using instrumented couplers, onboard telemetry, instrumented track and instrumented wheelset data; and interdepartmental governance to consolidate approval criteria. Application to the 135-car grain train showed that redistributing traction into three blocks reduces long compression zones, improves longitudinal predictability and lowers load severity on couplers and track. The results indicated a 47.5% reduction in coupler-force variation amplitude, a 60% reduction in average and maximum observed forces, increased projected component life and associated gains in fuel efficiency and safety. The study concludes that block-based distributed power is a replicable methodology for different business portfolios, provided that simulation, instrumentation and integrated operational validation support the approval process.

Keywords: Very long trains; Distributed power; Longitudinal dynamics; VAMPIRE; FTS; Block standardization.