

Situação: O preprint foi submetido para publicação em um periódico

# Eficiência das ferrovias especializadas em transporte de minério de ferro e pelotas

Renata Fontan, Rodrigo Rosa, Adonai Lacruz

<https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.1941>

Este preprint foi submetido sob as seguintes condições:

- O autor submissor declara que todos os autores responsáveis pela elaboração do manuscrito concordam com este depósito.
- Os autores declaram que estão cientes que são os únicos responsáveis pelo conteúdo do preprint e que o depósito no SciELO Preprints não significa nenhum compromisso de parte do SciELO, exceto sua preservação e disseminação.
- Os autores declaram que a pesquisa que deu origem ao manuscrito seguiu as boas práticas éticas e que as necessárias aprovações de comitês de ética de pesquisa estão descritas no manuscrito, quando aplicável.
- Os autores declaram que os necessários Termos de Consentimento Livre e Esclarecido de participantes ou pacientes na pesquisa foram obtidos e estão descritos no manuscrito, quando aplicável.
- Os autores declaram que a elaboração do manuscrito seguiu as normas éticas de comunicação científica.
- Os autores declaram que o manuscrito não foi depositado e/ou disponibilizado previamente em outro servidor de preprints ou publicado em um periódico.
- O autor submissor declara que as contribuições de todos os autores estão incluídas no manuscrito.
- O manuscrito depositado está no formato PDF.
- Os autores declaram que caso o manuscrito venha a ser postado no servidor SciELO Preprints, o mesmo estará disponível sob licença [Creative Commons CC-BY](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).
- Caso o manuscrito esteja em processo de avaliação ou sendo preparado para publicação mas ainda não publicado por um periódico, os autores declaram que receberam autorização do periódico para realizar este depósito.

Submetido em (AAAA-MM-DD): 2021-03-01

Postado em (AAAA-MM-DD): 2021-03-02

## **Eficiência das ferrovias especializadas em transporte de minério de ferro e pelotas**

Renata Guimarães de Oliveira Fontan – Vale (ORCID 0000-0002-2516-3514)

Rodrigo Alvarenga Rosa – UFES (ORCID 0000-0003-0841-514X)

Adonai José Lacruz – Ifes e PPGAdm/UFES (ORCID 0000-0003-1575-3788)

Submetido à Revista de Administração Contemporânea – RAC (ISSN 1982-7849)

\*ID: RAC-2020-0284

\*Submissão do original: 03 ago. 2020

\*Submissão da 1ª revisão: 08 out. 2020

### **Resumo**

**Objetivo:** Objetiva-se comparar a eficiência relativa das ferrovias especializadas em transporte de minério de ferro (MFe) e pelota (PLMFe), que fazem parte do patrimônio das empresas de mineração e usinas de pelletização considerando o cenário de 2016.

**Métodos:** Foi utilizada a técnica Análise Envoltória de Dados (DEA), com aplicação do modelo de retornos constantes de escala (CCR) e orientação a saída (*output*); o método multicritério combinatório inicial para escolha das variáveis de entrada e a regressão Tobit como estratégia de validação do modelo DEA.

**Resultados:** Das doze ferrovias avaliadas, três ferrovias foram identificadas como eficientes: Estrada de Ferro Carajás, Fortescue e Mount Newman.

**Conclusões:** O modelo aplicado foi considerado como um bom método para avaliar a eficiência das ferrovias especializadas em transporte de MFe e PLMFe, pois determinou a eficiência de cada ferrovia, sugerindo o aumento necessário na variável de saída ou ajustes nas variáveis de entrada para que as ferrovias atinjam a fronteira de eficiência. Com isso, as empresas podem utilizar os resultados deste estudo para guiar melhorias futuras para tornar sua ferrovia mais eficiente ou se manter na fronteira de eficiência.

**Palavras-chave:** ferrovias especializadas em minério de ferro e pelotas; análise envoltória de dados; eficiência do transporte ferroviário de carga.

## **The efficiency of railways specialized in transporting iron ore and pellets**

### **Abstract**

**Objective:** The objective is to compare the relative efficiency of the railways specialized in transporting iron ore (MFe) and pellets (PLMFe), which are part of the assets of mining companies and pellet plants considering the 2016 scenario.

**Methods:** The Data Envelopment Analysis (DEA) technique was used, with the application of the output-oriented Constant Returns Scale (CRS) model; the initial combinatorial multicriteria method for choosing the input variables; and Tobit regression as a validation strategy for the DEA model.

**Results:** Of the twelve railways evaluated, three railways were identified as efficient: Estrada de Ferro Carajás, Fortescue and Mount Newman.

**Conclusions:** The applied model was considered as a good method to evaluate the efficiency of railways specialized in transporting MFe and PLMFe, as it determined the efficiency of each railway, suggesting the necessary increase in the output variable or adjustments in the input variables so that the railways reach the efficiency frontier. With that, companies can use the results of this study to guide future improvements to make their railway more efficient or maintain on the frontier of efficiency.

**Keywords:** railways specialized in iron ore and pellets; data envelopment analysis; rail freight transport efficiency.

## Introdução

Este artigo tecnológico (Motta, 2017) é orientado aos praticantes e interessados no estudo da eficiência de ferrovias especializadas em transporte de minério de ferro (MFe) e pelota (PLMFe) e/ou no método Análise Envoltória de Dados (do inglês *Data Envelopment Analysis* - DEA).

Objetivamente, se avalia neste estudo a eficiência relativa das ferrovias especializadas em transporte de MFe e PLMFe, que fazem parte do patrimônio das empresas de mineração e usinas de pelotização por meio da técnica DEA. Esclarece-se que os dados, coletados em 2018, refletem o cenário do de 2016.

O MFe é um mineral encontrado na natureza na forma de rochas, misturado a outros elementos. Por meio de processos de beneficiamento, este é obtido em granularidade e quantidade de teor de ferro ideais para ser vendido às indústrias siderúrgicas. A PLMFe é um aglomerado de MFe em formato esférico, obtida em processo industrial, aproveitando os finos gerados durante a extração do minério, que antes eram descartados. Tanto o MFe quanto a PLMFe são fundamentais para a economia global por se tratarem de insumos para fabricação do aço.

Neste mercado, as empresas, via de regra, decidem por estabelecer sua própria cadeia logística, necessitando, assim, construir a sua infraestrutura de transporte para escoar a produção de MFe e PLMFe. O meio de transporte que melhor atende ao volume movimentado por essas empresas é o ferroviário.

São consideradas como ferrovias especializadas no transporte de MFe e PLMFe aquelas que possuem estes produtos como predominantes em sua matriz de carga transportada. Estas duas cargas podem ser tratadas de forma semelhante por três motivos: ambas possuem peso específico próximos ( $2,22 \text{ ton/m}^3$ ); utilizam o mesmo tipo de vagão; e suas operações de carregamento, transporte e descarregamento são similares.

Algumas características que diferenciam este tipo de ferrovia das demais é o peso da carga transportada por vagão, o que leva a um alto valor de carga por eixo, exigindo mais de suas locomotivas e vagões. Além disso, nestas ferrovias, via de regra, muitos trens circulam diariamente acarretando um nível maior de degradação na linha férrea, pelo aumento do tráfego de trens na via e pelo tamanho do trem que é mais extenso, com mais locomotivas e vagões em sua formação em relação a trens de outros tipos de carga.

Além disso, por serem patrimônio das empresas mineradoras e/ou das usinas de pelotização, elas não cobram o frete pelo transporte e são vistas como centro de custos da operação da mina e/ou da usina de pelotização. No entanto, o modo ferroviário necessita de grandes investimentos e possui altos custos de operação, o que impacta significativamente no valor final do produto. Em linha com a estratégia de mercado e competitividade, as empresas buscam aumentar a eficiência do transporte ferroviário visando reduzir seus custos.

Considerando que as ferrovias transportam produtos semelhantes, a comparação permitirá entender o motivo porque umas ferrovias são mais eficientes que outras. Nesse encadeamento, objetiva-se neste artigo avaliar a eficiência entre essas ferrovias especializadas no transporte de MFe e PLMFe utilizando a técnica DEA para mensurar e comparar a eficiência delas, identificando quais ferrovias são consideradas eficientes e o quanto as demais estão distantes em relação a esta referência. Logo, tendo o desempenho relativo como resultado, é possível conhecer medidas que podem ser tomadas para tornar a ferrovia mais eficiente.

O modelo DEA escolhido para aplicação foi o retorno constante em escala ou CCR (em homenagem aos seus autores Charnes, Cooper e Rhodes), com orientação a saída (*output*); ou seja que considera eficiência por uma função linear, caracterizada pela melhor relação de proporção das variáveis de saída com as variáveis de entrada de uma determinada unidade observada, também conhecida como *Decision Making Units* (DMU). Assim, o objeto de estudo são as DMU definidas neste artigo são as 12 ferrovias no mundo especializadas no transporte

de MFe e PLMFe e que fazem parte do patrimônio de grandes empresas mineradoras e/ou pelletizadoras, sobre as quais se discutirá mais adiante.

Como variáveis de entrada, representando os insumos (*inputs*), foram adotadas: número de vagões em operação (VAG), carga por eixo (CGE) e quantidade de vagões do trem tipo de maior predominância (TTP). Como variável de saída, representando o produto (*output*) foi adotado o indicador tonelada quilômetro útil (TKU), que representa a tonelada útil transportada pela distância percorrida. Esclarece-se que para seleção das variáveis foi utilizada o método multicritério combinatório inicial e que a regressão Tobit foi usada como estratégia de validação do modelo de eficiência.

Os dados do ano de 2016, coletados em 2018, refletem quatro dos cinco grandes eventos que alteraram a dinâmica do mercado, sendo eles: entrada do novo player Fortescue, retração do mercado chinês e forte queda dos preços do MFe, rompimento da barragem de rejeito da Samarco e início da produção da mina S11D. De posse dos resultados de 2016, divulgados pelas empresas, foram levantados os dados das ferrovias.

Este artigo se justifica pois se difere dos demais publicados sobre DEA e ferrovia, uma vez que trata da análise de ferrovias de transporte de MFe e PLMFe que fazem parte do patrimônio de empresas mineradoras e/ou usinas de pelletização e, portanto, não cobram frete para o transporte de MFe e PLMFe, sendo tratadas como centros de custos pelas referidas empresas. Também se diferenciam por operarem com trens mais longos, com maior quantidade de vagões e com vagões mais pesados (maior peso por eixo). Além disso, as empresas possuem autonomia na tomada de decisões para aumentar a eficiência e reduzir custos.

Este artigo contribui para a prática gerencial ao apresentar a fronteira de eficiência e, conseqüentemente, as ferrovias eficientes na aplicação dos recursos e as ações que as empresas podem tomar que melhorar seu índice de eficiência, e conseqüentemente, aumentar sua competitividade.

## Contexto da Investigação

O MFe e PLMFe (aglomerado de finos de MFe gerados durante a extração do MFe) são fundamentais para a economia global por se tratarem de insumos para fabricação do aço, com grande demanda pelas indústrias automotivas, de maquinários e construção civil.

Consulta realizada em 2020 no website Statista acerca do cenário de 2016, mostra que foram produzidos no mundo 2,34 bilhões de toneladas de MFe, liderado pela Austrália com uma produção de aproximadamente 825 milhões de toneladas, o que equivale a 34% do cenário global. Em segundo lugar no ranking está o Brasil, que produziu nesse ano por volta de 391 milhões de toneladas, representando 16% da produção mundial, seguido pela China, com uma produção de 353 milhões de toneladas, responsável por 14% da produção mundial (Statista, 2020). Nos últimos anos, cinco grandes eventos alteraram a dinâmica do mercado de minério de ferro que interferiram na forma de operação das mineradoras / usinas de pelotização. Em 2014 surgiu a empresa Fortescue, um novo concorrente australiano com uma produção expressiva de 165 milhões de tonelada ao ano (Mta) de MFe, assumindo um espaço no mercado que ocasionou perda de *marketshare* das concorrentes. Em 2015, com a redução da demanda por parte da China, o mercado reagiu com queda expressiva do preço do MFe, o que provocou cancelamentos e/ou postergação de vários projetos de expansão de minas de MFe. No final de 2015 teve o rompimento da barragem de rejeitos da usina de pelotização brasileira Samarco, retirando por consequência um volume significativo de pelotas no mercado. Em 2016 teve o início da produção da mina de MFe S11D da empresa Vale, que possibilita a oferta de mais 90 milhões de toneladas ao ano adicionais de MFe de altíssima qualidade. Além disso, no início de 2019 ocorreu o rompimento de outra barragem de rejeito da mineradora Vale, na cidade de Brumadinho, que ocasionou interdições em várias operações desta empresa, reduzindo a oferta de MFe e PLMFe e desequilibrando novamente o mercado. Diante de fatos que provocam

constantes mudanças de avaliação do mercado e volatilidade no preço do MFe e PLMFe, todas empresas mineradoras e produtoras de pelotas buscaram formas de reduzir custos e aumentar produtividade, com o objetivo de melhorar sua competitividade num mercado tão dinâmico.

Existem 12 ferrovias no mundo especializadas no transporte de MFe e PLMFe e que fazem parte do patrimônio de grandes empresas mineradoras e/ou pelletizadoras, sendo cinco anglo-australianas (uma da BHP Billiton, duas da Rio Tinto, uma da Fortescue e uma da Roy Hill), duas brasileiras da Vale, duas canadenses (uma da Rio Tinto e uma da Arcelor Mittal), uma europeia da LKAB e duas africanas (uma da Arcelor Mittal e outra da SNIM).

Esta escolha foi feita pelo fato destas empresas terem autonomia para implementar ações que melhorarão a performance do seu transporte ferroviário. Foram desconsideradas as ferrovias que são prestadoras de serviço, na qual as mineradoras pagam tarifas para o transporte de sua produção e não possuem autonomia para modificações operacionais, dentre essas, cita-se no Brasil a MRS Logística S/A.

Em um cenário competitivo, em busca por redução de custo e ganho em produtividade, surgem os seguintes questionamentos: Quais ferrovias especializadas no transporte de MFe e PLMFe no cenário global foram eficientes na aplicação dos recursos no ano de 2016? Quais são os pontos de ineficiência que merecem atenção?

Esses questionamentos endereçam o objetivo aplicado de demonstrar a aplicação da metodologia DEA para lidar com essa problematização.

### **Análise Envoltória de Dados e Eficiência de Ferrovias**

O método DEA foi inicialmente desenvolvida por Charnes, Cooper e Rhodes (1978) e utiliza a Programação Linear para calcular a eficiência de unidades observadas, denominadas de *Decision Making Units* (DMU). A DMU pode ser definida como uma empresa ou uma divisão organizacional da empresa, na qual sua eficiência é avaliada. O objetivo da aplicação da

metodologia DEA é comparar as DMU escolhidas que realizam atividades semelhantes. A partir disso, verificam-se quais DMU estão na fronteira de eficiência, índice de eficiência igual a um. As ferrovias que possuem índice de eficiência abaixo de um não são consideradas como eficientes.

Existem dois modelos que representam a metodologia DEA: Charnes, Cooper e Rhodes (CCR) e Banker, Charnes e Cooper (BCC). O CCR calcula a eficiência por uma função linear, caracterizada pela melhor relação de proporção dos *outputs* com os *inputs* de uma determinada DMU. Uma característica do CCR diz respeito a escolha da orientação, seja ela entrada ou saída, que não influencia no valor da eficiência pois este modelo trabalha com a variação proporcional entre as entradas e saídas. Sendo assim, a escolha é feita com base no objetivo que se deseja alcançar: reduzir a utilização dos insumos (*inputs*) ou aumentar a produção (*output*) (Cinca, Molinero & Callén, 2016).

O BCC foi proposto após o CCR e considera rendimentos de escala, substituindo a teoria da proporcionalidade entre *inputs* e *outputs* pela teoria da convexidade. O maior diferencial do BCC foi a introdução do conceito de retorno variável de escala, com o acréscimo da variável que representa o fator de escala (Reis, Sacramento, Mello & Meza, 2017). A principal característica do modelo BCC é que a fronteira de eficiência é limitada às combinações convexas dos planos de produção observados, enquanto o CCR a fronteira de eficiência é uma reta com inclinação de 45 graus (Bogetoft & Otto, 2011).

O método DEA além de mensurar a eficiência, oferece dados sobre a ineficiência mostrando quais variáveis de entrada ou saída foram utilizadas de forma insatisfatória e quais apresentam folgas que poderiam ser eliminadas (Lin & Tseng, 2007). O modelo DEA poderá ter duas diferentes orientações que indicarão a maneira que uma DMU irá atingir a fronteira de eficiência: 1) orientação a entrada, 2) orientação a saída. A primeira busca responder a proposição de qual é a quantidade possível de redução proporcional de insumos (*inputs*) sem

alterar as quantidades produzidas (*outputs*). A segunda aponta qual é a quantidade possível de aumento proporcional da saída (*output*), sem mudar as quantidades de entrada (*input*), ou seja, busca a obtenção do melhor resultado pela aplicação de um determinado nível de recurso (Caldas, Gabriele, Carvalhal & Ramos, 2012).

A seguir apresenta breve revisão da literatura, a partir de busca das seguintes palavras chaves: *benchmarking*, *ferrovia*, *railway*, *railroad*, *eficiência*, *efficiency* DEA, *Data Envelopment Analysis*, *transporte de carga e freight*, nos sites: periódicos CAPES, Science Direct, Scopus e Google Scholar.

Yu (2008) avaliou 40 ferrovias europeias e apurou três medidas de desempenho para as ferrovias: eficiência técnica, eficácia do serviço e eficácia técnica, de modo a ajudar as empresas a melhorar o desempenho de suas ferrovias. Asmild, Holvad, Hougaard e Kronborg (2009) estimaram separadamente a ineficiência em cada parcela de custo da ferrovia (infraestrutura, equipamentos, manutenção, pessoal, etc.), investigando assim o impacto das reformas ferroviárias europeias nos custos da operação.

Cantos, Pastor e Serrano (2012) avaliaram, utilizando DEA, 23 ferrovias europeias no período de 2001 a 2008 para estimar a evolução dos níveis de eficiência após processo de regulamentação e reestruturação do transporte ferroviário na Europa. Os resultados mostram que a introdução da concorrência nos setores de transporte de carga e passageiros teve um impacto positivo tanto na eficiência quanto na produtividade.

Kutlar, Kabasakal e Sarikaya (2013) mediram o desempenho das empresas ferroviárias de transporte de carga e passageiros em todo o mundo, no período de 2000 a 2009. Eles utilizaram DEA CCR e BCC. Eles ressaltaram que o DEA permite avaliar um grande número de variáveis (entrada e/ou saída) simultaneamente, sendo útil para aplicações reais. Pereira, Rosa e Lunkes (2015) avaliaram, utilizando DEA, a eficiência das empresas concessionárias ferroviárias do Brasil no período de 2009 a 2013, com viés financeiro, avaliando gastos como *input* e receita

como *output*. Das onze ferrovias analisadas, quatro apresentaram eficiência máxima nos cinco anos analisados.

Sharma, Debnath, Oloruntoba e Sharma (2016) consideram que a escolha por DEA em relação à metodologia Stochastic Frontier Analysis (SFA) foi feita porque o SFA assume uma forma funcional pré-concebida da fronteira de produção, ao passo que a abordagem DEA usa Programação Linear para construir a fronteira de produção, que envolve todas as unidades de medida (DMU). Reis *et al.* (2017) utilizaram DEA BCC *output* para calcular a eficiência de doze ferrovias brasileiras de transporte de carga. Os resultados apontaram cinco ferrovias eficientes. Os autores não chegaram a uma conclusão sobre os motivos que influenciaram as ferrovias a alcançarem a eficiência.

Marchetti e Wanke (2017) avaliaram a eficiência de doze ferrovias brasileiras entre 2010 e 2014, quando foram introduzidos novos regulamentos competitivos no Brasil. Foram utilizados os modelos DEA BCC e CCR para identificação da eficiência. Os autores constataram que o compartilhamento de infraestrutura com mais de um operador não influenciou no desempenho das DMU.

Zhou e Hu (2017) utilizaram DEA BCC em dois estágios (produção e serviço) para calcular o desempenho de sustentabilidade geral e subestágio do transporte ferroviário na China de 2002 a 2013, a partir dos aspectos de economia, meio ambiente e sociedade. Wanke, Chen, Liu, Antunes e Azad (2018) investigaram os impulsionadores do desempenho ferroviário em países asiáticos tendo em vista que as publicações focam mais em medição da eficiência e pouco discutem ações para possíveis melhorias.

Silva, Oliveira e Marinov (2020) avaliaram o impacto na eficiência do transporte de cargas em 4 ferroviárias brasileiras, após a fusão vertical que formou a empresa RUMO-ALL. Foram considerados os dados de 2006 a 2018, com a utilização do DEA CCR *input*. Os autores comentam que as principais questões operacionais que podem limitar ou aumentar a

produtividade das ferrovias são: tamanho do trem, tempo de expedição dos trens, peso carregado em cada vagão, disponibilidade operacional das locomotivas e vagões e velocidade da via. O resultado apontou mudança de eficiência significativa em 2 ferrovias, sugerindo ter ocorrido uma priorização do transporte de carga pesada.

Nesta revisão da literatura não foi encontrada nenhuma publicação que tratasse somente de ferrovias proprietárias de empresas mineradoras/usinas de MFe e PLMFe que diferem das demais, sobretudo, por não cobrarem frete e terem características operacionais distintas dos outros tipos de ferrovias, tanto assim que são denominadas ferrovias *Heavy Haul* por seus trens com mais vagões e vagões com maior tonelada por eixo.

O modelo utilizado para este artigo foi DEA CCR *output*. A orientação foi definida em função da escolha de reduzir os insumos (variáveis de entrada) sem alterar as quantidades produzidas (variáveis de saída) ou aumentar a quantidade produzida (variáveis de saída) com os insumos existentes (variáveis de entrada). Para este estudo, a orientação a entrada (*input*) foi avaliada como inviável pelo fato de minimizar recursos da ferrovia que leva a perda de escala no transporte ou reduzir capacidade dos ativos, o que pode deixar a empresa vulnerável em caso de mudança para maior demanda no mercado de MFe e PLMFe. Estas medidas na ferrovia podem acarretar numa perda de competitividade caso o tempo de resposta da empresa seja demorado, perdendo espaço para o concorrente. Por estes motivos, faz mais sentido trabalhar com a orientação a saída (*output*), ou seja, aumentar o total de MFe e PLMFe transportado pela ferrovia.

Tendo em vista o cenário estudado que é um segmento de negócio mais restrito e considerando as particularidades da ferrovia, definiu-se o modelo CCR como o mais adequado para resolver o problema proposto. O modelo CCR trabalha com a relação de proporcionalidade entre os inputs e outputs, que se aplica melhor na avaliação da aplicação dos recursos (VAG, CGE e TTP) na obtenção do volume movimentado pela distância percorrida (TKU). No entanto, esses

resultados estão condicionados ao conjunto de valores das ferrovias apresentadas e se alguma variável alterar ou tiver modificações na quantidade de DMU (inclusão ou exclusão), o resultado será outro por se tratar de uma eficiência relativa.

### Aplicação da Análise Envoltória de Dados

Neste artigo foi utilizado o método DEA CCR orientado a saída. O modelo CCR é apresentado no modelo a seguir, sendo a sua função objetivo apresentada na Equação (1), onde  $E_{ff0}$  é a eficiência da DMU<sub>0</sub> em análise;  $x_{i0}$ : *input*  $i$  da DMU<sub>0</sub>;  $y_{j0}$ : *output* da DMU<sub>0</sub>;  $x_{ik}$ : *input*  $i$  da DMU  $k$ ,  $k=1, \dots, n$ ;  $y_{jk}$ : *output*  $j$  da DMU  $k$ ,  $k=1, \dots, n$ ;  $v_i$ : pesos do *input*  $i$ ,  $i=1, \dots, r$ ;  $u_j$ : pesos do *output*  $j$ ,  $j=1, \dots, s$ ;  $u^*$ : fator de escala.

Função objetivo:

$$\text{Maximizar } E_{ff0} = \sum_{j=1}^s u_j y_{j0} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^r v_i x_{i0} = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^s u_j y_{jk} - \sum_{i=1}^r v_i x_{ik} \leq 0 \quad \forall k = 1, \dots, n \quad (3)$$

$$u_j, v_i \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, r, j = 1, \dots, s \quad (4)$$

$$u^* \in R \quad (5)$$

O objetivo do CCR é determinar os pesos ótimos  $u_j$  (variável de saída) e  $v_i$  (variável de entrada). Se a eficiência  $E_{ff0}$  for igual a 1, significa que a DMU é eficiente. Se o resultado for menor que 1 e maior ou igual a zero, a DMU não é considerada como eficiente.

O modelo DEA CCR baseia-se na hipótese de retornos constantes de escala, em que o crescimento do insumo (*input*) produzirá proporcional crescimento de produção (*output*), sendo a medição da eficiência do DEA CCR conhecida como a Eficiência Técnica (Marchetti & Wanke, 2017).

As DMU neste estudo são as ferrovias especializadas em transporte de MFe e PLMFe, que fazem parte do patrimônio das empresas (mineradoras e/ou usinas de pelotização). Doze ferrovias foram escolhidas, sendo duas brasileiras, duas canadenses, cinco australianas, uma liberiana, uma sueca e uma mauritana, conforme apresentado na Tabela 1. Foram desconsideradas as ferrovias que são prestadoras de serviço, na qual as mineradoras pagam tarifas para o transporte de sua produção e não possuem autonomia para modificações operacionais, dentre essas, cita-se no Brasil a MRS Logística S/A.

Tabela 1

**Ferrovias definidas como DMU**

<b>DMU</b>	<b>Ferrovias</b>	<b>Empresa</b>	<b>País</b>	<b>Carga</b>
1	Estrada de Ferro Vitória Minas (EFVM)	Vale	Brasil	MFe + PLMFe
2	Estrada de Ferro Carajás (EFC)	Vale	Brasil	MFe
3	Mount Newman Railway (NEWM)	BHP	Austrália	MFe
4	Hamersley Railway (RTHA)	Rio Tinto	Austrália	MFe
5	Robe River (RTRR)	Rio Tinto	Austrália	MFe
6	Fortescue Railway (FMG)	Fortescue	Austrália	MFe
7	Roy Hill Railway (RHILL)	Roy Hill	Austrália	MFe
8	QNS & L (QNSL)	IOC	Canadá	PLMFe
9	Cartier (CART)	Arcelor Mittal	Canadá	MFe + PLMFe
10	Yekepa-Buchanan Line (AML)	Arcelor Mittal	Libéria	MFe
11	Iron Ore Line (IOL)	LKAB	Suécia	MFe + PLMFe



estes motivos, faz mais sentido trabalhar com a orientação a saída (*output*), ou seja, aumentar o total de MFe e PLMFe transportado pela ferrovia.

A maior dificuldade no levantamento dos dados foi a obtenção dos dados das ferrovias, pois são empresas privadas que divulgam resultados financeiros, mas não detalham as informações técnicas de suas operações. Os dados coletados são referentes ao ano de 2016 e as principais fontes para obtenção das informações foram os relatórios institucionais das empresas proprietárias das ferrovias escolhidas como DMU e informações dos órgãos reguladores do transporte ferroviário.

Nas pesquisas foram obtidos os valores das variáveis: extensão de linha (EXT), que corresponde ao comprimento da ferrovia, que inicia na mina/usina e termina no porto ou em um ponto de descarga; a quantidade de vagões em operação (VAG); quantidade de locomotivas em operação (LOC); a quantidade de vagões do trem tipo de maior predominância (TTP); a carga por eixo do vagão (CGE), que é a quantidade de MFe e/ou PLMFe que é transportada por cada rodeiro (eixo), considerando que os vagões avaliados possuem quatro rodeiros. Para encontrar a tara do vagão (TAR), foi necessário pesquisar qual é o tipo de vagão utilizado por cada empresa e o seu peso quando vazio. Para encontrar a capacidade líquida por trem (CLT) é obtida por meio de cálculo, com a multiplicação do valor da carga por eixo (CGE) por quatro (cada vagão possui quatro rodeiros ou eixos) e depois subtraído o valor da tara do vagão (TAR). Em seguida o valor é multiplicado pela quantidade de vagões existentes no Trem Tipo de Maior Predominância (TTP) de cada empresa. O número de trens (composição de locomotivas e vagões) por ano (NUT) carregados com MFe e PLMFe que percorreram a extensão da ferrovia ao longo de um ano; o volume movimentado de MFe e PLMFe em toneladas (TUU) e a tonelada quilômetro útil (TKU), que representa a tonelada útil transportada multiplicada pela distância percorrida, em unidade ton.km. Com os dados coletados foi elaborada uma base de dados na Tabela 2.

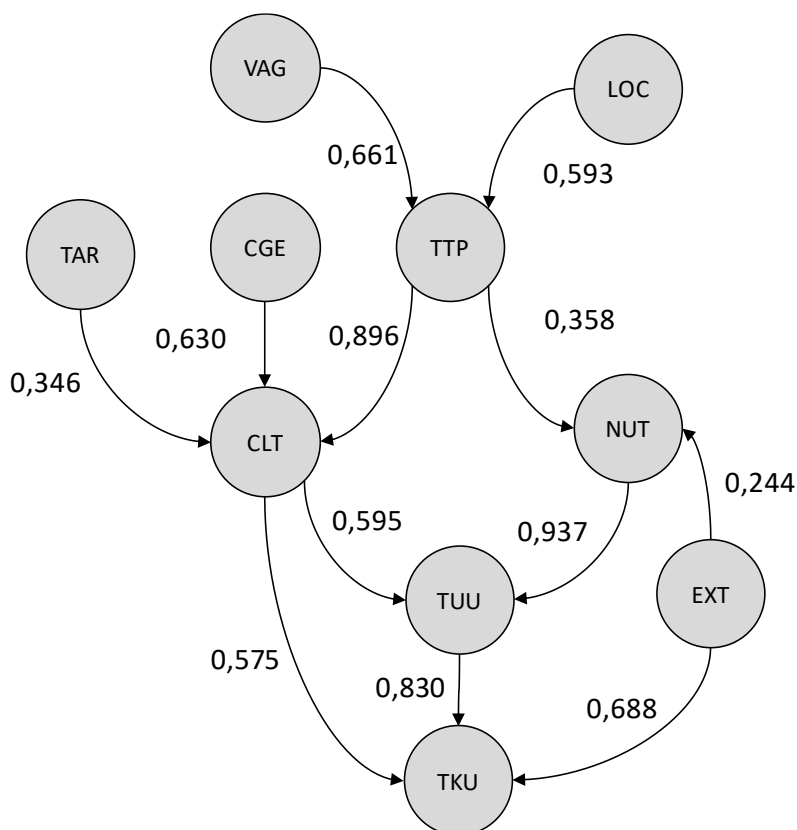
Tabela 2

**Base de dados das DMU**

<b>DMU</b>	<b>EXT<sup>1</sup></b>	<b>VAG<sup>2</sup></b>	<b>LOC<sup>2</sup></b>	<b>TTP<sup>3</sup></b>	<b>CGE<sup>4</sup></b>	<b>TAR<sup>5</sup></b>	<b>CLT<sup>5</sup></b>	<b>NUT<sup>2</sup></b>	<b>TUU<sup>5</sup></b>	<b>TKU<sup>6</sup></b>
EFVM	895	11.925	325	252	27,5	18	23.310	4.406	103	91.917
EFC	997	18.135	289	330	32,5	20	36.300	4.080	148	147.656
NEWM	426	4.000	178	268	37,5	20	34.840	6.359	222	94.382
RTHA	328	6.971	116	236	40,0	21	32.922	7.146	235	77.161
RTRR	242	4.529	75	167	40,0	21	23.297	1.520	35	8.570
FMG	620	4.600	53	250	42,0	20	37.000	4.676	173	107.260
RHILL	344	1.196	21	232	45,0	22	36.749	599	22	7.568
QNSL	418	1.000	20	265	36,0	20	32.860	554	18	7.608
CART	420	1.340	30	200	30,0	18	20.400	1.225	25	10.500
AML	243	195	4	70	30,0	18	7.140	294	2	510
IOL	390	1.100	17	68	32,5	21	7.398	3.636	27	10.491
MAUR	704	1.200	31	210	30,0	20	21.000	790	17	11.686

**Nota.** Fonte: Elaborado pelos autores. Unidades de medida: <sup>1</sup> quilômetro (km); <sup>2</sup> unidade; <sup>3</sup> quantidade de vagões por trem; <sup>4</sup> tonelada por eixo (ton/eixo); <sup>5</sup> tonelada (ton); <sup>6</sup> milhões de tonelada por quilômetro (milhões ton.km).

Ao conhecer a relação de causalidade entre as variáveis, é possível explicar como uma determinada causa implica em um específico efeito. Com o auxílio de especialistas da área em conjunto com a Tabela 2, foi montada a Figura 2, que demonstra esta relação por meio das setas e adicionalmente, é apresentado o coeficiente de correlação entre as variáveis abordadas (calculado usando o software Stata). Com base na Figura 2 é possível verificar a relação de causalidade entre as variáveis levantadas para mensurar a eficiência das ferrovias especializadas no transporte de MFe e PLMFe, que são patrimônios das empresas mineradoras e usinas de pelotização.



Legenda:

→ = Relação de causalidade

#,### = Coeficiente de correlação

VAG = Quantidade de vagões em operação

LOC = Quantidade de locomotivas em operação

TAR = Tara do vagão

TTP = Quantidade de vagões do trem tipo predominante

CLT = Capacidade líquida por Trem

NUT = Número de trens ao ano

TUU = Tonelada útil

EXT = Extensão de linha

TKU = Tonelada Quilometro Útil

CGE = Carga por eixo do vagão

**Figura 2.** Relação de causalidade entre as variáveis

Acrescenta-se que pela gradação de Miles e Shevlin (2001), valores entre 0,10 e 0,29, 0,30 e 0,49 e maiores que 0,50 são consideradas baixas, moderadas e elevadas, respectivamente.

O método DEA possui uma limitação relacionada a quantidade de variáveis utilizadas, ao ponto que se for utilizado muitas variáveis em relação a quantidade de DMU, haverá uma tendência de muitas destas ficarem próximas a eficiência máxima, perdendo assim o poder discricionário. Este problema pode ser evitado ao restringir a quantidade de variáveis utilizadas no modelo.

Como este estudo possui uma quantidade limitada de DMU, que representa um segmento de negócio específico, foi adotada a restrição da *Golden Rule* (Banker, Charnes, Cooper, Swarts & Thomas, 1989), que determina que  $n \geq \text{MAX}_{\{p \times q, 3(p+q)\}}$ , sendo  $n$  = número de observações da amostra,  $p$  = *inputs* e  $q$  = *outputs*.

Registra-se que a abordagem DEA *Bootstrap* (ou *smoothed Bootstrap*), desenvolvida por Simar e Wilson (1998), corrige o viés ascendente do método DEA quando o tamanho da amostra é inadequado para o número de entradas e saídas (i.e. *golden rule*). Porém, como adverte Chernick (2008), o tamanho da amostra deve ser de no mínimo 50 observações para estimar pontuações confiáveis consistentes usando o DEA *Bootstrap*.

A seleção das variáveis é a parte mais crítica do desenvolvimento do modelo DEA pois a escolha de diferentes conjuntos de variáveis pode levar a diferentes análises (Merkert, Smith & Nash, 2010). Em muitos trabalhos esta seleção de variáveis é feita de acordo com a opinião de especialistas, o que pode levar a um resultado tendencioso. Desta forma, para evitar este tipo de problema adotou-se o método multicritério combinatório inicial para selecionar as variáveis, pois ele independe da opinião do decisor (Senra, Nanci, Mello & Meza, 2007). Este método é uma variação do método multicritério de seleção de variáveis (Mello, Gomes, Meza & Lins, 2004), caracterizado por uma boa ordenação das DMU, sendo imparcial na escolha das variáveis por meio de uma ponderação entre a capacidade discriminatória e a eficiência média do modelo.

No entanto, antes de iniciar o método de seleção é fundamental uma análise prévia de possíveis variáveis pelos especialistas e/ou decisores, com o objetivo de avaliar quais variáveis contribuem com o real propósito da análise, que contribuem com a eficiência no transporte de MFe e PLMFe. Com o auxílio de seis profissionais da área de operação de empresas ferroviárias, foi realizada uma seleção prévia das variáveis a serem associadas ao *output* TKU,

sendo elas: VAG, LOC, CLT, TTP e CGE. Com esta pré-seleção foram formados os pares *input-output*: VAG-TKU, LOC-TKU, CLT-TKU, CGE-TKU e TTP-TKU.

O método multicritério combinatório inicial pondera os resultados em função de dois critérios: 1) em função da maximização da eficiência e 2) em função da minimização da discriminação, ambos calculados pela Equação 1. O ajuste à fronteira é medido por meio da eficiência média, que após a normalização é denominada de variável  $S_{EF}$ , assumindo o valor 10 para eficiência máxima e zero para eficiência mínima. A minimização da discriminação é medida pela quantidade de DMU que atingiram a eficiência, que após a normalização é denominada de variável  $S_{DIS}$ , que assume o valor 10 para o menor número de DMU na fronteira e zero para o maior número de DMUs que atingiram a fronteira. O parâmetro  $\omega$  permite atribuir maior ou menor importância a cada um dos critérios conforme a necessidade da análise. No entanto, por este estudo representar um segmento específico do negócio de MFe e PLMFe, com os especialistas técnicos analisaram que é mais relevante dar notoriedade a eficiência do que a quantidade de DMU na fronteira de eficiência, sendo atribuído o valor de 0,6 para  $\omega$ . O cálculo inicial é feito para cada par *input-output* e aquele que possui o maior valor de  $S$ , obtido pela Equação 1, é incorporado ao modelo.

$$S = \omega * S_{EF} + (1 - \omega) * S_{DIS} \quad (6)$$

Na Tabela 3, observa-se que na primeira rodada do modelo CCR *output* foi o par TTP-TKU que obteve o maior valor de  $S$ , alcançando o valor igual a 1,00 e por isso foi o primeiro par *input-output* escolhido.

Tabela 3

**Primeira rodada do método multicritério combinatório inicial para DEA CCR**

<i>Input</i>	Índice de Eficiência CCR <i>output</i>				
	VAG	CLT	CGE	LOC	TTP
<i>Output</i>	TKU	TKU	TKU	TKU	TKU
EFVM	0,3267	0,9694	0,7357	0,1397	0,8152
EFC	0,3451	1,0000	1,0000	0,2525	1,0000
NEWM	1,0000	0,6660	0,5540	0,2620	0,7871
RTRR	0,0802	0,0904	0,0472	0,0563	0,1147
RTHA	0,4691	0,5762	0,4246	0,3293	0,7307
FMG	0,9882	0,7127	0,5621	1,0000	0,9589
RHILL	0,2682	0,0506	0,0370	0,1781	0,0729
QNSL	0,3224	0,0569	0,0465	0,1880	0,0642
CART	0,3321	0,1265	0,0770	0,1729	0,1173
AML	0,1109	0,0176	0,0037	0,0630	0,0163
IOL	0,4042	0,3486	0,0711	0,3049	0,3448
MAUR	0,4127	0,1368	0,0857	0,1863	0,1244
Eficiência média:	0,4216	0,3960	0,3037	0,2611	0,4289
Qtd. DMU na fronteira:	1	1	1	1	1
$S_{EF}$ :	0,95	0,90	0,30	0,00	1,00
$S_{DIS}$ :	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\omega$ :	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
S:	0,97	0,94	0,58	0,40	<b>1,00</b>

**Nota.** Fonte: Elaborado pelos autores.

Na segunda rodada do modelo CCR *output*, as variáveis de entrada VAG, CGE e LOC são incorporadas separadamente ao par TTP-TKU. A variável CLT foi excluída por ter forte

correlação (0,896) com a variável TTP, que foi selecionada na primeira rodada. Utilizando a Equação 1 para as combinações feitas, a variável VAG foi a segunda variável de entrada selecionada por ter alcançado o maior valor de  $S$ , de 0,60.

As rodadas são repetidas até atender a restrição da quantidade de variáveis por modelo do método DEA. Como este estudo adotou a restrição da *Golden Rule* (Banker *et al.*, 1989), a quantidade de variáveis a serem selecionadas estará limitada a quatro, o que representa três rodadas. Na terceira e última rodada, a variável LOC foi excluída por ter forte correlação (0,906) com a variável VAG, que foi selecionada na segunda rodada, restando assim somente a variável CGE para ser selecionada.

Como conclusão do método multicritério combinatório inicial, para o modelo CCR *output* foram selecionadas três variáveis como entrada (VAG, CGE e TTP) e uma variável de saída (TKU).

### **Análise dos Resultados**

Esta seção aborda os resultados e análises da comparação das ferrovias especializadas em transporte de MFe e PLMFe, caracterizada pela aplicação do método DEA. Conforme visto no Seção 3, foram adotadas três variáveis de entrada (VAG, CGE e TTP), e uma variável de saída (TKU). Utilizou-se o *software* Frontier Analyst para rodar o modelo DEA.

As eficiências foram calculadas e aquelas que alcançaram o índice de eficiência igual a 1 foram consideradas como DMU (ferrovias) eficientes. Pelo modelo CCR *output* existem 3 ferrovias com o índice de eficiência igual a 1, sendo elas: EFC da Vale, NEWM da BHP e FMG da Fortescue. Pelo modelo BCC *output*, 7 ferrovias apresentam o índice de eficiência igual a 1, sendo elas: EFVM e EFC da Vale, NEWM da BHP, FMG da Fortescue, AML da Arcelor Mittal, IOL da LKAB e MAUR da Mauritânia. As demais possuem o índice de eficiência abaixo de 1 e não são consideradas como eficientes.

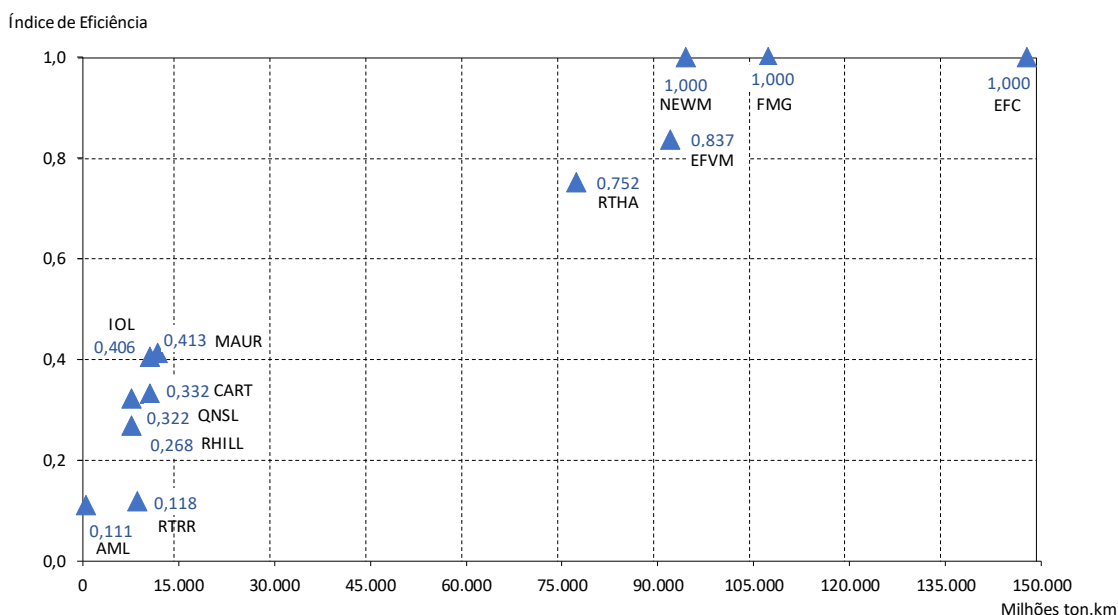
Considerando as particularidades da ferrovia, o modelo CCR mostrou-se mais adequado por trabalhar com a relação de proporcionalidade entre os inputs e outputs, que se aplica melhor na avaliação da aplicação dos recursos (VAG, CGE e TTP) na obtenção do volume movimentado pela distância percorrida (TKU).

Por fim, como estratégia de validação do modelo DEA, foi processada regressão Tobit, que trata de variáveis dependentes censuradas; ou seja, que não estão livremente distribuídas entre  $-\infty$  e  $+\infty$  (Gujarati, 2000), como o índice de eficiência que emerge de modelos DEA.

Para tanto foram utilizadas como variáveis independentes as mesmas variáveis do modelo DEA desenvolvido (VAG, TTP, CGE e TKU) e como variável dependente a eficiência revelada na aplicação da DEA. Adicionalmente foi utilizado procedimento de reamostragem *bootstrap* (1.000 replicações). Explica-se que foi feito espelhamento do banco de dados, por estar limitado a 12 observações, e que foi utilizado o software Stata.

Os resultados permitem validar o modelo DEA aplicado, pois os coeficientes de todas as variáveis se mostraram estatisticamente significantes (*p-value* < 0,05), tanto nos dados originais (espelhados) quanto no procedimento *bootstrap*.

A Figura 3 apresenta graficamente os índices de eficiência calculados utilizando o modelo CCR *output* para as doze ferrovias avaliadas, onde foi possível identificar que três ferrovias eficientes, sendo elas: Estrada de Ferro Carajás (EFC), Fortescue (FMG) e Mount Newman (NEWM).



**Figura 3.** Resultado gráfico do modelo CCR *output*

Os alvos para a variável de saída TKU das DMU que não atingiram o índice de eficiência igual a 1 auxiliam as empresas a avaliarem medidas que podem ser tomadas no transporte ferroviário para melhorar a eficiência. Além disso, ele apresenta as DMU que possuem folgas em uma ou mais variáveis de entrada. Para a variável VAG, nenhuma DMU apresentou folga, o que demonstra que esta variável de entrada está adequada em relação a variável de saída TKU. Para as variáveis TTP e CGE o modelo indicou adequações.

A Tabela 4 apresenta o alvo e a folga das variáveis de entrada TTP e CGE para cada DMU. Para a variável TTP, seis DMU apresentam folga na quantidade de vagões que fazem parte do trem tipo de maior predominância na ferrovia. Na EFVM o ajuste é menor, com a proposta de redução de 5 vagões. Nas demais ferrovias a proposta de redução é mais significativa, que varia de 57 a 198 vagões na composição de um trem. Reduzir a quantidade de vagões do trem tipo de maior predominância (TTP) não aparenta ser uma boa opção, tendo em vista uma perda de escala no transporte em ferrovias já planejadas para o trem tipo existente.

Para a variável de entrada CGE, oito DMU apresentam folga demandando ajustes que variam desde 5,3 até 33,8 ton/eixo. A redução da carga por eixo (CGE) pode ser alcançada com a

diminuição da quantidade de produto transportado por vagão, mas que não faz sentido transportar vários vagões sem utilizar sua capacidade máxima.

Tabela 4

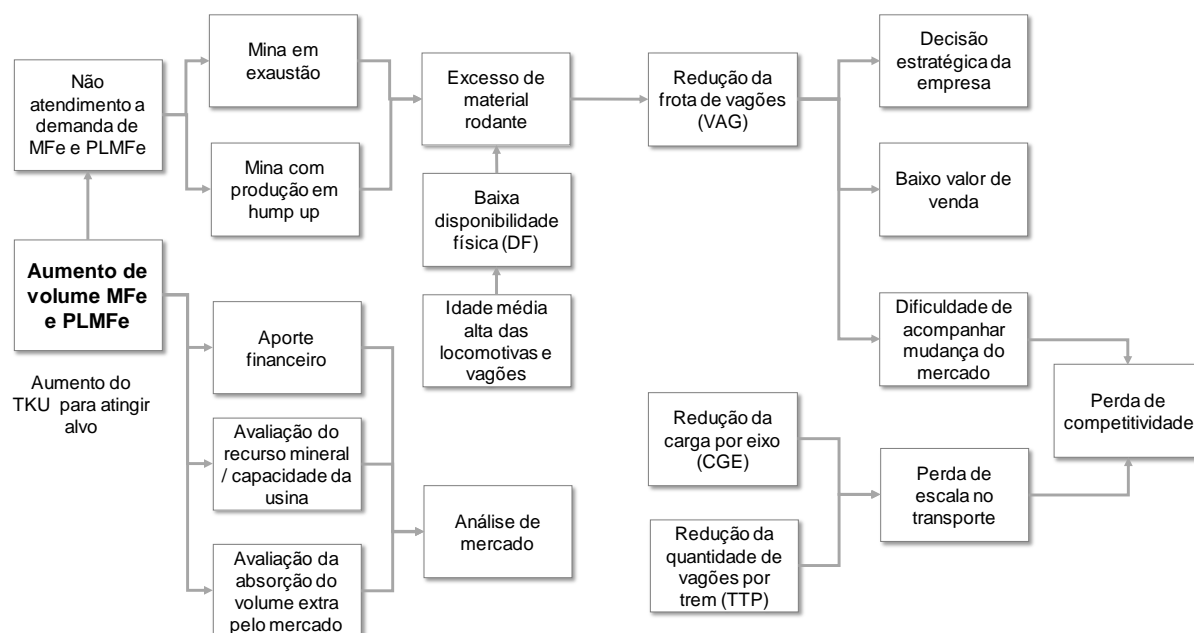
**Alvo e folga das variáveis TTP, CGE e TKU**

DMU	Índice Eficiência	Valores Observados			Valores Alvo			Valores de Folga			Incremento
		TTP <sup>1</sup>	CGE <sup>2</sup>	TKU <sup>3</sup>	TTP <sup>1</sup>	CGE <sup>2</sup>	TKU <sup>3</sup>	TTP <sup>1</sup>	CGE <sup>2</sup>	TKU <sup>3</sup>	
EFC	1,000	330	32,5	147.666	330	32,5	-	-	-	-	
FMG	1,000	250	42,0	107.260	250	42,0	-	-	-	-	
NEWM	1,000	268	37,5	94.382	268	37,5	-	-	-	-	
EFVM	0,837	252	27,5	91.917	247	27,5	109.768	5	-	17.851	
RTHA	0,752	236	40,0	77.160	236	34,7	102.577	-	5,3	25.417	
MAUR	0,413	210	30,0	11.686	80	11,3	28.315	130	18,7	16.628	
IOL	0,406	68	32,5	10.491	68	10,2	25.830	-	22,3	15.339	
CART	0,332	200	30,0	10.500	90	12,6	31.618	110	17,4	21.118	
QNSL	0,322	265	36,0	7.608	67	9,4	23.596	198	26,6	15.988	
RHILL	0,268	232	45,0	7.568	80	11,2	28.220	152	33,8	20.652	
RTRR	0,118	167	40,0	8.570	167	9,4	72.383	-	14,7	63.812	
AML	0,111	70	30,0	510	13	11,2	4.601	57	28,2	4.091	

**Nota.** Fonte: Elaborado pelos autores. Unidades de medida: <sup>1</sup> quantidade de vagões por trem; <sup>2</sup> tonelada por eixo (ton/eixo); <sup>3</sup> milhões de tonelada por quilômetro (milhões ton.km).

A Tabela 4 também apresenta o alvo e o incremento necessário na variável de saída TKU, para que as DMU atinjam o índice de eficiência igual a 1. Observa-se nos resultados que nove DMU precisam de ajustes no TKU. É proposto um aumento de 19% no TKU da ferrovia EFVM e de 33% no TKU da ferrovia RTHA. As ferrovias RTRR, RHILL, QNSL, CART, AML, IOL e MAUR precisam aumentar mais de 140% de seu TKU para se tornarem eficientes.

Para a análise dos resultados foi utilizado o fluxo proposto na Figura 4, que ressalta os pontos que precisam ser analisados antes de uma tomada de decisão, considerando o aumento de variável de saída e/ou eliminação das folgas das variáveis de entrada.



**Figura 4.** Fluxo para análise dos resultados do software Frontier Analyst

Apesar dos resultados indicarem necessidade de incremento de TKU para as DMU não eficientes, é preciso avaliar se as empresas têm condições e/ou interesse de investir para aumentar a produção e se as minas/pelotizadoras têm capacidade de expandir a produção. Também, podem existir minas com a produção em crescimento, projetos em *hump up*, e, assim, a ferrovia já possui vagões, locomotivas e capacidade de transporte, porém como a mina não está produzindo a pleno, a ferrovia opera abaixo da capacidade instalada.

Outra causa levantada pode ser a existência de minas em exaustão de sua produção, tendo volumes decrescentes, levando a ferrovia a ter vagões em excesso. Todavia, a redução da frota não seria viável caso a empresas tenha projetos para reposição deste volume, o que levaria à utilização destes ativos no futuro.

A redução de vagões pode deixar a empresa vulnerável em caso de mudança do mercado de MFe e PLMFe. Um desinvestimento na ferrovia poderia acarretar numa perda de competitividade, além do valor baixo que se conseguiria com a venda desses vagões. Mas esta redução pode ser uma decisão estratégica, tomada pela alta administração das empresas.

A Tabela 5 apresenta um resumo do percentual de aumento do TKU, o volume de MFE / PLMFe que cada DMU movimentou (TUU) em 2016 e o valor necessário de aumento de produção para atingir o índice de eficiência igual a 1. As análises a seguir foram realizadas tomando como base as Tabelas 1, 2 e 4.

Tabela 5

**Resumo da análise das sugestões sobre o aumento do volume movimentado**

DMU	Aumento do TKU (%)	Volume ano 2016 <sup>1</sup>	Volume necessário para atingir eficiência <sup>1</sup>	Análise das sugestões sobre capacidade produtiva
EFC	-	148	-	Produção crescente do projeto S11D
FMG	-	173	-	Sem planos de crescimento da produção
NEWM	-	222	-	Possui projeto de expansão para 290 Mta
EFVM	19%	103	123	Sem planos de crescimento de produção
RTHA	33%	235	313	Sem planos de crescimento de produção
MAUR	142%	17	40	Sem planos de crescimento de produção
IOL	146%	27	66	Sem planos de crescimento de produção
CART	201%	25	76	Sem planos de crescimento de produção
QNSL	210%	18	56	Sem planos de crescimento de produção
RHILL	273%	22	82	Produção crescente com estabilidade em 2018 de 55 Mta
RTRR	745%	35	299	Sem planos de crescimento de produção

AML	802%	2	19	Possui projeto de expansão para 15 Mta
-----	------	---	----	--

---

**Nota.** Fonte: Elaborado pelos autores. Unidade de medida: <sup>1</sup> milhões de tonelada.

Na maioria dos casos, o aumento de TKU necessário para alcançar a eficiência dificilmente seria obtido, pois a maioria das empresas está mantendo estável sua produção de MFe/PLMFe, incentivada pela incerteza do mercado e grandes oscilações do preço do MFe. Por outro lado, em caso de mudança no cenário mundial e aumento da demanda, as empresas precisariam aumentar sua produção e adequar a ferrovia para o escoamento dos produtos.

De fato, várias empresas não têm planos para crescer, mas podem a qualquer momento aumentar a produção em função do aumento de demanda global. No entanto, a ferrovia possui uma operação pouco flexível e não absorve ajustes em um curto período de tempo. Como a frota de ativos é muito complexa de ser alterada, pois o valor residual de vagões e locomotivas é ínfimo para venda, quase vendido como sucata, é extremamente difícil de serem comprados numa eventual retomada da demanda mundial. Assim, entendemos que o foco da empresa é crescer e atender o mercado e não ir definhando por não ter ativos que a permitam responder a demanda.

A EFVM é uma ferrovia com a malha bastante ramificada e é a única ferrovia de bitola métrica, o que limita a capacidade de via, utilização de vagões menores quando comparados a outras ferrovias de MFe e PLMFe, o que leva a uma menor capacidade de transporte da ferrovia. Para que esta ferrovia se torne eficiente, o modelo CCR *output* sugere um aumento de 19% em seu TKU, passando de 91.917 milhões ton.km para 109.768 milhões ton.km. Este percentual representa aumentar de 103 Mta para 120 Mta. Apesar de ter capacidade produtiva, a Vale divulgou para o mercado que não fará investimentos no Sistema Sudeste que é atendido pela ferrovia EFVM, concentrando os esforços na expansão da produção da mina de MFe S11D do Sistema Norte, que é atendida pela ferrovia EFC.

A EFC é a única ferrovia entre as DMU estudadas que possui bitola de 1,60m e o maior trem, com 330 vagões. Ela é considerada pelo método DEA como eficiente por *default* por possuir o maior valor de TKU da amostra e não demanda nenhum ajuste. A EFC possui as variáveis de entrada condizentes com o volume de MFe transportado. A Vale Norte apresenta uma produção crescente de MFe no longo prazo, oriundo do projeto S11D.

A NEWM é a única ferrovia australiana ativa da BHP após a paralisação da mina Yarrie em 2014, que era atendida pela ferrovia Goldsworthy. Ela possui bitola *standard* de 1,435m e atende quatro complexos de minas, transportando MFe. Esta ferrovia também foi considerada como eficiente, dispensando ajustes em suas variáveis de entrada e saída. A BHP apresenta uma produção crescente de MFe no longo prazo e bom equilíbrio entre os *inputs* e o *output* o que poderá mantê-la como uma ferrovia eficiente nos próximos anos.

A Rio Tinto possui dois corredores logísticos, compreendidos pelas ferrovias RTRR e RTHA, ambas de bitola *standard*. O resultado sugere um aumento expressivo da quantidade de TKU, passando de 8.570 milhões ton.km para 72.383 milhões ton.km. Já a ferrovia Hamersley, a alteração é menor. O resultado sugere que o TKU seja aumentado de 77.146 milhões ton.km para 102.577 milhões ton.km, representando um acréscimo de 33%. No atual cenário, o aumento do TKU não se mostra favorável porque a Rio Tinto apresenta em seu planejamento de longo prazo uma produção estável de MFe até 2025, tendo em vista que seus projetos são para suprir o volume perdido com a exaustão de algumas minas. No entanto, ela mantém uma quantidade de material rodante superior ao necessário porque ela possui outros projetos de expansão temporariamente suspensos, aguardando uma retomada crescente da demanda por MFe. Para a ferrovia RTRR, o aumento de TKU é muito alto o que dificilmente seria atendido pela capacidade produtiva do Complexo Robe River. Uma avaliação mais criteriosa se faz necessária para certificar que as variáveis de entrada estão superdimensionadas em relação ao volume previsto nos novos projetos.

A FMG é uma ferrovia exclusiva para MFe, com bitola *standard* e 42 toneladas por eixo. É uma ferrovia nova, bem estruturada, com capacidade de via preparada para futuras expansões. Seu trem tipo é o de maior capacidade da amostra, com 37.000 toneladas e com composição de trem equiparada com as outras ferrovias australianas. Foi considerada pelo modelo como eficiente, sem ajustes a serem feitos.

A RHILL é a mais recente ferrovia australiana de grande porte construída, que entrou em operação em 2015, com 45 toneladas por eixo, bitola *standard* e movimentação de MFe na região de Pilbara. Seu índice de eficiência é 0,268 e demanda incremento no TKU, na qual é sugerido um aumento de 273%, indo de 8.570 milhões ton.km para 28.220 milhões ton.km. Esta ferrovia foi planejada para uma produção de MFe futura que ainda não foi atingida em sua plenitude até 2016. A ferrovia Roy Hill teve uma produção crescente de MFe até 2018, onde atingiu sua estabilidade com uma produção de 55 Mta. Por ser uma ferrovia nova e em expansão, torna-se interessante uma nova avaliação a partir de 2019 para verificar a melhoria em sua performance.

A ferrovia QNSL, da IOC, de bitola *standard*, faz o transporte de PLMFe e teve um índice de eficiência baixo igual a 0,322. Os resultados apontam uma necessidade de aumento do TKU de 7.608 milhões ton.km para 23.596 milhões ton.km, o que representa um acréscimo de 210%. A unidade produtiva de PLMFe da IOC não está preparada para este aumento tão expressivo e seu planejamento mostra estabilidade na produção de longo prazo. A CART da Arcelor Mittal, de bitola *standard*, que transporta MFe e PLMFe, também teve índice de eficiência baixo, igual a 0,332. Para se tornar eficiente seria preciso aumentar o TKU em 201%, saindo de 10.500 milhões ton.km para 31.618 milhões ton.km. Em linhas gerais, é muito difícil ferrovias do porte da CART e QNSL terem um aumento tão expressivo do volume transportado por não terem planos de crescimento nos próximos anos.

A ferrovia AML, da Arcelor Mittal, de bitola *standard*, transporta MFe na Libéria. É uma ferrovia de pequeno porte, com as operações retomadas em 2015 e movimentação de 510 milhões ton.km de MFe. Sua frota é pequena e seu trem é composto por apenas uma locomotiva e setenta vagões, o que dificulta torná-la como referência para as demais ferrovias. A Arcelor Mittal da Libéria apresentou para o mercado o investimento em um projeto de expansão que elevará sua produção para 15 Mta. Este crescimento atenderá parcialmente o incremento de TKU na ferrovia AML, que demanda uma produção de 19 Mta para se tornar eficiente.

A ferrovia IOL possui bitola *standard* e movimenta MFe e PLMFe para exportação. Para se tornar eficiente, a IOL precisa fazer ajuste na variável TKU, com aumento de 146%, passando de 10.491 milhões ton.km para 25.830 milhões ton.km. A empresa demonstra em seu planejamento de longo prazo uma produção estável, o que dificulta o atendimento deste aumento de TKU.

A ferrovia MAUR, da SNIM, com o índice de eficiência igual a 0,413, precisa de um ajuste significativo na quantidade de TKU, indo de 11.686 milhões ton.km para 28.315 milhões ton.km, o que caracteriza um aumento de 142%. A SNIM também apresentou um planejamento de longo prazo de estabilidade, inviabilizando um aumento tão expressivo.

De um modo geral, este estudo permite aos gestores conhecerem quais são as adequações operacionais necessárias em relação a quantidade de vagões por trem e carga por eixo, bem como a aquisição de vagões que permitirão seu crescimento para atendimento da demanda por MFe e PLMFe.

## **Conclusões**

Este artigo propôs a utilização do método DEA CCR *output* para mensurar e comparar a eficiência das ferrovias especializadas em transporte de MFe e PLMFe, que fazem parte do

patrimônio das empresas de mineração e usinas de pelotização e, portanto, não cobram frete para o transporte do MFe e PLMFe.

Foram definidas três variáveis de entrada por meio do método multicritério combinatório inicial, sendo elas: 1) a quantidade de vagões em operação (VAG), 2) a carga por eixo do vagão (CGE) e 3) a quantidade de vagões do trem tipo de maior predominância (TTP). E uma variável de saída, a tonelada quilômetro útil (TKU). Por último, foi utilizada a regressão Tobit como estratégia de validação do modelo DEA.

Pelo levantamento realizado das ferrovias que transportam MFe e PLMFe no cenário mundial do ano de 2016, descobriu-se que doze ferrovias são patrimônio das empresas mineradoras e/ou usinas de pelotização e não cobram frete das suas empresas proprietárias. Destas doze ferrovias, percebeu-se que três são consideradas como eficientes, sendo elas: 1) Estrada de Ferro Carajás (EFC), 2) Mount Newman (NEWM) e 3) Fortescue (FMG). As demais ferrovias precisam aumentar a variável de saída para se tornarem eficientes. Para cada ferrovia observada foram avaliadas proposições em relação as possibilidades das ferrovias diante a realidade do mercado que elas estão inseridas.

No modo geral, devido a proporcionalidade entre as variáveis de entrada e saída (i.e. retorno constante de escala), o modelo CCR *output* foi considerado como um bom método para avaliar a eficiência das ferrovias especializadas em transporte de MFE e PLMFe, pois determinou a eficiência de cada DMU, sugerindo o aumento necessário do TKU para que as ferrovias atinjam o índice de eficiência igual a 1 e possíveis ajustes nas variáveis de entrada. No entanto, caso seja utilizado outro conjunto de variáveis que demonstre combinações convexas (retorno crescente de escala) ou côncavas (retorno decrescente de escala), torna-se interessante a utilização do modelo BCC, considerando que os resultados estão condicionados a um determinado conjunto de valores por se tratar de uma eficiência relativa.

Considerando que o mercado de MFe é muito dinâmico, as empresas poderão utilizar os resultados deste artigo para guiar melhorias futuras no caso de expansão da sua produção, tornando sua ferrovia mais eficiente ou se mantendo na fronteira de eficiência.

Por fim, esse trabalho possui algumas limitações por restringir o escopo ao ano de 2016. Apresenta-se como oportunidade para estudos futuros a avaliação do quinto evento que alterou a dinâmica do mercado de MFe e PLMFe e desequilibrou a oferta x procura: o rompimento da Barragem de Rejeito de Brumadinho, ocorrido em 2019. Sugere-se também a aplicação da metodologia DEA para os Portos, que são o elo seguinte da cadeia integrada do MFe e PLMFe com destino ao cliente.

A continuidade deste e de outros trabalhos poderão proporcionar para as empresas de MFe e PLMFe indicativos de como aumentar sua eficiência nos elos da cadeia, reduzindo os custos e aumentando a margem de lucro.

## Referências

- Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT (2018). *Anuário do Setor Ferroviário*. Recuperado em 04 de fevereiro, 2018, de <https://www.antt.gov.br/anuario-do-setor-ferroviario>
- Asmild, M., Holvad, T., Hougaard, J. L., & Kronborg, D. (2009). Railway reforms: do they influence operating efficiency? *Transportation*, 36(5), 617-638. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s11116-009-9216-x>.  
<https://doi.org/10.1007/s11116-009-9216-x>
- Banker, R. D., Charnes, A., Cooper, W. W., Swarts, J., & Thomas, D. (1989). An introduction to data envelopment analysis with some of its models and their uses. *Research in governmental and nonprofit accounting*, 5(1), 125-163.
- Bogetoft, P., & Otto, L. (2011). *Benchmarking with DEA, SFA, and R* (Vol. 157). New York: Springer Science & Business Media.
- Caldas, M. A. F., Gabriele, P. D., Carvalhal, R. L., & Ramos, T. G. (2012). A eficiência do transporte ferroviário de cargas: uma análise do Brasil e dos Estados Unidos. In *Congresso Latino Ibero-Americano de Investigación Operativa e Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (CLAIO-SBPO)*, 16, 1775-1786. Recuperado de <http://www.din.uem.br/sbpo/sbpo2012/pdf/arq0333.pdf>

- Cantos, P., Pastor, J. M., & Serrano, L. (2012). Evaluating European railway deregulation using different approaches. *Transport Policy*, 24, 67-72. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0967070X12001291>. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2012.07.008>
- Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European journal of operational research*, 2(6), 429-444. Retrieved from <https://farapaper.com/wp-content/uploads/2019/06/Fardapaper-Measuring-the-efficiency-of-decision-making-units.pdf>
- Chernick M. R. (2008) *Bootstrap Methods: a Guide for Practitioners and Researchers*. New Jersey: Wiley.
- Cinca, C. S., Molinero, C. M., & Callén, Y. F. (2016). Input and output search in DEA: The case of financial institutions. In *Handbook of Operations Analytics Using Data Envelopment Analysis* (pp. 51-87). Boston: Springer.
- Gujarati, D. N. (2000). *Econometria básica*. São Paulo, SP: Makron Books.
- Kutlar, A., Kabasakal, A., & Sarikaya, M. (2013). Determination of the efficiency of the world railway companies by method of DEA and comparison of their efficiency by Tobit analysis. *Quality & Quantity*, 47(6), 3575-3602. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s11135-012-9741-0>. <https://doi.org/10.1007/s11135-012-9741-0>
- Lin, L. C., & Tseng, C. C. (2007). Operational performance evaluation of major container ports in the Asia-Pacific region. *Maritime Policy & Management*, 34(6), 535-551. Retrieved from <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/03088830701695248>. <https://doi.org/10.1080/03088830701695248>
- Marchetti, D., & Wanke, P. (2017). Brazil's rail freight transport: Efficiency analysis using two-stage DEA and cluster-driven public policies. *Socio-Economic Planning Sciences*, 59, 26-42. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038012116300490>. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2016.10.005>
- Mello, J. D. S., Gomes, E. G., Meza, L. A., & Lins, M. E. (2004). Selección de Variables para el incremento del poder de discriminación de los modelos DEA. *Embrapa Territorial-Artigo em periódico indexado (ALICE)*. Recuperado de <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/17494/1/1805.pdf>
- Merkert, R., Smith, A. S., & Nash, C. A. (2010). Benchmarking of train operating firms—a transaction cost efficiency analysis. *Transportation Planning and Technology*, 33(1), 35-53. Retrieved from <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/03081060903429330>. <https://doi.org/10.1080/03081060903429330>
- Miles, J., & Shevlin, M. (2001). *Applying regression and correlation: A guide for students and researchers*. London: Sage.
- Motta, G. D. S. (2017). Como escrever um bom artigo tecnológico? *Revista de Administração Contemporânea*, 21(5), 4-8. Recuperado de <http://www.scielo.br/pdf/rac/v21n5/1415-6555-rac-21-05-00004.pdf>. <http://dx.doi.org/10.1590/1982-7849rac2017170258>

- Pereira, M. A., Rosa, F. S. da, & Lunkes, R. J. (2015). Análise da eficiência ferroviária no Brasil nos anos entre 2009 a 2013. *Transportes*, 23(3), 56-63. Recuperado de <https://anpet.homologacao.emnuvens.com.br/anpet/article/view/909>. <https://doi.org/10.14295/transportes.v23i3.909>
- Reis, J. C., Sacramento, K. T., Mello, J. S. de, & Meza, L. A. (2017). Avaliação de eficiência das ferrovias brasileiras: Uma aplicação do método multicritério para seleção de variáveis em DEA e Representação Gráfica Bidimensional. *Revista Espacios*, 38(14), 16-26.
- Sharma, M. G., Debnath, R. M., Olorunfoba, R., & Sharma, S. M. (2016). Benchmarking of rail transport service performance through DEA for Indian railways. *The International Journal of Logistics Management*, 27(3), 629-649. Retrieved from <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/IJLM-08-2014-0122/full/html?fullSc=1>. <https://doi.org/10.1108/IJLM-08-2014-0122>
- Senra, L. F. A. D. C., Nanci, L. C., Mello, J. C. C. B. S. D., & Meza, L. A. (2007). Estudo sobre métodos de seleção de variáveis em DEA. *Pesquisa Operacional*, 27(2), 191-207. Recuperado de [https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0101-74382007000200001&script=sci\\_arttext&tlng=pt](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0101-74382007000200001&script=sci_arttext&tlng=pt). <https://doi.org/10.1590/S0101-74382007000200001>
- Silva, F. G. F., Oliveira, R. L. M., & Marinov, M. (2020). An Analysis of the Effects on Rail Operational Efficiency Due to a Merger between Brazilian Rail Companies: The Case of RUMO-ALL. *Sustainability*, 12(12), 1-23. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/12/4827>. <https://doi.org/10.3390/su12124827>
- Simar L. & Wilson, P. W. (1998) Sensitivity analysis of efficiency scores: How to bootstrap in nonparametric frontier models. *Management Science*, 44(1), 49-61. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/2634426>.
- Statista (2020). *Iron ore - Statistics & Facts*. Retrieved on March, 30, 2020, from <https://www.statista.com/statistics/589945/iron-ore-production-gross-weight-worldwide/>
- Wanke, P., Chen, Z., Liu, W., Antunes, J. J., & Azad, M. A. K. (2018). Investigating the drivers of railway performance: Evidence from selected Asian countries. *Habitat International*, 80, 49-69. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0197397518304399>. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2018.08.004>
- Yu, M. M. (2008). Assessing the technical efficiency, service effectiveness, and technical effectiveness of the world's railways through NDEA analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 42(10), 1283-1294. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0965856408000918>. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2008.03.014>
- Zhou, H., & Hu, H. (2017). Sustainability evaluation of railways in China using a two-stage network DEA model with undesirable outputs and shared resources. *Sustainability*, 9(1), 150. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2071-1050/9/1/150>. <https://doi.org/10.3390/su9010150>

### **Declaração de contribuição dos autores**

Os autores declaram que a pesquisa da qual decorreu o manuscrito foi desenvolvida pela primeira coautora, sob orientação do segundo coator no mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo. Também que o terceiro coautor foi examinador externo da banca de qualificação e defesa da dissertação. Declaram ainda que na elaboração do artigo contribuíram de forma semelhante.

### **Declaração de conflito de interesses**

Os autores registram que não há qualquer conflito de interesse a ser declarado.