

Análise da causa raiz de perdas de eficiência energética em uma ferrovia de cargas

Sérgio M. Mayrink Júnior^{1*}, Maria Leonor F. de Paiva², Cláudio L. Salles da Silva

¹ MRS Logística, Gerência de Operação de Trens de Minas Gerais, Av. Brasil 2001, Centro, CEP 36060-010, Juiz de Fora/MG

² MRS Logística, Gerência de Operação de Trens de Minas Gerais, Av. Brasil 2001, Centro, CEP 36060-010, Juiz de Fora/MG

³ MRS Logística, Gerência de Operação de Trens de Minas Gerais, Av. Brasil 2001, Centro, CEP 36060-010, Juiz de Fora/MG

e-mail: sergio.mayrink@mrs.com.br, maria.leonor@mrs.com.br, claudio.luz@mrs.com.br

RESUMO

O presente trabalho visa apresentar um estudo de caso relativo à gestão da eficiência energética junto à equipe operacional da MRS, em Minas Gerais - MG. A metodologia utilizada para medição se baseia no *duty cycle* obtido de caixas-pretas de locomotivas, o que já é amplamente difundido no meio ferroviário. Do comparativo do consumo atual de trens de mesmas características com o histórico são gerados indicadores de desempenho da condução, que podem ser detalhados por trechos e por maquinistas. Desse modo, cabem à gestão da equipe operacional o treinamento e a auditoria da execução de um procedimento baseado em um modelo ótimo de condução, que garanta segurança, *transit time* e um menor consumo de combustível.

As equipes operacionais de MG apresentavam um baixo desempenho até o 1º tri/18. No entanto, a difusão e a auditoria dos procedimentos operacionais de forma prática, possibilitaram uma evolução significativa do padrão de condução e geraram excelentes resultados a partir de abril/18. Em julho/18, houve uma ruptura dessa evolução, onde os resultados de consumo de combustível começaram a apresentar recorrente piora. Não era razoável pensar que os mesmos maquinistas que há três meses vinham acumulando recordes de economia comesçassem a se tornar menos aderentes aos procedimentos de condução que nada modificaram no período. Assim, através da ferramenta de *Ishikawa*, iniciou-se uma análise de possíveis causas deste desvio.

Nesse contexto, um importante conceito sobre nível de interação do maquinista com a condução passou a ser introduzido. Trechos que incluem inflexões no perfil da via foram tratados como de alta interação, ao passo que longas rampas que exigem pouca ação do maquinista seguiram o caminho inverso. Isto permitiu identificar que as perdas estavam concentradas em trechos de baixa interação, corroborando com a presunção de que não se tratava de uma falha humana na condução. Outras análises ainda indicaram que a velocidade média dos trens nesses trechos havia caído, o que era mais representativo em períodos da noite e madrugada. Ao eliminar diversas causas, a suspeita de que havia algo errado com os equipamentos (máquinas), envolvidos na operação tornou-se representativa. Foi então evidenciado que o número de avarias em um determinado sistema das locomotivas envolvidas neste fluxo havia aumentado. Este sistema é o que permite o lançamento de areia sobre os trilhos para aumentar o coeficiente de aderência das rodas sobre eles.

Diante da maior perda da eficiência energética constatada na subida das rampas, onde havia também queda na velocidade, em especial nos períodos de maior incidência de neblina, e cruzando com as análises das causas das avarias do areeiro foi possível concluir de que o problema estava no entupimento dos bicos injetores causado por um desvio na qualidade da areia que passou a ser utilizada naquele período.

Palavras-Chaves: Operação; padrão de condução; análise de causas; Eficiência energética.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de combustível de forma eficiente é um tema crítico e relevante para qualquer empresa do setor de transporte. Esse tema é dominante na agenda de transportadores ao redor do mundo (FIGUEIRO, 2015), sejam eles de qualquer modal.

CAVALIERI 2018, afirma que para se alcançar uma maior eficiência energética no setor de transportes é necessário:

- Aumentar a quantidade transportada e/ou aumentar distâncias transportadas mantendo-se, em ambos os casos, a mesma quantidade de energia consumida.
- Reduzir a quantidade de energia utilizada para realizar o mesmo trabalho de transporte.

No caso desse artigo abordaremos um estudo focado na segunda vertente citada acima para alcançar uma maior eficiência energética.

Considerando que alcançar um patamar de consumo energético eficiente é uma busca constante no setor de transporte, na MRS, isso não é diferente. Existe uma série de iniciativas nesse sentido, como: otimização da formação de trens (tração por tonelada útil transportada); desligamento de locomotivas, incluindo tecnologias para automatização desse processo; revisão de cruzamentos e intervenções de via permanente em locais críticos; priorização de frota de locomotivas de acordo com eficiência energética; condução de trens visando economia de combustível. Esse último item tem sido um grande desafio para as equipes de operações.

Nesse contexto, é dever da gestão das equipes operacionais a busca, o treinamento e a auditoria da execução de um modelo ótimo de condução que garanta segurança, *transit time* e um menor consumo de combustível. Dessa forma, é possível afirmar que o investimento em treinamento teórico e prático dos maquinistas impacta na qualidade da

condução dos trens, refletindo diretamente na eficiência energética (FRADE, 2020).

2. GESTÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NAS OPERAÇÕES DE TRENS DA MRS

2.1 Indicador de desempenho da condução de trens

Considerando a importância do tema da eficiência energética, tanto no âmbito da redução de custos quanto da emissão de poluentes, as equipes de maquinistas na MRS são medidas em seu desempenho de consumo de combustível. Este indicador tem como metodologia a comparação de trens de mesmas características (tipo de carga, faixa de peso, modelo e quantidade de locomotivas). Através do *duty cycle* obtido do registrador de eventos da locomotiva, calcula-se o tempo de permanência em cada ponto de aceleração, *idle* ou freio dinâmico. Baseado em um consumo médio conhecido para cada um desses estágios, é possível estimar o consumo do trem em determinado intervalo. Esses intervalos são definidos por entrepátios ao longo da ferrovia. A mediana dos valores de consumo de um conjunto de trens similares no mesmo entrepátio é tomada com referência. A relação entre o consumo de um trem e o valor referência para ele naquele entrepátio representa o seu desempenho em eficiência energética. O resultado de um maquinista é dado pela relação entre o somatório dos valores realizados de consumo pelo somatório de valores referência para cada registro obtido. Cálculo semelhante é feito para o desempenho de uma equipe e de uma gerência. Para fins de análise, podem ser calculados também os resultados de todos os maquinistas por entrepátio ou por trecho.

2.2 Modelo de trabalho

Tratando da abordagem de desenvolvimento da equipe operacional em prol desse

indicador, o primeiro passo consiste na confecção de um procedimento operacional padrão buscando as melhores práticas na condução de trens à luz da economia de combustível, porém guardando um nível de serviço adequado para o *transit time*. Um procedimento dessa natureza é construído através de discussão com a equipe operacional, análise de registros de trens que apresentaram bons resultados, reprodução dessa condução em simulador para avaliação de parâmetros de segurança e testes em campo. Esse processo é conduzido pela equipe de Inspeção de Operação de Trens, em parceria com a Engenharia de Operações. Após alguns ciclos de análise e testes, é iniciado o treinamento dos maquinistas neste procedimento, utilizando de acompanhamentos em campo e treinamentos em simulador. Após o treinamento, os resultados do indicador permitem identificar quais as pessoas precisam de reciclagem no conteúdo e qual o trecho em que há deficiência, possibilitando assim, um ciclo de melhoria contínua em busca da eficiência energética.

2.3 Aplicação na Operação de Minas Gerais

Este trabalho de desenvolvimento do procedimento operacional padrão para eficiência energética para os trechos da Operação de Trens MG ocorreu entre final de 2017 e o primeiro trimestre de 2018. Com o início dos treinamentos e acompanhamentos em campo, rapidamente houve uma grande evolução no resultado a partir do mês de abril/2018. O ritmo de forte melhoria nos resultados foi observado nos meses de maio e junho, à medida que a equipe ganhava mais familiaridade com a execução do modelo de condução. No entanto, a partir de julho, uma queda de resultado inesperada foi observada. Essas informações podem ser vistas na figura 1, que traz o resultado do percentual de melhoria de consumo de combustível

comparando o executado com a referência. O trecho em questão é o da Ferrovia do Aço, entre os pátios do P1-07 (Jeceaba) e P2-06 (Bom Jardim), que representa o maior consumo de combustível da operação Minas Gerais devido ao perfil de aclave e à circulação de trens de minério carregados.

O resultado apresentado a partir de julho de 2018 era totalmente contraintuitivo, por esperarmos que a habilidade dos maquinistas na execução da condução tendia a melhorar mês a mês. Diante desse problema, um profundo trabalho de análise iniciou-se.

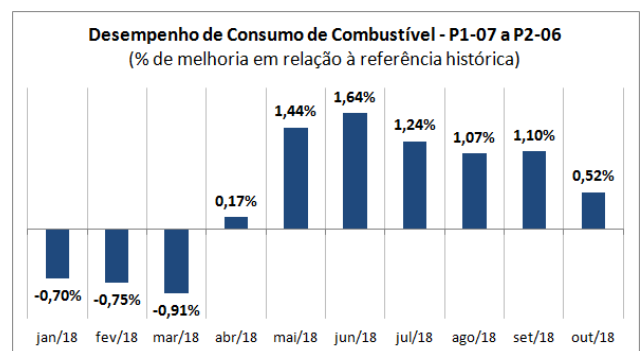


Figura 1. Histórico do desempenho de consumo de combustível na Ferrovia do Aço

3. ANÁLISE DA CAUSA RAIZ DE RESULTADOS INESPERADOS

Kepner e Tregoe (1981) definem que sempre que existe uma situação em que determinado nível de desempenho não é alcançado e que a causa associada não é conhecida, constitui-se um problema. Ou seja, deparava-se com o problema de queda no percentual de melhoria no desempenho do consumo de combustível dos maquinistas de MG, uma vez que todo o trabalho feito até então produzia um ritmo forte de evolução.

Na busca pela análise e solução do problema uma investigação de possíveis causas foi introduzida a fim de verificar o que ocorreu para que se traçassem ações que pudessem eliminar a causa raiz até então totalmente desconhecida.

Como metodologia para a tal trabalho, utilizou-se do diagrama de Ishikawa. Segundo

Campos (1992), este diagrama é amplamente utilizado para mostrar as várias causas potenciais e suas inter-relações que podem influenciar um efeito específico, resultado ou fim não esperado.

A figura 2 mostra este diagrama construído através de um *brainstorming* orientado com a equipe de inspetores e engenharia de operação.

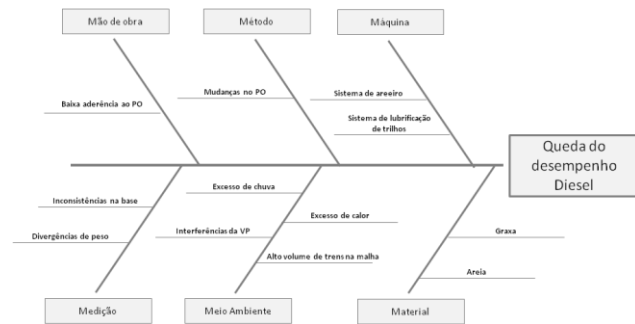


Figura 2. Diagrama de Ishikawa para o problema observado

3.1 Medição

O processo de apuração desse indicador é bastante complexo, envolvendo o cruzamento de informações de diferentes bases de dados e o processamento de caixas-pretas dos trens. Com isso, uma das hipóteses estudadas foi de que poderia haver alguma inconsistência nos dados. Foi realizada uma checagem geral nos parâmetros do indicador, observando se haviam *outliers* sendo considerados e se as regras gerais do sistema que geraram os resultados anteriores permaneciam inalteradas. Também foram feitos alguns comparativos entre o cálculo manual do consumo nos registradores de eventos e o cálculo automatizado pelo sistema. Ao final, não foi identificado nenhum desvio referente à medição, o que indicava que os resultados, apesar de inesperados, refletiam a realidade.

3.2 Método

O método de execução da operação estava bem estabelecido e havia sido revisto recentemente, o que motivou os ganhos

observados nos meses anteriores. Dessa forma, entendeu-se que este não é fator para piora, muito pelo contrário, era o fator preponderante para possibilitar ganhos.

3.3 Mão de obra

Quando se trata de mão de obra nesse caso, traz-se a ideia de aderência à execução do procedimento operacional. Apesar de contraintuitivo, era necessário checar se os maquinistas estavam se tornando menos aderentes ao procedimento ao passar dos meses. No entanto, para uma correta análise dessa aderência foi estabelecida um conceito de diferença entre trechos: os de maior interferência do maquinista, nos quais a habilidade do condutor é preponderante para o resultado de consumo – estes trechos contemplam a operação em inflexões e onde há a utilização da técnica de deriva*; os de menor interferência do maquinista, nos quais há baixa interação do condutor e fatores externos são mais preponderantes para o resultado de consumo – estes trechos contemplam as rampas ascendentes longas. Ao separarmos o desempenho nestas duas categorias, conseguimos avaliar se nos locais em que a condução do maquinista é mais relevante para o consumo houve expressiva queda de resultados. Esses locais de maior interação do maquinista com a condução, tratados como trechos críticos, estão marcados na figura 3.

Ao observar a figura, é possível verificar que se tratam basicamente dos locais em que há inflexão no perfil descendente para ascendente e em que se deve buscar a aderência à Velocidade Máxima Autorizada (VMA) do trecho para melhor aproveitamento da força da gravidade.

Ao compararmos o desempenho dos locais com maior e menor interferência dos maquinistas, é possível verificar que a queda nos resultados está concentrada nos trechos de rampa ascendente, em que a condução do

*Técnica de deriva: técnica de condução que consiste no maior aproveitamento da inércia do trem, mantendo ao máximo o acelerador em posição *idle*, gerando economia de combustível.

maquinista é pouco relevante para o consumo de combustível. Inclusive, existem entropátios com perdas em que a condução se resume em manter o 8° ponto de aceleração. Isso pode ser visto na figura 3, que leva á conclusão que o fator mão de obra não é causa raiz da perda de resultados observada.

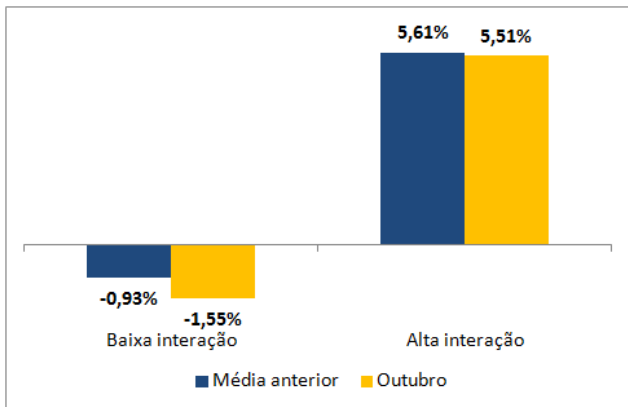


Figura 4. Comparativo de resultado entre trechos de maior e menor interferência do maquinista

Nota-se que o resultado nos trechos de baixa interação já vinha negativo e piorou consideravelmente, ao passo que os locais de alta interação vinham com resultado bom que se manteve. Há de se ressaltar que o peso dos locais de baixa interação no resultado final é muito maior, uma vez que nestes locais o consumo em litros é superior devido ao próprio perfil do trecho.

3.4 Meio Ambiente

Um dos fatores de grande relevância para a perda de eficiência energética é a interferência com manutenções na via.

As restrições de velocidade podem causar grandes impactos à circulação e alterar consideravelmente a condução do maquinista. Uma forma simples de verificar esse impacto é comparar o desempenho dia x noite ou dias de semana x fins de semana, considerando que neste trecho essas manutenções ocorrem apenas nos dias de semana no período diurno. Assim, uma das hipóteses analisadas é que poderia haver um aumento de manutenções da via, o que deveria se traduzir em queda concentrada nos dias de semana e durante o dia. No entanto, se observarmos a figura 5 que traz o comparativo da perda com o período mais crítico, em outubro de 2018, vemos que houve queda em ambos os períodos, porém a mais representativa ocorreu aos fins de semana. Em relação ao período do dia, na figura 6 observa-se algo similar, com a queda mais agressiva no período noturno.

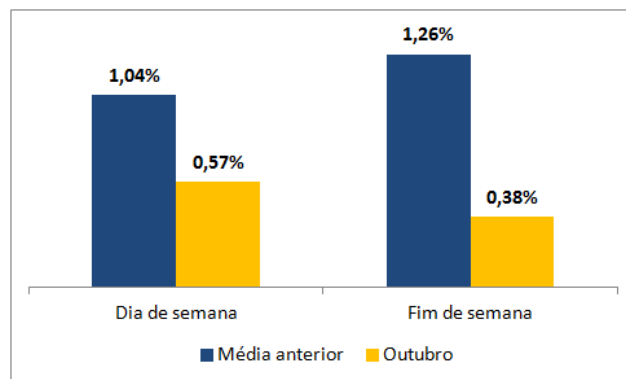


Figura 5. Comparativo de resultado por dias da semana

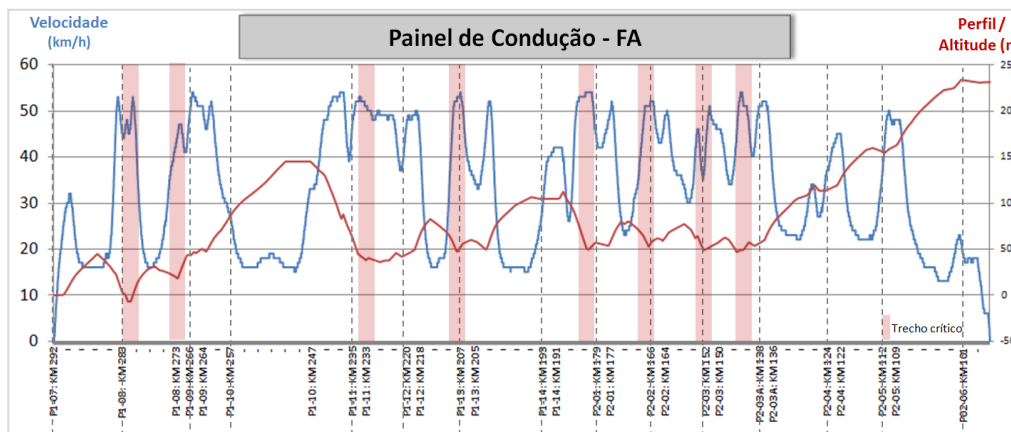


Figura 3. Painel Ferrovia do Aço (P1-07 a P2-06) com perfil, velocidade esperada e trechos críticos com maior interferência do maquinista

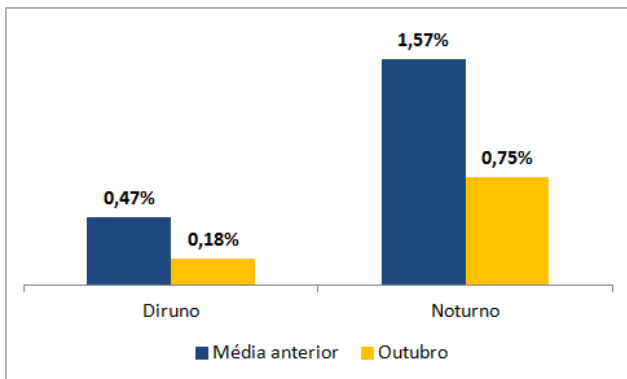


Figura 6. Comparativo de resultado período do dia

3.5 Máquina

Uma outra hipótese levantada para o problema em estudo era a de uma possível falha de equipamentos. Se observarmos os trechos de rampas ascendentes, em que estão concentradas as perdas, podemos verificar que há uma redução da velocidade média de circulação. Um exemplo dessa informação é demonstrado na figura 6, em que verificamos o tempo médio de exposição por faixas de velocidade. O aumento no tempo médio de exposição nas faixas inferiores indica que a média de velocidade do entrepátio caiu. Somado a isso, há também a informação prévia de que nos períodos noturnos, em que há incidência de neblina, observou-se uma perda mais acentuada.

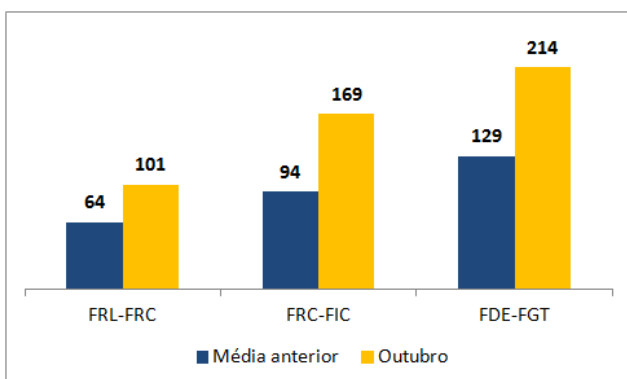


Figura 7. Tempo médio de permanência (s) entre 10 e 15 km/h nos trechos de rampa ascendentes

Uma primeira hipótese investigada foi a de que poderia haver algum desvio no processo dos lubrificadores de trilhos, o que estaria

ocasionando uma perda de aderência nas rampas e consequente queda na velocidade de subida, levando a um maior gasto de combustível. Essa ideia foi rapidamente refutada, pois não havia mudança recente nesses equipamentos nem correlação exata com a posição deles e as perdas observadas. A hipótese seguinte era de uma possível falha nos sistemas de areeiros das locomotivas, que poderiam prejudicar a aderência roda-trilho e provocar os efeitos observados. Foram realizados alguns testes nos areeiros, em que se notou uma recorrência de falhas no equipamento. Iniciou-se, então, um direcionamento para intensificação dos testes de areiros em todos os locais de troca de equipagem e origem de trens, o que levou a um pico de registros de falhas, conforme mostrado na figura 8. Chegava-se, assim, a uma causa dos resultados inesperados de perda de eficiência energética.

3.6 Material

Apesar de explicar os fenômenos observados, a falha no sistema de areiros ainda não era por si só a causa-raiz. Necessitava-se entender ainda qual era o fator novo que havia gerado o pico de falhas nesse sistema. Assim, foram trazidos à discussão os times de engenharia de confiabilidade de ativos e suprimentos, que a essa altura já investigavam a qualidade da areia de um fornecedor recém cadastrado na empresa.

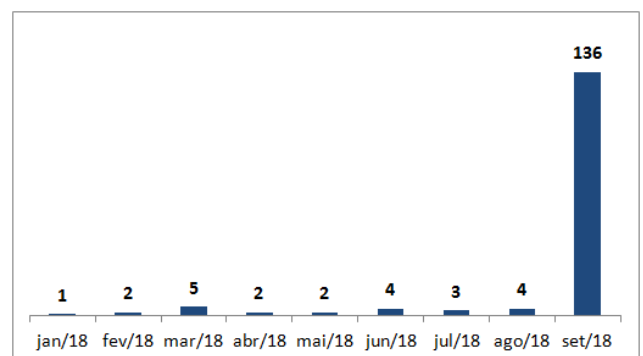


Figura 8. Registros de areeiro inoperante

Após um processo de investigação, uma série de oportunidades foi identificada em relação ao fornecimento de areia e inspeção de qualidade do material. Em abril de 2018, um novo fornecedor foi cadastrado no sistema. Entre maio e junho do mesmo ano, ele passou a compartilhar o fornecimento com o anterior, sendo que nesse período toda a entrega de areia era previamente avaliada por um laboratório que atestava a qualidade do material antes da descarga. Em julho de 2018 o laboratório foi fechado e os testes de qualidade foram descontinuados. Em agosto é identificado que o material entregue estava em desacordo com as especificações técnicas, apresentando partículas com granulometria fora do padrão, conforme figura 9.



Figura 9. Entupimento nos bicos injetores causado por areia fora do padrão

Encontrada a causa raiz (areia) daquilo que estava causando a queda no desempenho da condução, bem como a interação dessa causa com o equipamento (entupimento do bico injetor do areeiro da locomotiva), houve então a identificação das locomotivas que apresentavam esse defeito, a fim de solucionar o entupimento dos bicos, bem como a garantia das especificações técnicas da areia utilizada para melhorar o atrito roda trilho durante a circulação dos trens.

A partir daí, o desempenho da condução dos maquinistas em MG restabeleceu a melhoria. Os meses subsequentes ao tratamento das causas, mantiveram um crescimento a medida

em que se resolvia gradativamente o problema em nas locomotivas identificadas com o problema.

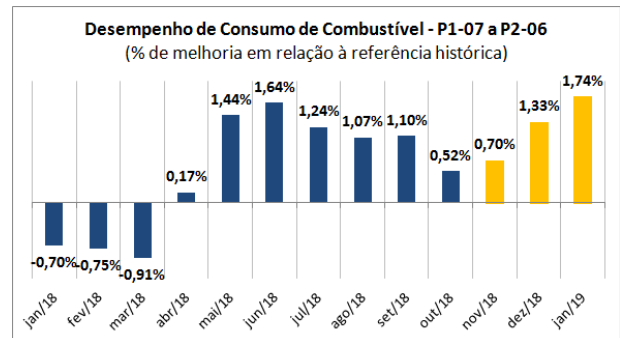


Figura 10. Desempenho de consumo na Ferrovia do Aço (destaque em amarelo para meses seguintes ao início da tratativa com areeiros)

3.7 Impacto dos desvios encontrados

Após a análise de causas descrita anteriormente e as medidas tomadas para a solução do problema, os resultados inesperados deixaram de ocorrer e foi retomado o ritmo de crescimento esperado, conforme mostra a figura 10. Para fins de cálculo de diesel recuperado com a solução do problema raiz, pode-se comparar o resultado médio com ou sem as falhas nos areeiros, conforme tabela 1.

Tabela 1. Comparativo de desempenho com e sem o problema de areeiros

Período	% de melhoria médio
Com PO revisado e problemas com areeiro (jul/18 a nov/18)	0,85%
Com PO revisado e sem problemas com areeiro (maio, junho, dezembro e janeiro/19)	1,54%

A partir da diferença entre o percentual de melhoria médio e do valor médio em litros consumido por mês para o trecho em análise, estima-se uma redução em torno de 16.500 litros por mês de diesel com a solução do problema.

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho utilizou a metodologia de análise de causas para a investigação da causa-raiz de resultados inesperados no indicador de eficiência energética da Operação de Trens de Minas Gerais da MRS. Ao longo da análise, é possível verificar como a metodologia desenvolvida por Ishikawa permite ampliar a visão das possíveis fontes causadoras do efeito, indo além de conclusões simples. Há uma distância grande entre o efeito de maior gasto em combustível e um desvio de qualidade de um fornecedor de areia, porém apenas tratando a causa-raiz do problema é que de fato soluciona-se o resultado indesejado.

5. REFERÊNCIAS

[1] FIGUEIREDO, J.N., **Metodologia de cálculo da eficiência energética para o transporte ferroviário de carga**, Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Transportes do Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, 2015.

[2] CAVALIERI, R. B., **Influência da distribuição de potência na eficiência**

energética de trens de carga, Monografia apresentada ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil, 2018.

[3] F. Frade, **Como aumentar a eficiência energética no transporte ferroviário**, www.saebrasil.org.br/noticias, Dezembro 2020.

[4] KEPNER, C.H.; TREGOE, B.B. **The new rational manager**, Princeton: Princeton Research Press, 1981.

[5] CAMPOS, V.F.; **TQC: Controle da Qualidade Total (no estilo japonês)**, 7. ed. Belo Horizonte, 1992