

CATEGORIA 3

REDUÇÃO DA VARIABILIDADE NA OPERAÇÃO DO TREM PARA MELHORAR A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA: UM ESTUDO DE CASO

INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos maiores exportadores de soja do mundo, com a China seu principal destino de exportação (OEC, 2017). Em 2018 exportações atingiram 33 bilhões de dólares, representando 13,8% das exportações totais do país (MDIC, 2019).

No entanto, as atuais condições da infraestrutura brasileira de transporte e logística tem um impacto significativo no fluxo da produção agrícola e dificulta a competitividade. Há uma distribuição inadequada da rede de transporte: 65% da soja é transportada por rodovias, enquanto nos EUA, principal concorrente do Brasil neste mercado, apenas 20%

da produção é transportada por rodovias, com distâncias médias entre regiões produtoras e portos equivalentes, em torno de 1.000 km em ambos os países (CNT, 2015). Além disso, o custo logístico, que no Brasil já está em um nível superior em relação aos seus principais concorrentes, agravou-se com o estabelecimento da tarifa de frete, aprovada pelo Congresso e sancionada pelo governo após a greve do caminhoneiro (CONAB, 2019).

Nesse cenário, uma das alternativas apontadas para o fluxo de longa distância das commodities é aumentar a participação de ferrovias na matriz de transporte de cargas. Um estudo realizado pelo Instituto de pesquisas econômicas aplicadas (IPEA) e pela Fundação Getúlio Vargas (FGV) apontou que o crescimento do país implicará necessariamente no investimento em ferrovias e que há espaço para transferir 40 milhões toneladas de produtos das estradas para as ferrovias. De acordo com o estudo, estima-se uma economia de cerca de 30% nos custos de transporte com a substituição gradual do transporte rodoviário pelo ferroviário (FGV, 2018; SIMEFRE, 2018).

Adicionalmente, o estudo " Transporte & Desenvolvimento: Entraves Logísticos ao escoamento de Soja e Milho.", conduzido pela CNT (2015), que entrevistou os responsáveis pela logística dos maiores exportadores de soja e milho do Brasil, aponta que um dos os estrangulamentos associados ao transporte ferroviário são o valor elevado da tarifa de transporte ferroviário (um problema que é predominantemente grave ou muito grave), indicando que a possibilidade de oferecer tarifas competitivas pela indústria ferroviária enfrenta elevados custos operacionais, especialmente com diesel.

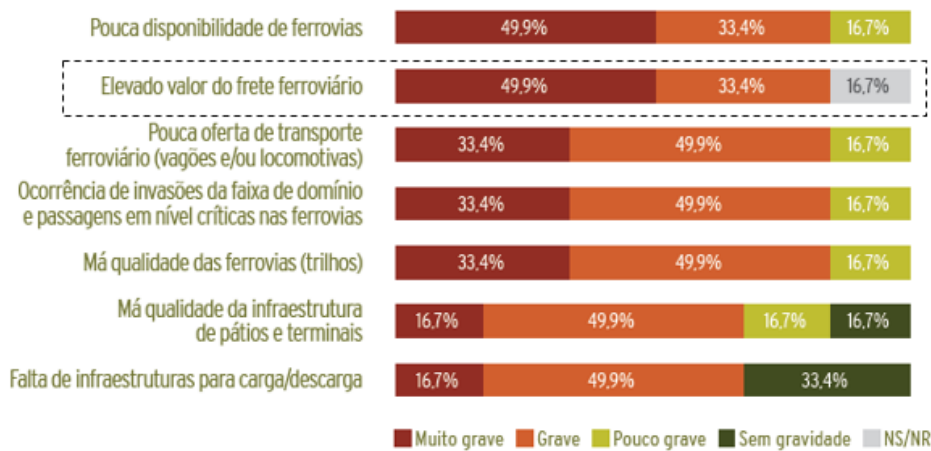


Figura 1 – Avaliação dos problemas associados ao transporte ferroviário pelos embarcadores entrevistados (Fonte: CNT, 2015)

Para aumentar a participação neste Mercado, as empresas estão se mobilizando, utilizando a intermodalidade (para resolver a falta de capilaridade das ferrovias) e focando no aumento da produtividade (para reduzir os custos operacionais), enquanto investimentos em infraestrutura não são colocados em prática pelo Governo. Este é o caso da VLI, uma companhia de solução de logística integrada que conecta ferrovias, portos e terminais intermodais em dez diferentes estados brasileiros, que transporta grãos, fertilizantes, açúcar, produtos siderúrgicos, combustível, biocombustível e minério de ferro.

O combustível é um dos maiores custos da empresa em ferrovias administradas pela VLI (Ferrovia Centro-Atlântica - FCA e Ferrovia Norte-Sul - FNS). Assim, as reduções nessa linha contribuem para a redução dos custos totais e aumentam a competitividade, uma vez que uma melhor tarifa de frete pode ser fornecida aos clientes.

Um dos indicadores utilizados para medir a produtividade de uma ferrovia relativa ao consumo de combustível é a Eficiência Energética, medida em litros consumidos por tonelada quilometro bruto (L/KTKB). Embora, em conjunto, FCA e FNS tenham melhorado 26% nos últimos 7 anos, as concessões administradas pela VLI, comparada com as ferrovias americanas, não são consideradas referência neste assunto, indicando que ainda existe espaço para melhoria.

Avaliando as melhoras práticas de ferrovias nacionais e internacionais, existem diversas ações que podem ajudar a reduzir o consumo de combustível, desde a melhorias no material rodante, até mudanças no planejamento e operação de trens. Muitas ações já foram implantadas (ou estão em implantação) pela VLI, como renovação da frota de locomotivas por modelos mais econômicos. Entretanto, percebe-se que na área operacional (especificamente na de operação de trens) existem oportunidades que podem ser melhor exploradas.

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a operação atual do maquinista da VLI para identificar oportunidades de redução no consumo de combustível de locomotivas. A hipótese é que a operação atual varia muito entre os maquinistas e a redução dessa variabilidade pode levar a um grande impacto no consumo de combustível nas ferrovias operadas pela companhia.

Para tanto, serão analisados dados históricos de maquinistas para investigar algumas questões (por exemplo, “A experiência ou treinamento do maquinista ou o tipo de locomotiva utilizada no trem influencia no consumo de combustível?”). Com base nos resultados dos testes de hipóteses, os segmentos com alta variabilidade na operação de

trens serão selecionados e para eles será estimado um potencial de redução no consumo de combustível.

Melhores práticas aplicadas por outras ferrovias serão avaliadas e sugeridas para sustentarem a redução da variabilidade na operação de trens. Adicionalmente, uma avaliação financeira para uma rota específica será fornecida.

É importante mencionar que este trabalho não tem a intenção de avaliar todas as rotas de transporte da VLI, mas alguns segmentos representativos para propor alternativas para melhorar o consumo de combustível de trens.

Este estudo é relevante porque os custos com combustível são um dos maiores custos da VLI e a melhoria da eficiência energética dos trens tem grande potencial para refletir nos preços finais ao consumidor, ajudando o Brasil a ser mais competitivo (principalmente no mercado de grãos estrangeiros, que é um dos bens com maior volume de carga transportada pela VLI). Além disso, ajudará a reduzir as emissões de CO₂, já que o transporte ferroviário é mais econômico e ambientalmente sustentável.

MELHORES PRÁTICAS PARA REDUZIR O CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

MELHORES PRÁTICAS GERAIS APLICADAS PELAS FERROVIAS

As ferrovias de carga geral dos EUA implementaram na última década uma ampla gama de novas tecnologias e estratégias para reduzir o consumo e as emissões, com ganhos econômicos substanciais (BRETCHER; SPOSATO KENNEDY, 2014).

No resumo da AAR (2019), existe uma lista das estratégias mais eficazes para as ferrovias de carga para melhorar a eficiência energética e reduzir as emissões de gases com efeito de estufa:

- Modernização ou renovação de frotas de locomotivas e vagões (por exemplo, por meio de redução de massa, formas aerodinâmicas, motores mais eficientes);
- Redução do tempo do motor em marcha lenta através "Stop-Start" (AESS) e outros upgrades de equipamentos (por exemplo, unidades auxiliares de energia);
- Treinamentos de maquinistas em avançados sistemas de controle de motor para economizar combustível e incentivos de desempenho para a conservação de combustível;
- Desenvolvimento e implementação de sistemas avançados de software para eficiente despacho e controle de tráfego, otimização da condução de trens, monitoramento e controle das operações de locomotivas;
- Implantação de novas tecnologias e mudanças operacionais: uso de lubrificantes *Top-of-Rail* (TOR) para reduzir o atrito entre roda e trilho, uso de aditivos de combustível para maior combustão, expansão de potência distribuída (DP), adoção de freios eletropneumáticos (ECP), uso de truques de menor resistência, etc.

As ferrovias brasileiras (principalmente EFC, EFVM, MRS, Rumo e VLI) também implementaram muitas dessas melhores práticas acima mencionadas, entre as quais a renovação da frota, AESS, carros leves, lubrificantes TOR, trens com tração distribuída e

treinamento de maquinista. Mais recentemente, sistemas assistentes de condução de trens estão sendo instalados em locomotivas da Vale (GHELERE; PARREIRA, 2017), MRS (MRS, 2018) e Rumo.

Muitas outras opções para melhorias no sistema ferroviário foram descritas por diferentes autores como oportunidades para a reduzir o consumo de combustível (por exemplo, combustíveis alternativos; unidades híbridas, incluindo: elétrica/diesel, diesel/bateria com regeneração para regarregar a bateria e outros dispositivos de armazenamento a bordo para assistência de energia; aditivos de combustível que reduzem as emissões e melhoram a queima de combustível) (STODOLSKY, 2002; FRA, 2009, VANTUONO, 2011). No entanto, este documento centrou-se principalmente em oportunidades relacionadas às melhores práticas de operações de trem, que serão detalhadas nas subseções a seguir.

MELHORES PRÁTICAS VOLTADAS À OPERAÇÃO DE TRENS

De maneira geral, as melhores práticas podem ser classificadas em cinco grandes assuntos: estratégias de condução, treinamento de condução econômica, sistemas de gestão de combustível, gestão da composição/trem e integração (sistemas de gestão do tráfego e sistemas assistentes de condução).

- **Estratégias de condução:** Ghelere e Parreira (2017) mencionaram algumas estratégias de condução que podem ser usadas para reduzir o consumo de combustível, como a elaboração de procedimentos operacionais com a forma

mais econômica e produtiva de conduzir os trens que os maquinistas devem cumprir.

Operar em velocidades mais baixas e restringir o uso do acelerador são outras alternativas. Simulações indicam economias de combustível potenciais de até 8% para limitação do uso do acelerador e de até 11% para redução de velocidade. No entanto, este aumento no tempo de viagem pode acarretar em problemas no atendimento do nível de serviço com os clientes (EEX, 2019).

A Union Pacific implementou o programa de “Conservation Speed 50”, com tipos de tarefas que não são críticas no tempo em que as velocidades médias poderiam ser reduzidas (por exemplo, transportar vagões/contêineres vazios). A análise mostrou que este programa não reduziu o tempo de trânsito global (FRA, 2009).

- **Treinamento de condução econômica:** Esta é uma estratégia que pode ser implementada prontamente e a baixo custo. Tendo em mente que o comportamento de condução afeta significativamente o consumo de combustível, ferrovias americanas classe I estão investindo em treinamento de condução econômica para seus funcionários, que inclui:
 - Treinamento em melhores práticas para operação de locomotivas (utilizando simuladores como auxiliar de treinamento e técnicas de ensino para reduzir o consumo de combustível, como reduzir a marcha lenta e diminuir a velocidade máxima) (FRA, 2009);

- Acompanhamento do desempenho do operador (BNSF compara a eficiência de cada maquinista contra o seu desempenho passado, UP compara através de condições de circulação semelhantes);
- Fornecer incentivos e premiar os esforços dos empregados para economizar combustível (por exemplo, o programa *Union Pacific Fuel Masters* e o MVP de combustível da BNSF). (FRA, 2009).

O sucesso desses programas mostra que os funcionários treinados em eficiência de combustível podem reduzir os custos operacionais dentro de alguns anos após a implementação (a redução do consumo de combustível é estimada em 5% dentro de quatro anos na UP) (FRA, 2009).

- **Sistemas de gestão de combustível / Sistemas assistentes de condução:** Uma operação eficiente e segura do trem depende de diversos fatores e o ser humano é um dos mais críticos, visto que deve considerar diversas variáveis externas. Uma consequência é que o uso de combustível na mesma rota pode variar entre as tripulações em 12 – 20%, de acordo com estudos das ferrovias Union Pacific e Burlington Northern Santa Fe (STODOLSKY, 2002). As variações do trem e do condutor resultam em uso de combustível pior que o ideal, emissões mais elevadas, variações do tempo de viagem e desgastes (GE, 2017).

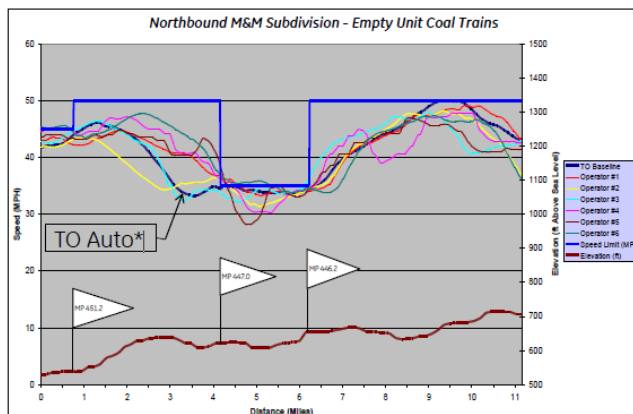


Figura 2 – Variabilidade da operação de trens entre maquinisas (Source: ELDREDGE, 2017)

O uso da tecnologia certa pode fornecer assistência valiosa na condução de trens (LUSTIG, 2007) e muitas ferrovias estão investindo em sistemas computadorizados avançados, conhecidos como sistemas de gerenciamento de combustível (ou sistemas assistentes de condução), para melhorar a eficiência no consumo de combustível. Atualmente há diversos produtos disponíveis no mercado e a melhoria varia (pode ser até 14% dependendo da rota) (AAR, 2019).

Eles são sistemas inteligentes, totalmente integrados nas locomotivas, usados para aproximar a operação de condução de trens da *Golden Run* (viagem com a combinação ideal de economia de combustível, esforços intra-trem bem gerenciados e conformidade com parâmetros e regras operacionais).

Com base em inúmeras variáveis, incluindo topografia, curvatura de via, peso e comprimento do trem e até mesmo efeito de vento, eles calculam um plano de condução otimizado (ou seja, atendendo o tempo de viagem e consumindo o combustível tão pouco quanto possível, sem desrespeitar restrições operacionais-com segurança).

O controle da operação para seguir o plano ideal pode ser manual (realizado pelo operador) ou automático (realizado pelo sistema). Dependendo do modo de controle, o sistema terá uma denominação diferente: Advisor (quando fornece as recomendações de onde aplicar/liberar os freios e lidar com o acelerador, com o maquinista tendo a tarefa de seguir o que foi proposto (ou não)); Semi-autônomo (quando a atuação do plano de viagem é parcialmente automática, ou seja, de apenas certas funções e/ou em regiões específicas) e Autônomo (quando o controle da operação do trem é 100% automático, sem a necessidade de intervenção do operador dentro da cabine locomotiva).

Independentemente do modo de controle, o andamento da jornada é continuamente monitorado e comparado ao plano de viagem, gerando recomendações para o operador de trem ou agindo efetivamente quando a operação não corresponde às normas pré-estabelecidas. O posicionamento do trem e as recomendações ideais do plano de viagem são exibidas no monitor de interface na cabine da locomotiva.

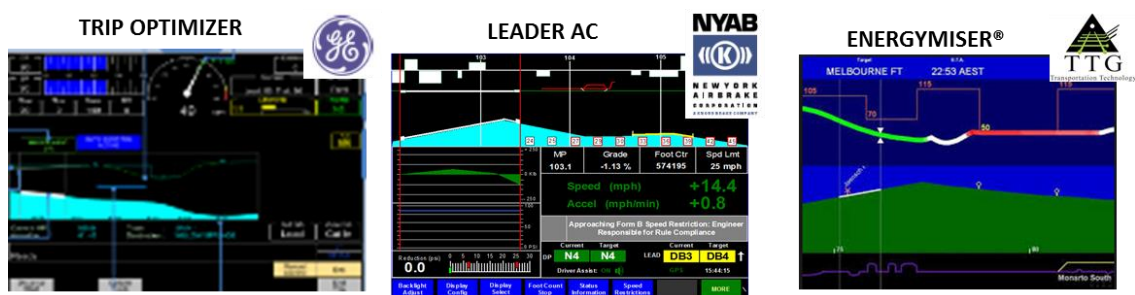


Figura 3 – Exemplo de telas na cabine da locomotiva

Os benefícios mais comumente atribuídos a esses sistemas são a redução sustentável do consumo de combustível (e as emissões de dióxido de carbono), a eficiência na operação de trens, o gerenciamento do tempo de viagem, a redução do desgaste do material rodante e a segurança na operação (LUSTIG, 2007; HOUPY et al., 2009; PUDNEY & COLEMAN, 2005; GHYS, 2016).

- **Gestão da composição:** Consiste na manipulação de comprimento do trem, da quantidade e posição de vagões e locomotivas com base na velocidade de operação, tonelagem e perfil de via.

O sistema ajusta cada locomotiva do trem de forma individual para melhorar a economia de combustível total e para reduzir emissões, de forma a conseguir o esforço trator e potência exigidos para a movimentação do trem.

Exemplos de produtos comerciais são Progress Rail Smartconsist™, que promete um adicional de 1 a 3 % de economia de combustível (RAEDER, 2013), e GE Transportation SmartHPT, com uma economia de combustível incremental de 5-8% aos trens com o sistema assistente de condução *Trip Optimizer* (WABTEC, 2018).

- **Integração (sistemas de gestão do tráfego e sistemas assistentes de condução):** Esta é uma evolução quando um sistema assistente de condução está disponível. Trata-se da integração entre dois sistemas: sistema de gestão de tráfego (TMS), usado geralmente por controladores/despachadores no centro de controle operacional (CCO) e sistema assistente de condução, que está disponível na cabine da locomotiva. O consumo de combustível pode ser minimizado escolhendo rotas

eficientes em termos energéticos, cronogramas e perfis de velocidade que melhoram a regularidade, evitando paradas não planejadas e minimizando acelerações por etapas.

AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DAS MELHORES PRÁTICAS AO AMBIENTE VLI

▪ Visão Geral da VLI

A VLI é uma empresa de soluções logísticas integradas, conectando ferrovias, portos e terminais intermodais em dez diferentes estados brasileiros. Com mais de 7.500 funcionários, opera uma frota de aproximadamente 700 locomotivas e 24.000 vagões ferroviários, através dos quais transporta grãos, fertilizantes, açúcar, produtos siderúrgicos, combustíveis, biocombustíveis e minério de ferro.

Há cinco grandes corredores logísticos cobrindo as regiões mais importantes do país: Centro-Norte (inclui terminais de integração Porto Nacional e Palmeirante e a ferrovia FNS), Centro-Sudeste (inclui Uberaba, Guará e Tiplam integrando terminais e ferrovia FCA), Centro-Leste (inclui os terminais de integração de Araguari e Pirapora e ferrovia FCA), Minas-Rio (ferrovia FCA) e Minas-Bahia (ferrovia FCA).

▪ Melhores práticas já implementadas e oportunidades

Comparando-se com as melhores práticas apresentadas nas seções anteriores, algumas iniciativas já foram estabelecidas na VLI, outras ainda estão em testes. A maior parte dos investimentos foi aplicada nos três principais corredores: Centro-Norte, Centro-Sudeste e Centro-Leste, que concentram a maior parte do volume transportado. Exemplos são a

renovação da frota (VLI adquiriu 270 novas locomotivas DC e AC entre 2012-2018), instalação de novas tecnologias para locomotivas (AESS), gerenciamento de contato roda/trilho (incluindo TOR, lubrificadores ferroviários, esmerilhamento de trilho, truques de melhor desempenho, etc) e expansão do uso de trens com tração distribuída.

Os maiores ganhos de eficiência de combustível até à data são principalmente devido à modernização da frota e à adoção de trens com tração distribuída.



Figura 4 – Melhoria da Eficiência Energética da FCA e da FNS

Em relação às melhores práticas voltadas à condução de trens, estratégias de condução como procedimentos operacionais são usados em poucas rotas, geralmente para os principais tipos de trens. Uma vez que o procedimento é desenvolvido considerando um trem padrão e os trens reais podem variar, por vezes, a tonelage transportada, as orientações têm de ser ajustadas em tempo real. Operação em velocidades mais baixas e restrição do uso do acelerador foram usados há alguns anos, mas não são mais utilizados na VLI.

Os treinamentos usando simuladores de trem (chamado internamente operação de trem – módulos 1 e 2) foram retomados no 2º semestre de 2018. Mesmo com poucos

simuladores (apenas dois), o treinamento é focado bem mais em operação segura e menos em técnicas de condução econômica (embora muitos conceitos de operação segura possam também ter impactos positivos sobre o consumo de combustível). Atualmente está em elaboração um treinamento específico com foco em condução econômica e a expectativa é iniciar as primeiras aulas neste 2º semestre de 2019.

Para monitorar o desempenho do operador são utilizados dados do registrador de eventos (mas é uma análise a posteriori, uma vez que os dados de viagem são baixados manualmente). Na atualidade nenhuma avaliação de desempenho é feita no formato do programa de combustível, embora muitos parâmetros relacionados à condução de trens possam ser medidos (como o isolamento locomotor em alguns segmentos específicos). Como muitas práticas operacionais não são usadas, acredita-se que a variabilidade entre os operadores é muito alta.

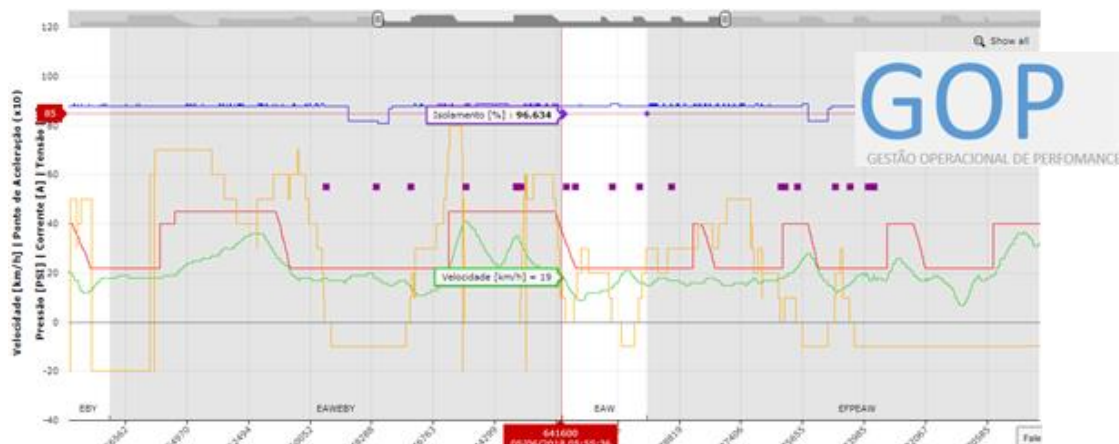


Figura 5 – Exemplo de análise de dados de registrador de eventos

Sistemas assistentes de condução ainda não são usados, embora tenham sido estudados há alguns anos. A VLI tentou desenvolver internamente uma funcionalidade no

computador de bordo (OBC) da locomotiva, chamado Golden Run, que indica a eficiência de combustível alvo e a real medida para cada segmento. No entanto, ela não foi bem aceita pelos maquinistas, uma vez que o alvo foi baseado em uma viagem padrão ideal e maquinistas não têm qualquer assistência durante a viagem sobre como melhorar a sua condução.

Gestão da composição e integração de sistemas (sistema de gestão de tráfego integrado ao sistema assistente de condução) são uma espécie de evolução após a implementação do sistema assistente de condução. VLI ainda não usa ambos.

Concluindo, considerando as cinco melhores práticas relacionadas à operação de trens, há uma grande oportunidade para a VLI reduzir o consumo de combustível, melhorando as estratégias de condução e o treinamento de condução econômica (uma prática recomendada de baixo custo que pode ser implementada prontamente). Para as demais práticas, elas são novos conceitos para a VLI e, uma vez que envolvem uma quantidade considerável de investimento, uma análise de viabilidade deve ser realizada para verificar se eles têm um retorno positivo sobre o investimento. Do ponto de vista técnico, os sistemas assistentes de condução são um conceito comprovado que realmente refinam a operação do trem e reduzem o consumo de combustível, sendo considerados o primeiro passo para uma gestão completa (incluindo a gestão do trem e integração com sistema de gestão de tráfego).

MÉTODO E RESULTADOS

CONSIDERAÇÕES

O consumo de combustível dos trens pode ser influenciado por diversas variáveis. Desta forma, a base de dados de condução dos condutores foi limitada para permitir comparações em situações semelhantes conforme alguns pressupostos listados abaixo:

- O trecho considerado nesse trabalho será o de ZGU (Guará) até a ZOP (Paulínia), mas os ganhos serão projetados no caminho ZZB (TIUB) até ZOP devido à similaridade do perfil da ferrovia. Isso foi feito para simplificar a análise de dados.
- Os dados dos trens que tiveram alguma parada em uma seção de bloqueio (SB) serão desconsiderados pelo fato de que o consumo cresce em momentos de saída da situação de inércia (arrancada);
- A comparação será feita entre trens com o mesmo tipo de locomotivas SD70 e GT46, as quais representam a maior frota do corredor;
- As amostras de consumo de combustível foram extraídas das locomotivas da OBC;
- Somente trens carregados serão considerados;
- Os dados foram coletados de dezembro / 2018 a março / 2019.

ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Para determinar os ganhos do projeto, foram necessárias análises estatísticas mais profundas, verificando alguns possíveis fatores que poderiam influenciar o consumo de diesel dos trens.

Para minimizar o risco de falha na análise, testes de hipóteses foram usados com 95% de confiabilidade, já que a utilização de uma simples comparação entre médias geraria uma análise superficial o que poderia aumentar a chance de erros.

▪ Influência do modelo de trem no desvio padrão do consumo de combustível:

A primeira verificação realizada no conjunto de dados foi relacionada ao tipo de locomotiva e modelo de trem. É normal que com a mudança do modelo de trem, o consumo médio e a variação desse consumo sejam diferentes. No entanto, a proporcionalidade entre o desvio padrão e a média, também chamado de coeficiente de variação (CV), deve ser semelhante, mesmo em modelos diferentes. Como referência, um bom valor deste CV é inferior a 10%.

Para cada modelo de trem, a média e desvio padrão de cada SB foram definidas e, em seguida, o coeficiente de variação foi calculado. Ao final, todos os 37 coeficientes foram plotados no Minitab e as estatísticas descritivas foram geradas, evidenciando que a variação no consumo dos trens com GT46 e SD70 tem uma diferença: os modelos de trem com GT46 tendem a ter um CV maior que os trens com SD70.

Para confirmar essa diferença, foi realizado o teste t-student, alcançando um p-valor equivalente a 0,032 ($<0,05$), ou seja, podemos concluir que o coeficiente de variação do consumo de GT46 é maior que o da SD70 ao nível de 95% de significância.

Assim, o tipo de locomotiva interfere na média de consumo e na magnitude da variância, uma vez que o coeficiente de variação e, portanto, o desvio padrão, não varia proporcionalmente a essa média. Uma força-tarefa integrando a manutenção e a operação deve ser feita para descobrir porque o GT46 tem uma variação maior, e isso será considerado um ponto extra deste trabalho.

A partir desse ponto, a análise será focada nos trens com a locomotiva SD70 devido a sua maior quantidade.

- Influência da experiência do maquinista no consumo de combustível

Outra análise necessária foi a verificação de como a experiência do maquinista interfere no consumo de combustível. Para esta comparação, os dados foram trabalhados da seguinte forma:

- Entre as SBs que tiveram um consumo médio de mais de 100 litros de diesel, foram selecionadas aquelas com coeficiente de variação maior que 15% (maior desvio padrão);
- Os maquinistas foram separados em três grupos de acordo com o tempo de experiência:
 - Grupo 1: 0 anos a 2 anos e 11 meses
 - Grupo 2: de 3 anos a 6 anos e 11 meses
 - Grupo 3: mais de 7 anos
- O consumo médio foi determinado para cada SB e, em seguida, os valores individuais de cada grupo foram divididos por essa média geral. Essa

porcentagem representa a posição do grupo em relação a todos os maquinistas.

Dessa forma, foi possível agrupar dados de todas as seções e compará-los entre si.

Após a modelagem dos dados, foi realizado um teste de hipótese comparando os dados do grupo 1 com os do grupo 3. O valor-p obtido foi de 0,040 ($<0,05$), o que determina que o consumo do grupo 1 foi maior que o do grupo 3 com 95% de confiança. As estatísticas descritivas mostram que os maquinistas menos experientes tinham 102% do consumo médio e os condutores mais experientes tinham 97% desse consumo.

Após confirmar essa diferença no consumo médio, outro teste de hipótese foi realizado para verificar se o desvio padrão é influenciado também pela experiência. No entanto, o valor-p encontrado foi de 0,671, mostrando que a experiência do maquinista não interfere no desvio padrão do consumo.

Portanto, os maquinistas com maior experiência gastam menos diesel do que os de menor experiência (no mesmo cenário), mas a variação do consumo é semelhante.

- Influência do treinamento de maquinistas no consumo de combustível

A última análise estatística foi relacionada ao treinamento no simulador de condução e como isso influencia o consumo de combustível. Essa análise foi feita da seguinte maneira:

- Os dados dos treinamentos foram informados pela área responsável pelo simulador de condução;

- Considerou-se o resultado do treinamento do Módulo 1, ou seja, um treinamento de quatro dias em um simulador da New York Air Brake (NYAB)
- O consumo no teste antes do treinamento foi comparado ao consumo após, e essas variáveis foram consideradas interdependentes devido à variabilidade de condução de cada maquinista.

O teste de hipóteses realizado retornou um valor-p inferior a 0,001, o que comprova que o consumo de combustível diminuiu após o treinamento do motorista no simulador (cerca de 5,1% a menos).

Interferência no treinamento também foi verificada no desvio padrão, mas como o valor-p correspondeu a 0,377, não houve influência significativa na variância do consumo após os testes simulados.

Assim, após o treinamento, os maquinistas gastam menos diesel do que antes, mas a variação do consumo é semelhante.

CONCLUSÃO DAS ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Após os testes de hipóteses, concluiu-se que o consumo médio é suscetível à influência de algumas variáveis, como a experiência do maquinista (quanto maior o tempo, menor o consumo comparado aos maquinistas recém-contratados) e os treinamentos realizados na condução simuladores (consumo médio após este treinamento é menor que a média anterior).

No entanto, o desvio padrão não é influenciado por essas variáveis (experiência e tempo de treinamento), apenas pelo tipo de locomotiva (os trens SD70 apresentam menor variação que o GT46). Assim, o fator mais importante que deve ser melhorado é a variabilidade do consumo em todas as SBs.

Com a implementação de um assistente de condução, espera-se que o maquinista tenha uma referência clara sobre o que seguir e, portanto, que a variabilidade caia drasticamente. Assim, a implementação desse sistema pode trazer um enorme ganho para a VLI.

Outros pontos extras para este trabalho são a melhoria do treinamento para diminuir essa variação e o estudo do que faz com que os trens GT46 tenham mais variação no consumo de combustível.

GANHO ESTIMADO COM A IMPLANTAÇÃO DO ASSISTENTE DE CONDUÇÃO

Com a implementação desse sistema, o maquinista terá uma referência para a condução, melhorando não apenas o consumo médio de combustível, mas também o desvio padrão dos valores observados.

De acordo com as conclusões feitas no item anterior, a estimativa do ganho de consumo de combustível após a implantação do sistema de controle de cruzeiro foi calculada da seguinte forma:

- O consumo médio é altamente influenciado pelas variáveis treinamento e experiência, portanto, espera-se que ele tenha uma grande redução após a

implementação do assistente de condução. Assim, assumimos que o novo consumo de referência será o 10º percentil de cada SB. Essa premissa garante que o consumo escolhido tenha sido feito algumas vezes, sendo mais factível do que simplesmente escolher o menor valor histórico, pois pode haver alguns fatores especiais que contribuíram para a execução desse número isolado.

- O desvio padrão de referência foi definido pelo coeficiente de variação. A seção com menor CV foi escolhida e foi acordado que o novo sistema melhoraria esse coeficiente em 50%. Ou seja, o coeficiente que hoje é de 11,9% seria de 5,5% após a implementação. Ao replicar este valor para todas as seções de bloqueio em conjunto com a nova referência (10º percentil), o desvio padrão esperado foi determinado;
- Com esses dados, foram geradas dez mil simulações de números aleatórios seguindo a distribuição normal com valores projetados após a implementação do projeto. O uso da distribuição normal para representar a situação atual é uma consideração mais restritiva do que a realidade, uma vez que permite alguns consumos mais baixos (parte esquerda da curva azul). Assim, o ganho de 9,6% pode ser subestimado, mas será considerado para evitar um ganho irreal.

ESTUDO DE CASO – IMPLANTAÇÃO DO ASSISTENTE DE CONDUÇÃO

ANÁLISE DO CUSTO BENEFÍCIO

A solução proposta por este projeto indica a instalação de um assistente de condução nas locomotivas, bem como a intensificação e aprimoramento do treinamento voltado ao consumo de combustível e condução econômica, concomitante aos aspectos de segurança operacional na operação dos trens. Espera-se que com a condução semiautomática, a variabilidade de operação entre os condutores seja reduzida e sejam aumentados ganhos no consumo de combustível, sem prejuízo dos tempos de viagem e à segurança.

A implementação desta solução exige dispêndios financeiros com a aquisição de software e hardware para instalação nas locomotivas, instalação de equipamentos de bordo nas máquinas e treinamento dos maquinistas e demais equipes envolvidas.

Na análise da seção anterior foi observada uma possibilidade de ganho real de 9,6%, o que está de acordo com os valores encontrados nas melhores práticas de mercado. Para qualificar essa análise, foi realizado um estudo utilizando o método de análise custo-benefício (ACB) que permite a comparação sistemática dos custos e benefícios do projeto em questão, permitindo a melhor decisão. Para a parte financeira dos benefícios do projeto, foi utilizado o método Valor Presente Líquido. A tabela abaixo apresenta a análise qualitativa do método ACB para a implementação deste trabalho no VLI.

Tabela 1 – Análise de custo benefício

Custos	Benefícios tangíveis	Benefícios intangíveis
--------	----------------------	------------------------

Aquisição de software	Economia de combustível	Padronização da operação
Aquisição de hardware	Melhoria do tempo de trânsito	Melhoria de segurança
Treinamento dos maquinistas	Menor variação na condução	Facilidade na condução de trens

ANÁLISE DE RISCO

Para analisar os riscos envolvidos neste projeto, foi escolhida a metodologia conhecida como *Hazard and Operability Study*, popularmente chamada pela sigla HAZOP. Essa ferramenta, originada na indústria química na década de 1960 e hoje utilizada mundialmente em diversos segmentos, permite identificar e investigar os perigos e problemas no desenvolvimento de projetos e durante sua fase de operação, e que podem representar riscos para equipamentos e pessoas.

A análise de HAZOP realizada neste trabalho foi baseada no padrão 61882 da *International Electrotechnical Commission (IEC 61882)*, que trata do guia de aplicação para estudos deste tipo. De acordo com a norma, a ferramenta é um processo detalhado, executado por uma equipe dedicada, para identificar riscos e problemas de operação e acrescenta que, os estudos tratam da identificação de possíveis desvios do projeto original e análise de suas possíveis causas e consequências. A base para um estudo HAZOP é a avaliação por meio de "palavras-chave", que consiste em uma busca

deliberada por desvios dos objetivos do projeto. Para facilitar a avaliação, o sistema é dividido em partes para que a funcionalidade de cada peça possa ser adequadamente definida (IEC 61882).

De acordo com a IEC 61882, o procedimento para o estudo deve seguir as seguintes etapas:

- 1) Definições: escopo, objetivos, papéis e responsabilidades
- 2) Preparação: planejamento, coleta de dados e documentação, estabelecendo palavras-guia e desvios
- 3) Avaliação: estruturar e executar a avaliação
- 4) Documentação e acompanhamento: registrar informações, estudar resultados e monitorar ações.

Assim, utilizando a estrutura preconizada na norma, foi realizada uma análise de HAZOP para avaliar os riscos da implantação e operação do assistente de condução nas locomotivas da seção estudada neste trabalho..

Para realizar o estudo de HAZOP, o sistema foi dividido em três nós: software, operador (maquinista) e hardware. A tabela abaixo apresenta o resultado do estudo utilizando a técnica acima mencionada.

Tabela 2 – HAZOP – Análise de risco do sistema

Estudo HAZOP					
Projeto: Assistente de condução semi-automatico			Data: 07/03/2019		
Time: Cesar Toniolo, Fernanda Deltregia, Pedro Sena					
Nó	Palavra chave	Desvio	Possível causa	Possível consequencia	Ação
Software do assistente de condução	Nenhum	Aceleração inadequada / frenagem inadequada	Falha de Software Mapeamento inadequado da via permanente Entrada de dados do trem de forma incorreta	Acidente Perda no consumo de combustível Maiores transit times	Implantar mecanismo de falha segura no caso de falhas abruptas de software (modo manual)
	Menos de / mais de				Melhorar o treinamento para as pessoas que cadastram os dados do trem no sistema
Maquinista	Menos de / mais de	Aceleração inadequada / frenagem inadequada	Maquinista não está preparado para assumir o trem em modo manual	Acidente Perda no consumo de combustível Maiores transit times	Implantar um sistema robusto para alertar maquinista quando for necessário assumir o trem em modo manual
			Maquinista não observa que sistema passou para modo manual		Desenvolver estudo para determinar o tempo ótimo que o maquinista deve operar o trem em modo manual
	Nenhum	Maquinista sem treinamento ideal	Melhorar o treinamento dos maquinistas na utilização do sistema (simuladores) e estabelecer reciclagens periódicas		
Hardware do assistente de condução	Nenhum	Aceleração inadequada / frenagem inadequada	Falha de Hardware (tela inoperante)	Acidente Perda no consumo de combustível Maiores transit times	Implantar mecanismo de falha segura em caso de falha de hardware
			Perda de comunicação com a locomotiva		Implantar sistema robusto para alertar maquinista no caso de perda de comunicação com a locomotiva (Passar para modo manual)

VIABILIDADE FINANCEIRA

De acordo com a revisão bibliográfica, foram encontrados resultados de sucesso de até 14% na diminuição de gastos com combustível com a utilização de um assistente de condução em locomotivas. Porém, como visto na análise estatística de dados da VLI, a economia de combustível esperada no trecho estudado é de 9,6%, que é o valor que será usado para o plano financeiro aqui apresentado.

Para validar a viabilidade econômico-financeira, foi realizada uma avaliação utilizando o método do Valor Presente Líquido (VPL) por um período de 10 anos. O período de 10 anos para cálculo foi escolhido por causa da vida útil estimada do tipo de equipamento a ser instalado nas locomotivas. Para o cálculo do consumo plurianual de capacidade, foram utilizados os dados de volume no período de 10 anos.

Um fato importante é que o cálculo da economia foi sensibilizado de acordo com a disponibilidade de máquinas adequadas em oficina com a tecnologia, de acordo com o cronograma de instalação física.

A partir da análise dos valores pode-se afirmar que o projeto, com a modelagem econômica escolhida, é viável, uma vez que apresenta um VPL positivo ao longo de 10 anos. É importante notar que sua viabilidade está diretamente ligada à taxa de câmbio, que apresentou oscilações significativas nos últimos anos no Brasil. Assim, recomenda-se revisar a avaliação com a taxa de câmbio do período, se o projeto for realizado em um outro período de tempo.

CONCLUSÃO

Este trabalho buscou estudar as melhores práticas adotadas pelas ferrovias internacionais para garantir a máxima eficiência operacional de combustível nos trens.

Diversas variáveis externas dificultam que os maquinistas determinem como operar de maneira mais eficiente. A consequência é que o uso de combustível na mesma rota varia entre as equipes. A revisão de literatura descobriu que diferentes práticas aplicadas por ferrovias podem ter um impacto enorme no consumo de combustível.

Com base nesta fundamentação teórica, que mostrou que diferentes práticas aplicadas por ferrovias podem ter um impacto enorme no consumo de combustível, avaliou-se uma massa de dados de viagens para um estudo de caso selecionado (trecho entre Guará e Paulínia, no Corredor Centro-Sudeste da VLI). Neste estudo estatístico, uma variação muito grande foi encontrada na condução do trem praticada por diferentes maquinistas. Concluiu-se então que, padronizando as viagens, seria possível uma redução no consumo de diesel (em litros) de 9,6% naquela localidade.

A escolha de um sistema assistente de condução a ser instalado nas locomotivas deste trecho foi então escolhida para auxiliar os condutores de trem, garantindo o melhor desempenho em termos de segurança e eficiência energética, reduzindo a variabilidade. Verificou-se também que existe viabilidade financeira para o uso de tal tecnologia, uma vez que através de avaliações econômicas, aplicando-se o ganho encontrado na análise, foi encontrado um VPL positivo em 10 anos.

Assim, este trabalho conclui que a implementação de uma tecnologia de assistência à condução nas locomotivas do Corredor Centro-Sudeste é de grande valor para reduzir a variabilidade na condução de trens, sendo economicamente viável já que gera um impacto muito positivo no consumo de combustível. Esse sistema deve contemplar os fatores avaliados no HAZOP para se mitigar os riscos envolvidos em sua operação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AAR – American Railroad Association. **Freight Rail: The Most Environmentally Friendly Way to Move Freight Over Land**. Disponível em: <AAR.org/Environment>. Acessado em 01/03/2019.

_____. **Freight Railroads Help Reduce Greenhouse Gas Emissions**. 2019. Disponível em: <<https://www.aar.org/wp-content/uploads/2018/07/AAR-Railroads-Greenhouse-Gas-Emissions.pdf>>. Acessado em 01/03/2019.

BRECHER, Aviva; SPOSATO, Joseph; KENNEDY, Bernard. **Best Practices and Strategies for Improving Rail Energy Efficiency**. 18 DOT-VNTSC-FRA-13-02, FRA, U.S. Department of Transportation, Washington, Janeiro 2014.

CNT - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Transporte & Desenvolvimento: Entraves Logísticos ao escoamento de Soja e Milho**. Brasília, 2015. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/Estudo/transporte-desenvolvimento>>. Acessado em 26/02/2019.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Boletim Logístico: Mercado de frete**. Reference obtained on the internet. Brasília, 2019. <<https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuario-e-extrativista/boletim-logistico>>. Acessado em 26/02/2019.

EEX. **Ways to save – Rail freight transport**. Australian Government Department of the Environment and Energy. Disponível em: <<https://www.eex.gov.au/industry-sectors/transport/rail-freight-transport/opportunities>>. Acessado em 26/02/2019.

FCA - Ferrovia Centro Atlântica S.A. **Demonstrações Financeiras encaminhadas à ANTT, referentes ao exercício encerrado em 31 de dezembro de 2017**. Brasília, 2017. Disponível em: <http://www.antt.gov.br/backend/galeria/arquivos/2018/08/15/DEZEMBRO_2017_FCA.pdf>. Acessado em 01/03/2019.

FGV - FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS. Grupo de Economia da Infraestrutura & Soluções Ambientais. **Avaliação da política de prorrogação antecipada das concessões ferroviárias**. Disponível em: <<https://gei-sa.fgv.br/sites/gei-sa>>

sa.fgv.br/files/u49/estudo_vantajosidade_final_grupo_de_economia_vf_limpa_.pdf>.

Acessado em 01/03/2019.

FNS - Ferrovia Norte Sul S.A. **Demonstrações Financeiras encaminhadas à ANTT, referentes ao exercício encerrado em 31 de dezembro de 2017.** Brasília, 2017.

Disponível em: <

http://www.antt.gov.br/backend/galeria/arquivos/2018/08/15/DEZEMBRO_2017_FNS.pdf>. Acessado em 01/03/2019.

FRA - Federal railroad administration. **Comparative evaluation of rail and truck fuel efficiency on competitive corridors.** U.S. Department of Transportation, Washington, Novembro 2009.

ELDREDGE, David. **Trip Optimizer Overview and What's New.** Digital Solutions Summit, Orlando, Maio 2017.

GHELERE, Helvio Luiz; PARREIRA, Vivian Andrade. **Optimization of iron ore train operation with focus on fuel savings.** Proceedings of the 11th IHHA Conference, Cape Town, Setembro 2017.

GHYS, Stan. **Optimizing the world's railways: an Australian technology perspective.** Australasian Railway Association -Telecommunications & Technology Forum, Melbourne, Julho 2016. Disponível em: <
<https://ara.net.au/sites/default/files/u16/Stan%20Ghys%20-%20TTG.pdf>>. Acessado em 26/02/2019.

HOUPT, Paul K. et al. **Optimal Control of Heavy-Haul Freight Trains to Save Fuel.** Proceeding of 9ª IHHA Conference, Shanghai, Junho 2009.

LUSTIG, David. **Engineers to Get Computer Help: New York Air Brake's LEADER System is Designed to Provide Coaching to Improve Train-Handling.** *Trains Magazine*, Maio (2007), pag. 24-25.

MDIC – Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. **Séries Históricas - Fator Agregado e Produtos.** Brasília, 2019. Reference obtained on the internet. <<http://www.mdic.gov.br/index.php/comercio-externo/estatisticas-de-comercio-externo/series-historicas>>. Acessado em 06/03/2019.

MRS. **Trip Optimizer: tecnologia aliada ao conhecimento.** *MRS News*, Juiz de Fora, 2018. Disponível em: <<https://www.mrs.com.br/post-newsletter/trip-optimizer-tecnologia-aliada-ao-conhecimento/>>. Acessado em 06/03/2019.

OECD – The Observatory of Economic Complexity. **Brazil (BRA) Exports, Imports, and Trade Partners.** 2017. Reference obtained on the internet. <<https://atlas.media.mit.edu/en/profile/country/bra/>>. Acessado em 01/03/2019.

POTENCIAL para crescer. **Série Estudos: Ferroviário.** São Paulo: SIMEFRE & ABIFER, Year XXIII, p. 16-22, June 2018. Disponível em: <<http://www.shreditorial.com.br/digital/2018/ferroviario/index.html>>. Acessado em 06/03/2019.

PUDNEY, Peter; COLEMAN, Dale.; **Freightmiser, Saving Fuel on Long-Haul Trains.** Proceeding of 8ª IHHA Conference, Rio de Janeiro, Junho 2005.

RAEDER, Ben. **Smart Consist Training.** *Electro-Motive Diesel*, Junho 2013.

STODOLSKY, F. **Railroad and locomotive technology roadmap**. Center for Transportation Research, Energy systems Division, Argonne National Laboratory, USA, 2002.

VANTUONO, William C. **The greening of the railroads – and why it matters**. Railway Age, p 25-33. Fevereiro 2011.

VLI. **VLI Institutional presentation**. Março, 2019.

YEE, R; COLEMAN D.; WARDROP, A. **Optimizing the Scheduling and Operation of Trains on a Heavy Haul Railroad**. Specialist Technical Session (STS) of IHHA Conference, Kiruna, Sweden, 2007.

WABTEC. **WABTEC and GE transportation to merge**. Press release presentation, 2018.
Disponível em: < <https://www.wabtec.com>>. Acessado em 08/03/2019.

WIKIPEDIA. **Hazard and operability study**. Disponível em:
<https://en.wikipedia.org/wiki/Hazard_and_operability_study>. Acessado em
08/03/2019.