



TEORIA DAS FILAS APLICADA AO PLANEJAMENTO DE CIRCULAÇÃO FERROVIÁRIA COM FOCO NA REDUÇÃO DO CONSUMO DE DIESEL NAS OPERAÇÕES

Kalil Mousinho Seba Salomão Sobrinho¹; Paula Juliani de Miranda²

RESUMO:

Este artigo analisa a aplicação da Teoria das Filas ao planejamento da circulação ferroviária, com ênfase na redução do consumo de diesel em operações de carga pesada. Ao modelar trechos críticos como sistemas de espera e serviço, busca-se identificar gargalos operacionais, reduzir tempos de permanência dos trens em pátios e cruzamentos e aumentar a fluidez do tráfego. O estudo foi conduzido em uma ferrovia de carga pesada localizada na região Norte do Brasil, com base em dados operacionais reais e em simulações fundamentadas em modelos de filas. Os resultados indicam que a redução do tempo médio de espera está associada à diminuição do consumo de combustível e à melhoria da eficiência energética. Conclui-se que a abordagem proposta oferece suporte analítico à tomada de decisão e apresenta potencial de aplicação em corredores ferroviários de alta demanda.

Palavras-chave: Teoria das Filas; circulação ferroviária; eficiência energética; consumo de diesel.

ABSTRACT:

This paper examines the application of Queueing Theory to railway traffic planning, with emphasis on reducing diesel consumption in heavy-haul freight operations. By modeling critical railway segments as waiting-and-service systems, the study seeks to identify operational bottlenecks, reduce train dwell times at yards and crossings, and improve traffic flow. The analysis was conducted on a heavy-haul railway located in northern Brazil, using real operational data and simulations based on queueing models. The results indicate that shorter average waiting times are associated with lower fuel consumption and improved energy efficiency. The findings suggest that the proposed approach provides analytical support for decision-making and may be applicable to other high-demand railway corridors.

Keywords: Queueing Theory; railway traffic; energy efficiency; diesel consumption.



1. INTRODUÇÃO

O transporte ferroviário de carga pesada é estratégico para a logística brasileira, sobretudo em corredores das regiões Norte e Nordeste. Nesses ambientes, atrasos, esperas em pátios/cruzamentos e paradas sucessivas elevam o tempo em trânsito e aumentam o consumo específico de diesel, pressionando custos e tornando as operações menos eficientes do ponto de vista energético.

Do ponto de vista operacional, o planejamento de circulação tende a tratar as esperas como inevitáveis, atuando de forma reativa na resolução de conflitos de tráfego. Este trabalho propõe uma abordagem comparativa: (i) a *situação atual*, baseada na série histórica de operação, e (ii) um *cenário de intervenção* em que gargalos são modelados como sistemas de filas para reduzir a probabilidade de congestionamento e, por consequência, diminuir paradas/arrancadas melhorando a eficiência energética das operações.

Do ponto de vista científico, o estudo busca contribuir para a literatura ao aplicar a Teoria das Filas ao planejamento da circulação em um corredor ferroviário de carga pesada, articulando a modelagem de gargalos operacionais com indicadores de fluidez e eficiência energética. Embora existam aplicações da teoria em terminais, linhas e processos de transporte (OLIVEIRA, 2006; JACYNA; ŻAK; GOŁĘBIEWSKI, 2015; WEIK; NIEBEL; NIEßEN, 2016), a conexão entre gestão de filas em trechos críticos de circulação e redução do consumo específico de diesel permanece pouco explorada, especialmente em contextos de alta densidade operacional.

1.1. Estrada de Ferro Carajás

A Estrada de Ferro Carajás (EFC), inaugurada em 1985, conecta por trilhos os estados do Pará e Maranhão com extensão de 892km, escoando principalmente minério de ferro do complexo de Carajás ao Terminal Marítimo de Ponta da Madeira (São Luís/MA). Trata-se de um corredor de alta demanda, com tráfego misto (minério, carga geral e passageiros) e elevado consumo de diesel, o que torna ganhos de fluidez operacional diretamente relevantes para custo, capacidade e sustentabilidade.



1.2. Eficiência Energética

A eficiência energética das ferrovias é medida por um indicador de consumo específico de combustível das locomotivas pela tonelada quilômetro bruta (TKB) transportada no período. Para ferrovia quanto menor o indicador, melhor será a eficiência e o resultado do período medido.

Ao longo dos últimos anos, iniciativas tecnológicas e de processo buscaram reduzir consumo e emissões. Ainda assim, permanece uma oportunidade operacional: reduzir paradas não planejadas e tempos de espera decorrentes de conflitos de tráfego e gargalos. Este artigo foca no mecanismo operacional, por ser de implementação mais rápida e com potencial de impacto direto no consumo específico medido pela EE.

Nesse contexto, entre 2023 e 2024, foi conduzido um estudo que evidenciou o potencial do planejamento da circulação ferroviária com foco em sustentabilidade. Essa abordagem mostrou-se promissora ao contribuir para a meta da companhia de tornar-se referência em mineração sustentável, por meio da descarbonização e da redução do consumo de diesel nas operações, especialmente pela diminuição das paradas não planejadas das composições ao longo das viagens.

No campo da eficiência energética ferroviária, estudos em operações *heavy haul* indicam que variáveis operacionais como número de paradas, quilômetro médio entre paradas (kmep) e perfil de circulação influenciam o consumo específico de diesel (RODRIGUES, 2018). Em particular, evidências empíricas mostram associação entre menos interrupções de movimento e melhora do indicador L/KTKB, reforçando a relevância de intervenções que atuem sobre a fluidez da circulação, e não apenas sobre tecnologia de locomotivas ou renovação de frota (RODRIGUES, 2018).

1.3. Teoria das filas

A Teoria das Filas descreve sistemas em que “clientes” chegam para receber um serviço com capacidade limitada, podendo formar espera quando a demanda supera o atendimento (SINAY, 2005; CORRÊA, 2004). Em ferrovias, essa lógica se aplica a trechos restritivos, como pátios, cruzamentos e zonas de abastecimento, nos quais a fila



IX Simpósio de Engenharia Ferroviária

24 e 25 de junho de 2026 – Campinas/SP

representa trens parados e o serviço representa a liberação do trecho ou a conclusão da atividade operacional (OLIVEIRA, 2006).

Em termos de aplicação, a literatura registra usos da Teoria das Filas em terminais ferroviários, linhas singelas e análises de capacidade, frequentemente em combinação com simulação para estimar atrasos, ocupação e desempenho operacional (OLIVEIRA, 2006; WEIK; NIEBEL; NIEßEN, 2016; EMUNDS; NIEßEN, 2023). Esses estudos demonstram a utilidade da abordagem para apoiar decisões de operação e dimensionamento, mas tendem a privilegiar indicadores de atraso e capacidade, o que reforça a pertinência de investigar seus efeitos sobre indicadores energéticos em ferrovias de carga pesada.

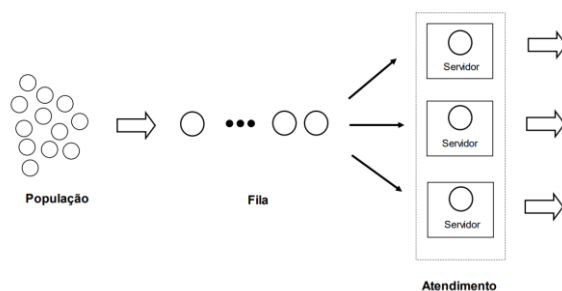


Imagem 01 – Elementos de uma fila
Fonte: Prado (2004)

2. METODOLOGIA

O presente trabalho consiste em um estudo de caso aplicado às operações ferroviárias, estruturado a partir da análise de eventos que provocaram interferências na circulação de trens e contribuíram para desvios em relação ao orçamento de eficiência energética no primeiro semestre de 2024. Adota-se uma abordagem quantitativa, baseada em modelos da Teoria das Filas e a unidade de análise adotada foi a circulação mensal agregada dos trens carregados no trecho selecionado, complementada por séries históricas dos indicadores operacionais do corredor.

Para fins comparativos, definiu-se como período de referência a série entre janeiro de 2023 e julho de 2024, enquanto o período pós-implementação compreendeu setembro a



IX Simpósio de Engenharia Ferroviária

24 e 25 de junho de 2026 – Campinas/SP

dezembro de 2024. Ademais, utilizou-se o intervalo de janeiro a julho de 2025 para verificar a manutenção dos ganhos observados após a adoção da premissa operacional.

A base de dados inclui:

- Tempo em trânsito das composições de minério;
- Quantidade de paradas ao longo do percurso;
- Eficiência energética;

A metodologia está estruturada em quatro etapas principais:

- i. Descrição do sistema ferroviário
- ii. Análise de dados
- iii. Modelagem matemática simplificada
- iv. Simulação de cenários

2.1. Descrição do sistema ferroviário

Foi selecionado um trecho representativo da ferrovia, com aproximadamente 158 km de extensão, caracterizado por operação em linha dupla, proximidade da origem das composições carregadas, presença de infraestrutura para abastecimento das locomotivas no segmento final, conexão com ramal ferroviário em linha singela e elevada densidade de tráfego.

Dentre essas características, cabe destacar o elevado tempo de ocupação do segmento destinado ao abastecimento das locomotivas, localizado na extremidade do trecho analisado e atuando como fronteira com o próximo segmento ferroviário.

No modal ferroviário, a capacidade de transporte é inversamente proporcional ao tempo de ocupação dos segmentos. Nesse contexto, a zona de abastecimento, devido ao seu elevado tempo de permanência dos trens, configura-se como um ponto crítico para a circulação eficiente das composições carregadas uma vez que o trem vazio não abastece durante a viagem.



2.2. Análise de dados

As bases de dados referentes aos tempos mínimo, médio e máximo em trânsito foram examinadas com o objetivo de identificar padrões sazonais e valores atípicos. Em seguida, essas informações foram relacionadas à distância média percorrida entre paradas. Além disso, analisou-se a associação entre a quantidade de paradas e o indicador de eficiência energética no mesmo período.

Para reduzir distorções provocadas por eventos extraordinários, a análise descritiva considerou a inspeção de valores extremos por comparação com o comportamento histórico mensal dos indicadores. Registros associados a ocorrências operacionais excepcionais, sem recorrência no período e sem relação direta com o gargalo estudado, foram tratados como observações não representativas para fins de interpretação comparativa, mantendo-se, contudo, a rastreabilidade da série histórica agregada.

2.3. Modelagem matemática simplificada

Para modelar o sistema de forma objetiva, adotou-se a notação de Kendall (A/B/c/K/Z) e representou-se o trecho crítico como uma rede de filas. Foram utilizados, de forma simplificada, modelos do tipo M/M/1 e M/M/2 para comparar a operação com um servidor (um ponto de atendimento efetivo) *versus* dois servidores (abastecimento simultâneo), analisando principalmente utilização do sistema e probabilidade de congestionamento.

Na parametrização do modelo, a taxa de chegada foi interpretada como a frequência média de ingresso de trens carregados na zona crítica de abastecimento, estimada a partir do histórico operacional do trecho. A taxa de serviço associada ao inverso do tempo médio de atendimento na zona de abastecimento, considerando os cenários com um e dois pontos efetivos de atendimento. A capacidade foi tratada como finita, compatível com a restrição física do sistema observada no trecho, isto é, limitada pelo número de posições operacionais disponíveis e pela possibilidade de retenção de composições antes do atendimento.



2.4. Simulação de cenários

Para o cenário 1, estabeleceu-se a premissa operacional da disponibilidade de apenas 1 servidor durante todo o período do ano; para o cenário 2, considerou-se a disponibilidade de 2 servidores no mesmo período.

A comparação entre os cenários teve caráter analítico-comparativo, com o objetivo de avaliar como alterações na capacidade de atendimento afetam a probabilidade de congestionamento e os indicadores operacionais associados. Não se pretendeu estabelecer uma inferência causal estrita, mas verificar a consistência entre os resultados do modelo simplificado e os efeitos observados após a implementação da premissa operacional no trecho estudado.

3. DESENVOLVIMENTO

3.1. Tempo em trânsito e correlação com o quilômetro médio entre paradas (kmep)

Considerando que trens percorreram a mesma distância em sentidos opostos com velocidades médias substancialmente distintas, investigou-se a existência de associação entre a quantidade de paradas realizadas e o tempo em trânsito, tendo em vista que, para uma distância fixa, a velocidade média varia inversamente com o tempo de percurso.

Para tal, utilizou-se o indicador que mede a relação entre a distância percorrida e a quantidade de paradas/arrancadas realizadas durante seu percurso.

Para esse indicador, a orientação é definida como *quanto maior melhor*, isto é, quanto maior o kmep, menos paradas e arrancadas o trem realizou em seu percurso.

$$\uparrow kmep (km) = \frac{\text{distância percorrida (km)}}{\text{quantidade de arrancadas}}$$

A série histórica do indicador apresentou grande variabilidade e elevada amplitude especialmente quando comparamos os meses de maio de 2023 (52,7km) e março de 2024 (80,6km) – pior e melhor resultados.



IX Simpósio de Engenharia Ferroviária

24 e 25 de junho de 2026 – Campinas/SP

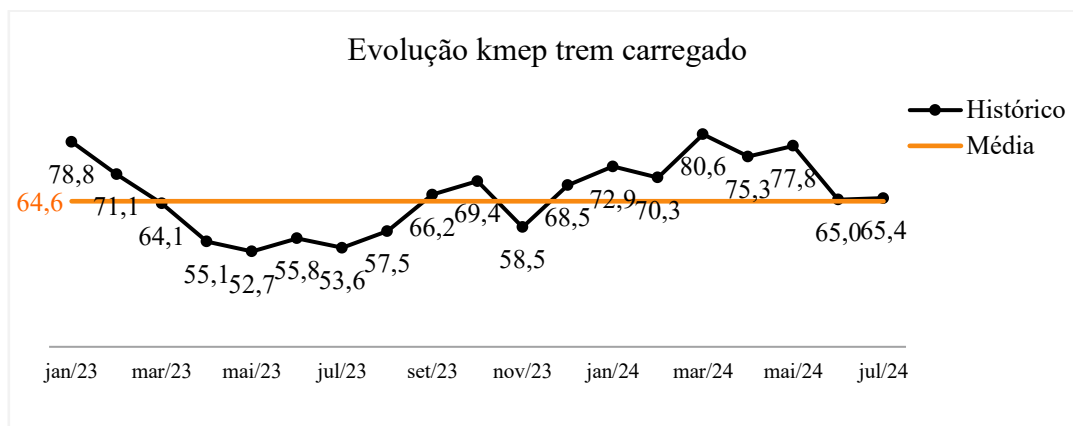


Gráfico 1 – Série histórica kmep
Fonte: GPVFerrovias - Vale S.A.

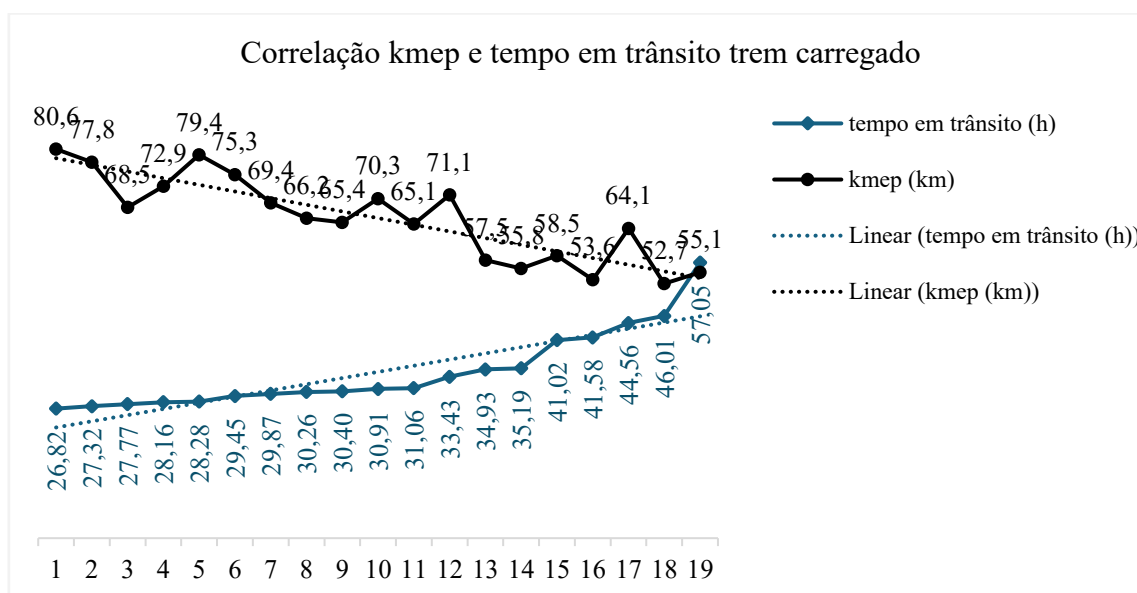


Gráfico 2 – Correlação entre tempo em trânsito e kmep trem carregado
Fonte: GPVFerrovias - Vale S.A.

Ao dispor em rol o tempo em trânsito dos trens carregados associado ao kmep nesse mesmo período, observamos uma clara tendência de diminuição do kmep à medida que o tempo em trânsito aumenta.

Esse comportamento estatístico também encontra respaldo na dinâmica física do deslocamento ferroviário. Durante o deslocamento sobre a via férrea, o veículo ferroviário está sujeito a um conjunto de forças que se opõem constantemente ao seu avanço, dependentes da velocidade de marcha e do traçado da via. Para esse caso, consideramos o trem em movimento.



24 e 25 de junho de 2026 – Campinas/SP

Por outro lado, em caso de retirada da inércia com velocidade igual a 0km/h (trem parado), a força resistente é proporcional ao peso da composição e – especialmente para o trem carregado cujo peso gira em torno de 34mil toneladas – o tempo para atingimento da velocidade máxima autorizada no trecho pode ser consideravelmente elevado implicando em um tempo também elevado para conclusão do percurso.

A correlação estimada entre os indicadores foi de -0,76, caracterizando uma associação inversa e forte. Esse resultado sustenta a hipótese de que a redução de paradas e arrancadas contribui para a diminuição do tempo de circulação e, conseqüentemente, para o aumento da velocidade média, sobretudo no caso de composições cuja retomada de movimento demanda maior tempo.

De forma complementar, sucessivas arrancadas (retirada de inércia) trazem implicações para o consumo de diesel uma vez que o esforço trator observado nos motores de tração – ainda que elétricos – são resultantes da energia química oriunda da queima do combustível no motor a diesel posteriormente transformada em mecânica.

Pelo exposto, é possível inferir que otimizar a circulação dos trens carregados tem potencial relevante de redução de consumo de diesel, contribuindo para a redução de emissão de carbono e custos operacionais.

3.2. Aplicação da teoria das filas no trecho gargalo (Trecho 4)

Nas operações ferroviárias, a formação de filas de trens corresponde ao tempo de espera, também expresso pelo indicador THP (trem-hora parado). A identificação e o tratamento das variáveis que condicionam esse indicador contribuem para a otimização da circulação e para a redução do tempo em trânsito. Nesse contexto, a Teoria das Filas foi empregada como instrumento analítico para caracterizar o comportamento do trecho crítico em estudo.

Pela literatura, considerando a operação com abastecimento simultâneo, a representação do sistema pela notação de Kendall é **M/M/2/K/FCFS**. Para fins comparativos, também se analisa o cenário restrito com apenas um servidor disponível, equivalente a um sistema do tipo **M/M/1**.



IX Simpósio de Engenharia Ferroviária

24 e 25 de junho de 2026 – Campinas/SP

O regime de filas do trecho 4 tem seu padrão de chegada de clientes do tipo estocástico assim como seu padrão de serviço por depender da chegada.

A quantidade de servidores considerada na análise varia entre 1 e 2, conforme o cenário operacional avaliado. Além disso, o sistema tem capacidade finita, ou seja, superada a capacidade da fila, não é possível o ingresso de novos clientes; o regime de atendimento é do tipo FCFS, em que o primeiro a chegar é o primeiro a ser atendido.



Imagem 02 – Unifilar trecho 4

Fonte: O autor

Onde:

Abastecimentos 1 e 2 – são os servidores (fim do trecho 4)

QCA, QSS e QSL origem dos clientes (terminais de carregamento)

←←← trens carregados em fila (trens)

A partir das características observadas, é possível destacar, portanto, alguns fatores que podem potencializar a formação de filas nesse trecho.

- i. **Padrão de chegada.** Como as chegadas são estocásticas, a formação de fila ocorre quando a demanda instantânea supera a capacidade disponível de atendimento. No trecho analisado, isso tende a acontecer quando há dois trens no sistema e um terceiro chega, considerando a disponibilidade máxima de dois servidores.
- ii. **Padrão de serviço.** O tempo de atendimento não depende do número de trens aguardando. Assim, mesmo com aumento da fila, não há aceleração proporcional do processamento, o que limita a capacidade de absorver picos de demanda.
- iii. **Capacidade do sistema.** O principal processo realizado no servidor é o abastecimento das locomotivas, necessário para que o trem prossiga até o porto sem risco de pane seca. Essa capacidade é limitada pela vazão da bomba de abastecimento e pelo tempo de atendimento, impondo um limite físico ao sistema.



3.3. Simulação de cenários

Uma vez conhecido o comportamento da fila de trens no trecho 4, focou-se na medição da probabilidade de congestionamento ou utilização do sistema. Dessa forma, geramos 2 cenários para avaliação.

- Cenário 1: quantidade de servidores igual a 1
- Cenário 2: quantidade de servidores igual a 2

A probabilidade de congestionamento é definida considerando:

$\rho = \frac{\lambda}{c\mu}$ onde, λ é a taxa de chegada, μ a taxa de serviço e c a quantidade de servidores.

Pela notação, temos que $c=2$ (cenário 2), portanto em condições normais: $\rho = \frac{\lambda}{2\mu}$

Caso haja a indisponibilidade de um servidor $c=1$ (cenário 1), a nova probabilidade de congestionamento será: $\rho' = \frac{\lambda}{1\mu}$

Dividindo ρ' por ρ , temos que a probabilidade de congestionamento aumentará em 100% ao reduzirmos de 2 pra 1 servidores.

Do ponto de vista operacional, esse resultado indica que a utilização de 2 servidores simultaneamente constitui uma alavanca relevante para reduzir a probabilidade de formação de filas. Na prática, essa alavanca é conhecida como “abastecimento simultâneo” e implica posicionar 2 trens carregados, ao mesmo tempo, nas 2 linhas disponíveis.

Essa estratégia resulta, no entanto, no bloqueio – ainda que de forma controlada – do tráfego ferroviário naquele segmento enquanto 1 dos 2 trens não concluir e desocupar a zona de abastecimento, ou seja, os trens no sentido contrário, aguardarão que 1 das linhas fique livre para seguir viagem.

Dessa forma, considerando que a duplicação de ferrovia tem como principal objetivo o aumento da capacidade de transporte considerando o cruzamento dinâmico, faz-se necessário que o planejamento de circulação considere uma faixa intermediária (faixa essa que varia entre a utilização de 1 e 2 servidores), controlando a probabilidade de congestionamento em função do volume transportado e demanda horária de trens.

Esse controle garante que o trem no sentido contrário não tenha um tempo de espera elevado em cenários de grande demanda de abastecimentos simultâneos.

Adicionalmente ao estabelecimento da zona de controle, no gráfico abaixo é possível observar que à medida que o volume de transporte aumenta, a probabilidade de congestionamento também aumenta.

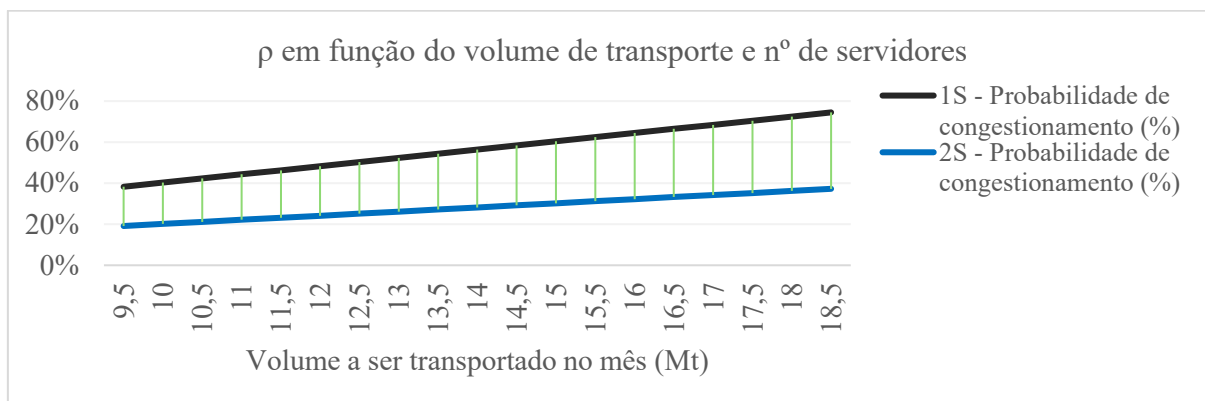


Gráfico 3 – Zona de controle de congestionamento
Fonte: O autor

Estabeleceu-se, portanto, a premissa operacional de abastecimento simultâneo em regime com foco na redução da fila de trens carregados no trecho 4 e consequentemente o atingimento dos seguintes resultados:

- I. Aumento da velocidade média por trecho e total;
- II. Redução no tempo de espera (otimização do tempo em trânsito por trecho e total);
- III. Aumento na distância média entre paradas em km (kmep);
- IV. Redução no consumo de diesel (eficiência energética).

4. RESULTADOS

Os resultados apresentados a seguir comparam a situação de referência (baseline: jan./2023–jul./2024) com o cenário pós-implementação (set.–dez./2024), após a adoção da premissa de controle do gargalo no Trecho 4. A análise busca evidenciar em que medida a redução de esperas e paradas se associou a ganhos de fluidez operacional e eficiência energética.

Para orientar a intervenção, definiu-se um valor de referência para o kmep (80 km), acima do patamar histórico, por sua relação direta com a redução de paradas/arrancadas e, portanto, com a melhoria da Eficiência Energética.

4.1. Aumento da velocidade média e redução do tempo de espera

Constata-se aumento da velocidade média em 6 das 8 segmentações (lotação e trecho). O maior destaque foi o Trem Carregado no Trecho 4, cuja velocidade média passou de 20,94 km/h, na série histórica, para 48,49 km/h no período de verificação entre setembro e dezembro de 2024, um ganho de 132%.



IX Simpósio de Engenharia Ferroviária

24 e 25 de junho de 2026 – Campinas/SP

Em síntese, o cenário pós-implementação elevou a fluidez no Trecho 4 (gargalo) sem degradar o sentido oposto, indicando que o controle do sistema de filas melhorou o desempenho global do corredor.

Convém salientar que, ainda, que esse ganho no fluxo dos trens carregados não trouxe prejuízo ao desempenho dos trens no sentido oposto, nem no próprio trecho 4 nem no trecho adjacente.

Lotação	Trecho	Pré-projeto	Pós- Projeto	Δ
Carregado	Trecho 1	34,78	44,43	28%
	Trecho 2	32,84	39,19	19%
	Trecho 3	23,00	30,86	34%
	Trecho 4	20,94	48,49	132%
Vazio	Trecho 1	33,50	32,99	-2%
	Trecho 2	30,50	28,68	-6%
	Trecho 3	37,45	41,17	10%
	Trecho 4	27,77	46,08	66%

Tabela 01 – Comparativo velocidade média pré e pós projeto
Fonte: O autor

Com o aumento da velocidade média observado é possível afirmar que houve redução no tempo em trânsito dos trens uma vez que não houve alteração na distância dos trechos.

Como efeito adicional, a redução do tempo em trânsito tende a reduzir horas de operação e apoiar a estabilidade da programação, ampliando a capacidade efetiva do sistema.

4.2. Aumento do kmep (quilômetro médio entre paradas)

Durante o período de verificação, para uma meta de 80km obteve-se uma média de 84,35 km, superando em 5,4% a meta estabelecida, em 21% a meta anterior e em 30% a média da *baseline* conforme quadro abaixo.

Média kmep (km)	km	Período de verificação	Δ
Série histórica	64,64	84,35	30%
Meta pré-projeto	70		21%
Meta pós-projeto	80		5%

Tabela 02 – Comparativo kmep pré e pós projeto
Fonte: O autor

No gráfico abaixo é possível observar nítida mudança de patamar do indicador com destaque para redução da amplitude em 45,5% passando de 27,9km na série histórica para 15,2km no período de verificação o que reflete maior estabilidade.

Em dezembro de 2024, o indicador teve o seu melhor valor observado na série histórica alcançando 92,9km superando a meta em 12,9km.



IX Simpósio de Engenharia Ferroviária

24 e 25 de junho de 2026 – Campinas/SP

Evolução kmep Carregado pré e pós projeto ↑

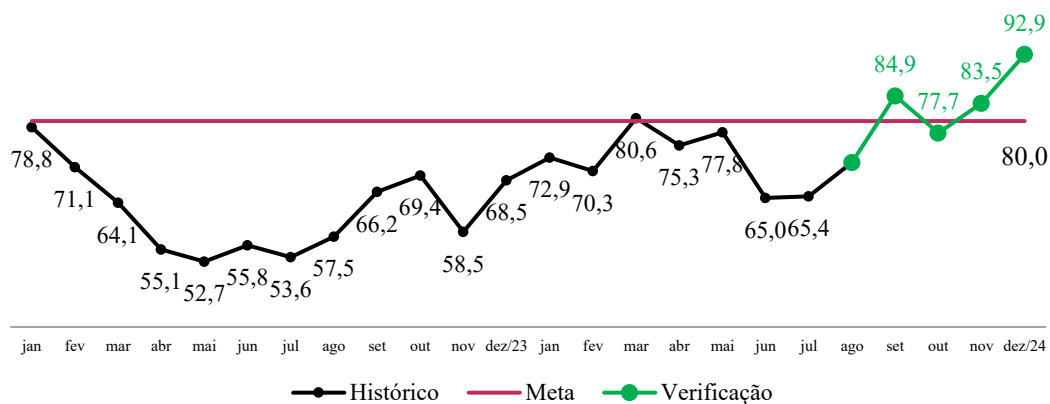


Gráfico 4 – Evolução kmep pré e pós projeto
Fonte: O autor

Ao dispormos em gráfico de frequência é possível observar outro marco alcançado:

- Pré-projeto, apenas 21,4% dos trens alcançaram o kmep de 80km;
- Pós-projeto, 69,7% dos trens alcançaram a meta.

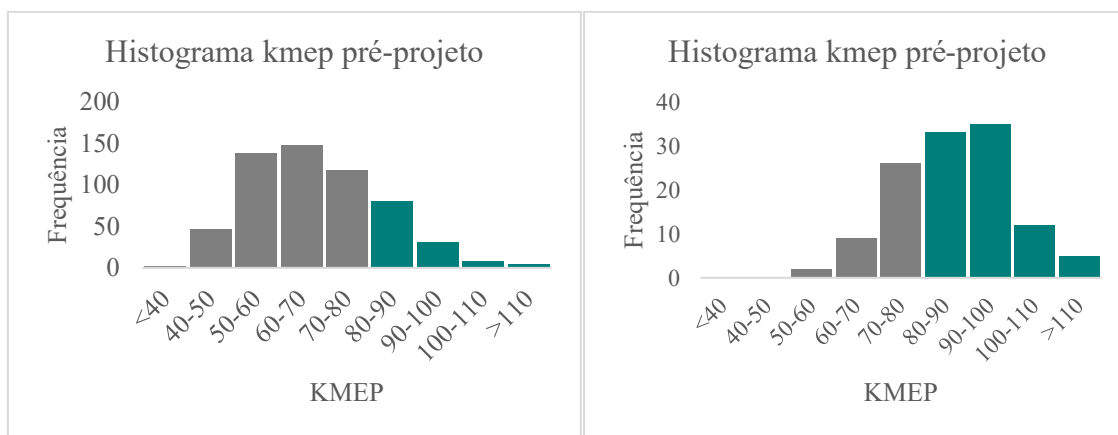


Gráfico 5 – Gráfico de frequência pré e pós projeto
Fonte: O autor

A manutenção da premissa operacional e o monitoramento do indicador nos sete meses posteriores ao período de verificação preservaram os ganhos obtidos, com média de 81,14 km entre janeiro e julho de 2025.

Esse resultado reforça a estabilidade e a repetibilidade da solução adotada.



24 e 25 de junho de 2026 – Campinas/SP

4.3. Eficiência Energética

Uma vez reduzidas as paradas e arrancadas dos trens carregados ao longo do percurso — especialmente nos primeiros 158 km — e considerando a forte correlação entre esse fator e a eficiência energética, avaliou-se o reflexo da intervenção sobre o consumo de diesel por meio do indicador de EE.

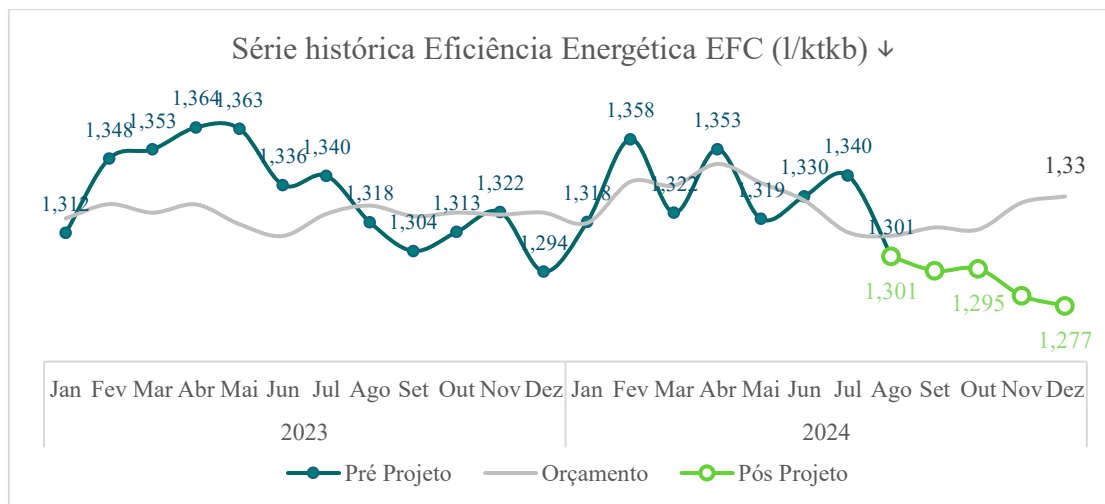


Gráfico 6 – Evolução EE pré e pós projeto
Fonte: O autor

Comparado à baseline, o período pós-implementação apresentou melhora consistente no indicador de EE (menor relação litros/ktkb) ao longo do quadrimestre, revertendo a tendência anterior de desvio e contribuindo para a aderência ao orçamento anual.

Período 2024	Eficiência energética (l/ktkb)	Orçamento período	Δ %	Δ (l/ktkb)
Série histórica	1,334	1,330	0,29%	0,004
Período de verificação	1,287	1,322	-2,61%	-0,035
Realizado	1,312	1,325	-0,98%	-0,013

Tabela 03 – Comparativo EE pré e pós projeto
Fonte: O autor

Observa-se, portanto, que o estudo e suas aplicações contribuíram para atingimento da aderência de aproximadamente 99% da eficiência energética orçada para o período.

4.4. Consolidado

Com base nos resultados apresentados nas seções anteriores, consolidam-se a seguir os principais efeitos diretamente associados à intervenção operacional proposta, com ênfase em fluidez da circulação, desempenho energético e desdobramentos operacionais observados no período analisado.



IX Simpósio de Engenharia Ferroviária

24 e 25 de junho de 2026 – Campinas/SP

Desempenho energético e operacional

- ✓ Economia estimada de 467 mil litros de diesel no período avaliado;
- ✓ Redução estimada das emissões associadas ao consumo de combustível, em consonância com a melhora observada no indicador de eficiência energética;
- ✓ Alcance do melhor resultado histórico do indicador de eficiência energética em 2024 (1,312 L/ktkb).

Efeitos econômicos e de fluidez

- ✓ Economia operacional estimada em R\$ 1,78 milhão, associada principalmente à redução do consumo de diesel;

Tempo em trânsito

- ✓ Redução aproximada de 3 horas no tempo em trânsito dos trens carregados.

Em conjunto, esses resultados indicam que a intervenção proposta não apenas melhorou o desempenho do trecho crítico, mas também produziu efeitos relevantes sobre o consumo energético e a eficiência operacional, reforçando a aplicabilidade da abordagem em contextos ferroviários de elevada densidade de tráfego.

5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos indicam que o tratamento do Trecho 4 como um sistema de filas, em substituição a uma lógica predominantemente reativa de gestão de conflitos de tráfego, permite atuar sobre a causa operacional das esperas e reduzir paradas, arrancadas e consumo não produtivo de diesel.

A comparação entre os períodos pré e pós-implementação evidenciou ganhos consistentes de fluidez, expressos pelo aumento da velocidade média, redução do tempo em trânsito e elevação do kmep, bem como melhoria da eficiência energética e economia relevante de diesel. Considerados em conjunto, os achados apontam que intervenções operacionais orientadas pela Teoria das Filas podem produzir efeitos mensuráveis sobre custo, capacidade, sustentabilidade e estabilidade da circulação ferroviária.

Como contribuição analítica, o estudo demonstra a utilidade da Teoria das Filas como instrumento de apoio ao planejamento da circulação ferroviária em trechos críticos, ao relacionar a gestão de gargalos a indicadores operacionais e energéticos. Embora os resultados decorram de um estudo de caso e devam ser interpretados dentro de suas limitações, a abordagem apresenta potencial de replicação em corredores ferroviários de alta densidade, especialmente quando associada a dados operacionais sistematicamente monitorados.



6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CORRÊA, H. L. *Administração de produção e operações: manufatura e serviços: uma abordagem estratégica*. São Paulo: Atlas, 2004.

PRADO, D. *Teoria das filas e da simulação*. Nova Lima: Falconi, 2004.

OLIVEIRA, G. D. *Análise do desempenho de terminais ferroviários utilizando teoria de filas e simulação de eventos discretos: um estudo de caso na MRS Logística S/A*. 2006. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2006.

SINAY, M. C. F. *Teoria das filas*. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2005. Apostila do Curso de Especialização em Transporte Ferroviário de Cargas.

RODRIGUES, K. P. *Análise de modelos de gestão da eficiência energética no transporte ferroviário heavy haul*. 2018. Dissertação (Mestrado em Energia e Ambiente) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.

WEIK, N.; NIEBEL, N.; NIEßEN, N. Capacity analysis of railway lines in Germany: a rigorous discussion of the queueing-based approach. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, v. 6, n. 2, p. 99-115, 2016.

EMUNDS, T.; NIEßEN, N. To build or not to build: a queueing-based approach to timetable-independent railway junction infrastructure dimensioning. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 2023.

JACYNA, M.; ŻAK, J.; GOŁĘBIEWSKI, P. The use of queueing theory for the analysis of transport processes. *Transport Problems*, v. 10, n. 4, p. 5-16, 2015.