

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E MECÂNICA

ROMULO BARBOSA CAVALIERI

**INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
DE TRENS DE CARGA**

Juiz de Fora

2018

ROMULO BARBOSA CAVALIERI

**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, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Ms. Vitor Mainenti Leal Lopes

Juiz De Fora

2018

Cavalieri, Romulo Barbosa.

INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA NA
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE TRENS DE CARGA / Romulo
Barbosa Cavalieri. -- 2018.

71 p.

Orientador: Vitor Mainenti Leal Lopes

Coorientador: Sergio Luiz da Silva Cassemiro

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade
Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2018.

1. Trem de carga. 2. Distribuição de Potência. 3. Eficiência
energética. I. Lopes, Vitor Mainenti Leal, orient. II. Cassemiro, Sergio
Luiz da Silva, coorient. III. Título.

ROMULO BARBOSA CAVALIERI

**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, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em 20 de novembro de 2018:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ms. Vitor Mainenti Leal Lopes - Orientador

Ms. Sergio Luiz da Silva Cassemiro

Prof. Dr. Marco Aurélio da Cunha Alves

RESUMO

Após estudos e conversas com especialistas e trabalhadores da ferrovia observou-se a necessidade de estudos que visassem a economia de combustível. Com o passar do tempo e maior familiarização à área foi possível notar algumas práticas realizadas com este intuito, mas sem embasamento teórico, tampouco certeza da eficácia. Uma dessas práticas é a distribuição de potência dentro das composições férreas, ou seja, alocação das locomotivas em diferentes posições, não só na cabeça do trem. É de conhecimento dos ferroviários que este modelo de operação pode sim gerar ganhos energéticos, porém, com o desenvolver do trabalho, utilizando a metodologia proposta, foi observado que a redução de consumo referente à distribuição de potência está relacionada a possibilidade do aumento do tamanho dos trens e não à possibilidade de aplicação de operações assíncronas, como muito se acredita. Para o desenvolvimento do trabalho foi utilizado dados de trens reais, retirados dos registradores de eventos das locomotivas embarcadas.

Palavras Chave: Consumo de combustível. Registrador de eventos. Distribuição de potência.

ABSTRACT

After studies and conversations with railroad workers and specialists, the need for studies aimed at fuel economy was observed. In the course of time and with a greater understanding to the area it was possible to note some practices carried out for this purpose, but without theoretical basis, nor certainty of effectiveness. One of these practices is the distribution of power within the train, that is, locomotives are allocated in different positions, not only at the head of the train. It is well known that this model of operation can generate energy gains, but with the development of the work, using the proposed methodology, it was observed that the gain related to the power distribution is related to the possibility of increasing the size of the trains and not to the possibility of applying asynchronous operations, as is widely believed. For the development of the work, data from real trains were taken from the event recorders of the locomotives.

Keywords: Fuel consumption. Event Recorder. Distributed Power.

Sumário

1 INTRODUÇÃO	8
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	8
1.2 MOTIVAÇÕES	10
1.3.1 Objetivo geral.....	10
1.3.2 Objetivos específicos	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1 HISTÓRIA DA FERROVIA.....	11
2.2 LOCOMOTIVAS	12
2.3 ESFORÇO TRATOR	13
2.4 FORÇAS QUE SE OPÕE AO MOVIMENTO (RESISTÊNCIAS)	15
2.4.1 Determinação das resistências normais	15
2.4.2 Determinação das resistências acidentais.....	17
2.5 A TRACÇÃO DISTRIBUIDA	21
2.6 O REGISTRADOR DE EVENTOS (CAIXA PRETA).....	23
3 DESENVOLVIMENTO	25
3.1 DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA EM LOCOMOTIVAS DE UM MESMO BLOCO RESPEITANDO O ESFORÇO GERADO PELO BLOCO SÍNCRONO	25
3.1.1 Duas locomotivas de um mesmo bloco	30
3.1.2 Três locomotivas respeitando o modelo atual	42
3.1.3 Três locomotivas operando de maneira independente	47
3.2 DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA RESPEITANDO O ESFORÇO EXIGIDO PELO TRECHO.....	51
3.2.1 Metodologia de cálculo para determinar o perfil de forças e as melhores combinações	51
3.2.2 Cálculo do perfil de forças e escolha das configurações	59
4 RESULTADOS E CONCLUSÃO.....	66
REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Apesar da notória predominância do modo rodoviário no transporte de cargas no Brasil, como pode ser observado na figura 1, o modo ferroviário segue em crescimento desde sua privatização. De acordo com a Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários (ANTF), houve um aumento de 98,8% do volume de carga transportado pelas ferrovias entre os anos de 1997, ano da privatização, e 2016. Além disso, registrou-se um crescimento de 2,2% entre 2015 e 2016 (ANTF, 2018), o que confirma o contínuo crescimento do setor.

Além do aumento do volume transportado, houve também um aumento da produtividade do setor ferroviário, ou seja, mesmo com os baixos investimentos na expansão da malha, há um elevado acréscimo na quantia transportada. Desde o início da concessão, o crescimento da produtividade foi de mais de 173% (ANTF, 2018).

No ano de 2017 as operadoras ferroviárias associadas à ANTF iniciaram seus processos individuais de prorrogação antecipada dos contratos de concessão, o que abriu, para o setor, um cenário de mais investimentos de longo de prazo, expansão de capacidade de transporte, de produtividade e geração de empregos em várias regiões do País (ANTF, 2018)

O modo ferroviário, especificamente o de carga, além da sua relevância econômica, é caracterizado pelo transporte de elevados volumes por trechos geograficamente distantes, permitindo ganhos de escala quando comparado com outros modos de transporte (Cassemiro, 2017)

No que diz respeito à capacidade de transporte, um vagão graneleiro de 100 toneladas substitui a movimentação de quase quatro caminhões, o que reduz a poluição e o congestionamento nas estradas e nos centros urbanos. Expandindo essa análise para uma composição inteira, podemos dizer que um trem de 100 vagões ajuda a retirar 357 caminhões das estradas do País, de acordo com a ANTF.

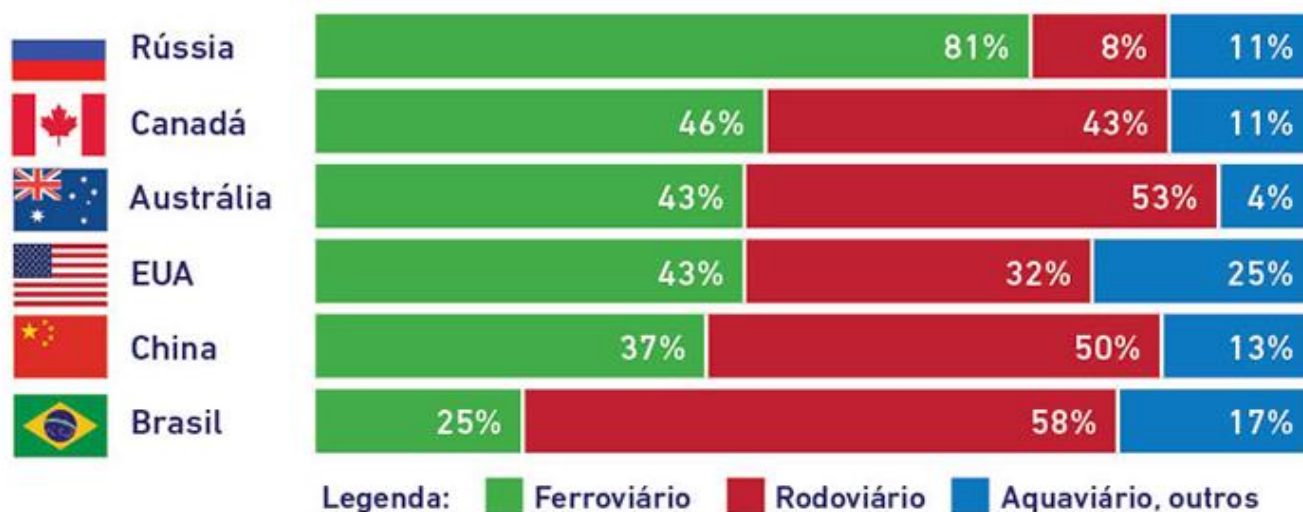
A questão ambiental é um dos principais diferenciais das ferrovias frente a outros modais. As emissões de dióxido de carbono (CO₂) e monóxido de carbono (CO) dos trens de carga são muito inferiores às dos caminhões (ANTF, 2018). Neste contexto, as concessionárias estão em uma busca constante pela melhoria da eficiência energética dos trens de carga.

Visto que o consumo de óleo diesel constitui um dos principais custos operacionais das empresas ferroviárias, como mostra Pereira (2009) no caso da Estrada de ferro Carajás (EFC), e o aumento da blendagem de biodiesel (menos eficiente) no diesel faz com que diminua o rendimento do motor, iniciativas que visem diminuir o consumo de combustível devem sempre ser levadas em consideração.

Como aponta o demonstrativo financeiro de uma empresa do ramo ferroviário de 2017, o consumo com combustível e lubrificantes em 2016 e 2017 ultrapassaram 500 milhões de reais, mais uma vez enfatizando a necessidade de iniciativas que visem minimizar este consumo.

Neste contexto, o presente trabalho tem o intuito de estudar novas alternativas para a operação ferroviária, que explorem melhor a distribuição de potência nos trens, visando economia de combustível.

Figura 1: Influência de cada modal no transporte de diferentes países.



Fonte: ANTF 2018

1.2 MOTIVAÇÕES

Como já dito, a despesa relacionada ao consumo de óleo diesel está entre as mais relevantes em uma empresa ferroviária, sua redução impacta diretamente na saúde econômica das empresas. Além disso, a questão ambiental é de suma importância nos dias atuais, qualquer tipo de iniciativa que vise minimizar a queima de combustíveis fósseis deve ser estudada e colocada em prática.

Portanto, pretende-se com este trabalho, estudar a influência de uma tecnologia já empregada, porém para outros fins, na eficiência energética dos trens de carga.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

- Avaliar a influência da distribuição de tração dentro de uma composição sobre o consumo de combustível.

1.3.2 Objetivos específicos

- Avaliar a influência de usar pontos diferentes em locomotivas do mesmo bloco, respeitando a força gerada pelo bloco síncrono, na Eficiência energética;

- Avaliar a influência de usar combinações de pontos que são possíveis dados as tecnologias atuais e que forneçam o mesmo ou maior esforço trator e menor consumo, mas que não são empregadas atualmente, na Eficiência energética;

- Avaliar a influência de usar combinações de pontos que são ou não possíveis dados as tecnologias atuais (operação totalmente assíncrona) e que forneçam o mesmo ou maior esforço trator e menor consumo, mas que não são empregadas atualmente, na Eficiência energética;

- Traçar um “perfil de força necessária” para vencer o traçado a uma determinada velocidade e, em cima disso, determinar a melhor combinação de pontos que dê tais forças e mensurar os possíveis ganhos;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo visa expor a base teórica necessária para que se tenha uma boa compreensão do trabalho e dos estudos nele desenvolvidos. O que é uma locomotiva, como se dá o movimento de uma locomotiva e um trem, eficiência energética na ferrovia, forças que estão presentes e se opõe ao movimento da composição, modelo de tração distribuída em trens de carga. Além disso, será feita uma explicação acerca do programa desenvolvido para simular, de maneira simplificada, o comportamento do trem.

2.1 HISTÓRIA DA FERROVIA

O aumento do volume de produção de mercadorias, decorrente da revolução industrial que aconteceu, principalmente, na Inglaterra a partir do século XIX, gerou a necessidade do escoamento dessas mercadorias de maneira mais rápida. Com isso, a solução apresentada pelos empresários da época foi o incentivo à criação de uma máquina a vapor que andasse sobre as estradas de ferro, outrora usadas com tração animal. Com isso, George Stephenson (1781-1848) construiu a “Locomotion”, que, em 1825, tracionou uma composição ferroviária trafegando entre Stockton e Darlington, num percurso de 15 quilômetros, a uma velocidade próxima dos 20 quilômetros por hora (DNIT, 2018). Já na segunda metade do século XIX, de acordo com o Departamento nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT), ao menos 3000 quilômetros de ferrovia já se estendia pela Europa e 5000 nos Estados Unidos.

Já no Brasil, a primeira ferrovia se deu quando, em 1852, Irineu Evangelista de Souza (1813-1889) recebeu a concessão do Governo Imperial para a construção e exploração de uma linha férrea ligando o Porto de Estrela, situado ao fundo da Baía da Guanabara, e a localidade de Raiz da Serra, em direção à cidade de Petrópolis. A primeira seção, de 14,5 km e bitola de 1,68m, foi inaugurada por D. Pedro II, no dia 30 de abril de 1854.

Em 1922, ao se celebrar o 1º Centenário da Independência do Brasil, existia no país um sistema ferroviário com, aproximadamente, 29.000 km de extensão, cerca de 2.000 locomotivas a vapor e 30.000 vagões em tráfego (DNIT,2018). Algumas datas importantes para a história ferroviária brasileira são o ano de 1930, em que houve a introdução das locomotivas com tração elétrica e o ano de 1939, com a substituição da tração a vapor pela diesel elétrica.

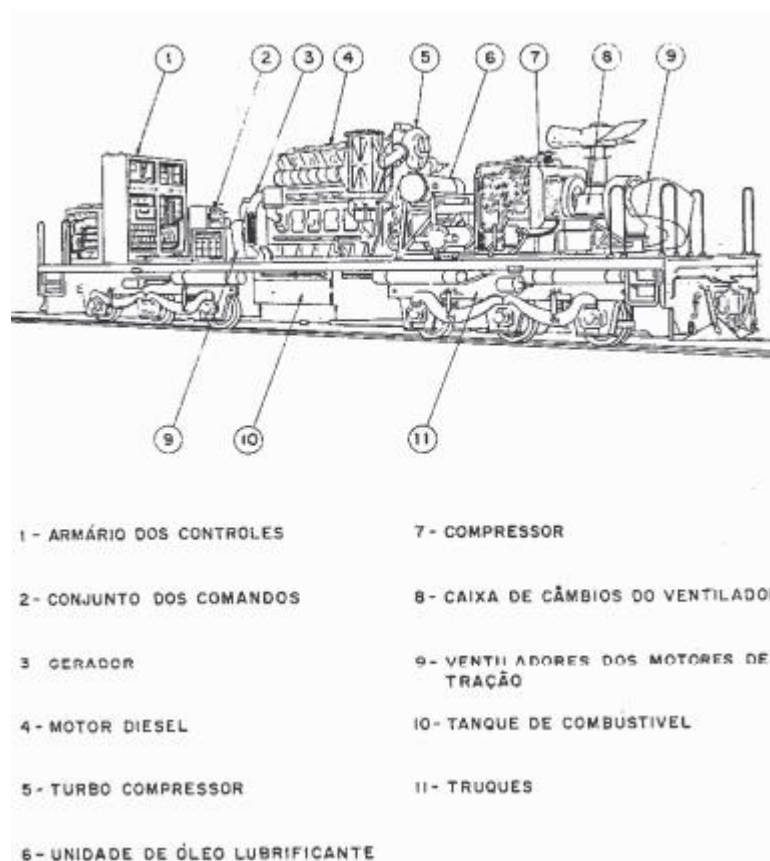
No início da década de 50 o Governo Federal decidiu pela unificação administrativa das 18 estradas de ferro pertencentes à União, totalizando 37.000 km de linha férrea espalhadas pelo território nacional. Em 16 de março de 1957 foi criada a sociedade anônima Rede Ferroviária Federal S.A (RFFSA) com o intuito de administrar, explorar, conservar, reequipar, ampliar e melhorar o tráfego das ferrovias brasileiras a ela incorporada. A RFFSA se estendeu até os anos 90 quando, em 18/02/1998 concluiu-se o processo de desestatização da malha ferroviária Brasileira e em 7 de dezembro de 1999, o Governo Federal a dissolve.

2.2 LOCOMOTIVAS

Existem diversos modelos de locomotivas, que atendem às mais diversas especificações e necessidades. Como pioneiras podemos citar as locomotivas à vapor, cujos primeiros registros datam do século XXVII, quando Richard Trevithick testa seu emprego em substituição à tração animal. Porém, essa ainda se mostrou incapaz de subir pequenas rampas por falta de peso para produzir aderência (ANTF, 2018). Com o passar dos anos e o avanço da tecnologia, as locomotivas à vapor, cujo funcionamento baseia-se na utilização de vapor sob pressão para acionar êmbolos que transmitem o movimento para as rodas, ganharam robustez e se instauraram na indústria. Alguns anos depois, Werner Von Siemens fez trafegar a primeira locomotiva elétrica do mundo, em Berlim. Essas se baseiam na captação de energia por meio de pantógrafos ou um terceiro trilho para alimentar os motores de tração, situados nos truques. Por fim, temos as locomotivas diesel-elétricas, em que é utilizado um sistema que transforma energia mecânica dos motores à combustão em energia elétrica, através de um gerador, e esse alimenta os motores de tração. Segundo Borba (2011), a corrente de saída do gerador alimenta os motores de tração acoplados aos eixos operando também quando a locomotiva opera em frenagem dinâmica (freio elétrico), e acoplado ao motor diesel está o Governador, responsável por manter constante a rotação do motor para todos os pontos desaceleração de acordo com a necessidade de carga exigida pelo maquinista.

Na figura 2 podemos ver um esquema simplificado de uma locomotiva diesel-elétrica, em que é possível identificar os elementos supracitados.

Figura 2: Principais componentes de uma locomotiva diesel-elétrica.



Fonte: (Brina, 1988)

2.3 ESFORÇO TRATOR

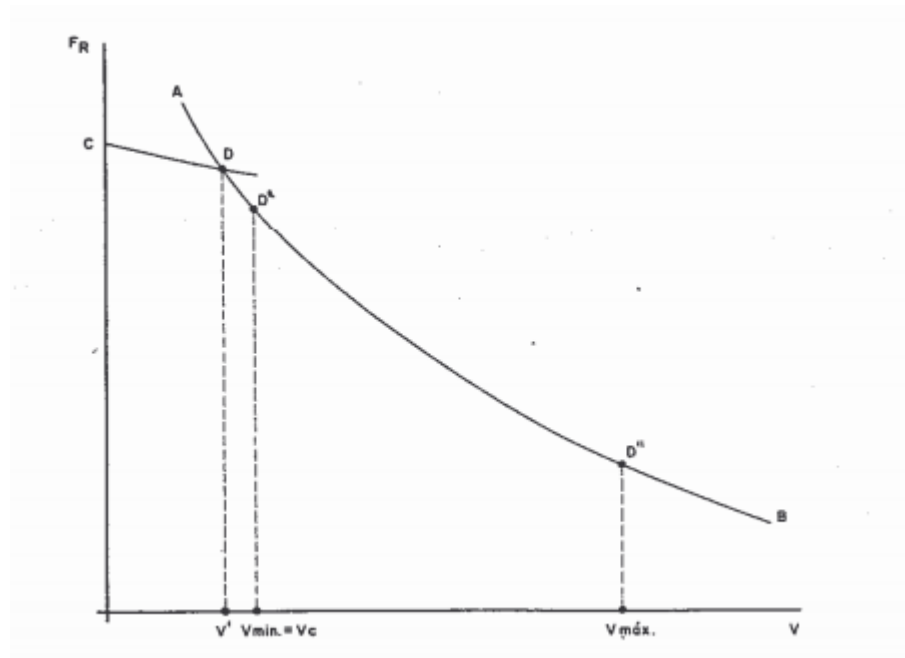
O esforço trator de uma locomotiva é o conjugado motor, na periferia das rodas, que proporciona o deslocamento da locomotiva e conseqüente movimentação dos trens. Esta força é o resultado da energia mecânica aplicada às rodas motrizes e, de acordo com Brina (1988), por se tratar de um tipo de tração que necessita da aderência, o esforço trator está limitado pela força de aderência presente no contato roda trilho que, pela equação de Coulomb, é determinada como:

$$F \leq P_a \times f$$

Em que F é a força de aderência P_a o peso aderente (conhecido como força normal na física básica) e f o coeficiente de aderência entre a roda e o trilho. De acordo com Borba (2011), em sua apostila do curso de pós-graduação em engenharia ferroviária, os valores do coeficiente de aderência variam de 8 a 45%, conforme as condições dos trilhos. Além disso, esses coeficientes são influenciados também pela velocidade, tendo um comportamento de decréscimo conforme o

aumento da mesma. Como o coeficiente de aderência influencia a capacidade de tração das locomotivas exclusivamente em baixas velocidades, como podemos na figura 3, não serão abordados maiores detalhes.

Figura 3 Curva característica do esforço trator de uma locomotiva



Fonte: Brina (1988)

O gráfico acima retrata uma curva característica do esforço trator das locomotivas diesel elétricas. A curva AB é determinada pela equação da definição da potência:

$$W = F \times V$$

$$F = \frac{W}{V}$$

Onde W é a potência, que é dependente do ponto de tração escolhido pelo maquinista, F a força e V a velocidade.

Como pode-se observar, a capacidade de tração de uma locomotiva, em baixa velocidade, é limitada não pela potência do motor de tração, mas pela força de aderência (curva CD). Esses valores de esforço trator (máximo) em função da velocidade são dados fornecidos pelos fabricantes das locomotivas.

Portanto, para que uma locomotiva proporcione um grande esforço trator, não basta que ela disponibilize muita potência, é necessário que ela tenha também um peso aderente compatível.

Além disso, apesar de em baixas velocidades a locomotiva desenvolver esforços maiores, há um limite inferior de velocidade, indicado pelo fabricante, que garante o funcionamento dos motores sem superaquecimento e desenvolvendo um esforço contínuo. Esse esforço é denominado por Brina (1998) como esforço trator contínuo.

2.4 FORÇAS QUE SE OPÕE AO MOVIMENTO (RESISTÊNCIAS)

Brina (1988) classifica as resistências em dois principais grupos, as resistências ditas “normais”, que são permanentes, presentes em qualquer trecho e em qualquer ocasião, inerentes ao movimento e as resistências acidentais, que são causadas pela interação entre a via e o veículo (perfil, curvatura) ou pela mudança de estado do mesmo (aceleração, desaceleração).

Podemos citar como resistências normais:

- Resistência de atrito (atrato na manga do eixo, no friso das rodas, no cubo das rodas, etc)
- Resistência do meio (pela pressão exercida na parte frontal do trem, pelo atrito com o ar, pela sucção na parte traseira, etc)

Como resistências acidentais temos:

- Resistência de inércia (para mudar o estado do veículo, acelerar)
- Resistência de curvas (provocada pelo atrito da roda com os trilhos em curva)
- Resistência à rampa (provocada pela gravidade);

2.4.1 Determinação das resistências normais

De acordo com Profillidis (2006), a equação geral para determinar as resistências normais é dada por:

$$R_v = A + B \cdot V + C \cdot V^2$$

e seus parâmetros são empíricos, variando os valores usados pelas ferrovias.

A incógnita o R_v é a resistência do veículo, dada em kgf. o termo A refere-se às resistências de rolamento, proveniente dos frisos da roda com o trilho, por exemplo, e sua natureza

independe da velocidade. De acordo com Profillidis (2006), este parâmetro pode ser determinado pela seguinte equação:

$$A \text{ (kgf)} = \delta \cdot M \cdot \sqrt{10/m}$$

Onde M é o peso total do veículo, em tonelada força (tf), m o peso por eixo e δ cujo valor depende do tipo do veículo. De acordo com Profillidis (2006), a Société Nationale des Chemins de fer Français (SNCF), empresa ferroviária francesa, adota para o parâmetro δ valores entre 0,9 e 1,5.

Brina (1988), afirma que as fórmulas propostas por W. L. Davis Jr são amplamente aceitas pela sociedade científica. Tais fórmulas também são empíricas e partem da mesma equação geral, variando seus parâmetros de veículo para veículo. Nestas equações de Davis, o parâmetro A é expresso por:

$$A \text{ (kgf)} = \left(0,65 + 13,5/m\right) \cdot M$$

e seu valor não diferencia de um tipo de veículo para outro.

O termo B , de acordo com Profillidis (2006), representa as resistências diretamente proporcionais à velocidade, como o atrito nos mancais e na transmissão, e seu valor é expresso por:

$$B = 0,01 \cdot M$$

Já das equações propostas por Davis:

$$B = 0,00931 \cdot M$$

para locomotivas e

$$B = 0,01395 \cdot M$$

para vagões.

Por fim, o parâmetro C está ligado às resistências aerodinâmicas e seu valor depende de características geométricas do veículo em questão e pode ser definido por:

$$C = k_1 \cdot S + k_2 \cdot p \cdot L$$

Onde S , p e L são características geométricas do veículo, k_1 um parâmetro ligado à forma da frente e da traseira do veículo e k_2 ligado à condição da superfície do veículo.

Profillidis (2006) expõe que a SNCF utiliza da seguinte fórmula empírica para o cálculo da resistência normal das locomotivas:

$$R = 0,65 \cdot M + \frac{13}{m} \cdot M + 0,01 \cdot M \cdot V + 0,03 \cdot V^2$$

já, de acordo com a formulação de Davis, temos:

$$R = 0,65 \cdot M + \frac{13,2}{m} \cdot M + 0,00931 \cdot M \cdot V + 0,00453 \cdot A_f \cdot V^2$$

para locomotivas e:

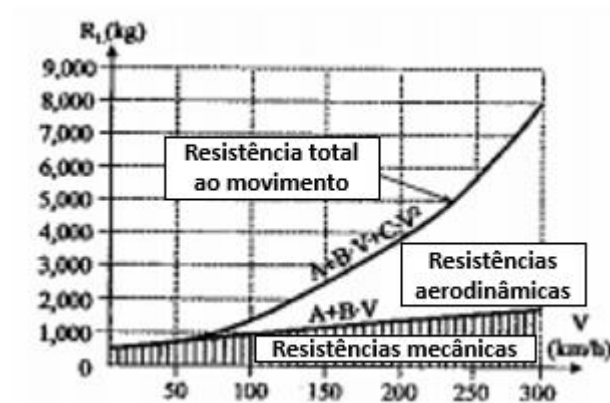
$$R = 0,65 \cdot M + \frac{13,2}{m} \cdot M + 0,01395 \cdot M \cdot V + 0,000944 \cdot A_f \cdot V^2$$

para vagões.

Visto que, como observado em Borba (2009), a área frontal A_f de locomotivas usuais no Brasil estão entre 10 e 15 metros quadrados, a fórmula de Davis fornece valores mais altos para essa parcela da resistência nas locomotivas.

Abaixo podemos observar um gráfico que representa o acréscimo da resistência total dos veículos, incluindo as aerodinâmicas, com a velocidade e apenas a soma das outras resistências.

Figura 4 Influência da velocidade nas resistências ao movimento.



Fonte: Profillidis (2006)

Como podemos observar, embora haja uma diferença sensível entre as duas equações, este parâmetro por estar relacionada ao quadrado da velocidade ganha mais relevância em altas velocidades, o que não acontece em ferrovias de carga.

2.4.2 Determinação das resistências acidentais

Como dito anteriormente, as resistências acidentais, de acordo com Brina (1988), são as quais estão presentes apenas em determinadas circunstâncias. Elas são causadas pela oposição do veículo à mudança de estado (inércia) ou pela interação via x veículo.

De acordo com Profillidis (2006), a resistência à aceleração pode ser calculada com a seguinte equação:

$$R = \frac{M \cdot a}{g} \cdot q$$

Onde

$$q = 1 + \frac{M_{rot}}{M}$$

Em que M_{rot} é a massa presente na locomotiva, sujeita a rotação e M a massa total da locomotiva. Visto que $M_{rot} \ll M$, e considerando M dado em toneladas, temos:

$$R \cong \frac{1000 \cdot M \cdot a}{9,81} \cdot 1$$

$$R \cong 102 \cdot a \cdot M$$

Onde

- a é a aceleração, em m/s²;
- M a massa total do veículo, em toneladas;
- R a resistência do veículo em Newtons

Logo:

$$R(kgf) = 102 \cdot a \cdot M \cdot 0,102$$

$$R(kgf) = 10,4 \cdot a \cdot M$$

Já Casseiro (2017 apud Brina, 1988), usando as mesmas unidades, temos a seguinte equação para o cálculo da resistência à inércia:

$$R(kgf) = 8,65 \cdot a \cdot M$$

Outra resistência acidental que, de acordo com Brina (1988), sua determinação teórica é cheia incertezas é a resistência às curvas. Por conta dessas dificuldades, ele cita e utiliza a seguinte fórmula para calculá-la:

$$R = \frac{745}{r} \cdot M$$

Para carros cuja bitola é 1,6m. onde:

- R é a resistência do veículo em kgf
- r o raio da curva em que o veículo está inscrito e
- M a massa do veículo em toneladas.

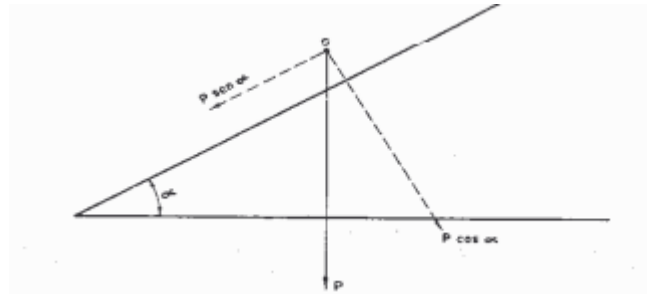
Profillidis afirma que a seguinte fórmula é usada na SNCF:

$$R = K/r . M$$

onde K varia entre 500 e 1200.

Devido a elevada massa dos veículos ferroviários, é de se esperar que a resistência que tenha maior impacto no comportamento dos trens seja a resistência ao perfil, ou seja, à inclinação da via férrea. Essa resistência é de fácil entendimento e sua dedução está a seguir:

Figura 5 Decomposição de forças.



Fonte: Brina (1983)

Considerando um veículo no ponto O, a força que atuará contrário ao movimento do veículo, pela decomposição da força P, terá o valor de:

$$R = P \text{ sen}(\alpha)$$

Como nas ferrovias, de maneira geral, os valores de α são próximo a 0, temos que:

$$R = P \text{ sen}(\alpha) \cong P \tan(\alpha) = P . i$$

Em que i é a inclinação da rampa, ou seja, a variação da cota vertical, pela variação da cota horizontal da via. De maneira geral este parâmetro é dado em percentual, portanto, temos:

$$R = P \cdot i(\%)/100$$

Considerando $P=M$, e M em toneladas:

$$R (kgf) = 10 \cdot M \cdot i(\%)$$

Em ferrovia, as rampas são muito pequenas, inferiores a 3%. Exceto em alguns casos como a Serra da Cremalheira, no estado de São Paulo, onde se encontra uma rampa de 10% de inclinação. Para rampas assim o sistema de tração utilizado é diferente do convencional (Cassemiro, 2017).

Portanto, para calcular todas as resistências que atuam ao longo da composição, é necessário que o cálculo seja feito veículo a veículo, respeitando o sentido que ele está circulando e a localização de cada um na via.

$$R_{T.C} = R_{T.V} + R_{T.L}$$

A figura 6 apresenta quais serão as fórmulas utilizadas neste trabalho para o cálculo de cada um dos veículos. Por serem amplamente aceitas pela comunidade científica, como afirma Leite (2009), as resistências normais serão calculadas a partir das fórmulas propostas por W. L. Davis Jr. Como essas equações diferenciam de acordo com o veículo, serão abordados apenas os vagões de carga e as locomotivas. As resistências serão calculadas a partir das equações sintetizadas na figura 6, exposta por Cassemiro (2017) em sua dissertação de mestrado cuja proposta é um procedimento para direcionar a decisão de alocação de diferentes tipos de locomotivas em diferentes tipos de trens focando na redução dos principais custos operacionais. As equações são dadas em kgf/ton, bastando multiplica-las pelo peso total de cada veículo.

Figura 6 Resumo das equações de resistência ao movimento

Tipo de Resistência		Fórmula	Definições
Normal	Resistência Normal / Locomotivas	$R_{NL} = 0,65 + \frac{13,2}{P} + 0,00931 \times V + \frac{0,00453 \times A \times V^2}{n \times P}$	P = peso por eixo do veículo em toneladas;
	Resistência Normal / Vagões	$R_{NV} = 0,65 + \frac{13,2}{P} + 0,01395 \times V + \frac{0,000944 \times A \times V^2}{n \times P}$	V = velocidade em Km/h; A = área frontal do veículo em m ² ; n = número de eixos do veículo
Acidental	Resistência de Curva (atrito) / Locomotiva	$R_{CL} = 0,2 + \frac{100}{R} (B + b + 3,8)$	R = raio da curva em metros; B = base rígida da locomotiva em metros; b = bitola da via em metros.
	Resistência de Curva (atrito) / Vagão - bitola de 1,6m	$R_{CV} = 0,65 \times G_{20}$	G ₂₀ é o grau da curva para uma corda de 20 metros.
	Resistência de Curva (atrito) / Vagão - bitola de 1,0m	$R_{CV} = 0,54 \times G_{20}$	$G_{20} = \frac{1146}{R}$
	Resistência de rampa	$R_r = 10 \times i$	i = valor da rampa em %
	Resistência de aceleração (inércia)	$R_a = 31,1 \times A$	A = aceleração em Km/h/seg. Se A em m/seg ² multiplica-se por 0,278 e encontra-se em Km/h/seg

Fonte: Casemiro (2017)

2.5 A TRAÇÃO DISTRIBUIDA

Castello Branco et al (2000) afirmam que desde muito cedo a distribuição de potência apresentou-se como alternativa à necessidade de ampliar o peso dos trens sem ultrapassar os limites de resistência disponíveis. Com isso, muito antes de projetarem equipamentos que permitissem o controle remoto das locomotivas que não estivessem acopladas à locomotiva líder, já apareceram registros do uso da tração distribuída. Em 1934 uma composição especial, que conduziu o duque

Gloucester e sua comitiva, usou da tração distribuída para subir a rampa de Rimutaka, Nova Zelândia. Neste exemplo a composição estava munida de 5 locomotivas a vapor distribuídas da cabeça à cauda, como mostra a figura abaixo.

Figura 7 Tração distribuída em locomotivas a vapor

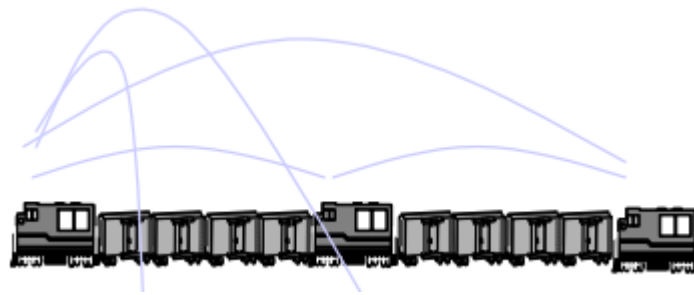


Fonte: Tratado de estradas de ferro, Castello Branco et al (2000).

Castello Branco et al (2000) apontam que a dificuldade em conseguir um sincronismo na operação tornou o uso deste tipo de composição perigoso. Ao final da década de 50 algumas ferrovias norte americanas começaram suas experiências com equipamentos que pudessem controlar remotamente as locomotivas distribuídas ao longo do trem.

Na prática, a tração distribuída consiste em uma locomotiva líder, anexada na cabeça do trem, que comanda remotamente as demais locomotivas distribuídas ao longo da composição, como podemos ver na imagem abaixo.

Figura 8 Esquema de comunicação da tração distribuída



Fonte: Pereira (2009)

De acordo com Pereira (2009) a tração distribuída se apresenta como uma solução interessante para ganhos em malhas de tráfego saturado na medida em que permite uma drástica redução no número de trens que circulam em função do aumento desses trens. Além disso, ele afirma que, segundo Borba (2008), os ganhos no consumo de combustível da EFC variam na casa de 5 a 6% devido a essa tecnologia.

Pereira (2009) cita que esse ganho de combustível está associado a 2 fatores:

- A possibilidade de execução de operações assíncronas, nas quais o ponto da locomotiva líder pode ser diferente das locomotivas remotas, aumentando o número possível de combinações que atingem a potência exigida pelo trecho.
- Redução do que ele nomeou de “efeito corda”, que consiste no esforço lateral no sentido interno à curva. Segundo ele, quanto maior for a concentração de potência e menor o raio, maior será a resistência nas curvas.

Como não foram encontrados outros registros relacionados ao “efeito corda” e a formulação referente à resistência dos veículos nas curvas não engloba a distribuição de potência, neste trabalho será feito uma investigação acerca do primeiro ponto citado por Pereira (2009): a possibilidade da execução de operações assíncronas influenciando na redução de combustível.

2.6 O REGISTRADOR DE EVENTOS (CAIXA PRETA)

Uma das principais ferramentas usada para análise do desempenho dos trens são os registradores de eventos. Ele consiste em um sistema presente nas locomotivas capaz de gravar vários parâmetros relacionados à condução. De acordo com Gazabim (2008), o registrador de eventos tem como função primária monitorar e gravar os sinais digitais e analógicos gerados pelo próprio registrador de eventos ou pelo trem para posteriormente serem analisados.

Dentre os principais parâmetros gravados pelo registrador de eventos temos:

- Velocidade;
- Ponto de aceleração;
- Esforço trator;
- Pressão no encanamento geral;

Todos esses dados e os demais passíveis de serem gravados são referenciados ao instante em que eles ocorreram.

3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo será abordado o passo a passo do desenvolvimento do estudo, bem como alguns dos resultados. As análises referentes aos resultados serão discutidas melhores no capítulo 4.

Como já dito anteriormente, Pereira (2009) aponta a possível redução do consumo do combustível ao realizar operações assíncronas, uma vez que há uma maior gama de combinações de pontos para explorar.

Com o intuito de restringir e direcionar o estudo, foi escolhido um trecho que faz parte da chamada Ferrovia do Aço, que se estende da cidade de Barra Mansa onde se encontra o quilômetro 0, à Itabirito, cujo marco quilométrico é o 357. O estudo será feito no trecho situado entre os pátios de sigla FJC (km 293 aproximadamente) e FOJ (km 99 aproximadamente). Atualmente, no trecho em questão, são operadas composições de minério, formadas por 3 locomotivas GE-AC44i e 136 vagões carregados.

Portanto, neste capítulo será investigada a veracidade da redução do combustível em função do aproveitamento da quantidade de combinações possíveis quando aplicada a duas locomotivas GE-AC44i de um mesmo bloco, ou seja, uma dupla de locomotivas colocadas em sequência. É válido ressaltar que este tipo de operação não é empregado atualmente, fazendo uso apenas das duas locomotivas em modo síncrono.

3.1 DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA EM LOCOMOTIVAS DE UM MESMO BLOCO RESPEITANDO O ESFORÇO GERADO PELO BLOCO SÍNCRONO

Nesta etapa será analisado se as operações ditas síncronas, ou seja, quando a locomotiva comandada espelha a operação da líder, são as que fornecem o menor consumo para o patamar de força gerada. Para isso será exposto o consumo por ponto de aceleração e freio dinâmico (FD) da locomotiva GE AC-44i, disponibilizada pelo fabricante, bem como a força, em tf, que cada um desses pontos gera.

Tabela 1 Consumo da locomotiva GE-AC44i

Consumo por ponto GE-AC44i		
Ponto	Consumo (Gal/h)	Consumo (Litros/h)
FD	7,5	28,4
IDLE	2,9	11,0
P1	11,7	44,3
P2	26,7	101,1
P3	54,4	205,9
P4	78,7	297,9
P5	109,6	414,9
P6	140,0	530,0
P7	169,8	642,8
P8	209,3	792,3

Fonte: Disponibilizada pelo fabricante.

Tabela 2 Força (tf) fornecida em cada ponto, em função da velocidade, para a locomotiva GE-AC44i

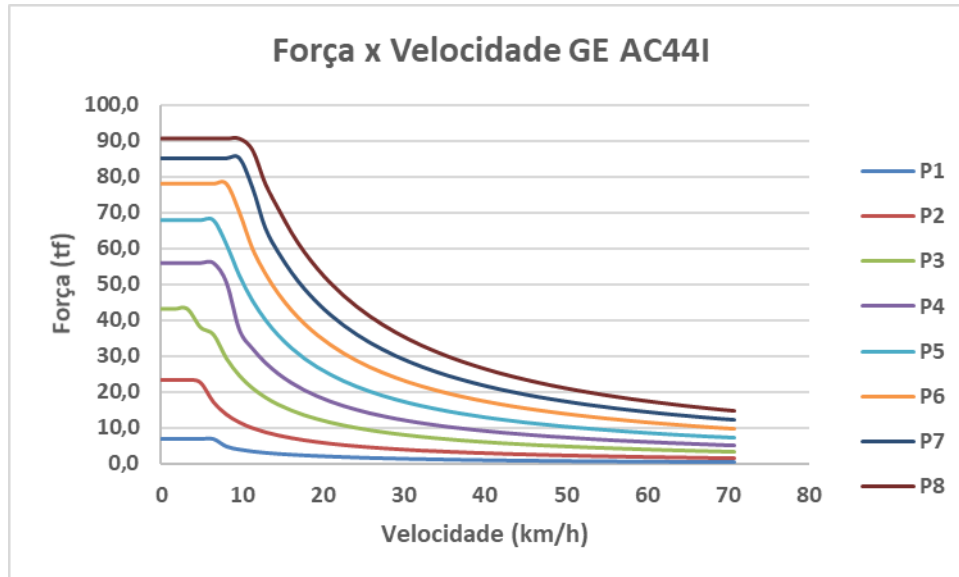
DETALHAMENTO LOCOMOTIVA AC44								
HP	200	500	1040	1550	2220	2940	3660	4500
Velocidade (km/h)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
0	6,8	23,3	43,0	56,0	68,0	78,0	85,0	90,7
1,6	6,8	23,3	43,0	56,0	68,0	78,0	85,0	90,7
3,2	6,8	23,3	43,0	56,0	68,0	78,0	85,0	90,7
4,8	6,8	22,6	37,9	56,0	68,0	78,0	85,0	90,7
6,4	6,8	17,2	35,9	56,0	68,0	78,0	85,0	90,7
8,0	4,8	13,7	29,2	50,5	61,2	78,0	85,0	90,7
9,7	3,9	11,4	24,4	37,3	52,5	70,0	85,0	90,7
11,3	3,4	9,9	21,0	32,1	45,5	59,9	76,8	87,5
12,9	3,1	8,7	18,4	28,1	40,1	52,9	65,5	78,0
14,5	2,8	7,8	16,3	25,0	35,8	47,3	58,7	71,1
16,1	2,5	7,0	14,7	22,5	32,3	42,7	53,2	64,5
17,7	2,3	6,4	13,4	20,4	29,4	38,9	48,6	59,0
19,3	2,2	5,9	12,3	18,7	26,9	35,8	44,7	54,4
20,9	2,0	5,5	11,4	17,3	24,9	33,1	41,3	50,4
22,5	1,9	5,1	10,6	16,0	23,1	30,7	38,4	47,0
24,1	1,8	4,8	9,9	15,0	21,5	28,7	35,9	43,9
25,7	1,7	4,5	9,3	14,0	20,2	26,9	33,7	41,3
27,4	1,6	4,2	8,7	13,2	19,0	25,3	31,7	38,9
29,0	1,5	4,0	8,2	12,5	17,9	23,9	29,9	36,7
30,6	1,4	3,8	7,8	11,8	17,0	22,7	28,3	34,8
32,2	1,3	3,6	7,4	11,2	16,1	21,5	26,9	33,1
33,8	1,2	3,4	7,1	10,7	15,4	20,5	25,6	31,5
35,4	1,2	3,2	6,7	10,2	14,6	19,6	24,4	30,0
37,0	1,1	3,1	6,4	9,8	14,0	18,7	23,4	28,7
38,6	1,1	2,9	6,2	9,4	13,4	17,9	22,4	27,5
40,2	1,0	2,8	5,9	9,0	12,9	17,2	21,5	26,4
41,8	1,0	2,7	5,7	8,6	12,4	16,6	20,6	25,4

43,4	0,9	2,6	5,5	8,3	11,9	15,9	19,9	24,4
45,1	0,9	2,5	5,3	8,0	11,5	15,4	19,1	23,5
46,7	0,9	2,4	5,1	7,7	11,1	14,8	18,5	22,7
48,3	0,8	2,3	4,9	7,5	10,7	14,3	17,8	21,9
49,9	0,8	2,2	4,7	7,2	10,4	13,9	17,3	21,2
51,5	0,8	2,1	4,6	7,0	10,1	13,4	16,7	20,5
53,1	0,7	2,0	4,4	6,8	9,7	13,0	16,2	19,9
54,7	0,7	2,0	4,3	6,6	9,5	12,6	15,7	19,3
56,3	0,7	1,9	4,2	6,4	9,2	12,3	15,3	18,7
57,9	0,7	1,8	4,1	6,2	8,9	11,9	14,8	18,2
59,5	0,6	1,8	3,9	6,0	8,7	11,6	14,4	17,7
61,1	0,6	1,7	3,8	5,9	8,4	11,3	14,1	17,2
62,8	0,6	1,6	3,7	5,7	8,2	11,0	13,7	16,8
64,4	0,6	1,6	3,6	5,5	8,0	10,7	13,3	16,4
66,0	0,5	1,5	3,5	5,4	7,8	10,4	13,0	16,0
67,6	0,5	1,5	3,4	5,2	7,6	10,2	12,7	15,6
69,2	0,5	1,4	3,3	5,1	7,4	9,9	12,4	15,2
70,8	0,5	1,4	3,2	5,0	7,2	9,7	12,1	14,8

Fonte: Disponibilizada pelo fabricante.

Como pode-se observar, o consumo da locomotiva independe da velocidade em que ela está operando, sendo influenciado apenas pelo ponto de tração escolhido pelo maquinista. Já a força, por ser uma função da potência, velocidade e eficiência dos pontos, depende destes três parâmetros. Os dados presentes na tabela de força estão discretizados de 1,6 km/h em 1,6 km/h. Suspeita-se que isso se deva à conversão feita de milhas para quilômetro. Na figura 9 podemos ver a expressão gráfica desta força em função da velocidade.

Figura 9 Força em função da velocidade para a locomotiva GE-AC44i.



Força em função da velocidade para a locomotiva GE-AC44i. Fonte: Autor.

Matematicamente, apesar de se tratar de uma otimização discreta, é possível descrever qual a função objetivo que deve ser minimizada, bem como a restrição que ela está submetida da seguinte forma:

Função Objetivo:

$$\min Ct(cc, t) = \sum_i^f cc_i \cdot \Delta t_i$$

Em que “Ct” é o consumo total, “cc” o consumo da configuração escolhida e “Δt” o tempo sujeito a esta. O somatório se dá do início da operação até o fim, mudando o fator “cc” toda vez que é trocada a condição de tração. O consumo “cc” se dá pela soma dos consumos dos pontos, que pode ser encontrado na tabela 1, da configuração escolhida.

A escolha da configuração que deve ser utilizada está sujeita à seguinte restrição:

$$F(Ce) \geq F(Cu)$$

$$cc(Ce) < cc(Cu)$$

Ou seja, o esforço trator fornecido pela configuração escolhida (“Ce”) deve ser superior ou igual ao esforço da configuração utilizada atualmente (“Cu”). Já o consumo segue a lógica inversa.

3.1.1 Duas locomotivas de um mesmo bloco

A operação de locomotivas de um mesmo bloco, da forma que é feita atualmente, permite que elas estejam todas operando em um mesmo ponto, ou uma em “Idle” e a outra em outro ponto de tração. Portanto, temos uma combinação de 16 possíveis combinações em um bloco de 2 locomotivas, como mostrado na tabela abaixo, além da combinação “Idle-Idle”, que não fornece força. Na tabela podemos ver também qual o consumo de cada uma das combinações (Configurações 1), que é obtida pela soma do consumo de cada um dos pontos separadamente, encontrados na tabela 1.

Tabela 3 Consumo por configuração para um bloco de 2 locomotivas GE-AC44i.

Configurações 1	Consumo de combustível (Litros/hora)
0-0	22,0
0-1	55,3
0-2	112,0
0-3	216,9
0-4	308,9
0-5	425,9
0-6	540,9
0-7	653,7
0-8	803,3
1-1	88,6
2-2	202,1
3-3	411,9
4-4	595,8
5-5	829,8
6-6	1059,9
7-7	1285,5
8-8	1584,6

Fonte: Autor.

Para cada uma das configurações supracitadas podemos determinar também a força em função da velocidade, somando a força que cada uma das locomotivas faz (tabela 2) separadamente na velocidade em questão. Abaixo uma tabela exemplificando, contendo apenas algumas configurações.

Tabela 4 Força por configuração em função da velocidade

Velocidade (km/h)	Configuração				
	0-0	0-1	0-8	1-1	8-8
0	0,00	6,80	90,72	13,61	181,44
1	0,00	6,80	90,72	13,61	181,44
2	0,00	6,80	90,72	13,61	181,44
3	0,00	6,80	90,72	13,61	181,44
4	0,00	6,80	90,72	13,61	181,44
5	0,00	6,80	90,72	13,61	181,44
6	0,00	6,80	90,72	13,61	181,44
7	0,00	6,09	90,72	12,17	181,44
8	0,00	4,82	90,72	9,63	181,44
9	0,00	4,28	90,72	8,55	181,44
10	0,00	3,83	90,04	7,66	180,07
11	0,00	3,51	88,06	7,01	176,12
12	0,00	3,25	83,18	6,50	166,36
13	0,00	3,03	77,47	6,06	154,93
14	0,00	2,85	73,16	5,70	146,32
15	0,00	2,69	68,96	5,38	137,93
16	0,00	2,55	64,87	5,09	129,75
17	0,00	2,42	61,41	4,85	122,83
18	0,00	2,30	58,17	4,61	116,34

19	0,00	2,20	55,29	4,40	110,59
20	0,00	2,10	52,70	4,20	105,39
21	0,00	2,01	50,25	4,02	100,50
22	0,00	1,92	48,10	3,85	96,20
23	0,00	1,85	46,08	3,69	92,15
24	0,00	1,77	44,19	3,54	88,38
25	0,00	1,70	42,49	3,40	84,99
26	0,00	1,64	40,87	3,27	81,75
27	0,00	1,57	39,39	3,15	78,78
28	0,00	1,52	38,00	3,03	76,01
29	0,00	1,46	36,68	2,92	73,36
30	0,00	1,41	35,48	2,82	70,96
31	0,00	1,36	34,33	2,72	68,67
32	0,00	1,32	33,25	2,63	66,50
33	0,00	1,27	32,25	2,55	64,50
34	0,00	1,23	31,28	2,46	62,57
35	0,00	1,19	30,39	2,38	60,78
36	0,00	1,16	29,54	2,31	59,07
37	0,00	1,12	28,72	2,24	57,43
38	0,00	1,09	27,96	2,17	55,93
39	0,00	1,05	27,23	2,11	54,47
40	0,00	1,02	26,54	2,05	53,08
41	0,00	0,99	25,89	1,99	51,77
42	0,00	0,97	25,25	1,93	50,51
43	0,00	0,94	24,66	1,88	49,32
44	0,00	0,92	24,09	1,83	48,18
45	0,00	0,89	23,54	1,78	47,08
46	0,00	0,87	23,03	1,74	46,05
47	0,00	0,85	22,53	1,69	45,05
48	0,00	0,82	22,05	1,65	44,09
49	0,00	0,80	21,59	1,61	43,18

50	0,00	0,78	21,15	1,57	42,30
51	0,00	0,77	20,73	1,53	41,46
52	0,00	0,75	20,32	1,49	40,65
53	0,00	0,73	19,93	1,46	39,86
54	0,00	0,71	19,56	1,43	39,12
55	0,00	0,70	19,20	1,39	38,40
56	0,00	0,68	18,85	1,36	37,70
57	0,00	0,67	18,51	1,33	37,03
58	0,00	0,65	18,19	1,30	36,38
59	0,00	0,64	17,88	1,27	35,75
60	0,00	0,62	17,57	1,25	35,15
61	0,00	0,61	17,28	1,22	34,56
62	0,00	0,60	17,00	1,19	34,00
63	0,00	0,58	16,72	1,17	33,45
64	0,00	0,57	16,46	1,14	32,92
65	0,00	0,56	16,20	1,12	32,40

Fonte: Autor

Na tabela 4, que expõe a força das configurações em função da velocidade, pode-se observar que a velocidade está dividida de 1 em 1 km/h. Para chegar a esse nível de discretização foi feito uma interpolação linear dos valores fornecidos na tabela 2, referente à força por ponto de tração. A equação utilizada na interpolação está explícita abaixo:

$$\frac{V - v}{F - f} = \frac{vo - v}{fo - f}$$

Portanto:

$$fo = \frac{vo - v}{V - v} * (F - f) + f$$

Em que:

- fo é a força fornecida pelo ponto de tração na velocidade em análise;
- vo a velocidade em análise;
- v a velocidade inferior mais próxima à vo e que contém na tabela;
- V a velocidade superior mais próxima à vo e que contém na tabela;

- f a força relacionada à velocidade v ;
- F a força relacionada à velocidade V ;

Munidos da força fornecida por cada uma das configurações utilizadas atualmente, podemos definir melhor quais serão as “restrições” do estudo, como já apontada no tópico anterior:

- A força gerada pela configuração será tida como uma restrição de força mínima, ou seja, para que alguma outra configuração (2) seja analisada em comparação a essa, sua força fornecida deve ser igual ou superior;
- Para que a configuração (2) seja considerada melhor que a tida como restrição, ela deverá ter um consumo menor.

Como o objetivo desta parte do estudo é investigar a existência de uma configuração assíncrona que seja melhor que a configuração síncrona que forneça uma força igual ou inferior à ela, devemos extrapolar as tabelas de consumo por configuração e força por configuração em função da velocidade para cada uma das possíveis configurações. Visto que a locomotiva GE-AC44i possui 8 pontos de tração, além do ponto “Idle”, é possível combinar de 45 maneiras os 9 pontos das 2 locomotivas, uma vez que a ordem em que esses pontos estão distribuídos no bloco de tração não importa. É válido ressaltar que as locomotivas contemplam também o ponto de Freio dinâmico, porém ele não será abordado no estudo por não variar o consumo independente da operação. Abaixo temos a tabela que fornecem o consumo de cada uma das configurações possíveis.

Tabela 5 Consumo para as 45 configurações possíveis de 2 locomotivas GE-AC44i.

Configurações 2	Consumo (Litros/hora)
0-0	22,0
0-1	55,3
0-2	112,0
0-3	216,9
0-4	308,9
0-5	425,9

0-6	540,9
0-7	653,7
0-8	803,3
1-1	88,6
1-2	145,4
1-3	250,2
1-4	342,2
1-5	459,2
1-6	574,2
1-7	687,1
1-8	836,6
2-2	202,1
2-3	307,0
2-4	399,0
2-5	516,0
2-6	631,0
2-7	743,8
2-8	893,4
3-3	411,9
3-4	503,8
3-5	620,8
3-6	735,9
3-7	848,7
3-8	998,2
4-4	595,8
4-5	712,8
4-6	827,9
4-7	940,7
4-8	1090,2
5-5	829,8
5-6	944,8

5-7	1057,6
5-8	1207,2
6-6	1059,9
6-7	1172,7
6-8	1322,2
7-7	1285,5
7-8	1435,0
8-8	1584,6

Fonte: Autor.

A procura por pontos melhores, baseado nas restrições já citadas, irá partir do conjunto de combinações “Configurações 1”, explicitada na tabela 3, para o conjunto “Configurações 2”, presente na tabela 5. Ou seja, para cada uma das configurações contidas no conjunto “Configurações 1”, será procurada uma outra configuração em “Configurações 2” que forneça a mesma força ou força superior e um consumo menor. Dado que a análise será feita numa amostra de 45 configurações, variando de 0 a 65 km/h, será usado um algoritmo programado no Visual Basic do Microsoft Excel 2014 para fazer a busca dessas configurações. Este algoritmo consiste na busca exaustiva de quais combinações presentes em “Configurações 2” são melhores que as presentes em “Configurações 1” para cada uma das velocidades. Por tanto, para cada combinação em “Configurações 1” ele avalia se, na velocidade em questão, existe alguma combinação em “Configurações 2” que forneça o mesmo esforço trator e menor consumo.

Para exemplificar a busca citada acima, a próxima tabela expõe o caso da configuração 4-4 em comparação à 1-6.

Tabela 6 Exemplo de busca de configurações melhores.

Velocidade (km/h)	Configuração			
	4-4		1-6	
	Consumo	Força	Consumo	Força
0	595,82	112,00	574,25	84,80
1	595,82	112,00	574,25	84,80
2	595,82	112,00	574,25	84,80

3	595,82	112,00	574,25	84,80
4	595,82	112,00	574,25	84,80
5	595,82	112,00	574,25	84,80
6	595,82	112,00	574,25	84,80
7	595,82	108,17	574,25	84,09
8	595,82	101,39	574,25	82,82
9	595,82	85,31	574,25	77,52
10	595,82	72,28	574,25	71,65
11	595,82	65,84	574,25	65,06
12	595,82	60,51	574,25	59,95
13	595,82	55,70	574,25	55,48
14	595,82	51,82	574,25	51,82
15	595,82	48,33	574,25	48,52
16	595,82	45,21	574,25	45,54
17	595,82	42,61	574,25	43,02
18	595,82	40,18	574,25	40,66
19	595,82	38,06	574,25	38,58
20	595,82	36,16	574,25	36,70
21	595,82	34,38	574,25	34,94
22	595,82	32,85	574,25	33,41
23	595,82	31,41	574,25	31,97
24	595,82	30,08	574,25	30,63
25	595,82	28,90	574,25	29,43
26	595,82	27,77	574,25	28,29
27	595,82	26,75	574,25	27,25
28	595,82	25,80	574,25	26,28
29	595,82	24,90	574,25	25,36
30	595,82	24,09	574,25	24,53
31	595,82	23,31	574,25	23,73
32	595,82	22,58	574,25	22,98
33	595,82	21,91	574,25	22,29

34	595,82	21,26	574,25	21,62
35	595,82	20,66	574,25	21,00
36	595,82	20,09	574,25	20,41
37	595,82	19,54	574,25	19,85
38	595,82	19,04	574,25	19,33
39	595,82	18,55	574,25	18,83
40	595,82	18,08	574,25	18,35
41	595,82	17,64	574,25	17,90
42	595,82	17,22	574,25	17,46
43	595,82	16,82	574,25	17,05
44	595,82	16,44	574,25	16,66
45	595,82	16,07	574,25	16,28
46	595,82	15,72	574,25	15,93
47	595,82	15,38	574,25	15,58
48	595,82	15,05	574,25	15,25
49	595,82	14,74	574,25	14,93
50	595,82	14,44	574,25	14,63
51	595,82	14,15	574,25	14,34
52	595,82	13,87	574,25	14,05
53	595,82	13,60	574,25	13,78
54	595,82	13,34	574,25	13,52
55	595,82	13,09	574,25	13,27
56	595,82	12,85	574,25	13,02
57	595,82	12,61	574,25	12,79
58	595,82	12,38	574,25	12,56
59	595,82	12,16	574,25	12,34
60	595,82	11,95	574,25	12,12
61	595,82	11,74	574,25	11,91
62	595,82	11,53	574,25	11,71
63	595,82	11,33	574,25	11,52
64	595,82	11,14	574,25	11,33

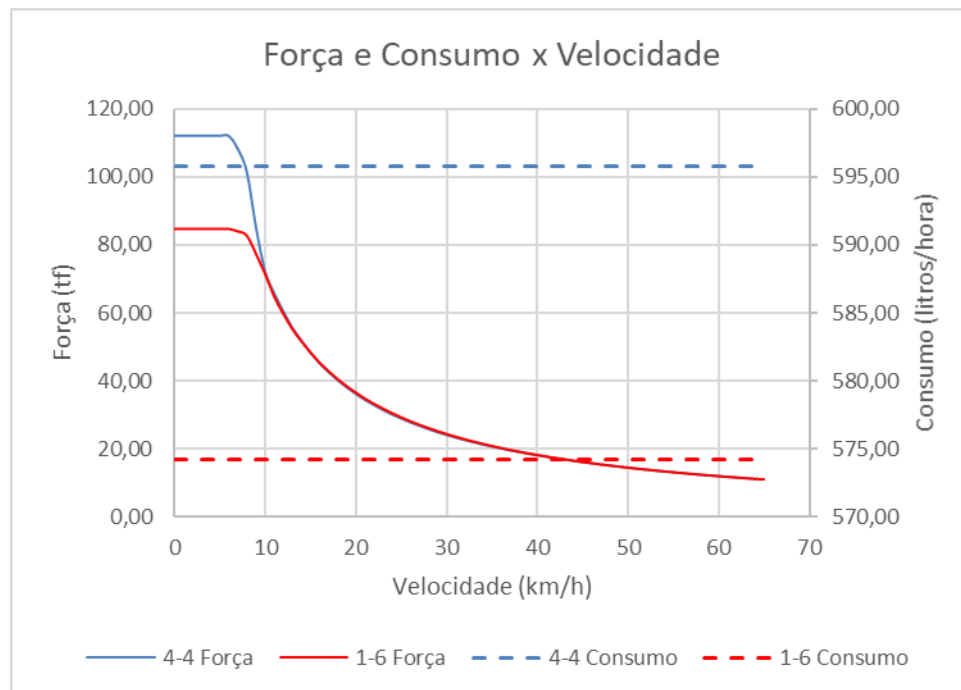
65	595,82	10,96	574,25	11,15
----	--------	-------	--------	-------

Fonte: Autor

Como já citado, o consumo de combustível não depende da variação da velocidade, portanto, a configuração 1-6 sempre será mais econômica que a 4-4. Porém, abaixo de 15 km/h, a configuração 4-4 fornece um esforço trator superior à configuração 1-6. Portanto, pode-se afirmar que, considerando a restrição de força sendo a gerada pela configuração 4-4, a 1-6 é melhor acima de 15 km/h.

O gráfico abaixo mostra como se comporta a curva de esforço trator e consumo em função da velocidade para as duas configurações.

Figura 10 Comparação gráfica entre esforço e consumo das configurações 4-4 e 1-6

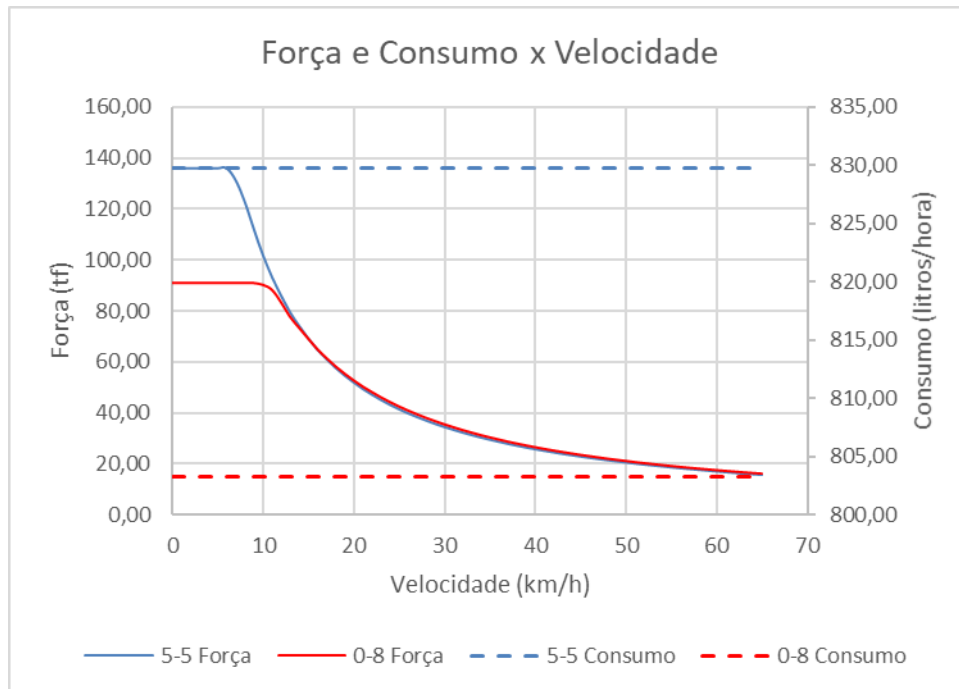


Fonte: Autor.

Como já citado, é possível observar que, acima dos 15 km/h a configuração 4-4, apesar de apresentar um consumo 3,8% maior que a 1-6, fornece o mesmo esforço trator ou menor que essa.

Esse mesmo comportamento, analisando as configurações contidas em “Configurações 1”, foi observado para a configuração 5-5, como mostrado no gráfico abaixo:

Figura 11 Comparação gráfica entre esforço e consumo das configurações 5-5 e 0-8.



Fonte: Autor.

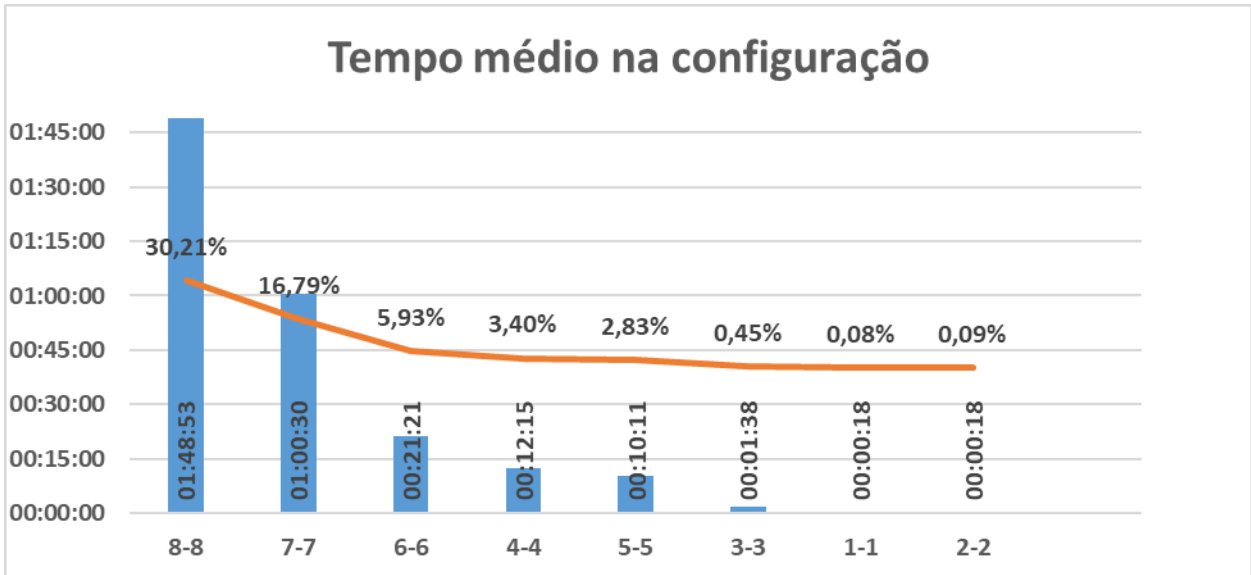
Neste caso, observamos que, acima dos 18 km/h, se faz mais vantajoso utilizar a configuração 0-8 à configuração 5-5 e a economia usando a 0-8 é de aproximadamente 3,3%.

Para as demais combinações de pontos contidas em “Configurações 1”, as: 0-3, 0-4, 0-5, 0-6, 0-7, 0-8 apresentaram este comportamento, porém, a uma velocidade abaixo de 5 km/h, o que é pouco aplicado em uma ferrovia de transporte de cargas, portanto não serão discutidas neste trabalho.

Portanto, é matematicamente possível economizar combustível operando de maneira assíncrona dentro de um bloco de 2 locomotivas GE AC44i, porém, ao analisar o tempo em que a composição fica exposta a essas duas configurações, no trecho em questão, conduzindo da maneira em que se conduz hoje, conclui-se que esses são pontos em que a composição não se mantém muito tempo, se fazendo apenas como transições para configurações que forneçam um esforço maior ou menor que estes, não sendo possível aproveitar este possível ganho. O gráfico abaixo apresenta o tempo médio em que as composições ficam submetidas às combinações de pontos, podendo observar que as combinações ditas “não ótimas” são pouco utilizadas na operação atual. Este tempo médio foi analisado com base nas caixas pretas de 30 trens de minério de julho de 2018. Para

excluir os casos em que a configuração é utilizada apenas como rápida transição para outras, o tempo só foi contabilizado quando maior que 30 segundos.

Figura 12 Tempo médio nas configurações.



Fonte: Autor.

Como é possível observar, a configuração 6-6 corresponde a aproximadamente 6% da operação realizada no trecho em análise, enquanto a 5-5 corresponde a aproximadamente 3%. Afim de mensurar o possível ganho, será multiplicado o percentual médio do tempo das configurações pela economia caso usado o ponto dito ótimo:

Tabela 7 Total de ganho considerando a substituição das operações não ótimas pelas ótimas

Combinação	% de uso	Combinação ótima	% de ganho	Estimativa de ganho
4-4	3,40%	1-6	3,80%	0,13%
5-5	2,83%	0-8	3,30%	0,09%
Total:				0,22%

Fonte: Autor

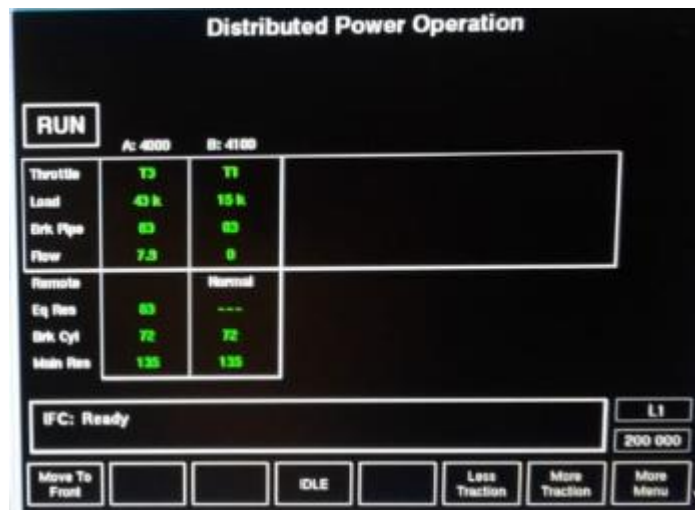
Portanto, a média de ganho aproveitando a potência distribuída em um bloco de duas locomotivas GE AC44i é de aproximadamente 0,22% para o trecho em questão.

Neste caso foram consideradas só as duas locomotivas da frente, que atuam de maneira síncrona, nos próximos casos serão abordadas as combinações das 3 locomotivas.

3.1.2 Três locomotivas respeitando o modelo atual

Para o caso de operações com 3 locomotivas, as tecnologias empregadas na maioria das ferrovias brasileiras para atuação remota, ou seja, para execução da distribuição de potência, permite que o maquinista opere mantendo 2 delas em um mesmo ponto e uma terceira em outro diferente. Essa tecnologia é conhecida como LOCOTROL, cujos direitos da Patente são da General Eléctric. Como explicado na sua patente de número US 6,301,015 B1 de junho de 2002, é possível dividir as locomotivas de uma composição em apenas 2 blocos, cuja operação é independente um do outro, mas dependente entre si. No caso deste sistema, os blocos são divididos acionando o botão “MOVE TO BACK” ou “MOVE TO FRONT” e a variação de potência pelos botões “LESS TRACTION” e “MORE TRACTION”, que podem ser vistos na imagem a seguir.

Figura 13 Fotografia de um simulador de trens operando em tração distribuída



Fonte: Autor.

Porém, atualmente os trens de minério são operados em apenas dois blocos, ou seja, as duas primeiras locomotivas atuando de maneira síncrona e a locomotiva da cauda de maneira remota, podendo ser síncrona ou não. As duas primeiras locomotivas, de maneira geral, são

acopladas eletronicamente e sua comunicação se dá da mesma forma, diferente da locomotiva remota, que se dá via rádio.

Como as duas primeiras locomotivas atuam sempre com o mesmo ponto e a última pode diferenciar, podemos calcular a quantidade de combinações da seguinte forma:

$$C = Np^{Nb}$$

Em que Np é número de pontos e Nb o número de blocos. Portanto

$$C = 9^2 = 81 \text{ combinações}$$

Após realizar a mesma metodologia empregada no tópico 3.1.2 foi possível encontrar quais combinações de pontos são menos eficientes, bem como os pontos possíveis de empregar com o modelo atual que são mais econômicos. A tabela 8 resume essas combinações e sintetiza os possíveis ganhos.

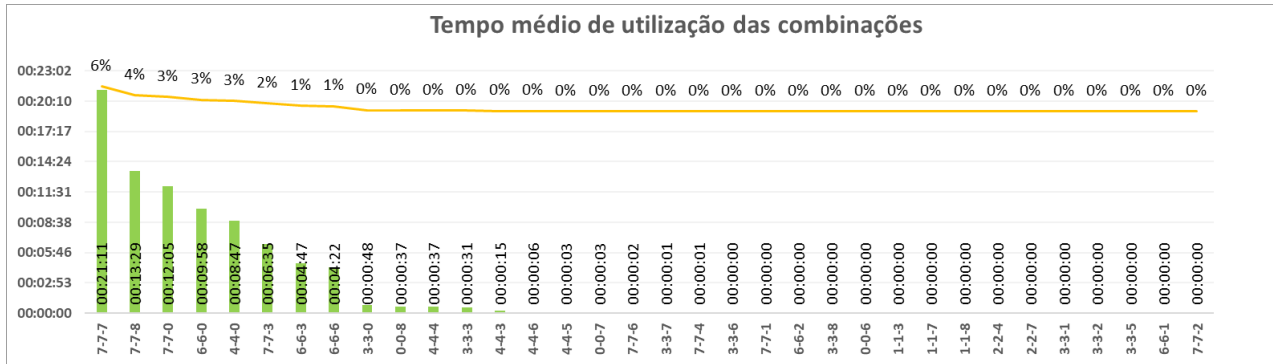
Tabela 8 Oportunidades de ganho com 3 locomotivas operando como atualmente

Combinação	Consumo (t/h)	Combinação ótima	Consumo (t/h)	% de ganho	Condição
0-0-6	538,4	2-2-5	491,7	9%	Velocidade entre 9 e 65 km/h
0-0-7	680,6	2-2-6	667,2	2%	Velocidade entre 11 e 65 km/h
0-0-8	807,5	5-5-1	725	10%	Velocidade entre 17 e 65 km/h
1-1-3	254,7	2-2-2	217,2	15%	Velocidade entre 0 e 65 km/h
1-1-7	727	5-5-0	701,8	3%	Velocidade entre 10 e 65 km/h
1-1-8	853,9	5-5-2	766,2	10%	Velocidade entre 12 e 65 km/h
2-2-4	417,2	1-1-5	409,3	2%	Velocidade entre 10 e 65 km/h
2-2-7	809,4	5-5-2	766,2	5%	Velocidade entre 11 e 65 km/h
3-3-0	392,6	0-0-5	362,9	8%	Velocidade entre 9 e 65 km/h
3-3-1	415,8	0-0-5	362,9	13%	Velocidade entre 11 e 65 km/h
3-3-2	457	1-1-5	409,3	10%	Velocidade entre 10 e 65 km/h
3-3-3	576,9	2-2-5	491,7	15%	Velocidade entre 8 e 65 km/h
3-3-5	731,5	5-5-0	701,8	4%	Velocidade entre 8 e 65 km/h
3-3-6	907	5-5-3	886,1	2%	Velocidade entre 10 e 65 km/h
3-3-7	1049,2	5-5-4	966,2	8%	Velocidade entre 10 e 65 km/h
3-3-8	1176,1	5-5-5	1040,7	12%	Velocidade entre 11 e 65 km/h
4-4-0	552,8	2-2-5	491,7	11%	Velocidade entre 0 e 65 km/h
4-4-3	737,1	5-5-0	701,8	5%	Velocidade entre 9 e 65 km/h
4-4-4	817,2	5-5-2	766,2	6%	Velocidade entre 10 e 65 km/h
4-4-5	891,7	5-5-3	886,1	1%	Velocidade entre 10 e 65 km/h
4-4-6	1067,2	5-5-5	1040,7	2%	Velocidade entre 7 e 65 km/h
6-6-0	1052,8	5-5-4	966,2	8%	Velocidade entre 9 e 65 km/h
6-6-1	1076	5-5-5	1040,7	3%	Velocidade entre 10 e 65 km/h
6-6-2	1117,2	5-5-5	1040,7	7%	Velocidade entre 9 e 65 km/h
6-6-3	1237,1	5-5-6	1216,2	2%	Velocidade entre 9 e 65 km/h
6-6-6	1567,2	5-5-8	1485,3	5%	Velocidade entre 14 e 65 km/h
7-7-0	1337,2	5-5-6	1216,2	9%	Velocidade entre 13 e 65 km/h
7-7-1	1360,4	4-4-8	1336,3	2%	Velocidade entre 13 e 65 km/h
7-7-2	1401,6	5-5-7	1358,4	3%	Velocidade entre 10 e 65 km/h
7-7-3	1521,5	5-5-8	1485,3	2%	Velocidade entre 10 e 65 km/h
7-7-4	1601,6	5-5-8	1485,3	7%	Velocidade entre 0 e 65 km/h
7-7-6	1851,6	6-6-8	1836,3	1%	Velocidade entre 13 e 65 km/h
7-7-7	1993,8	8-8-5	1929,9	3%	Velocidade entre 14 e 65 km/h
7-7-8	2120,7	8-8-6	2105,4	1%	Velocidade entre 13 e 65 km/h

Fonte: Autor

Apesar do possível ganho comprovado matematicamente a partir da curva de esforço e do consumo da locomotiva, é necessário avaliar com base na operação atual se há a possibilidade implementar essas opções. Para fazer essa avaliação foram analisados 30 trens de minério de julho de 2018 operando entre a região de São Brás do Suaçuí e Bom Jardim e foi feito o levantamento do tempo médio em cada uma das configurações menos eficientes. O gráfico abaixo sintetiza esta análise.

Figura 14 Tempo médio das configurações



Fonte: Autor.

O gráfico acima mostra que, apesar dos grandes potenciais de ganho de algumas configurações, como a 2-2-5 no lugar da 3-3-3, esta não é amplamente utilizada ao longo da operação. A tabela abaixo demonstra o ganho estimado substituindo as operações não ótimas:

Tabela 9 Total de ganho considerando a substituição das operações não ótimas pelas ótimas respeitando as restrições da tecnologia atual.

Combinação	% de uso	Combinação ótima	% de ganho	Estimativa de ganho
7-7-7	6,12%	8-8-5	3,20%	0,20%
7-7-8	3,90%	8-8-6	0,72%	0,03%
7-7-0	3,49%	5-5-6	9,05%	0,32%
6-6-0	2,88%	5-5-4	8,23%	0,24%
4-4-0	2,54%	2-2-5	11,05%	0,28%
7-7-3	1,90%	5-5-8	2,38%	0,05%
6-6-3	1,38%	5-5-6	1,69%	0,02%
6-6-6	1,26%	5-5-8	5,23%	0,07%
3-3-0	0,23%	0-0-5	7,56%	0,02%
0-0-8	0,18%	5-5-1	10,22%	0,02%
4-4-4	0,18%	5-5-2	6,24%	0,01%
3-3-3	0,15%	2-2-5	14,77%	0,02%
4-4-3	0,07%	5-5-0	4,79%	0,00%
4-4-6	0,03%	5-5-5	2,48%	0,00%
4-4-5	0,01%	5-5-3	0,63%	0,00%
0-0-7	0,01%	2-2-6	1,97%	0,00%
7-7-6	0,01%	6-6-8	0,83%	0,00%
3-3-7	0,01%	5-5-4	7,91%	0,00%
			Total	1,27%

Fonte: Autor

Portanto, buscando um desempenho semelhante ao realizado atualmente, ou seja, buscando o mesmo esforço utilizado ou maior, munido da tecnologia atual para distribuição de potência, o consumo de combustível teria uma redução estimada, de acordo com a metodologia empregada, próxima aos 1,3% no trecho em análise. Apesar de ser uma economia considerável, ainda não se aproxima do ganho comentado nos demais trabalhos já citados. No próximo tópico será estudado o caso das três locomotivas atuando de maneira totalmente independentes.

3.1.3 Três locomotivas operando de maneira independente

Neste tópico será aplicada a mesma metodologia dos dois últimos:

- Determinação das configurações não ótimas dentro da operação atual;
- Busca pelas configurações que fornecem o mesmo esforço trator ou maior, com

consumo inferior;

Porém, desta vez as configurações ditas ótimas poderão ser independentes entre si, ou seja, quaisquer combinações de pontos das 3 locomotivas serão aceitas.

Como neste estudo serão consideradas 3 locomotivas, podendo operar em 9 pontos diferentes, de maneira independente entre si, o número de combinações possíveis pode ser determinado pela seguinte equação, tratando-se de um caso de combinação com repetições:

$$C_{n+k-1,k} = \frac{(n+k-1)!}{k!(n-1)!}$$

Em que n é o número de pontos e k a quantidade de locomotivas. Portanto:

$$C_{9,3} = \frac{11!}{3!(9-1)!} = 165 \text{ Combinações}$$

As 165 combinações, bem como seus respectivos consumos estão disponíveis no apêndice A.

Após realizar a mesma metodologia aplicada nos demais tópicos, foi possível determinar quais as combinações atualmente possíveis não são as ótimas se comparadas as possíveis. A tabela abaixo expõe as combinações não ótimas, bem como as que as substituem, seus respectivos ganhos e condições de velocidade para usa-las.

Tabela 10 Configurações atuais não ótimas e suas respectivas substitutas

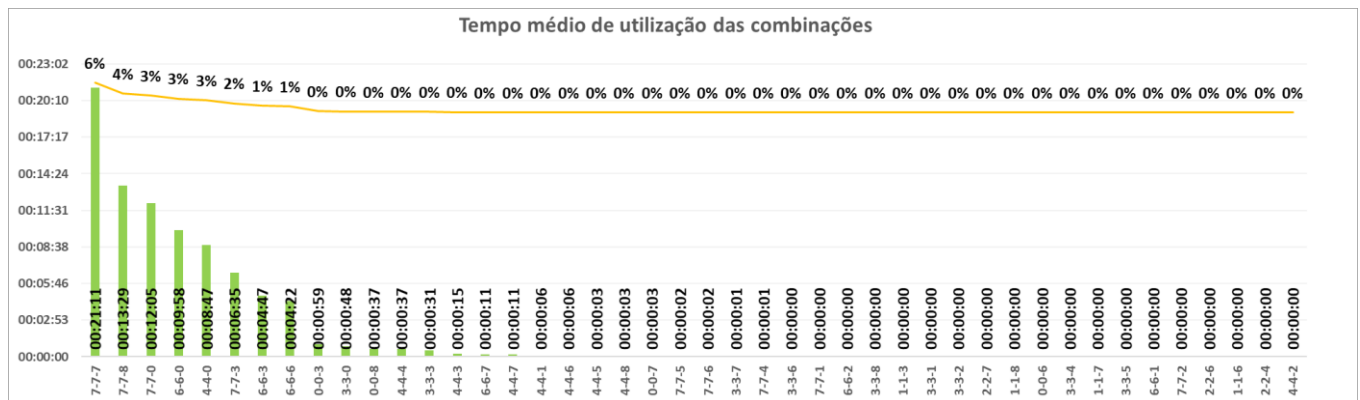
Combinação	Combinação Melhor	% de ganho	Condição
0-0-3	1-2-2	15,5%	Entre 7 e 65 km/h
3-3-3	2-2-5	14,8%	Entre 8 e 65 km/h
1-1-3	2-2-2	14,7%	Entre 0 e 65 km/h
3-3-1	0-0-5	12,7%	Entre 11 e 65 km/h
3-3-8	5-5-5	11,5%	Entre 11 e 65 km/h
4-4-0	2-2-5	11,1%	Entre 0 e 65 km/h
3-3-2	1-1-5	10,4%	Entre 10 e 65 km/h
2-2-7	1-5-5	10,4%	Entre 10 e 65 km/h
1-1-8	2-5-5	10,3%	Entre 12 e 65 km/h
0-0-8	1-5-5	10,2%	Entre 17 e 65 km/h
0-0-7	2-3-5	10,1%	Entre 10 e 65 km/h
7-7-0	5-5-6	9,0%	Entre 13 e 65 km/h
0-0-6	2-2-5	8,7%	Entre 9 e 65 km/h
6-6-0	4-5-5	8,2%	Entre 9 e 65 km/h
3-3-7	4-5-5	7,9%	Entre 10 e 65 km/h
3-3-0	0-0-5	7,6%	Entre 9 e 65 km/h
7-7-4	5-5-8	7,3%	Entre 0 e 65 km/h
3-3-4	2-3-5	6,9%	Entre 10 e 65 km/h
6-6-2	5-5-5	6,8%	Entre 9 e 65 km/h
4-4-4	2-5-5	6,2%	Entre 10 e 65 km/h
4-4-3	2-4-5	6,2%	Entre 10 e 65 km/h
6-6-6	5-5-8	5,2%	Entre 14 e 65 km/h
1-1-7	2-4-5	4,9%	Entre 11 e 65 km/h
3-3-5	0-5-5	4,1%	Entre 10 e 65 km/h
3-3-6	0-2-8	3,9%	Entre 21 e 65 km/h
4-4-7	1-5-8	3,3%	Entre 14 e 65 km/h
6-6-1	5-5-5	3,3%	Entre 10 e 65 km/h
7-7-7	5-8-8	3,2%	Entre 14 e 65 km/h
7-7-2	5-5-7	3,1%	Entre 10 e 65 km/h

6-6-7	5-6-8	2,8%	Entre 14 e 65 km/h
7-7-6	5-7-8	2,6%	Entre 14 e 65 km/h
2-2-6	1-4-5	2,5%	Entre 10 e 65 km/h
4-4-6	5-5-5	2,5%	Entre 7 e 65 km/h
1-1-6	1-3-5	2,5%	Entre 10 e 65 km/h
7-7-3	5-5-8	2,4%	Entre 10 e 65 km/h
7-7-1	3-5-8	2,2%	Entre 13 e 65 km/h
6-6-3	2-5-8	2,1%	Entre 13 e 65 km/h
2-2-4	1-1-5	1,9%	Entre 10 e 65 km/h
1-4-4	1-3-5	1,0%	Entre 10 e 65 km/h
7-7-5	5-6-8	0,9%	Entre 13 e 65 km/h
4-4-2	2-3-5	0,9%	Entre 10 e 65 km/h
7-7-8	6-8-8	0,7%	Entre 13 e 65 km/h
4-4-5	3-5-5	0,6%	Entre 10 e 65 km/h
4-4-8	3-5-8	0,4%	Entre 13 e 65 km/h

Fonte: Autor

Afim de estimar o ganho de combustível caso substitua as operações não ótimas, será multiplicado o percentual de ganho pelo percentual médio de uso destas configurações nas 30 viagens averiguadas do mês de julho de 2018. Abaixo está o gráfico que expõe o tempo médio em cada uma das configurações, bem como o percentual médio de utilização destas dentro das viagens, seguido da tabela estimando o ganho.

Figura 15 Tempo médio de utilização das combinações não ótimas.



Fonte: Autor.

Tabela 11 Estimativa de ganho operando com 3 locomotivas de maneira assíncrona

Combinação	% de uso	Combinação ótima	% de ganho	Estimativa de ganho
7-7-7	6,1%	5-8-8	3,2%	0,20%
7-7-8	3,9%	6-8-8	0,7%	0,03%
7-7-0	3,5%	5-5-6	9,0%	0,32%
6-6-0	2,9%	4-5-5	8,2%	0,24%
4-4-0	2,5%	2-2-5	11,1%	0,28%
7-7-3	1,9%	5-5-8	2,4%	0,05%
6-6-3	1,4%	2-5-8	2,1%	0,03%
6-6-6	1,3%	5-5-8	5,2%	0,07%
0-0-3	0,3%	1-2-2	15,5%	0,04%
3-3-0	0,2%	0-0-5	7,6%	0,02%
0-0-8	0,2%	1-5-5	10,2%	0,02%
4-4-4	0,2%	2-5-5	6,2%	0,01%
3-3-3	0,2%	2-2-5	14,8%	0,02%
4-4-3	0,1%	2-4-5	6,2%	0,00%
6-6-7	0,1%	5-6-8	2,8%	0,00%
4-4-7	0,1%	1-5-8	3,3%	0,00%
4-4-1	0,0%	1-3-5	1,0%	0,00%
4-4-6	0,0%	5-5-5	2,5%	0,00%
4-4-5	0,0%	3-5-5	0,6%	0,00%
4-4-8	0,0%	3-5-8	0,4%	0,00%
0-0-7	0,0%	2-3-5	10,1%	0,00%
7-7-5	0,0%	5-6-8	0,9%	0,00%
7-7-6	0,0%	5-7-8	2,6%	0,00%
3-3-7	0,0%	4-5-5	7,9%	0,00%
7-7-4	0,0%	5-5-8	7,3%	0,00%
			Total	1,32%

Fonte: Autor

Como é possível observar na tabela 11, apesar da grande gama de combinações possíveis, operando respeitando os patamares de esforço aplicados atualmente, com a mesma condição de formação da composição, o potencial ganho fica limitado a aproximadamente 1,3%, aplicando a metodologia desenvolvida.

Nos próximos tópicos serão abordados os possíveis ganhos caso se conheça previamente o esforço exigido pelo trecho.

3.2 DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA RESPEITANDO O ESFORÇO EXIGIDO PELO TRECHO.

Nesta etapa será realizado o cálculo acerca do esforço trator exigido pelo trecho para que a composição se mantenha em uma velocidade estipulada. Munidos deste esforço, será feita a comparação do consumo utilizando as operações síncronas e assíncronas que desenvolvam o esforço exigido. As equações utilizadas para começar fazer os cálculos foram expostas na revisão bibliográfica e podem ser encontradas na figura 6 e, como apontado por Allan Rodrigo Leite (2009), as equações expostas são amplamente utilizadas no meio acadêmico.

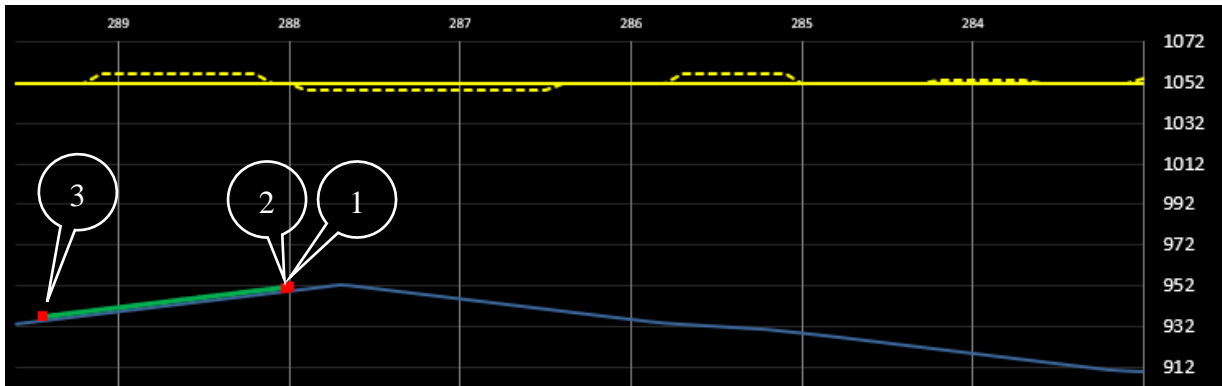
Para realizar o cálculo acerca do esforço trator necessário para manter-se na velocidade desejada foi desenvolvido um programa utilizando a plataforma do Visual Basic do Microsoft Excel. O programa consiste em calcular, de 50 em 50 metros, o esforço necessário para manter-se a velocidade estipulada, a partir das equações de Davis já mostradas. Com os esforços calculados é possível encontrar quais as combinações de pontos que fornecem esse esforço e consomem a menor quantidade de combustível.

3.2.1 Metodologia de cálculo para determinar o perfil de forças e as melhores combinações

Neste tópico será exemplificado o cálculo do esforço trator requerido para manter-se determinada velocidade. Para este cálculo serão consideradas as equações de Davis, já expostas no trabalho. Além disso, será considerado um trem munido de 3 locomotivas GE AC44i e 136 vagões gôndolas GDT, cujo peso bruto máximo informado pelo fabricante é de 130 Toneladas. Como há dificuldades no processo de carregamento dos vagões, será considerado um peso 10% abaixo do máximo, ou seja, 117 T. Como já citado, a via em que a composição estará inserida se encontra

entre a cidade de São Brás do Suaçui (MG) e Bom Jardim (MG). Abaixo podemos ver um esquema exemplificando o posicionamento da composição em um local desta via.

Figura 16 Esquema da composição inserida na via.



Fonte: Autor

No esquema a cima, os pontos 1 e 2 representam as 2 locomotivas posicionadas à frente do trem, enquanto o ponto 3 a locomotiva remota, posicionada ao final do trem. A linha verde representa o posicionamento dos vagões. A linha azul, o perfil altimétrico da via, enquanto a linha amarela representa a existência das curvas. A tabela abaixo expõe o valor calculado de resistência requerida de cada um dos veículos apresentados acima, bem como as condições da via na localização de cada um deles. Foi considerada uma velocidade de 20 km/h e uma aceleração de 0 km/h/min.

Tabela 12 Resistência de cada um dos veículos

Veículo	Tamanho (m)	Peso (T)	Número Eixos	Localização	Rampa (%)	Raio de Curva (m)	Resistência Total (kgf)
Loco 1	17,0	195	6	288000,0	1,0%	0,0	2083,8
Loco 2	17,0	195	6	288017,0	1,0%	0,0	2083,8
V 1	10,5	117	4	288027,5	1,0%	0,0	1252,5
V 2	10,5	117	4	288038,0	1,0%	0,0	1252,5
V 3	10,5	117	4	288048,5	1,0%	0,0	1252,5
V 4	10,5	117	4	288059,0	1,0%	0,0	1252,5

V 5	10,5	117	4	288069,5	1,0%	0,0	1252,5
V 6	10,5	117	4	288080,0	1,0%	0,0	1252,5
V 7	10,5	117	4	288090,5	1,0%	0,0	1252,5
V 8	10,5	117	4	288101,0	1,0%	0,0	1252,5
V 9	10,5	117	4	288111,5	1,0%	0,0	1252,5
V 10	10,5	117	4	288122,0	1,0%	0,0	1252,5
V 11	10,5	117	4	288132,5	1,0%	0,0	1252,5
V 12	10,5	117	4	288143,0	1,0%	0,0	1252,5
V 13	10,5	117	4	288153,5	1,0%	0,0	1252,5
V 14	10,5	117	4	288164,0	1,0%	0,0	1252,5
V 15	10,5	117	4	288174,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 16	10,5	117	4	288185,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 17	10,5	117	4	288195,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 18	10,5	117	4	288206,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 19	10,5	117	4	288216,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 20	10,5	117	4	288227,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 21	10,5	117	4	288237,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 22	10,5	117	4	288248,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 23	10,5	117	4	288258,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 24	10,5	117	4	288269,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 25	10,5	117	4	288279,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 26	10,5	117	4	288290,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 27	10,5	117	4	288300,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 28	10,5	117	4	288311,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 29	10,5	117	4	288321,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 30	10,5	117	4	288332,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 31	10,5	117	4	288342,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 32	10,5	117	4	288353,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 33	10,5	117	4	288363,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 34	10,5	117	4	288374,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 35	10,5	117	4	288384,5	1,0%	1102,1	1331,6

V 36	10,5	117	4	288395,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 37	10,5	117	4	288405,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 38	10,5	117	4	288416,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 39	10,5	117	4	288426,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 40	10,5	117	4	288437,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 41	10,5	117	4	288447,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 42	10,5	117	4	288458,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 43	10,5	117	4	288468,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 44	10,5	117	4	288479,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 45	10,5	117	4	288489,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 46	10,5	117	4	288500,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 47	10,5	117	4	288510,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 48	10,5	117	4	288521,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 49	10,5	117	4	288531,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 50	10,5	117	4	288542,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 51	10,5	117	4	288552,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 52	10,5	117	4	288563,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 53	10,5	117	4	288573,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 54	10,5	117	4	288584,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 55	10,5	117	4	288594,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 56	10,5	117	4	288605,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 57	10,5	117	4	288615,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 58	10,5	117	4	288626,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 59	10,5	117	4	288636,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 60	10,5	117	4	288647,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 61	10,5	117	4	288657,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 62	10,5	117	4	288668,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 63	10,5	117	4	288678,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 64	10,5	117	4	288689,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 65	10,5	117	4	288699,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 66	10,5	117	4	288710,0	1,0%	1102,1	1331,6

V 67	10,5	117	4	288720,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 68	10,5	117	4	288731,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 69	10,5	117	4	288741,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 70	10,5	117	4	288752,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 71	10,5	117	4	288762,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 72	10,5	117	4	288773,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 73	10,5	117	4	288783,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 74	10,5	117	4	288794,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 75	10,5	117	4	288804,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 76	10,5	117	4	288815,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 77	10,5	117	4	288825,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 78	10,5	117	4	288836,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 79	10,5	117	4	288846,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 80	10,5	117	4	288857,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 81	10,5	117	4	288867,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 82	10,5	117	4	288878,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 83	10,5	117	4	288888,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 84	10,5	117	4	288899,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 85	10,5	117	4	288909,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 86	10,5	117	4	288920,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 87	10,5	117	4	288930,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 88	10,5	117	4	288941,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 89	10,5	117	4	288951,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 90	10,5	117	4	288962,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 91	10,5	117	4	288972,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 92	10,5	117	4	288983,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 93	10,5	117	4	288993,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 94	10,5	117	4	289004,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 95	10,5	117	4	289014,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 96	10,5	117	4	289025,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 97	10,5	117	4	289035,5	1,0%	1102,1	1331,6

V 98	10,5	117	4	289046,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 99	10,5	117	4	289056,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 100	10,5	117	4	289067,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 101	10,5	117	4	289077,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 102	10,5	117	4	289088,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 103	10,5	117	4	289098,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 104	10,5	117	4	289109,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 105	10,5	117	4	289119,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 106	10,5	117	4	289130,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 107	10,5	117	4	289140,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 108	10,5	117	4	289151,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 109	10,5	117	4	289161,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 110	10,5	117	4	289172,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 111	10,5	117	4	289182,5	1,0%	1102,1	1331,6
V 112	10,5	117	4	289193,0	1,0%	1102,1	1331,6
V 113	10,5	117	4	289203,5	1,0%	0,0	1252,5
V 114	10,5	117	4	289214,0	1,0%	0,0	1252,5
V 115	10,5	117	4	289224,5	1,0%	0,0	1252,5
V 116	10,5	117	4	289235,0	1,0%	0,0	1252,5
V 117	10,5	117	4	289245,5	1,0%	0,0	1252,5
V 118	10,5	117	4	289256,0	1,0%	0,0	1252,5
V 119	10,5	117	4	289266,5	1,0%	0,0	1252,5
V 120	10,5	117	4	289277,0	1,0%	0,0	1252,5
V 121	10,5	117	4	289287,5	1,0%	0,0	1252,5
V 122	10,5	117	4	289298,0	1,0%	0,0	1252,5
V 123	10,5	117	4	289308,5	1,0%	0,0	1252,5
V 124	10,5	117	4	289319,0	1,0%	0,0	1252,5
V 125	10,5	117	4	289329,5	1,0%	0,0	1252,5
V 126	10,5	117	4	289340,0	1,0%	0,0	1252,5
V 127	10,5	117	4	289350,5	1,0%	0,0	1252,5
V 128	10,5	117	4	289361,0	1,0%	0,0	1252,5

V 129	10,5	117	4	289371,5	1,0%	0,0	1252,5
V 130	10,5	117	4	289382,0	1,0%	0,0	1252,5
V 131	10,5	117	4	289392,5	1,0%	0,0	1252,5
V 132	10,5	117	4	289403,0	1,0%	0,0	1252,5
V 133	10,5	117	4	289413,5	1,0%	0,0	1252,5
V 134	10,5	117	4	289424,0	1,0%	0,0	1252,5
V 135	10,5	117	4	289434,5	1,0%	0,0	1252,5
V 136	10,5	117	4	289424,0	1,0%	0,0	1252,5
L 3	17,0	195	6	289441,0	1,0%	0,0	2083,8
-	-	-	-	-	-	Total	184348,2

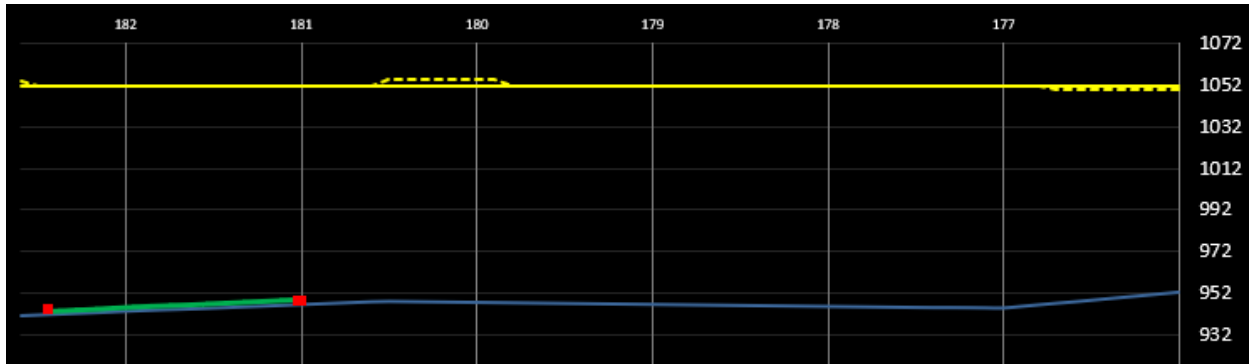
Fonte: Autor

Como podemos observar, para manter esta composição a 20 km/h neste local, é necessário um esforço trator de aproximadamente 185000 kgf, ou seja, 185 tf. Analisando a tabela do esforço trator disponibilizado pela locomotiva vemos que nesta velocidade, utilizando o oitavo ponto, cada uma delas fornece aproximadamente 52,7 tf. Portanto, mesmo com as 3 unidades em máxima potência, não seria possível transpor este ponto a 20 km/h, uma vez que os esforços somados contabilizam apenas 158,1 tf. Com isso, é necessário um recálculo para avaliar qual seria a velocidade máxima desta composição neste local. Neste caso, a velocidade máxima que esta composição atingiria é de aproximadamente 16,9 km/h, sendo necessário 184 tf e tendo disponível 62 tf de cada uma das locomotivas, somando 186 tf.

No caso exposto acima não há possibilidades de utilizar outra combinação de pontos, dado que esta é a mais forte e mesmo assim não foi suficiente para alcançar a velocidade desejada.

O próximo exemplo expõe um caso em que há diversas combinações de pontos que alcançam o esforço necessário. A escolha da combinação será feita em cima do menor consumo.

Figura 17 Composição com as locomotivas da frente localizada no km 181



Fonte: Autor

No caso acima, considerando a locomotiva líder da composição localizada no km 181, a 20 km/h, é necessário um esforço trator de 68,6 tf. A tabela abaixo expõe as configurações que se aproximam deste esforço nesta velocidade, bem como o consumo de cada uma.

Tabela 13 Esforço trator próximo a 68 tf e consumo por configuração.

Configuração	Esforço (T)	Consumo (L/h)
3-3-7	67,070	1049,200
0-6-6	69,203	1052,800
0-5-7	69,276	1019,500
4-5-5	70,157	966,200
2-3-8	70,348	1056,200
4-4-6	70,760	1067,200
0-4-8	70,776	1071,900
1-6-6	71,304	1076,000
1-5-7	71,377	1042,700
3-5-6	72,557	1061,600
1-4-8	72,877	1095,100
3-4-7	73,233	1129,300
2-6-6	74,939	1117,200
2-5-7	75,012	1083,900
2-4-8	76,511	1136,300

Fonte: Autor.

Há duas situações a se observar na tabela acima exposta:

- A configuração que fornece o menor esforço não é a que consome menos;

- Manter uma locomotiva isolada (em ponto 0) e as demais trabalhando, como no caso das configurações 0-6-6, 0-5-7 e 0-4-8 não garante um menor consumo.

O menor consumo encontrado para este caso foi o da configuração 4-5-5, fornecendo um esforço trator de 70,16 tf e consumo 966,2 L/h. É válido ressaltar que, utilizando esta configuração, a velocidade máxima que a composição irá atingir será superior a 20 km/h devido à sobra de potência, sendo necessário um recálculo para mensurá-la.

3.2.2 Cálculo do perfil de forças e escolha das configurações

Para o dimensionamento do esforço necessário será usada a metodologia de cálculo já explicitada, bem como as fórmulas empíricas de Davis. Para determinar qual velocidade a composição deverá desenvolver ao longo do trajeto serão definidas duas premissas:

- A velocidade mínima deverá ser aquela que, quando possível, se mantida constante, fará com que o tempo de percurso da composição se aproxime do realizado nos 30 trens de julho de 2018
- Os locais onde não há necessidade da utilização dos pontos de tração (descidas) serão descartados da análise.

O gráfico abaixo expõe a distribuição dos tempos de traslado entre os dois pontos em análise (km 293 e km 100) para os 30 trens analisados de julho de 2018.

Figura 18 Distribuição do tempo de traslado das viagens analisadas.



Fonte: Autor.

No gráfico acima os valores do eixo das abcissas referem-se ao limite superior da faixa de horários, ou seja, entre 05:40 e 05:50 existem 10 viagens.

Ao utilizar a média dos tempos e a distância entre os 2 pontos para calcular a velocidade média que a composição deve desenvolver para manter o tempo de traslado, é obtido o seguinte resultado:

$$V = \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{293 - 100}{6} = 32,2 \text{ km/h}$$

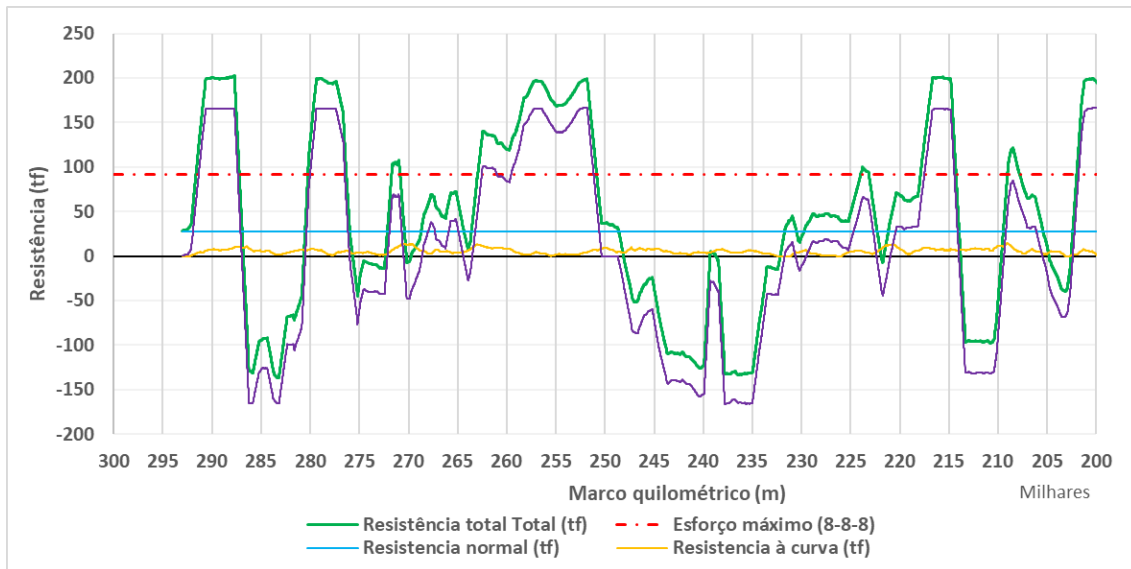
Ao utilizar a velocidade média de 35 km/h é alcançado o seguinte tempo de traslado:

$$t = \frac{\Delta S}{V_m} = \frac{293 - 100}{35} = 05:31 \text{ horas}$$

Afim de facilitar os cálculos e prover um tempo de viagem mais curto, a velocidade mínima será de 35 km/h, quando possível.

O gráfico abaixo representa os esforços requeridos calculados em intervalos de 50 em 50 metros, bem como o esforço requerido total, entre os marcos quilométricos 293 e 200. No apêndice B é possível observar este gráfico inteiro.

Figura 19 Esforço requerido calculado para a velocidade de 35 km/h



Fonte: Autor.

Do gráfico acima é possível inferir quais são as regiões onde há oportunidade de economia de combustível. A linha vermelha tracejada representa o máximo esforço trator que as 3 locomotivas juntas conseguem disponibilizar, ou seja, qualquer esforço trator acima deste não há possibilidades de variar a combinação de pontos, dado as premissas expostas. A reta preta representa o esforço requerido zero, ou seja, abaixo deste esforço é necessário frear a composição para manter os 35 km/h. Como, de acordo com a tabela de consumo por pontos exposta, o freio dinâmico da locomotiva tem um mesmo consumo independente da intensidade, abaixo desta força requerida também não há possibilidades de variação de operação com intuito de economia de combustível.

Portanto, afim de mensurar o ganho potencial entre o uso de 3 locomotivas completamente independentes e o modelo atualmente adotado (as 2 locomotivas da cabeça síncronas e a da cauda independente), será considerado apenas a faixa de esforço entre 0 e 92 tf. A tabela abaixo exemplifica alguns locais onde há possibilidade de ganho e mostra a sobra de potência.

Tabela 14 Exemplos de oportunidades de ganho considerando velocidade de 35 km/h.

Localização	Esforço Requerido (tf)	Operação atual			Operação independente			Ganho potencial
		Config.	Esforço Disponível (tf)	Consumo (l/h)	Config.	Esforço Disponível (tf)	Consumo (l/h)	
292420	30,69	5-5-1	30,84	725	5-5-1	30,84	725	0,0%
275880	18,09	2-2-5	21,35	491,7	1-2-5	19,28	450,5	8,4%
271870	68,53	6-6-8	70,00	1836,3	5-7-8	69,94	1803	1,8%
268780	23,29	4-4-2	23,92	617,2	2-3-5	24,91	611,6	0,9%
193470	27,83	5-5-0	29,65	701,8	2-4-5	28,41	691,7	1,4%
157540	22,37	4-4-2	23,92	617,2	1-3-5	22,84	570,4	7,6%
122780	67,39	8-8-3	67,60	1775,3	8-8-3	67,60	1775,3	0,0%
115270	21,42	4-4-1	21,85	576	0-3-5	21,65	547,2	5,0%

Fonte: Autor.

Estendendo esta análise a todos os pontos calculados é possível estimar a diferença de consumo nos locais passíveis de ganho a 35 km/h entre a melhor operação possível atual e a melhor operação possível independente para manter essa velocidade.

Para estimar a diferença de consumo entre as duas operações foram adotadas as seguintes premissas:

- O tempo que a composição está exposta a configuração será calculado em cima de uma velocidade de 35 km/h, dado que a sobra de potência pequena se comparada ao esforço requerido. Portanto, considerando que os intervalos serão calculados de 50 em 50 metros, o tempo que a composição estará sujeita à configuração será dado por:

$$t = \frac{\Delta S}{V} = \frac{50 \text{ metros}}{35 \text{ km/h}} = 5,14 \text{ segundos}$$

- Não será considerado a inércia do motor para a mudança dos pontos, ou seja, os pontos podem variar em qualquer intervalo de tempo. Essa simplificação fará com que seja encontrado o limite superior do ganho, uma vez que a qualquer instante pode-se trocar para a configuração ótima.

- Apenas os locais em que o esforço requerido pela via para manter-se os 35 km/h esteja entre 0 e 92 tf (esforço trator fornecido pela configuração 8-8-8 a 35 km/h), pois fora desta faixa os dois casos operam da mesma maneira.

- Nos locais onde o esforço disponibilizado pela configuração requerida ultrapassar o esforço exigido pelo trecho não será feito o recálculo para determinar a velocidade da composição, será considerado a velocidade utilizada para o cálculo de esforço requerido.

-

A tabela 15 exemplifica o cálculo do consumo para um intervalo de 1000 metros:

Tabela 15 Cálculo do consumo entre os km 269,300 e 268,300.

Intervalo	Esforço requerido (tf)	Operação atual			Operação independente			Economia (Litros)
		Config.	Esforço Disponível (tf)	Consumo (Litros)	Config.	Esforço Disponível (tf)	Consumo (Litros)	
269300 - 269250	9,53	2-2-2	9,79	0,31	2-2-2	9,79	0,31	0,00
269250 - 269200	11,16	1-1-4	12,71	0,48	1-2-3	11,28	0,42	0,06
269200 - 269150	12,07	1-1-4	12,71	0,48	1-1-4	12,71	0,48	0,00
269150 - 269100	13,07	2-2-3	13,35	0,48	2-2-3	13,35	0,48	0,00
269100 - 269050	14,00	0-0-5	14,82	0,52	0-0-5	14,82	0,52	0,00
269050 - 269000	14,76	0-0-5	14,82	0,52	0-0-5	14,82	0,52	0,00
269000 - 268950	15,80	1-1-5	17,21	0,58	0-1-5	16,02	0,55	0,03
268950 - 268900	16,52	1-1-5	17,21	0,58	1-1-5	17,21	0,58	0,00
268900 - 268850	17,50	2-2-5	21,35	0,70	0-2-5	18,08	0,61	0,09
268850 - 268800	18,54	2-2-5	21,35	0,70	1-2-5	19,28	0,64	0,06
268800 - 268750	21,91	1-1-6	22,19	0,84	1-3-5	22,84	0,81	0,02
268750 - 268700	24,71	2-2-6	26,33	0,95	2-3-5	24,91	0,87	0,08
268700 - 268650	28,94	5-5-0	29,65	1,00	0-5-5	29,65	1,00	0,00
268650 - 268600	32,33	5-5-2	32,91	1,09	5-5-2	32,91	1,09	0,00
268600 - 268550	35,63	5-5-3	36,47	1,27	5-5-3	36,47	1,27	0,00
268550 - 268500	38,25	5-5-4	39,98	1,38	5-5-4	39,98	1,38	0,00
268500 - 268450	41,46	5-5-5	44,47	1,49	5-5-5	44,47	1,49	0,00
268450 - 268400	45,26	4-4-7	45,38	1,73	1-5-8	46,40	1,67	0,06
268400 - 268350	47,30	5-5-6	49,45	1,74	2-5-8	48,47	1,73	0,01
268350 - 268300	48,13	5-5-6	49,45	1,74	2-5-8	48,47	1,73	0,01
							Total:	0,41

Fonte: Autor.

Para o cálculo da tabela acima foi considerada a tabela de consumo já exposta. Estendendo este cálculo para todo o trecho, temos a economia de combustível comparando a possível operação atual à operação independente.

Tabela 16 Diferença em litro das operações.

Consumo atual	Consumo Independente	Diferença
2622,0	2597,3	24,7

Fonte: Autor.

Os valores de consumo mostrados acima referem-se apenas às regiões em que o esforço requerido fica entre 0 e 92 tf. Portanto, considerando que essas duas operações irão consumir diesel na mesma ordem dos 30 trens de julho de 2018, a título de comparação, é possível estimar um ganho percentual.

Tabela 17 Consumo dos trens em análise de julho de 2018.

Trem	Consumo total (Litros)	Trem	Consumo total (Litros)	Média (Litros)
T 1	8298,5	T 16	8300,5	8037,2
T 2	8449,9	T 17	8156,8	Mínimo
T 3	7979,7	T 18	8062,7	6775,6
T 4	8251,9	T 19	8076,7	Máximo
T 5	8151,7	T 20	7990,0	8449,9
T 6	8202,9	T 21	8055,4	
T 7	8305,2	T 22	8259,4	
T 8	8129,9	T 23	7795,1	
T 9	7728,0	T 24	7860,2	
T 10	7841,9	T 25	7812,6	
T 11	8026,0	T 26	8107,5	
T 12	8076,8	T 27	7981,1	
T 13	7719,2	T 28	8389,7	
T 14	8149,7	T 29	8161,1	
T 15	8020,6	T 30	6775,6	

Fonte: Autor.

O consumo dos trens mostrados acima foi calculado com base no registrador de evento das locomotivas dos trens.

Considerando uma diferença de 24,7 litros, a economia de combustível da operação independente para a operação possível atual estaria entre 0,29%, quando considerado o maior valor de consumo encontrado na amostra, e 0,36%, quando considerado o menor valor. É válido ressaltar

que esses valores foram encontrados para o trecho em pauta do estudo, não se estendendo para outros trechos ou outras condições de via.

Portanto, apesar de haver um ganho, este não é expressivo na mesma ordem dos ganhos apontados por Pereira (2009), para o trecho analisado, quando usada a metodologia apresentada neste trabalho.

4 RESULTADOS E CONCLUSÃO

A tabela abaixo sintetiza os resultados encontrados ao longo do trabalho:

Tabela 18 Resumo dos possíveis ganhos encontrados.

Tópico	Estudo:	Ganho percentual
3.1.1	Possível ganho operando de maneira assíncrona 2 locomotivas, respeitando o esforço fornecido pelo bloco síncrono:	0,22%
3.1.2	Possível ganho operando 2 blocos de locomotivas (2 na cabeça e 1 na cauda), buscando a melhor operação que respeite o esforço fornecido pela operação atual	1,27%
3.1.2	Possível ganho operando de maneira assíncrona 3 locomotivas, respeitando o esforço fornecido pela operações atuais	1,32%
3.2.2	Possível ganho operando a uma velocidade de 35 km/h utilizando da combinação que forneça o menor consumo possível, respeitando o esforço exigido pelo trecho	0,36%

Fonte: Autor.

A tabela mostrada acima deixa claro que, dado a metodologia empregada neste trabalho, o modelo de tração distribuída gera economia de combustível quando analisada exclusivamente a possibilidade de empregar diferentes pontos. Ou seja, a maior combinação possível de pontos ocasionada pela tração distribuída faz com que seja possível operar de maneira mais econômica, porém, ao contrário do apontado por Borba (2009), essa possibilidade de execução de operações assíncronas não gera uma economia da ordem de 5% no trecho em que foi realizado o estudo, como ocorreu da EFC, quando realizada a metodologia e condições empregadas neste trabalho.

Como apontado por Castello Branco et al (2000), o emprego da tração distribuída em trens de carga está muito mais relacionado à possibilidade da execução de trens extra longos, ou seja, por diminuir o esforço máximo nos engates, a tração distribuída permite operar trens mais longos

e mais pesados, que aumentam a capacidade da malha e diminui os gastos unitários por trens, como equipagem, por exemplo.

Além disso, como o estudo foi realizado em um perfil de via acidentado, ou seja, onde há muita variação de perfil e a composição está com o peso elevado, dificilmente ela está sujeita a sobra de potência, não havendo muitos locais com oportunidade de ganho.

Com isso, a partir da abordagem empregada neste trabalho, a possibilidade de execução de diferentes combinações de ponto não fornece à composição uma redução de consumo de diesel na casa dos 5% no trecho em questão. Porém, é necessário que mais estudos sejam feitos a respeito dos demais ganhos relacionados à tração distribuída, por ser uma tecnologia amplamente empregada na indústria ferroviária internacional.

Como sugestão para próximos trabalhos ficam os seguintes pontos:

- Estudo da influência da distribuição de potência nas forças e choques internos dos trens de carga quando operados segundo as configurações propostas neste trabalho.
- Consequência da execução de pontos diferentes em locomotivas de um mesmo bloco.
- Estudo da influência do “efeito corda” citado por Pereira (2009) na economia de combustível.
- Estender o estudo para outros trechos, preferencialmente com perfil menos acidentado ou trens mais leves.

REFERÊNCIAS

ANTF, **Associação Nacional de Transportes Ferroviários**. Brasília, DF, 2018. Disponível em: <https://www.antf.org.br/informacoes-gerais/>. Acesso em 25 de junho de 2018.

BORBA, J. L. **Mecânica de Locomotivas**. Pós Graduação em Engenharia Ferroviária– Notas de Aula – Instituto de Educação Continuada - PUC Minas – 2011

BRINA, H. L. **Estradas de Ferro**, volumes 1 e 2. Livros Técnicos e Científicos Editora. Rio de Janeiro. 1983

CASTELLO BRANCO, José Eduardo et al. **Tratado de Estradas de Ferro**. Material rodante. 2000

CASSEMIRO, Sergio Luiz. **PROCEDIMENTO PARA PLANEJAMENTO DE ALOCAÇÃO DE LOCOMOTIVAS**. Dissertação (mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2018.

GENERAL ELETRIC. **Distributed power and eletronic air brake control system for a train and associated methods**. US 6,301,015 , 04 jun. 2002.

DNIT, **Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes**. Histórico Ferroviário. Brasília, DF, 2018. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/ferrovias/historico.asp>. Acesso em 25 de junho de 2018.

GAZABIM, Guilherme Scagion. **Uma contribuição aos estudos para adequação de superelevações no circuito do minério da MRS**. Dissertação (pós-graduação). Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2008.

LEITE, Allan Rodrigo. **Um esquema para redução do consumo de combustível em sistemas de condução férrea baseado em otimização distribuída de restrição.** Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2009.

PEREIRA, Olyntho Carmo. **Soluções de otimização da eficiência energética de uma ferrovia de carga : o caso da Estrada de Ferro Carajás - EFC / Olyntho Carmo Pereira – 2009.**

PROFILLIDIS, V.A. **Railway Management and Engineering.** Third Edition. Hampshire, England.

APÊNDICE A – CONFIGURAÇÕES POSSÍVEIS PARA TRÊS LOCOMOTIVAS INDEPENDENTES

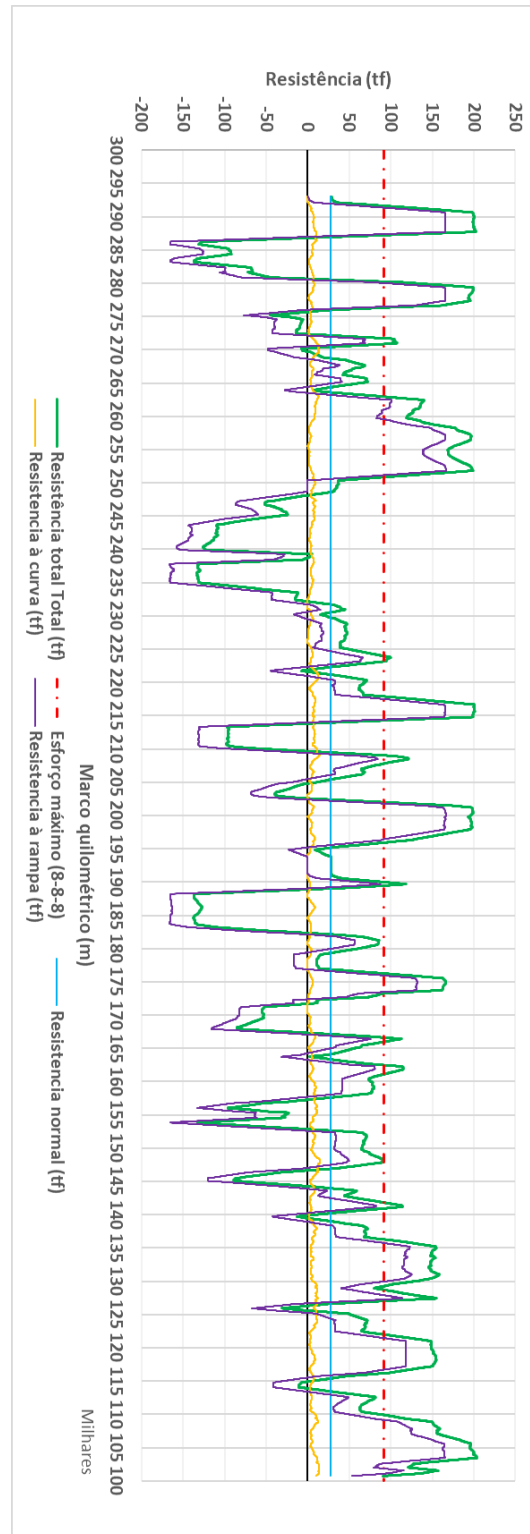
Tabela 19 Consumo das 165 configurações possíveis para uma composição com 3 locomotivas.

0-0-0	24	0-3-7	864,9	1-2-5	450,5	2-2-5	491,7	3-3-6	907	4-6-7	1459,4
0-0-1	47,2	0-3-8	991,8	1-2-6	626	2-2-6	667,2	3-3-7	1049,2	4-6-8	1586,3
0-0-2	88,4	0-4-4	552,8	1-2-7	768,2	2-2-7	809,4	3-3-8	1176,1	4-7-7	1601,6
0-0-3	208,3	0-4-5	627,3	1-2-8	895,1	2-2-8	936,3	3-4-4	737,1	4-7-8	1728,5
0-0-4	288,4	0-4-6	802,8	1-3-3	415,8	2-3-3	457	3-4-5	811,6	4-8-8	1855,4
0-0-5	362,9	0-4-7	945	1-3-4	495,9	2-3-4	537,1	3-4-6	987,1	5-5-5	1040,7
0-0-6	538,4	0-4-8	1071,9	1-3-5	570,4	2-3-5	611,6	3-4-7	1129,3	5-5-6	1216,2
0-0-7	680,6	0-5-5	701,8	1-3-6	745,9	2-3-6	787,1	3-4-8	1256,2	5-5-7	1358,4
0-0-8	807,5	0-5-6	877,3	1-3-7	888,1	2-3-7	929,3	3-5-5	886,1	5-5-8	1485,3
0-1-1	70,4	0-5-7	1019,5	1-3-8	1015	2-3-8	1056,2	3-5-6	1061,6	5-6-6	1391,7
0-1-2	111,6	0-5-8	1146,4	1-4-4	576	2-4-4	617,2	3-5-7	1203,8	5-6-7	1533,9
0-1-3	231,5	0-6-6	1052,8	1-4-5	650,5	2-4-5	691,7	3-5-8	1330,7	5-6-8	1660,8
0-1-4	311,6	0-6-7	1195	1-4-6	826	2-4-6	867,2	3-6-6	1237,1	5-7-7	1676,1
0-1-5	386,1	0-6-8	1321,9	1-4-7	968,2	2-4-7	1009,4	3-6-7	1379,3	5-7-8	1803
0-1-6	561,6	0-7-7	1337,2	1-4-8	1095,1	2-4-8	1136,3	3-6-8	1506,2	5-8-8	1929,9
0-1-7	703,8	0-7-8	1464,1	1-5-5	725	2-5-5	766,2	3-7-7	1521,5	6-6-6	1567,2
0-1-8	830,7	0-8-8	1591	1-5-6	900,5	2-5-6	941,7	3-7-8	1648,4	6-6-7	1709,4
0-2-2	152,8	1-1-1	93,6	1-5-7	1042,7	2-5-7	1083,9	3-8-8	1775,3	6-6-8	1836,3
0-2-3	272,7	1-1-2	134,8	1-5-8	1169,6	2-5-8	1210,8	4-4-4	817,2	6-7-7	1851,6
0-2-4	352,8	1-1-3	254,7	1-6-6	1076	2-6-6	1117,2	4-4-5	891,7	6-7-8	1978,5
0-2-5	427,3	1-1-4	334,8	1-6-7	1218,2	2-6-7	1259,4	4-4-6	1067,2	6-8-8	2105,4
0-2-6	602,8	1-1-5	409,3	1-6-8	1345,1	2-6-8	1386,3	4-4-7	1209,4	7-7-7	1993,8
0-2-7	745	1-1-6	584,8	1-7-7	1360,4	2-7-7	1401,6	4-4-8	1336,3	7-7-8	2120,7
0-2-8	871,9	1-1-7	727	1-7-8	1487,3	2-7-8	1528,5	4-5-5	966,2	7-8-8	2247,6
0-3-3	392,6	1-1-8	853,9	1-8-8	1614,2	2-8-8	1655,4	4-5-6	1141,7	8-8-8	2374,5
0-3-4	472,7	1-2-2	176	2-2-2	217,2	3-3-3	576,9	4-5-7	1283,9		
0-3-5	547,2	1-2-3	295,9	2-2-3	337,1	3-3-4	657	4-5-8	1410,8		
0-3-6	722,7	1-2-4	376	2-2-4	417,2	3-3-5	731,5	4-6-6	1317,2		

Fonte: Autor.

APÊNDICE B – GRÁFICO DE ESFORÇO PARA O TRECHO EM QUESTÃO

Figura 20 Gráfico de esforço requerido para o trecho em questão



Fonte: Autor.