

Avaliação do consumo energético de locomotivas elétricas no Brasil: um estudo de caso no transporte de cargas.

Fellipe Vitucci de Lucca Ribeiro (Universidade Nove de Julho - Uninove)
fellipecvitucci@uni9.edu.br

Aparecido dos Reis Coutinho (Universidade Nove de Julho – Uninove)
arcoutin@uni9.pro.br



O transporte ferroviário apresenta grande importância para a competitividade da economia nacional e regional e é caracterizado como um modal de longo curso e baixa velocidade, sendo utilizado especialmente para movimentar grandes volumes de cargas. Apresenta eficiência energética superior aos demais modais, menor impacto ambiental devido a baixa emissão de poluentes pelas composições, maior segurança, baixo índice de acidentes e de perdas. O presente trabalho foi desenvolvido na forma de estudo de caso, tendo como meta avaliar o consumo energético de locomotivas elétricas de uma empresa operadora ferroviária de cargas no Brasil. Foi possível verificar a evolução da eficiência energética desta operação ao longo dos anos de 2017-2019; em que, mesmo com o aumento das cargas/massas transportadas no período analisado, o consumo energético se manteve com poucas variações e, por outro lado, apresentou evolução e melhoria do consumo energético por viagem realizada, assim como em relação ao volume de carga transportada, tendo como referência os indicadores de tonelada útil (TU), tonelada bruta (TB) e distância percorrida.

Palavras-chave: Eficiência energética, transporte ferroviário, locomotivas elétricas, logística.

1. Introdução

O transporte ferroviário apresenta grande importância para a competitividade da economia nacional e regional (LUAN, 2018) e é caracterizado como um modal de longo curso e baixa velocidade, sendo utilizado especialmente para movimentar grandes volumes de cargas, principalmente de minérios e seus derivados, produtos siderúrgicos, combustíveis, produtos agroindustriais, fertilizantes, além de contêineres. Também, apresenta como vantagens eficiência energética superior aos demais modais, menor impacto ambiental devido a baixa emissão de poluentes pelas composições, maior segurança, baixo índice de acidentes e de perdas na forma de furtos e roubos (ANTT, 2019; BALLOU, 2006).

Devido a problemas físicos, operacionais e institucionais, o sistema ferroviário brasileiro é subaproveitado, de modo que são necessários investimentos e racionalização de processos decisórios para que o potencial deste serviço seja efetivado (CNT, 2019).

A movimentação e produção ferroviária no Brasil em 2018 atingiu recorde histórico. Segundo a ANTT (Associação Nacional de Transportes Terrestres) foram movimentadas neste ano 569,8 milhões de toneladas úteis (TU) de mercadorias, correspondente a uma elevação de 5,7% em relação ao ano de 2017. Por outro lado, no mesmo ano apresentou elevação de 8,5% com relação ao indicador TKU (toneladas quilômetro-útil). Entre os anos de 2015 e 2018 houve crescimento do transporte ferroviário no Brasil, fato contrário ao transporte rodoviário e à economia do país, que tiveram queda neste período (ANTT, 2019).

Devido ao ambiente competitivo no setor de transportes, cada vez mais é necessário que as ferrovias de cargas busquem uma posição vantajosa no mercado, principalmente com relação aos fatores econômicos (ŠTEFANCOVÁ, 2017). Assim, o setor do transporte ferroviário está sendo forçado a melhorar sua performance, por exemplo, como a eficiência energética, para atender à crescente demanda e se tornar mais competitiva frente outros modais de transporte (DUNBAR *et. al.*, 2017).

Neste contexto, nos últimos anos a busca pela eficiência energética tem sido uma meta global bastante importante, discutida e priorizada. Assim, a conscientização e informações sobre as formas de uso e demanda energia são necessárias para a melhoria da eficiência energética em praticamente todos os setores da sociedade, para que ações possam ser tomadas em relação às mudanças climáticas e o constante aumento dos preços dos combustíveis (ABREU, 2013; LIIMATAINEN E PÖLLÄNEN, 2010).

A eficiência energética pode ser alcançada quando se executa a atividade com um equipamento mais eficiente, que pode ser uma inovação incremental ou até mesmo um novo equipamento. Adicionalmente, a eficiência energética pode ser conseguida por meio do uso racional da energia, que depende do aspecto comportamental por parte dos usuários; ou pela substituição energética, pela troca de uma fonte por outra, como por exemplo, a troca da energia elétrica pela energia solar para geração de energia térmica; de modo a empregar fontes mais econômicas e ambientalmente amigáveis (ABREU, 2013; EPE, 2007).

De acordo com Pellegrini et. al., (2016) o consumo de energia no transporte ferroviário está totalmente relacionado com a operação do trem, em que as paradas e acelerações, são fatores chaves para a eficiência energética deste modal. O grande desafio para reduzir os níveis de consumo de combustíveis é manter o sistema com aceleração praticamente constante, com fluidez na circulação da composição.

As características dos trechos percorridos por um trem também influenciam diretamente a eficiência energética, uma vez que as variáveis como força de tração, distância percorrida e a aceleração alteram em relação a características geográficas como inclinação, extensão, entre outras (RAO *et. al.*, 2016).

Em geral, as locomotivas elétricas são caracterizadas por possuir relação de potência/peso superior as máquinas movidas a óleo diesel e as híbridas diesel-elétricas. As locomotivas elétricas fornecem elevada potência de tração em um curto espaço de tempo, ou seja, proporcionam uma aceleração rápida para grandes volumes (TANG, 2020). As locomotivas elétricas apresentam menor proporção em uso para transporte de cargas em todo mundo, com relação as movidas a combustíveis de origem fóssil, principalmente por conta dos custos de infraestrutura associados à eletrificação do trecho, assim como aos custos de fornecimento deste tipo de energia, que representam uma parte significativa dos custos finais de transporte (CIPEK 2019; DINCER E ZAMFIRESCU, 2016; FEDERICI *et. al.* 2008).

No passado houve grande utilização de locomotivas elétricas no transporte ferroviário brasileiro de cargas. O início se deu no período da I Guerra Mundial devido as dificuldades e restrição na importação de carvão, que era o combustível principal das locomotivas na época. Esta tecnologia mostrou-se capaz de gerar, de maneira segura, econômica e flexível, maiores quantidades de energia que as alternativas então existentes, fatores e benefícios que foram importantes para provocar o crescimento deste tipo de máquina na época (A FERROVIA

PAULISTA, 2016; VFCO, 1993). No entanto a elevada demanda de transporte por vias férreas levou a necessidade de trens cada vez mais longos, assim como de extensão da malha para atender novos fluxos. Os altos investimentos foram necessários para os novos sistemas de eletrificação; mas a baixa eficiência de locomotivas elétricas para trens de grande porte transitando em baixa velocidade acabaram por inviabilizar este tipo de transporte no Brasil. Aos poucos as máquinas elétricas foram substituídas locomotivas híbridas diesel-elétricas, que proporcionam maiores vantagens frente as características do transporte ferroviário brasileiro até os dias atuais (GORNI, 2003).

No Brasil, atualmente, há apenas um trecho para transporte de cargas que utiliza tração elétrica, que está localizado no estado de SP, ligando o Planalto Paulista a região da Baixada Santista. As movimentações são realizadas por uma concessionária de transporte ferroviário que através desta operação atendem terminais de exportação no Porto de Santos, localizado em Santos-SP e Guarujá-SP, além de abastecer indústrias da região de Cubatão-SP. As operantes neste trecho foram criadas por uma empresa suíça especialmente para este projeto, tendo aproximadamente 18 metros de comprimento e potência de 5 mil KWh (MRS, 2018; PORTO GENTE, 2013).

Neste contexto, o presente trabalho foi desenvolvido na forma de estudo de caso, tendo como meta avaliar o consumo energético de locomotivas elétricas de uma empresa operadora ferroviária de cargas no Brasil.

2. Metodologia

O presente trabalho foi desenvolvido na forma de estudo de caso em uma empresa operadora ferroviária de cargas no Brasil, e consistiu em: a) aquisição de dados em uma empresa operadora ferroviária de transporte de cargas, especificamente com relação ao uso de locomotivas elétricas; b) coleta de dados para o deslocamento em trecho curto, de serra, em via singela (única), ligando um ponto A até outro ponto B, com extensão de 8 km e inclinação de 10%; c) foram feitos levantamento de dados do consumo de energia elétrica (KWh) e da quantidade em massa da carga transportada (Kg) para os anos de 2016, 2017 e 2018.

Ainda, o ambiente de estudo possui como característica o transporte de cargas de celulose, sucata, container, produto siderúrgico (placas, bobinas, entre outros), sal e produtos agrícolas (milho, soja, açúcar, farelo de soja). O trecho é composto por via de circulação possui dois

trilhos convencionais e um terceiro trilho, que é um sistema de cremalheira, que é o conjunto de um trilho dentado com uma engrenagem que converte o movimento rotacional em retilíneo. As locomotivas são alimentadas eletricamente por meio de uma rede instalada ao longo da via, sendo que a duração do percurso é de 18 minutos, com carga máxima da composição de 750 t. Outra característica é de que o sistema consome energia apenas na etapa de subida, visto que na descida há a geração energia para o sistema. Assim, o levantamento de dados contempla a etapa de subida.

3. Resultados e discussão

A tabela 1 mostra os dados das cargas/massas transportadas no período compreendido entre os anos 2016-2018, em que TB (tonelada bruta) corresponde à carga total, que é soma das massas e que incluem a composição (locomotivas, vagões e equipamentos de material rodante) juntamente com a massa da mercadoria; TU (tonelada útil) corresponde somente a massa da mercadoria transportada. Também, são apresentados os dados correspondentes a quantidade de viagens realizadas em cada ano.

Tabela 1 - Dados de carga/massa transportada entre 2016-2018

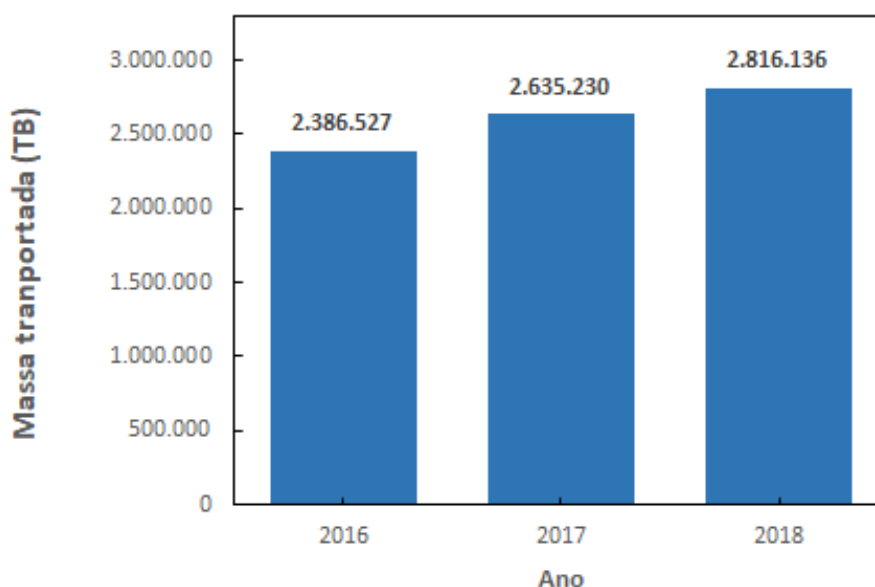
Ano	2016	2017	2018
Nº de viagens	8.531	9.471	9.539
Carga TB (t)	2.386.527	2.635.230	2.816.136
Carga TU (t)	718.292	867.258	863.101
TB/viagem	280	278	295
TU/viagem	84	92	90

Fonte: Autores (2020)

Inicialmente, a Figura 1 mostra a evolução da carga correspondente a TB, em que se pode observar um aumento da ordem de 15% no período compreendido entre os anos de 2016-2018. Também, a Figura 2 mostra a evolução dos dados de TU em que se observa o crescimento da

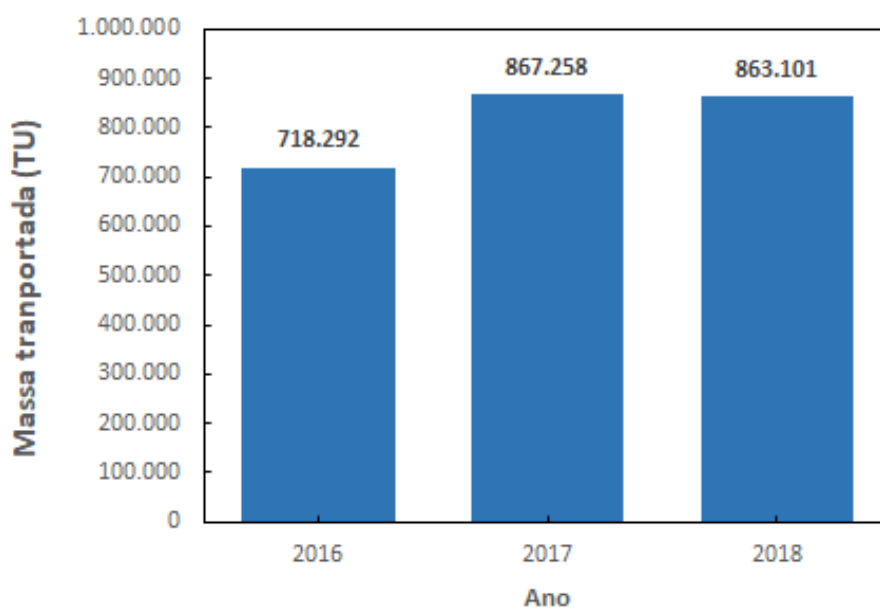
ordem de 17% entre os anos de 2016 e 2017, seguido de uma ligeira retração de aproximadamente 0,5% entre 2017 e 2018.

Figura 1 - Massa **bruta** transportada (toneladas).



Fonte: Autores (2020)

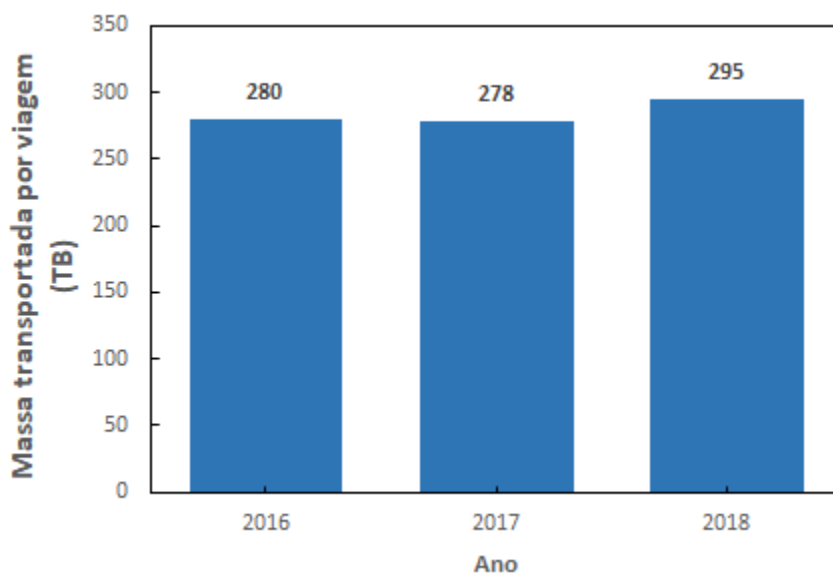
Figura 2 - Carga **útil** transportada (toneladas).



Fonte: Autores (2020)

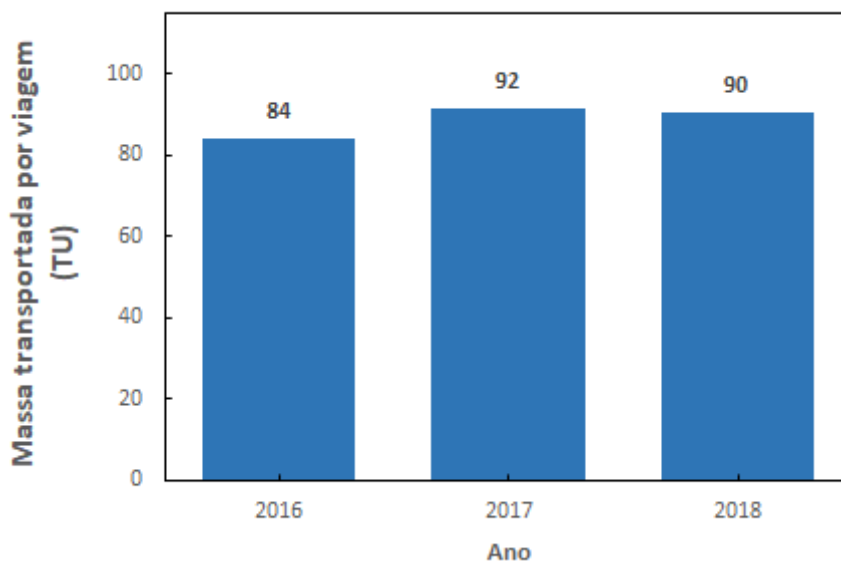
Comparando a carga/massa bruta movimentada com relação a quantidade de viagens (TB/viagem), a Figura 3 mostra um leve aumento no ano de 2018, que teve um acréscimo de 15 TB/viagem, comparado ao ano de 2017. De modo semelhante, a Figura 4 mostra a relação carga/massa útil transportada por viagem (TU/viagem), com pequena elevação no período.

Figura 3 - Carga/massa **bruta** transportada por viagem (toneladas).



Fonte: Autores (2020)

Figura 4 - Carga/massa **útil** transportada por viagem (toneladas).



Fonte: Autores (2020)

Com relação ao consumo de energia elétrica, a Tabela 2 mostra os dados relacionados ao consumo total em cada ano considerado, assim como os valores correspondentes às cargas transportadas. Observa-se que o consumo energético foi muito próximo no período considerado; com uma ligeira redução no ano de 2018, em que há uma queda de aproximadamente 1,63% em relação ao ano anterior.

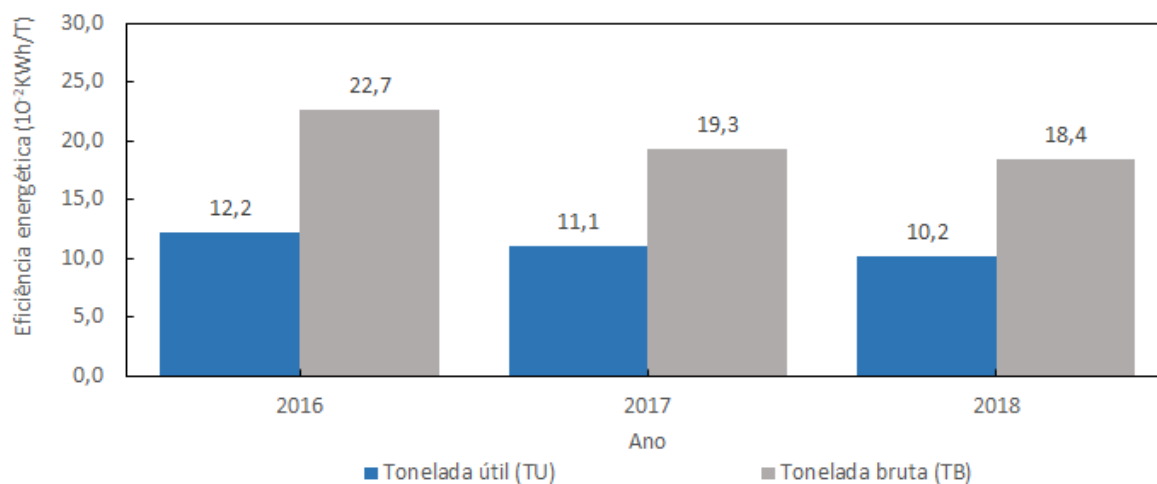
Tabela 2 - Dados do consumo de energia entre 2016-2018

Ano	2016	2017	2018
Consumo KWh	292.245	292.120	287.345
KWh/TB	0,122	0,111	0,102
KWh/TU	0,407	0,337	0,333
KWh/viagem	34	31	30
KWh/Km	15	14	13

Fonte: Autores (2020)

Portanto, em termos de eficiência energética observa-se a redução ao longo dos três anos no consumo energético por unidade de massa movimentada, como mostra a Figura 5.

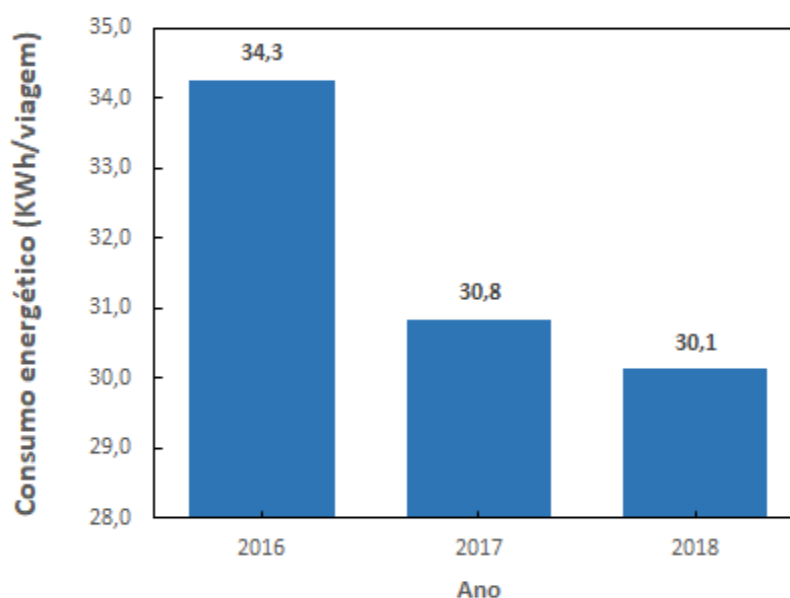
Figura 5 - Eficiência energética com relação a carga transportada (TU e TB).



Fonte: Autores (2020)

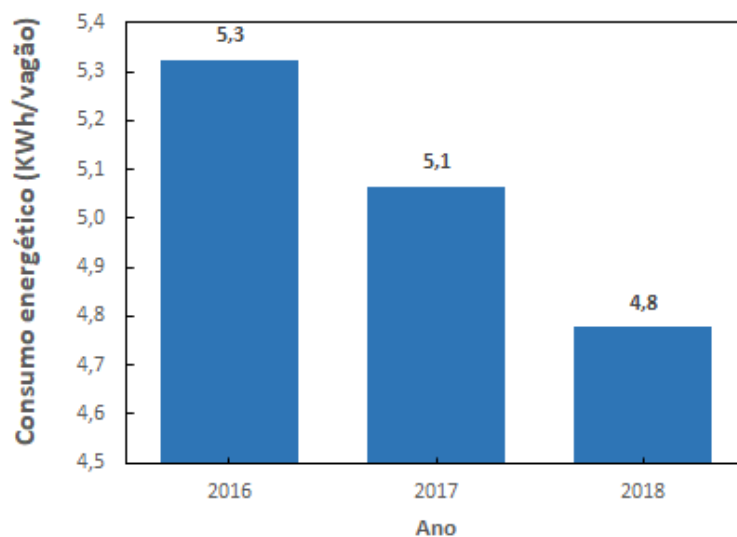
De outro modo, a Figura 6 mostra a quantidade de energia elétrica consumida para realizar uma viagem, com valor médio da ordem de 31,7 KWh/viagem. De forma complementar, a Figura 7 mostra a quantidade de energia consumida para movimentar cada vagão, mantendo em torno de 5KWh/vagão. Ambos os indicadores apresentaram redução ao longo do período considerado.

Figura 6 - Eficiência energética por viagem.



Fonte: Autores (2020)

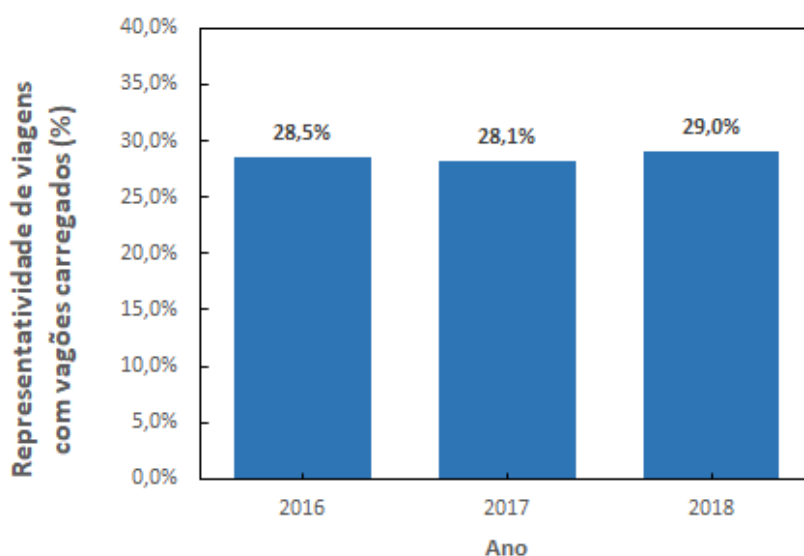
Figura 7 - Eficiência energética por vagão movimentado.



Fonte: Autores (2020)

A Figura 8 mostra os dados do número de viagens com vagões carregados, com relação ao número total de viagens. Observa-se que menos de um terço das viagens são empregadas para a movimentação de cargas e, que por outro lado, ocorre elevada participação de movimentações de vagões vazios e locomotivas.

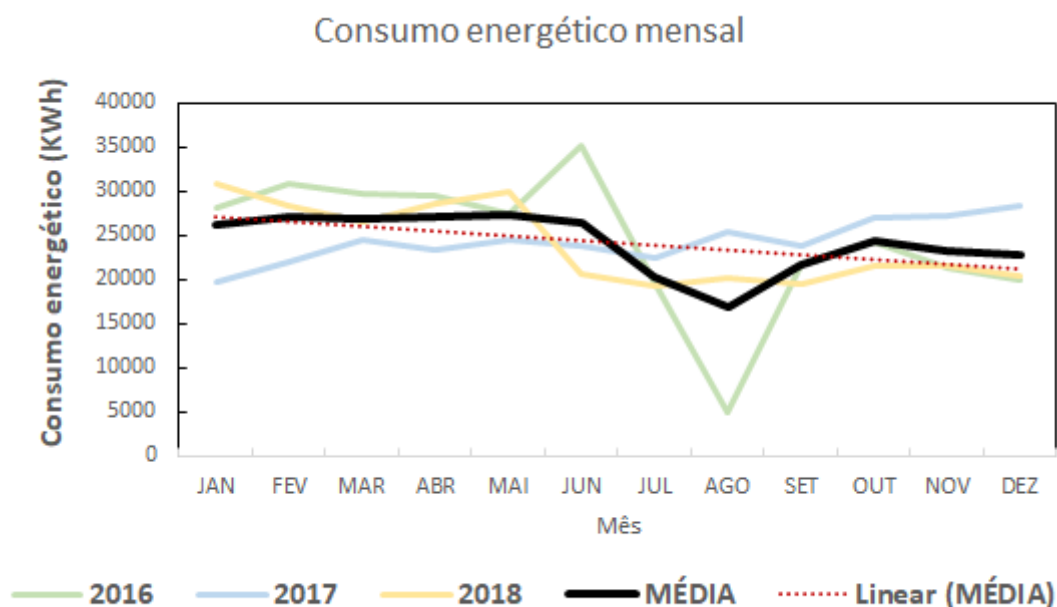
Figura 8 - Representatividade de viagens com vagões carregados.



Fonte: Autores (2020)

Em termos de sazonalidade foram analisados os dados de consumo mensal de energia elétrica e os referentes a massa movimentada mensal durante os anos de 2016-2018, mostrados na Figura 9. Observa-se uma leve inclinação decrescente do consumo ao longo dos meses, em que historicamente o consumo começa a reduzir a partir do mês de julho, atingindo um baixo consumo no mês de agosto. Em seguida, volta a crescer a partir de setembro em diante. O ciclo se repete a cada ano em função da sazonalidade do tipo de cargas transportada.

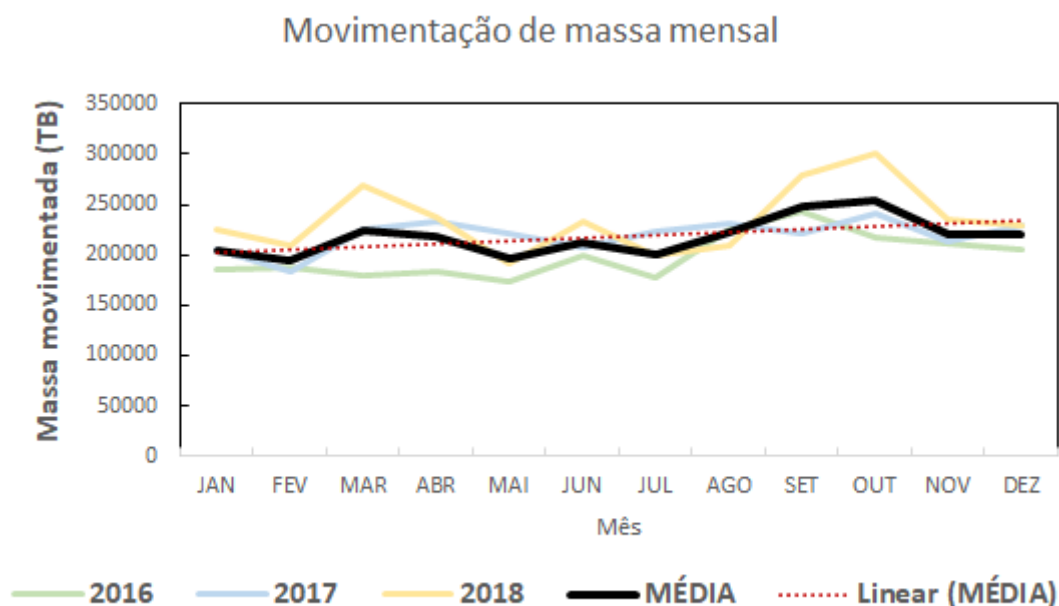
Figura 9 - Variação mensal do consumo de energia elétrica.



Fonte: Autores (2020)

Com relação a carga transportada, em termos de massa bruta (TB), a Figura 10 mostra uma pequena variação mensal, com uma ligeira tendência de aumento entre os meses setembro e outubro.

Figura 10 - Variação da massa bruta transportada.



Fonte: Autores (2020)

Nas figuras anteriores foi possível verificar que enquanto o consumo de energia elétrica tende a reduzir ao longo dos meses; em contrapartida, a massa movimentada aumenta de forma mais suave. Isto pode estar relacionado com as condições de temperatura da região, de modo que em períodos mais quentes tendem a ter uma maior demanda energética.

5. Conclusão

Ao longo do trabalho foi possível verificar a evolução da eficiência energética desta operação ao longo de três anos. Mesmo com o aumento das cargas/massas transportadas nos períodos analisados o consumo energético se manteve com poucas variações. Ainda fica evidente a melhoria do consumo energético por viagem, TU, TB e Km.

As viagens mostraram a agregação de mais valor ao negócio, uma vez que elas apresentaram maior valor de cargas/massa transportadas ao longo dos anos. No entanto, houve uma pequena retração na TU por viagem no ano de 2018, mas mesmo assim o resultado continua em relação a 2017. O maior aumento no indicador de TB por viagem em relação ao TU por viagem, leva a algumas questões podem ser exploradas em estudos futuros:

- Qual a relação e o impacto de diferentes tipos de mercadorias nesta operação (produtos diferentes possuem diferente densidade e necessitam de diferentes tipos de vagões).

- Quais foram os procedimentos operacionais adotados para atingir esta redução no consumo energético?

Para potencializar a eficiência energética deste sistema, é possível sugerir o aumento no transporte de viagens com vagões carregados, uma vez que estas atualmente representam menos de 30% de todas as viagens. Assim o sistema poderá melhores padrões de consumo energético por massa transportada, além de estar agregando maior valor ao negócio e reduzindo a movimentação vagões vazios. É indicado que este incremento de cargas seja realizado entre os meses de junho a agosto, dado que o sistema tende a consumir menos energia neste período devido a condições climáticas, além de ser um período um pouco mais ocioso e com grandes oportunidades.

REFERÊNCIAS

A FERROVIA PAULISTA. 2016. **Locomotivas elétricas da companhia paulista de estradas de ferro**. Disponível em portogente.com.br. Acessado em 16 de maio de 2020.

ABREU, BRD. 2013. **Avaliação do impacto do envelhecimento de frota na eficiência energética de uma empresa do setor ferroviário**.

ANTT – Associação Nacional de Transportes Terrestres. 2018. **Anuário Estatístico do Setor Ferroviário**. Disponível em: www.antt.gov.br. Acessado em 02 de novembro de 2019, 2019.

BALLOU RH. 2006. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos/logística empresarial**. 5ª edição. Editora Bookman, Porto Alegre.

CIPEK M, PAVKOVIC, D KIJAIC Z, MLINARIC TJ. 2019. *Assessment of battery-hybrid diesel-electric locomotive fuel savings and emission reduction potentials based on a realistic mountainous rail route*. *Energy*, 173, 1154-1171.

CNT – Confederação Nacional de Transporte. 2019. **Anuário CNT do Transporte – Estatísticas Consolidadas 2019**. Disponível em: www.cnt.gov.br. Acessado em 27 de fevereiro de 2020.

DINCER I, ZAMFIRESCU C. 2016. *A review of novel energy options for clean rail applications*. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 28, 461-478.

DUNBAR R, ROBERTS C, ZHAO N. 2007. *A tool for the rapid selection of a railway signalling strategy to implement train control optimisation for energy saving*. *Journal of rail transport planning & management*, 7(4), 224-244, 2017.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia – 2030**. Disponível em: www.epe.gov.br. Acessado em 27 de abril de 2020.

FEDERICI M, ULGIATI S, BASOSI R. *A thermodynamic, environmental and material flow analysis of the Italian highway and railway transport systems*. *Energy*, 33(5), 760-775, 2008.

GORNI AA. 2003. **A eletrificação nas ferrovias brasileiras**. Disponível em: www.gorni.eng.br. Acessado em 12 de maio de 2020.

LUAN X, WANG Y, DE SCHUTTER B, MENG L, LODEWIJKS G, CORMAN F. 2018. *Integration of real-time traffic management and train control for rail networks-Part 1: Optimization problems and solution approaches. Transportation Research Part B: Methodological*, 115, 41-71.

LIIMATAINEN H E PÖLLÄNEN M. 2010. *Trends of energy efficiency in Finnish road freight transport. 1995–2009 and forecast to 2016. Energy Policy*, 38(12), 7676-7686.

MRS LOGÍSTICA. 2018. **Cremalheira**. Disponível em www.mrs.com.br. Acessado em 15 de maio de 2020.

PELLEGRINI P; MARLIÈRE G; RODRIGUEZ J. 2016. *A detailed analysis of the actual impact of real-time railway traffic management optimization. Journal of Rail Transport Planning & Management*, 6(1), 13-31.

PORTO GENTE. 2013. **A ferrovia de Cremalheira da Serra do Mar - parte 2**. Disponível em portogente.com.br. Acessado em 16 de maio de 2020.

RAO X, MONTIGEL M, WEIDMANN U. 2016. *A new rail optimisation model by integration of traffic management and train automation. Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 71, 382-405.

ŠTEFANCOVÁ V, NEDELIAKOVÁ E, LÓPEZ-ESCOLANO C. 2017. *Connection of dynamic quality modeling and Total Service Management in railway transport operation. Procedia engineering*, 192, 834-839.

TANG H, WANG Y, LIU, X, FENG X. 2020. *Reinforcement learning approach for optimal control of multiple electric locomotives in a heavy-haul freight train: A Double-Switch-Q-network architecture. Knowledge-Based Systems*, 190, 105-173.

VFCO. **A eletrificação da Paulista**. 1993. Disponível em: www.cnt.gov.br. Acessado em 10 de maio de 2020.