

**GESTÃO AMBIENTAL E ENERGÉTICA NO AGRONEGÓCIO: ESTUDO DE CASO  
PARA O TRANSPORTE DE GRÃOS EM LONGA DISTÂNCIA**

**ENVIRONMENTAL AND ENERGY MANAGEMENT IN AGRIBUSINESS: A CASE  
STUDY FOR GRAIN TRANSPORTATION OVER LONG DISTANCES**

**GESTION AMBIENTAL Y ENERGÉTICA EM LA AGROINDUSTRIA: UN  
ESTUDIO DE CASO PARA EL TRANSPORTE DE GRANOS A LARGAS  
DISTANCIAS**

Fellipe Vitucci de Lucca Ribeiro  
Mestrado em Engenharia de Produção- UNINOVE

Aparecido dos Reis Coutinho  
Professor do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) – RDR Tecnologia  
Ambiental Ltda, Campinas - SP  
<https://orcid.org/0000-0002-6686-8828>

Editor Científico: José Edson Lara  
Organização Comitê Científico  
Double Blind Review pelo SEER/OJS  
Recebido em 18/02/2021  
Aprovado em 25/11/2022

This work is licensed under a Creative Commons Attribution – Non-Commercial 3.0 Brazil

## Resumo

**Objetivo do estudo:** Este estudo tem por objetivo analisar a gestão ambiental e energética no setor do agronegócio, por meio da avaliação do consumo de energia e emissão de GEE em uma empresa ferroviária de transporte de grãos no Brasil.

**Metodologia/abordagem:** O presente trabalho foi desenvolvido na forma de estudo de caso em uma operadora ferroviária de cargas no Brasil. Foi empregada uma abordagem mista para avaliação dos dados referentes ao transporte de grãos em longas distâncias.

**Originalidade/Relevância:** A originalidade se refere ao levantamento de dados em caso real de transporte de grãos em longa distância e a avaliação do consumo de energia, juntamente com a emissão de GEE, com relação ao uso de locomotivas híbridas como agente de tração da composição. A relevância está diretamente ligada ao crescimento e importância do agronegócio na matriz econômica do País.

**Principais resultados:** Os resultados mostraram um aumento expressivo de 73,75% de carga útil transportada entre os anos 2014-2019. Adicionalmente, os dados mostraram uma evolução significativa em termos de eficiência energética, quando se comparado ao volume transportando, representando uma redução de 17,56% nas emissões de CO<sub>2</sub>

**Contribuições teóricas/metodológicas:** Os resultados contribuem para o entendimento das questões técnicas e econômicas no transporte ferroviário de grãos em longa distância, assim como contribuem nas discussões no ambiente acadêmico, analisando o aumento acelerado do agronegócio no Brasil e suas implicações em termos de emissões de GEE e eficiência energética.

**Palavras-chave:** transporte ferroviário, agronegócio, eficiência energética, emissão de GEE, locomotivas híbridas.

## Abstract

**Objective of the study:** This study aims to analyze the environmental and energy management in the agribusiness sector, through the evaluation of energy consumption and GHG emission in a grain transportation company in Brazil.

**Methodology/approach:** The present work was developed in the form of a case study in a railway freight operator in Brazil. A mixed approach was used to evaluate data regarding grain transport over long distances.

**Originality/Relevance:** Originality refers to the collection of data in the real case of grain transport over long distances and the evaluation of energy consumption, together with the emission of GHG, in relation to the use of hybrid locomotives as a traction agent for the composition. The relevance is directly linked to the growth and importance of agribusiness in the country's economic matrix.

**Main results:** The results showed a significant increase of 73.75% in the payload transported between the years 2014-2019. In addition, the data showed a significant evolution in terms of energy efficiency, when compared to the transport volume, representing a 17.56% reduction in CO<sub>2</sub> emissions.

**Theoretical/methodological contributions:** The results contribute to the understanding of technical and economic issues in long-distance rail grain transportation, as well as contribute to

discussions in the academic environment, analyzing the accelerated increase in agribusiness in Brazil and its implications in terms of GHG emissions and energy efficiency.

**Keywords:** rail transport, agribusiness, energy efficiency, GHG emission, hybrid locomotives.

## Resumen

**Objetivo del estudio:** Este estudio tiene como objetivo analizar la gestión ambiental y energética en el sector agroindustrial, mediante la evaluación del consumo de energía y las emisiones de GEI en una empresa de transporte de granos en Brasil.

**Metodología / enfoque:** El trabajo se desarrolló en forma de estudio de caso en un operador de transporte de mercancías por ferrocarril en Brasil. Se utilizó un enfoque mixto para evaluar los datos relacionados con el transporte de granos a largas distancias.

**Originalidad / Relevancia:** La originalidad se refiere a la recolección de datos en el caso real del transporte de granos a largas distancias y la evaluación del consumo energético, junto con la emisión de GEI, en relación al uso de locomotoras híbridas como agente de tracción para la composición. La relevancia está directamente relacionada con el crecimiento y la importancia de la agroindustria en la matriz económica del país.

**Resultados principales:** Los resultados mostraron un aumento significativo del 73,75% en la carga útil transportada entre los años 2014-2019. Además, los datos mostraron una evolución significativa en términos de eficiencia energética, en comparación con el volumen transportado, lo que representa una reducción del 17,56% en las emisiones de CO<sub>2</sub>.

### **Contribuciones teóricas / metodológicas:**

Los resultados contribuyen a la comprensión de los problemas técnicos y económicos en el transporte ferroviario de granos a larga distancia, así como a las discusiones en el ámbito académico, analizando el aumento acelerado de la agroindustria en Brasil y sus implicaciones en términos de emisiones de GEI y eficiencia energética.

**Palabras clave:** transporte ferroviario, agroindustria, eficiencia energética, emisión de GEI, locomotoras híbridas.

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a busca pela eficiência energética tem sido uma meta global, discutida e priorizada. Assim, é necessário buscar novas estratégias, além da conscientização e mais informações sobre as formas de uso e demanda de energia, 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; Farah *et al.*, 2019; Liimatainen & Pöllänen, 2010).

A eficiência energética pode ser alcançada 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, todos no sentido de empregar fontes mais econômicas e ambientalmente amigáveis. Além disso, 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 (Abreu, 2013; EPE, 2007).

Com relação ao setor de transporte, destaca-se o modal ferroviário que apresenta grande importância para a economia nacional e regional (Luan, 2018), sendo caracterizado como um modal de longo curso e baixa velocidade, utilizado para movimentar grandes volumes de cargas, principalmente de produtos agroindustriais, minérios e seus derivados, produtos siderúrgicos, combustíveis, fertilizantes, além de contêineres. Também, apresenta como vantagens eficiência energética superior aos demais modais, menor impacto ambiental devido à 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 a 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. Assim, o setor do transporte ferroviário está sendo forçado a melhorar seu desempenho, como exemplo, a eficiência energética, no sentido de atender a crescente

demanda e se tornar mais competitiva frente outros modais de transporte (Dunbar *et al.*, 2017; Štefancová, 2017).

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).

### **1.1 Impactos ambientais no modal ferroviário**

O transporte é um serviço essencial para toda a sociedade como um todo, no entanto apresenta contribuição significativa e crescente para a geração e elevação dos gases de efeito estufa (GEE), sendo responsável por mais de 23% da de emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera terrestre (IEA, 2015; Kim *et al.*, 2017).

Na última década, cerca de 20% dos combustíveis fósseis produzidos globalmente foram consumidos pelo setor de transportes, na forma de energia primária, o que contribuiu significativamente emissões de GEE. Ademais, de acordo com a EPE (2007), o óleo diesel é o combustível responsável por e 77,8% de toda a energia consumida no transporte ferroviário no Brasil (Cipek, 2019; Mccollum *et al.*, 2014).

Múltiplas formas de poluição estão envolvidas e correlacionadas com o aumento da atividade de transporte ferroviário, em que os gases poluentes, principalmente CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> e os materiais particulados são emitidos pelos motores acionados pela queima de óleo diesel. Estes componentes são os principais contribuintes para a poluição, sendo o SO<sub>2</sub> o principal causador da chuva ácida e fumaça fotoquímica, que têm efeitos nocivos para a saúde e o meio ambiente (Bayraktar, 2008; Torregrosa *et al.*, 2013; Tutak *et al.*, 2015; Wei *et al.*, 2015; Wei e Geng, 2016).

## 1.2 Locomotivas híbridas

O transporte ferroviário teve início e expansão na época da primeira revolução industrial, em que os trens eram movidos por meio do vapor gerado pela queima de carvão mineral. O sucesso e a expansão do modal ferroviário estimulou o desenvolvimento de novas tecnologias, tornando-se obsoleta a locomotiva a vapor. Os motores de combustão interna a gasolina e a óleo diesel mostraram um avanço no acionamento das composições, no entanto apresentaram como desvantagens a maior dimensão e peso, além da característica mecânica diferenciada com relação à transmissão de torque às rodas. Outros avanços ocorreram com o emprego das locomotivas híbridas acionadas por sistema conjugado diesel-elétrico, em que um motor a diesel aciona um gerador que produz energia elétrica para movimentar motores de tração. Esta configuração, a locomotiva híbrida diesel-elétrica, é o formato mais utilizado em todo o mundo. Não obstante, também se destaca o uso de locomotivas elétricas, empregadas em transporte de passageiros (Dinçer e Zamfirescu, 2016; Saadat *et al.*, 2016).

Na locomotiva híbrida, o motor a diesel transforma a energia química proveniente da combustão do óleo diesel em energia mecânica de rotação de um eixo, denominado virabrequim, que aciona outros componentes. O acoplamento do virabrequim com o gerador elétrico transforma a energia mecânica de rotação em energia elétrica, que fornece a eletricidade necessária para o funcionamento de vários componentes. O motor de tração que movimenta a locomotiva é acionado pelo gerador principal, que fornece a energia elétrica, que é novamente transformada em energia mecânica cinética, responsável pela movimentação de toda a composição (Andrade, 2015; Cipek, 2019).

Os sistemas elétricos das locomotivas mais antigas utilizavam um sistema de geração em corrente contínua; mas por outro lado, com o avanço da tecnologia os sistemas modernos utilizam um gerador síncrono que gera corrente alternada, responsável por fornecer energia para os motores elétricos. Esta nova configuração é resultado do avanço das tecnologias relacionadas à eletrônica de potência presente em outros componentes do sistema de tração de locomotivas, como retificadores e inversores (Silva, 2017).

Neste contexto, o presente trabalho foi desenvolvido tendo como meta avaliar o consumo energético e os impactos ambientais associados ao uso de locomotivas híbridas de uma empresa ferroviária operadora 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 referentes ao transporte de grãos, com relação ao uso de locomotivas híbridas diesel-elétricas; *b)* coleta de dados para o deslocamento em trecho longo, variando entre 1.184km e 1.656km, com características geográficas diversificadas, a partir dos municípios de Rondonópolis/MT; Itiquira/MT; Alto Araguaia/MT e Chapadão do Sul/MS, com destino ao Porto de Santos-SP; *c)* levantamento de dados com relação ao consumo de óleo diesel (L) e da quantidade em massa da carga transportada (t) no período 2014-2019.

O ambiente de estudo corresponde ao transporte de cargas de grãos e derivados: milho, soja e farelo de soja. O trecho é composto por via de circulação férrea. As locomotivas são alimentadas por óleo diesel e abastecidas ao longo do trajeto em pontos estratégicos, sendo que a duração do percurso varia entre 80h às 96h, dependendo de fatores como: quantidade de trens circulando, situação dos terminais de origem e destino, chuvas, entre outras. Ao longo da malha em estudo existem pontos de linha singela (única) com pátios de cruzamento e pontos de linha dupla, além da existência de pátios de *setup* (abastecimento, manutenção de vagões e locomotivas e estacionamento de trens).

A composição ferroviária analisada é composta por trens com 82 vagões e 2 locomotivas, sendo empregados dois padrões: *1º)* 1 locomotiva com 26 vagões, e 1 locomotiva com 56 vagões; *2º)* 2 locomotivas com 82 vagões. Os trens chegam carregados ao terminal de descargas no Porto de Santos e, após a descarga, o trem retorna vazio para iniciar novo carregamento. As locomotivas utilizadas neste fluxo são híbridas diesel-elétricas do modelo AC44i, marca GE, com potência de 4.500 HP e operam com corrente alternada.

## 3. RESULTADOS

Este tópico está dividido em duas partes: a primeira corresponde a produtividade alcançada no período com relação ao transporte de grãos pelos trens, e a segunda corresponde ao consumo de combustível e a emissão de GEE.



### 3.1 Produtividade no transporte de grãos

A tabela 1 mostra os dados das cargas/massas transportadas no período compreendido entre os anos 2014-2019, 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), que corresponde somente a massa da mercadoria transportada (grãos de soja e milho e farelo de soja). Também, são apresentados os dados correspondentes a quantidade de pares de trens, sendo que cada par de trem realiza 2 viagens: uma viagem com o trem carregado até o ponto de descarga e uma viagem de retorno, com o trem vazio até o local do carregamento.

**Tabela 1**

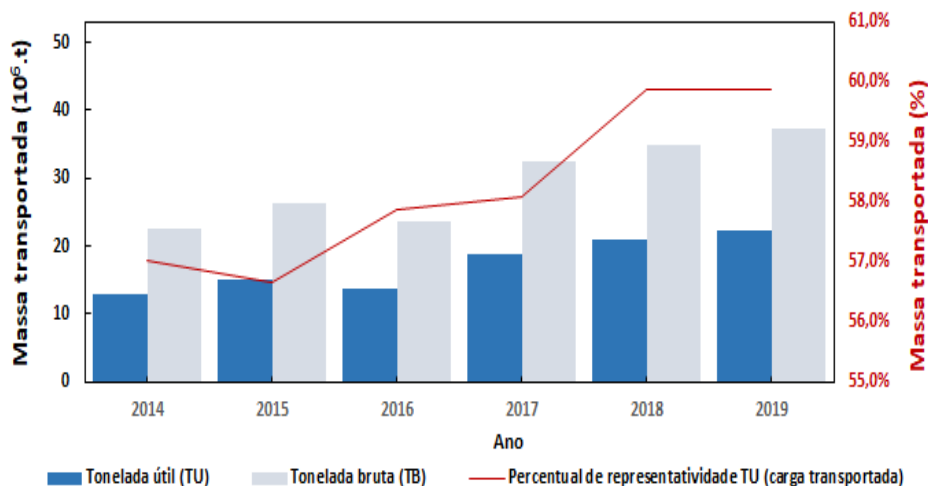
Quantificação das cargas transportadas no período 2014-2019.

Composição/Ano	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Pares de trem	2.111	2.335	1.957	2.519	2.708	2.876
Carga TB (t)	22.553.040	26.429.240	23.717.770	32.424.666	34.970.955	37.291.692
Carga TU (t)	12.847.901	14.976.795	13.729.414	18.836.880	20.935.469	22.323.728
TB/par de trem	10.676	11.316	12.121	12.870	12.914	12.967
TU/par de trem	6.087	6.413	7.017	7.477	7.731	7.763

Fonte: dados da pesquisa

A Figura 1 mostra a evolução da carga correspondente a TB, em que se pode observar um aumento de 65,50% no período compreendido entre os anos de 2014-2019, com uma retração de 10,26% entre os anos de 2015 e 2016. Também, observa-se a evolução dos dados de TU com crescimento de 73,75% entre os anos de 2014-2019, seguido também de uma retração de 8,33% entre os anos de 2015-2016. Os dados mostram uma evolução em termos de produtividade, uma vez que o percentual de representatividade de TU movimentada em relação a massa total transportada (TB) apresentou aumento ao longo dos anos.





**Figura 1.** Evolução quantidade de cargas transportadas em termos de TU e TB.

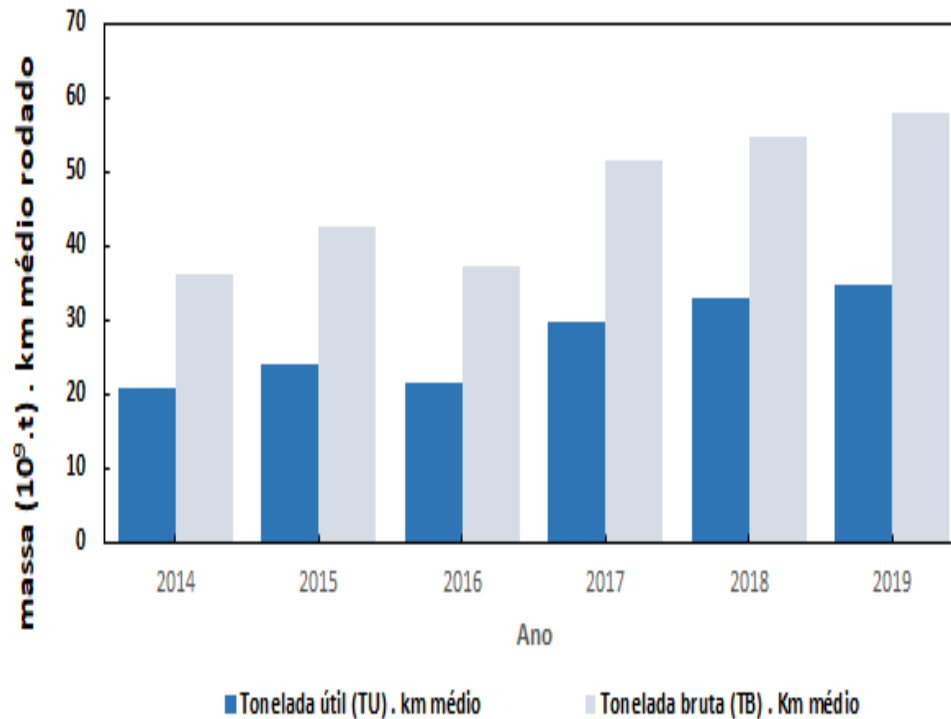
No modal ferroviário também são empregados os termos: TKB (tonelada quilometro bruto), que corresponde ao produto entre a carga bruta (mercadorias + vagões + locomotivas) e a distância percorrida; enquanto que TKU (tonelada quilometro útil) corresponde a multiplicação da carga útil transportada (somente a mercadoria) pela distância percorrida.

O TKU é uma forma utilizada para precificação e mensuração da produção, tendo se em vista que o valor do frete ferroviário leva em consideração o volume transportado juntamente com a distância percorrida pelo trem. Outros fatores também são utilizados para mensurar o valor do frete ferroviário, como tempo de trânsito, tipo, densidade da carga, produtividade dos próprios clientes; sendo que na maioria das vezes os vagões são entregues para descarga e/ou carga em terminais dos clientes e/ou de terceiros contratados por eles.

O TKB é uma forma de mensurar a distância total percorrida pelo trem e é utilizada para verificar eficiência energética e custos do transporte de cargas. São consideradas as movimentações tanto de trens carregados (produção), quanto de trens vazios (retornando para os pontos de carga). Trens de serviço interno da ferrovia também são considerados, como exemplo, o transporte de trilhos, transporte de locomotivas para manutenção, entre outros.

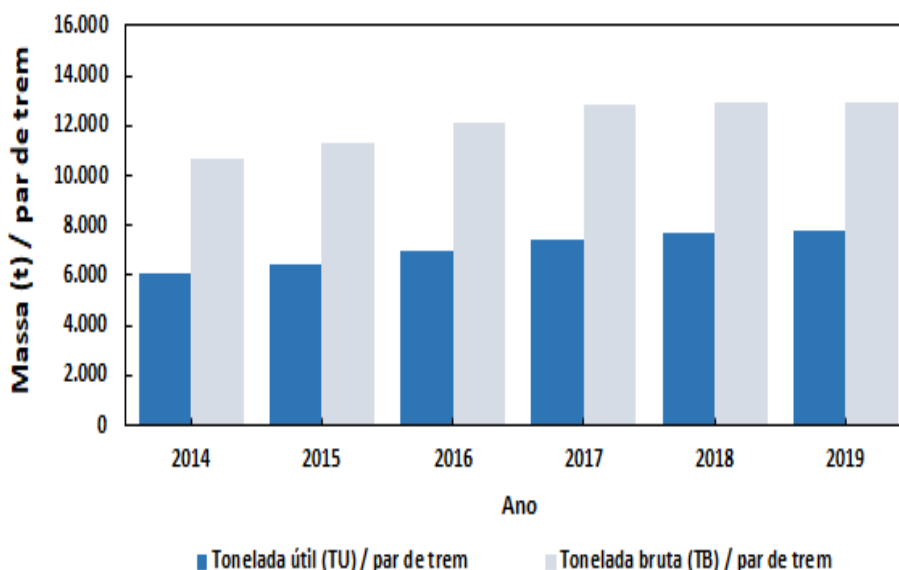
A figura 2 mostra a evolução do transporte, em que se observa o aumento na produção de 67,65% em termos de TKU e de 59,68% em termos TKB. Este aumento é justificado devido a elevação na capacidade transporte ocorrida em consequência das melhorias operacionais, além

dos investimentos realizados em infraestrutura (pátios, linhas, entre outros) e material rodante (locomotiva, vagões, entre outros).



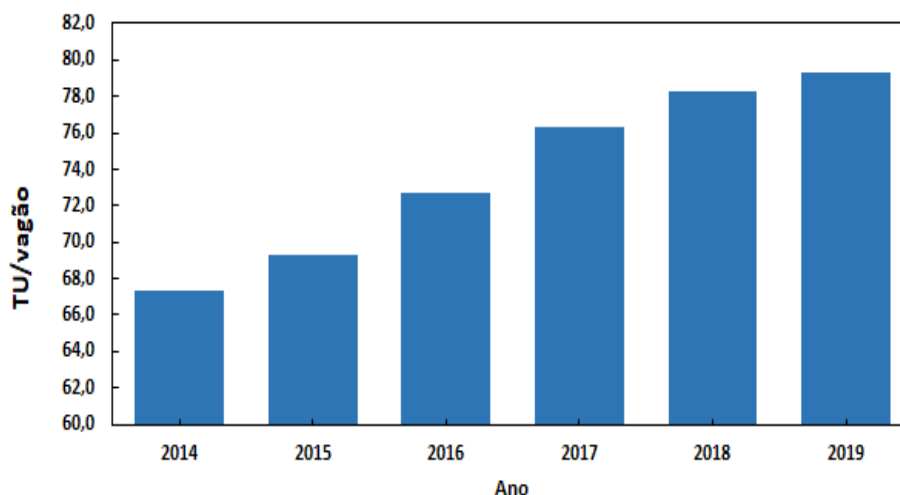
**Figura 2.** Evolução quantidade de cargas transportadas em termos de TKU e TKB.

A figura 3 mostra a evolução do volume de carga transportada, em termos de TU por par de trens no período, em que se observa um crescimento até atingir valores praticamente estáveis nos últimos dois anos. Observa-se o crescimento de 27,53% na quantidade de volume transportado por trem movimentado, na comparação entre 2014-2019. Em relação a massa transportada bruta TB, também é possível verificar um crescimento entre 2014-2016, sendo que a partir de 2017 os valores de TB tornam-se praticamente estáveis.



**Figura 3.** Evolução quantidade de cargas transportadas, TU e TB, por par de trens.

A figura 4 mostra os valores de TU para cada vagão, em que é possível verificar um aumento de 11,96 t, que corresponde a 12,93% na TU por vagão, no período 2014-2019. A elevação deste indicador (TU/vagão) aponta para o aumento da eficiência do transporte ferroviário, visto que menores quantidades de trens (vagões e locomotivas) serão necessárias para transportar a mesma quantidade de mercadoria.



**Figura 4.** Evolução quantidade de cargas transportadas por vagão (TU/vagão).

Utilizando como exemplo a produção no ano de 2019, em que TU foi de 22.323.728 t e considerando um lote padrão de 82 vagões por trem, então foram necessários 3.090 trens para transportar a carga. Fazendo uma comparação com o ano de 2014, considerando o mesmo volume do ano de 2019, porém com a taxa de TU/vagão de 2014 seria necessário empregar 3.490 trens, ou seja, uma diferença de 400 trens a menos, o que representa o aumento de produtividade e da eficiência no trecho e em volume de cargas transportadas no período.

Assim, quanto menor for a quantidade em trens para transportar a mesma quantidade de mercadoria, mais eficiente se torna o transporte ferroviário, o que implica benefícios, dentre eles a redução no consumo de combustível, maior utilização dos ativos, menores custos com a operação do sistema, como mão de obra, entre outros. A figura 5 mostra a quantidade de trens necessários para transportar o volume de 2019, em que TU foi de 22.323.728 t, considerando a quantidade TU por vagão de cada ano.

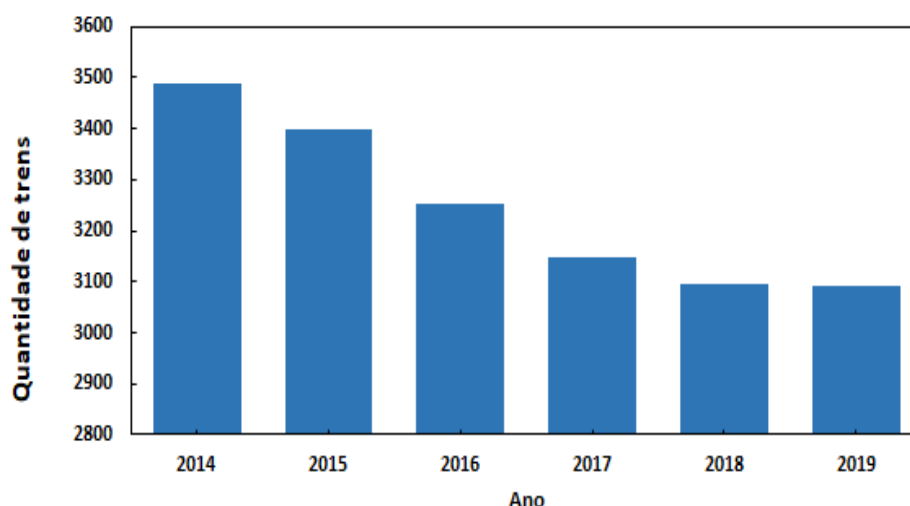
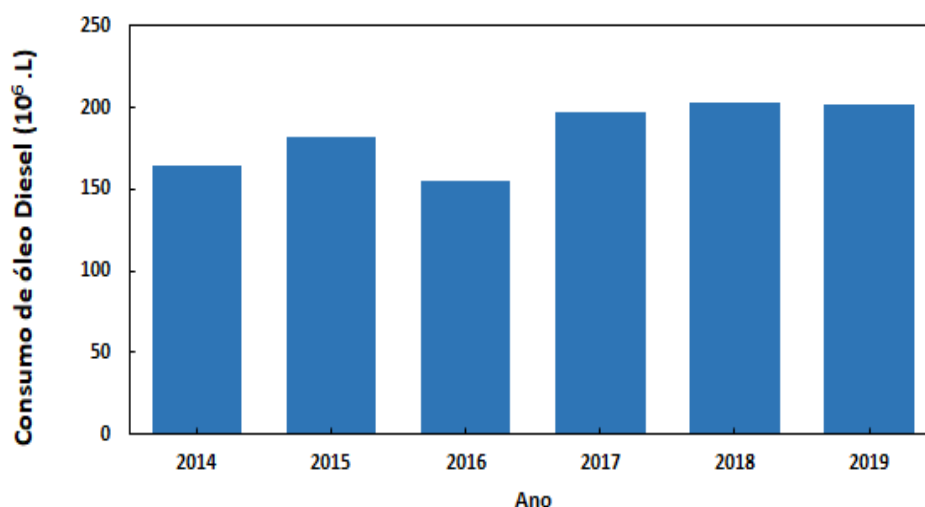


Figura 5. Evolução quantidade de trens no período.

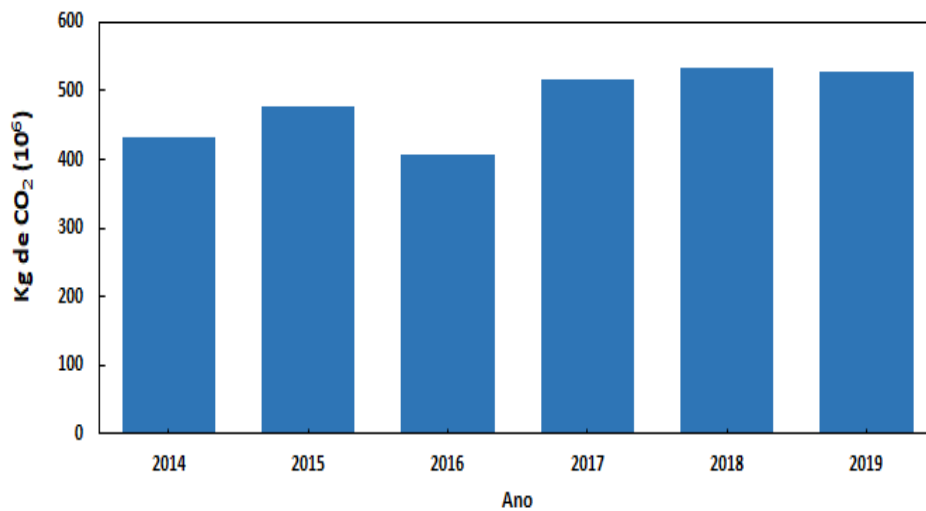
### 3.2 Consumo de combustíveis e emissão de GEE

A Figura 6 mostra a evolução no consumo de óleo diesel por ano, no período 2014-2019. Observa-se uma variação no consumo de óleo diesel entre os anos de 2014-2016, seguido de crescimento a partir de 2017. Entre os anos de 2017-2019 o consumo apresenta estabilidade, diferente dos indicadores de produção listados anteriormente, que crescem de forma mais acelerada neste período.



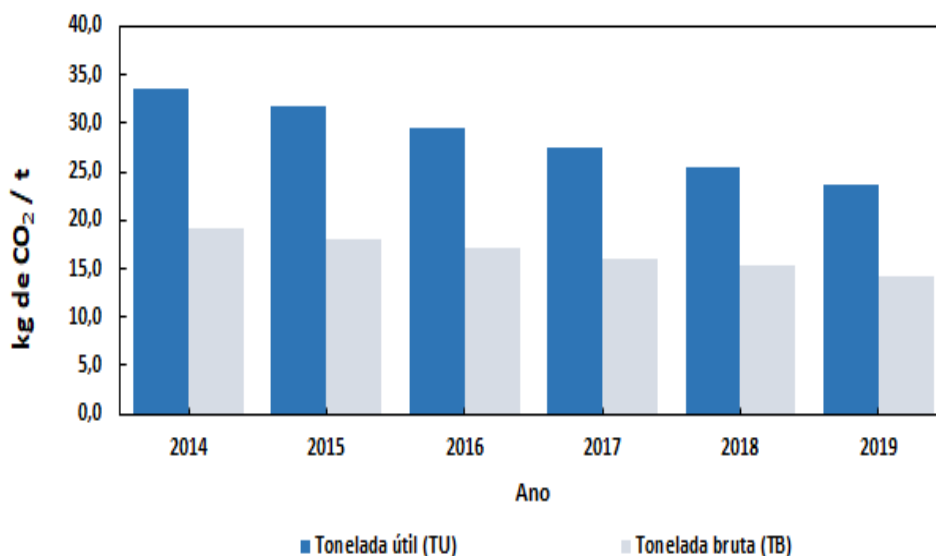
**Figura 6.** Consumo de óleo diesel no transporte ferroviário no período 2014-2019.

Um dos principais fatores para avaliar eficiência energética é a emissão de CO<sub>2</sub> por litro de combustível utilizado. De acordo com BRASIL (2017) a emissão de CO<sub>2</sub> com relação ao consumo de óleo diesel por veículos pesados, corresponde a relação 2,62 kg de CO<sub>2</sub> por litro combustível (2,62 Kg.CO<sub>2</sub>/L<sub>diesel</sub>). Assim, a Figura 7 mostra a evolução das emissões de CO<sub>2</sub> em cada ano, no período 2014-2019, em que observa se um aumento de 22,39% nas emissões. Este aumento é justificado em função do correspondente aumento em termos da produção. Entre os anos 2015-2016 há uma redução nas emissões que pode ser explicada pela também redução na produção. No entanto entre os anos de 2018-2019 houve aumento de 6,63% em TU e 6,64% em TB, porém houve redução de 0,87% nas emissões totais, mostrando a evolução em termos de eficiência do transporte.



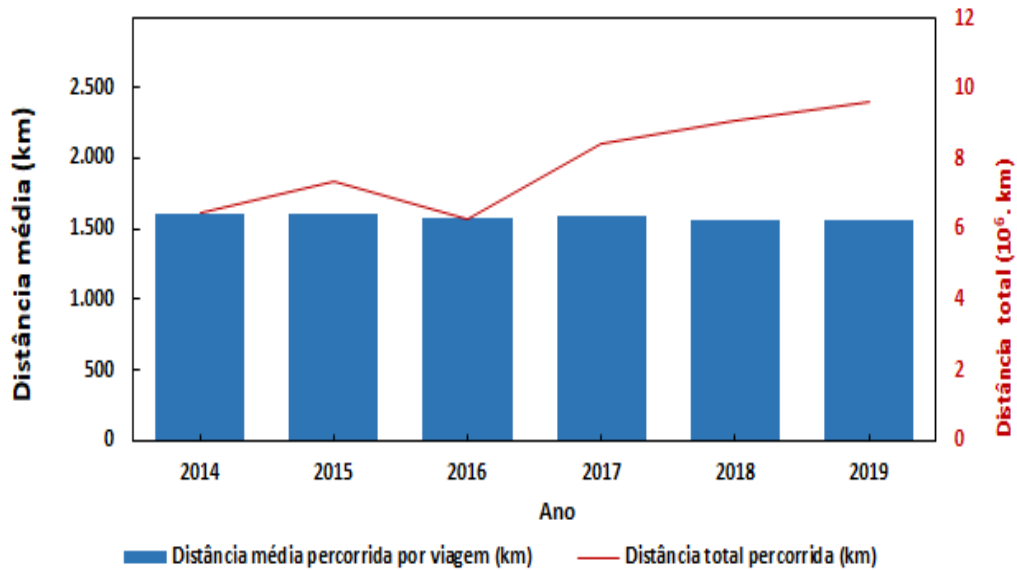
**Figura 7.** Emissão de CO<sub>2</sub> no transporte ferroviário no período 2014-2019.

A figura 8 mostra as emissões de CO<sub>2</sub> com relação a TB e TU movimentadas entre os anos 2014-2019, em que é possível verificar uma redução de 26,05% das emissões em relação a TB transportada; enquanto que ocorreu redução de 29,56% das emissões por TU. Estes indicadores mostram o aumento na eficiência com relação a redução no consumo de combustível e emissões de GEE, como consequências das melhorias promovidas no período considerado, principalmente com ganho na produtividade e a redução do número de trens, na contramão do aumento da carga transportada.



**Figura 8.** Emissão de CO<sub>2</sub> no transporte ferroviário no período 2014-2019.

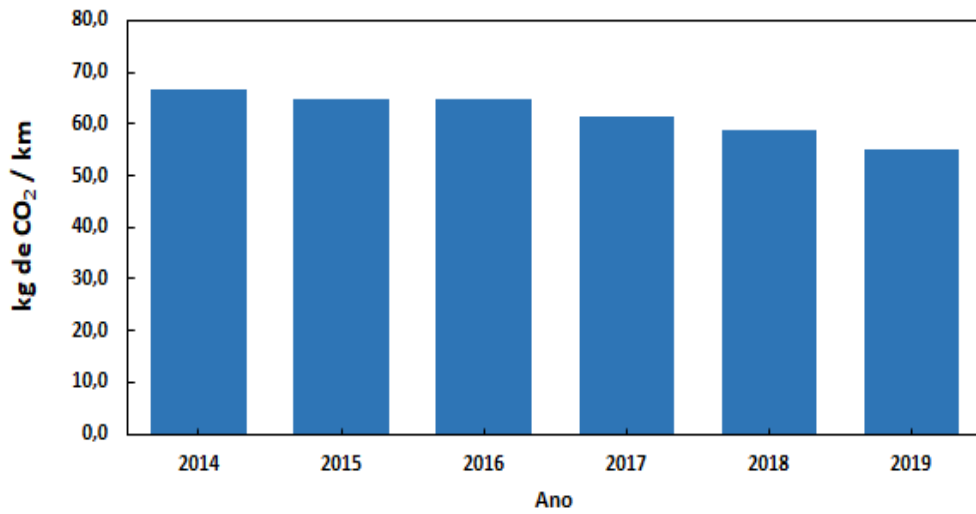
Com relação a distância média percorrida entre a origem e destino dos trens carregados, a Figura 9 mostra pequena variação no período, tendo uma distância média em torno de 1.583km por viagem. Em relação a distância total, ocorreu um aumento expressivo de 48,45% entre os anos de 2014-2019, a qual se comporta de forma similar ao aumento de produção.



**Figura 9.** Distância percorrida entre origem e destino das cargas transportadas.

A Figura 10 mostra as emissões de CO<sub>2</sub> com relação a distância total percorrida, em que no ano de 2014 apresentou uma emissão de 66,71kg<sub>CO2</sub>/Km, enquanto no ano de 2019 foram emitidos 55,0 kg<sub>CO2</sub>/km. Portanto, no período ocorreu redução média de 11,71 kg<sub>CO2</sub>/Km, que corresponde a uma redução de 17,56% nas emissões de CO<sub>2</sub> no período analisado.



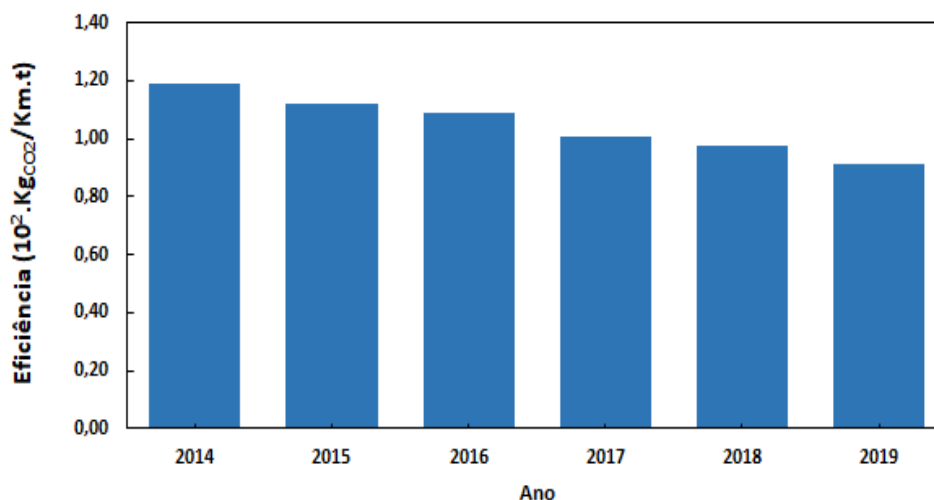


**Figura 10.** Emissão de CO<sub>2</sub> no transporte ferroviário no período 2014-2019.

Um outro fator indicador de eficiência energética usualmente utilizado nas ferrovias é dado pela equação-1, sendo: **e** = eficiência (kgCO<sub>2</sub>/km.t); **me** = massa de CO<sub>2</sub> emitido (kgCO<sub>2</sub>); **d** = distância percorrida (km); **m** = massa transportada (t).

$$e = \frac{me}{d.m} \quad (1)$$

Assim, a Figura 11 mostra a variação da eficiência energética do transporte ferroviário de grãos, em que se observa uma redução de 23,35% entre os anos de 2014-2019. Esta redução na emissão de CO<sub>2</sub> que relaciona a carga transportada e a distância percorrida confirma a melhoria na produtividade do transporte no período considerado, com a redução proporcional do consumo de combustível.



**Figura 11.** Eficiência energética e emissão de CO<sub>2</sub> no transporte ferroviário.

Em síntese, a tabela 2 mostra o resumo dos indicadores calculados e avaliados com relação ao sistema de transporte de grãos por trens movidos por locomotivas híbridas, em que se observa o aumento na carga transportada (TU e TB), assim como na distância total percorrida. Por outro lado, mesmo sendo maior o valor absoluto do indicador de emissão de CO<sub>2</sub> e, em contrapartida, a redução do número de trens, do consumo de combustível/diesel, resultaram em menor emissão de CO<sub>2</sub> relativo a carga transportada e a distância total percorrida.

**Tabela 2**

Síntese dos indicadores avaliados no transporte de grãos entre 2014-2019.

ANO	Unidade	2014	2019	%
Pares de trem	par	2.111	2.876	36,24
Massa transportada bruta	t	22.553.040	37.291.692	65,35
Massa transportada útil	t	12.847.901	22.323.728	73,75
Representatividade da massa útil	%	0,57	0,60	4,98
Massa bruta transportada X distância média percorrida	t.km	36.296.159.151	57.958.051.651	59,68
Massa útil transportada X distância média percorrida	t.km	20.695.363.570	34.695.121.394	67,65
Massa bruta transportada / par de trem	t/par	10.676	12.967	21,46

Massa útil transportada / par de trem	t/par	6.087	7.763	27,53
Massa útil transportada / vagão	t/vagão	67,33	79,29	17,76
Necessidade de trens para transportar carga de 22.323.728t	trem	3.490	3.090	-11,46
Emissão de CO <sub>2</sub>	kg	431.601.662	528.235.096	22,39
Emissão de CO <sub>2</sub> / massa bruta transportada	kg/t	19,15	14,16	-26,06
Emissão de CO <sub>2</sub> / massa útil transportada	kg/t	33,59	23,66	-29,56
Distância média percorrida	km	1.611	1.554	-3,54
Distância total percorrida	km	6.469.748	9.604.613	48,45
Emissão de CO <sub>2</sub> / distância total percorrida	kg/km	66,71	55,00	-17,55
Eficiência	10 <sup>2</sup> (kg/km.t)	1,19	0,91	-23,53

Fonte: dados da pesquisa

#### 4. CONCLUSÃO

Em termos de produtividade no período 2014-2019, os dados mostraram aumento de 65,5% de carga bruta transportada (TB) e de 73,75% de carga útil (TU). Com relação a distância percorrida, também ocorreu aumento para o indicador TKU (67,65%) e TKB (59,68%). Estes aumentos ocorreram devido a elevação na capacidade transporte e em função das melhorias operacionais, além dos investimentos em infraestrutura, como em pátios, linhas, e material rodante, locomotivas, vagões, entre outros.

Em relação aos valores de TU para cada vagão, observou se um aumento de 11,96 t, que corresponde a 12,93% na TU por vagão. A elevação deste indicador (TU/vagão) aponta para o aumento da eficiência do transporte ferroviário, visto que menores quantidades de trens (vagões e locomotivas) foram necessárias para transportar a mesma quantidade de mercadoria. Utilizando como exemplo o volume transportado no ano de 2019 e fazendo uma comparação com a taxa de TU/vagão de 2014, foram necessários 400 trens a menos, o que representa o aumento de produtividade e da eficiência no trecho considerado e em volume de cargas transportadas no período.

Com relação ao consumo de combustível, observou se um crescimento no período com aumento de 22,39% nas emissões de CO<sub>2</sub>. Em termos de cargas transportadas, ocorreu redução

de 26,05% das emissões em relação a TB e redução de 29,56% das emissões por TU. Estes indicadores mostram o aumento na eficiência com relação a redução no consumo de combustível e emissões de GEE, como consequências das melhorias promovidas no período considerado, principalmente com ganho na produtividade e a redução do número de trens, na contramão do aumento da carga transportada.

Comparando as emissões de CO<sub>2</sub> com relação a distância total percorrida, observa-se redução ao longo dos anos; sendo que em 2014 apresentou emissão de 66,71kg<sub>CO2</sub>/Km, enquanto que no ano de 2019 foram emitidos 55,0 kg<sub>CO2</sub>/km, que representa redução de 17,56% nas emissões de CO<sub>2</sub>. Estes dados confirmam a melhoria na produtividade do transporte no período considerado, com a redução proporcional do consumo de combustível.

## REFERÊNCIAS

- Abreu, B. R. D. (2013). Avaliação do impacto do envelhecimento de frota na eficiência energética de uma empresa do setor ferroviário. UFF, Dissertação de Mestrado, Niterói.
- Andrade, A. A. (2015). Noções sobre locomotivas e via permanente. Disponível em: <http://www.ferroeste.pr.gov.br>. Acesso: 22/04/2020.
- ANTT – Associação Nacional de Transportes Terrestres (2019). Anuário Estatístico do Setor Ferroviário (2018). Disponível em: [www.antt.gov.br](http://www.antt.gov.br). Acesso: 02/11/2019.
- Ballou, R. H. (2006). Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos/logística empresarial. 5ª edição. Editora Bookman, Porto Alegre.
- Bayraktar, H. (2008). An experimental study on the performance parameters of an experimental CI engine fueled with diesel–methanol–dodecanol blends. *Fuel*, v.87(2), p.158-164.
- Brasil (2017). Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. Sistemas de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa – Observatório do Clima (2017, SEEG V. 5.0). Disponível em: <http://www.brasil.gov.br>. Acesso: 13/04/2020.
- Cipek, M., Pavković, D., Kljaić, Z., Mlinarić, T. J. (2019). Assessment of battery-hybrid diesel-electric locomotive fuel savings and emission reduction potentials based on a realistic mountainous rail route. *Energy*, v.173, p.1154-1171.
- CNT – Confederação Nacional de Transporte (2019). O Transporte Move o Brasil - Resumo das Propostas da CNT ao País. Disponível em: [www.cnt.gov.br](http://www.cnt.gov.br). Acesso: 26/10/2019.
- Dunbar, R., Roberts, C., Zhao, N. (2017). 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*, v.7(4), p.224-244.
- Diñçer, İ., Zamfirescu, C. (2016). Sustainable hydrogen production. 1ª Edição. Editora Elsevier, Ontario.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2007). Plano Nacional de Energia 2030. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso: 01/05/2020.
- Farah, S., Whaley, D., Saman, W., Boland, J. (2019). Integrating climate change into meteorological weather data for building energy simulation. *Energy and Buildings*, v.183, p.749-760.

- IEA – International Energy Agency, UIC - International Railway Association (2015). Railway Handbook 2015. Disponível em: <https://uic.org>. Acesso em: 03/06/2020.
- Kim, Y. K., Lee, J. Y., Rhee, Y., Chun, Y. Y. (2017). Country-specific greenhouse gas emission factors of diesel-electric locomotive in Korea. *Transportation Research Part D*, v.57, p.74-83.
- 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*, v.115, p.41-71.
- Liimatainen, H., Pöllänen, M. (2010). Trends of energy efficiency in Finnish road freight transport 1995–2009 and forecast to 2016. *Energy Policy*, v.38(12), p.7676-7686.
- McCollum, D., Krey, V., Kolp, P., Nagai, Y., Riahi, K. (2014). Transport electrification: A key element for energy system transformation and climate stabilization. *Climatic change*, v.123(3-4), p.651-664.
- Štefancová, V., Nedeliaková, E., López-Escolano, C. (2017). Connection of dynamic quality modeling and Total Service Management in railway transport operation. *Procedia engineering*, v.192, p.834-839.
- 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.
- Rao, X., Montigel, M., Weidmann. (2016). A new rail optimisation model by integration of traffic management and train automation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v.71, p.382-405.
- Saadat, M., Esfahanian, M., Saket, M. H. (2016). Energy-efficient operation of diesel–electric locomotives using ahead path data. *Control Engineering Practice*, v.46, p.85-93.
- Silva, L. T., Resende, L. P., Tomim, M. A. (2017). Mathematical modeling and numerical simulation of locomotives electrical drive systems in Modelica. *Brazilian Power Electronics Conference (COBEP), IEE*, p.1-8.
- Torregrosa, A. J., Broatch, A., García, A., Mónico, L. F. (2013). Sensitivity of combustion noise and NOx and soot emissions to pilot injection in PCCI Diesel engines. *Applied Energy*, v.104, p.149-157.
- Tutak, W., Lukacs, K., Szwaja, S., & Bereczky, A. (2015). Alcohol–diesel fuel combustion in the compression ignition engine. *Fuel*, v.154, p.196-206.
- Wei, L., Yao, C., Wang, Q., Pan, W., & Han, G. (2015). Combustion and emission characteristics of a turbocharged diesel engine using high premixed ratio of methanol and diesel fuel. *Fuel*, v.140, p.156-163.
- Wei, L., Geng, P. (2016). A review on natural gas/diesel dual fuel combustion, emissions and performance. *Fuel Processing Technology*, v.142, p.264-278.