

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DAS FERROVIAS ESPECIALIZADAS EM TRANSPORTE DE MINÉRIO DE FERRO E PELOTAS INTEGRANTES DE UMA CADEIA PRODUTIVA INTEGRADA

Renata Guimarães de Oliveira Fontan

Rodrigo de Alvarenga Rosa

Universidade Federal do Espírito Santo
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

RESUMO

O mercado mundial de minério ferro extrai e negocia mais de dois milhões de toneladas por ano. As poucas empresas mineradoras estabelecem uma cadeia produtiva integrando mina, ferrovia e porto visando reduzir seus custos. Essas ferrovias são vistas como custos operacionais para exploração da mina e envolvem altos investimentos e custos operacionais. Neste artigo, propõe-se analisar comparativamente o desempenho de doze ferrovias especializadas no transporte de minério de ferro e pelotas, e que são propriedades das empresas mineradoras/pelotizadoras. Estas ferrovias estão localizadas em quatro continentes, distribuídas em dez países. Para isso, foi utilizada a metodologia *Data Envelopment Analysis* (DEA) com Retornos Variáveis de Escala (BCC) e orientação a saída. O objetivo é medir a eficiência das ferrovias e identificar seu posicionamento em relação às outras ferrovias. Das doze ferrovias avaliadas, cinco foram consideradas como eficientes e três poderão alcançar a fronteira de eficiência com ajustes apresentados e analisados.

ABSTRACT

The world iron ore market extracts and trades more than two million tons per year. The few mining companies establish a production system integrating mine, railway and port to reduce their costs. These railways are considered as a cost for the mining process and involve high investments and operating costs. In this paper, we propose to analyze comparatively the performance of twelve railways specialized in the transport of iron ore and pellets, which are properties of the mining/pellets companies. These railways are in four continents, distributed in ten countries. For this, the Data Envelopment Analysis (DEA) methodology was used with Variable Scale Returns (BCC) and output orientation. The objective is to measure the efficiency of the railways and identify their position in relation to the other railways. Considering the twelve railways analyzed, five were considered efficient and three can reach the efficiency frontier with adjustments presented and analyzed.

1. INTRODUÇÃO

O minério de ferro (MFe) e a pelota (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. Em 2016, no mundo foram produzidos 2,2 bilhões de toneladas de MFe, com a Austrália liderando com uma produção de aproximadamente 825 milhões de toneladas, ou seja, 37% do cenário global, seguido pelo Brasil que produziu nesse ano por volta de 391 milhões de toneladas, representando 18% da produção mundial (Statista, 2018). Para escoar uma produção de MFe tão expressiva da mina até o porto, as empresas utilizam o modo ferroviário, especialmente, por sua capacidade de transportar grandes volumes. No entanto, este modo possui altos custos de operação, o que impacta significativamente no valor final do produto.

No mercado internacional de MFe e PLMFe, muitas empresas decidem por construir a sua própria infraestrutura de transporte, pois possuem um fluxo dedicado de carga que justifica tal investimento. Especificamente nos casos das ferrovias, por elas serem de propriedade das mineradoras e/ou pelotizadoras, elas não cobram o frete pelo transporte e são vistas como sendo centro de custos da operação da mina ou da usina de pelotização. Eventualmente, além do MFe e PLMFe, elas podem transportar outras cargas, mas sempre em menor quantidade, sendo a carga predominante sempre o MFe e as PLMFe. Elas possuem alta densidade da carga

transportada, trens maiores e um peso por eixo alto (em função do peso específico do MFe e da PLMFe), o que exige mais de suas locomotivas e vagões e que as diferenciam das outras ferrovias de outras cargas e passageiros, que usualmente utilizam trens bem menores e mais leves.

Nesse mercado, as empresas (mineradoras e pelletizadoras) buscam aumentar a eficiência do transporte ferroviário visando reduzir custos, aumentar produtividade e, conseqüentemente, aumentar as margens de lucro. Sendo assim, surgem questionamentos sobre quais ferrovias nesse mercado são mais eficientes na aplicação dos seus recursos. Considerando que as ferrovias transportam produtos semelhantes, a comparação permitirá conhecer os pontos de (in)eficiência das ferrovias consideradas menos eficiente e, assim, entender o motivo que umas são mais eficientes que outras. Para medir a eficiência entre essas ferrovias especializadas no transporte de MFe e PLMFe, é proposto nesse artigo utilizar a metodologia *Data Envelopment Analysis* (DEA), desenvolvida por Charnes, Cooper e Rhodes (1978), para mensurar e comparar a eficiência técnica, 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 auxiliar as empresas na tomada de decisão para o aumento da eficiência e, conseqüentemente, reduzir os custos. Desta forma, cada ferrovia analisada poderá se valer das informações desse artigo para auxiliar na sua tomada de decisão para melhorias futuras visando se tornar mais eficiente.

Para avaliar a aplicação da metodologia DEA ao transporte ferroviário de MFe e PLMFe, foram definidas como unidades observadas, também conhecidas como *Decision Making Units* (DMU), 12 ferrovias de empresas que são proprietárias da cadeia integrada (mina/usina, ferrovia e porto). As ferrovias selecionadas foram 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 sueca da LKAB, uma liberiana da Arcelor Mittal e uma mauritana da SNIM. Como variáveis de entrada, representando os insumos (*inputs*), foram adotadas as seguintes variáveis: 1) número de locomotivas em operação, 2) número de vagões em operação, 3) capacidade líquida por trem. E como variável de saída, representando os produtos (*output*) foi adotado o indicador Tonelada Quilômetro Útil (TKU), que representa a tonelada útil transportada pela distância percorrida.

Este artigo se difere dos demais artigos publicados sobre DEA e ferrovia, pois trata da análise de ferrovias de transporte de MFe e PLMFe que fazem parte do patrimônio de empresas mineradoras e pelletizadoras. Uma característica dessas ferrovias é que elas não cobram tarifa da sua empresa proprietária para transportar MFe e/ou PLMFe das minas/usinas até o porto, sendo tratadas como centros de custos por referidas empresas. Também trabalham com trens muito maiores e mais pesados.

Este artigo está dividido em 5 seções. Esta introdução contextualiza o estudo e na Seção 2 são apresentados o referencial teórico e a revisão bibliográfica, com os principais trabalhos relacionados a aplicação de DEA a ferrovia. Na Seção 3 apresenta-se a aplicação do modelo DEA, incluindo o levantamento de dados e na Seção 4, são apresentados os resultados, apontando os pontos de melhoria para cada empresa aumentar a eficiência. Por fim, na Seção 5 são apresentadas as conclusões.

2. METODOLOGIA DATA ENVELOPMENT ANALYSIS (DEA)

A metodologia *Data Envelopment Analysis* (DEA) foi inicialmente desenvolvida por Charnes *et al.* (1978), que utiliza 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. Neste artigo estamos considerando as ferrovias especializadas em transporte de MFe e PLMFe, que são propriedades das empresas mineradoras. O objetivo da aplicação da metodologia DEA é comparar as DMU escolhidas que realizam atividades semelhantes, pela otimização da razão da soma ponderada das variáveis de saída pela soma ponderada das variáveis de entrada. A partir disso, verifica-se quais DMU estão na fronteira de eficiência, estabelecendo um ranking entre elas, que varia entre zero e um. Existem dois modelos que representam a metodologia DEA: 1) Charnes, Cooper e Rhodes (CCR); 2) 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. Este método é caracterizado por retornos constantes em escala, conhecido também como *Constant Returns to Scale* (CRS). O objetivo do CCR é determinar os pesos ótimos de saída e de entrada. Se a eficiência calculada 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 é ineficiente. Uma característica do CCR diz respeito a escolha da orientação, seja ela entrada ou saída, 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 (entradas) ou aumentar a produção (saída) (Ferreira e Gomes, 2009).

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. Este modelo também é conhecido como *Variable Returns to Scale* (VRS). 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. Essa variável não deve atender à restrição de positividade, podendo assumir valores negativos. Quando positivo, indica que a DMU possui retorno decrescente de escala, e quando negativo, os retornos de escala são crescentes. Se o valor for nulo, significa que o retorno de escala é constante (Reis *et al.*, 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. Na Figura 1 podem ser observadas as fronteiras dos dois modelos. Pelo modelo CCR apenas a DMU A é eficiente, enquanto pelo modelo BCC tem-se três DMU eficientes: A, B e C.

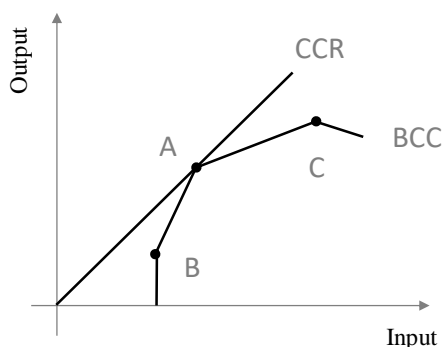


Figura 1: Fronteiras de eficiência CCR x BCC

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 *et al.*, 2009).

Após a definição das DMU, do modelo e da orientação, deve-se chegar a uma definição de quais características melhor descrevem o desempenho das ferrovias de carga, isto é, quais são as entradas (*inputs*) e saídas (*output*) mais importantes. Ferreira e Gomes (2009) destacam a importância dos especialistas para avaliação das variáveis relevantes para o uso da metodologia DEA, com consulta aos profissionais do setor. Em um primeiro levantamento nos estudos apresentados no referencial teórico e consultas aos especialistas ferroviários, foram identificadas as variáveis mais relevantes utilizadas na comparação da eficiência entre ferrovias (Figura 2).

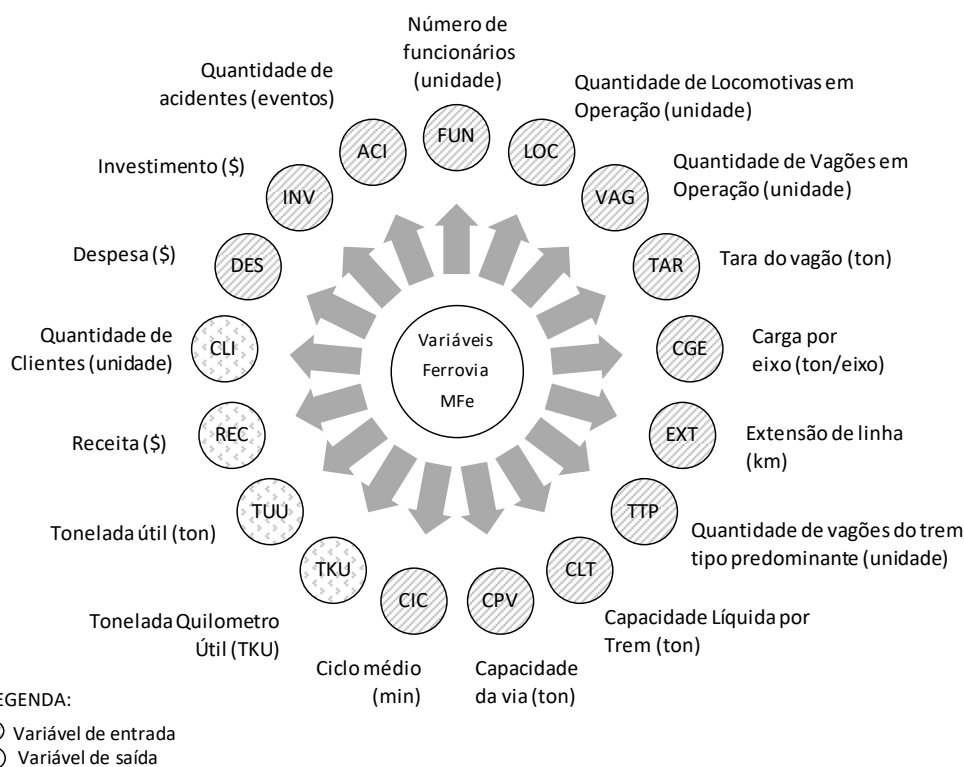


Figura 2: Variáveis utilizadas para comparação entre ferrovias

No Quadro 1 são apresentados os trabalhos publicados no período de 1994 a 2018, com a aplicação da metodologia DEA em transporte ferroviário de cargas, que foram encontrados por meio das 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.

Quadro 1: Revisão bibliográfica aplicação DEA em transporte ferroviário de carga

Autor	Input							Output			
	Extensão de linha	Qtd. Locos	Qtd. Vagões	Funcionários	Custos/Investiment	Acidentes	Capacidade por trem	TKU	TU	Receita	Clientes
Oum e Yu (1994)	•						•	•			
Jorge-Moreno e Cebrian. (1999)	•		•	•				•	•		
Paiva Junior (2000)	•	•	•	•				•	•		
Yu e Lin (2007)	•		•	•				•			
Movahevi <i>et al.</i> (2007)	•	•	•	•				•		•	
Paixão <i>et al.</i> (2008)		•	•	•				•			
Yu (2008)	•		•	•				•			
Hilmola (2010)	•	•	•	•				•	•	•	
Santos (2011)	•	•	•	•	•				•		
Caldas <i>et al.</i> (2012)	•			•					•		
Kutlar <i>et al.</i> (2012)	•	•	•	•	•			•	•	•	
Cantos <i>et al.</i> (2012)	•	•	•	•				•			
Pereira <i>et al.</i> (2015)	•			•	•					•	
Reis <i>et al.</i> (2017)					•	•		•			•
Este artigo ANPET		•	•				•	•			

Após esta revisão da literatura, não foi encontrada nenhuma publicação que tratasse somente de ferrovias proprietárias de empresas mineradoras/usinas de MFe e PLMFe e nenhum estudo que aplicasse as mesmas variáveis de entrada e saída. Este artigo definiu quatro variáveis, que indiretamente reúnem a maioria das variáveis, que serão melhor detalhados e explicados na Seção 3 a seguir.

3. APLICAÇÃO METODOLOGIA DEA

A aplicação da metodologia DEA segue seis etapas: 1) Definição das DMU; 2) Seleção das variáveis de entrada e saída; 3) Definição do modelo DEA; 4) Levantamento de dados; 5) Obtenção dos resultados e 6) Interpretação dos resultados. Neste artigo, foram escolhidas como DMU as ferrovias especializadas em transporte de MFe e PLMFe, que fazem parte do patrimônio das empresas (mineradoras e/ou usinas). Doze ferrovias foram escolhidas, sendo duas brasileiras, duas canadenses, cinco australianas, uma liberiana, uma sueca e uma mauritana, conforme apresentado no Quadro 2.

Quadro 2: Ferrovias definidas como DMU

DMU (Ferrovia)	Empresa	País	Carga
1 Estrada de Ferro Vitória Minas (EFVM) (http://www.vale.com/PT/investors/information-market/annual-reports/20f/20FDocs/Vale_20-F_FY2016_-_p.pdf)	Vale	Brasil	MFe + pelotas
2 Estrada de Ferro Carajás (EFC) (http://www.vale.com/PT/investors/information-market/annual-reports/20f/20FDocs/Vale_20-F_FY2016_-_p.pdf)	Vale	Brasil	MFe
3 Mount Newman Railway (NEWM) (https://www.bhp.com/investor-centre/financial-results-and-operational-reviews)	BHP	Austrália	MFe
4 Hamersley Railway (RTHA) (http://www.riotinto.com/)	Rio Tinto	Austrália	MFe
5 Robe River (RTRR) (http://www.riotinto.com/)	Rio Tinto	Austrália	MFe
6 Fortescue Railway (FMG) (http://www.fmgl.com.au/)	Fortescue	Austrália	MFe
7 Roy Hill Railway (RHILL) (https://www.royhill.com.au/overview/rail/)	Roy Hill	Austrália	MFe
8 QNS & L (QNSL) (http://www.ironore.ca/en/our-railway-activities_325/)	IOC	Canadá	Pelotas
9 Cartier (CART) (http://industry.arcelormittal.com/market-segments/steel-for-transport/rail)	Arcelor Mittal	Canadá	Pelotas
10 AM Libéria (AML) (http://liberia.arcelormittal.com/what-we-do/rail.aspx)	Arcelor Mittal	Libéria	MFe
11 Iron Ore Line (IOL) (https://www.lkab.com/en/about-lkab/from-mine-to-port/transport/rail-transport/)	LKAB	Suécia	MFe + pelotas
12 Mauritania Railway (MAUR) (http://www.snim.com/e/index.php/operations/train.html)	SNIM	Mauritânia	MFe

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.

A segunda etapa consiste na seleção das variáveis, sendo selecionadas como variáveis de *input*: Quantidade de Vagões em Operação (VAG), Quantidade de Locomotivas em Operação (LOC) e Capacidade Líquida por Trem (CLT). As variáveis Carga por Eixo (CGE), Tara do Vagão (TAR) e Trem Tipo de Maior Predominância (TTP) foram desconsideradas pela alta correlação com a variável Capacidade Líquida por Trem (CLT). Esta variável é obtida por meio de cálculo, com a multiplicação do valor da carga por eixo (CGE) por 4 (cada vagão possui quatro 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.

Como variável de saída, adotou-se a Tonelada Quilômetro Útil (TKU) ao invés de Tonelada Útil (TUU) porque este último indicador não reflete o real esforço da ferrovia em transportar a mesma carga por distâncias diferentes. O cálculo do TKU foi obtido pela multiplicação de 3 parcelas: a capacidade líquida por trem (CLT); o número de viagens dos trens obtido pela divisão da tonelagem útil (TUU) pela capacidade líquida por trem (CLT) e a distância média por viagem de cada trem. Como as empresas estrangeiras não divulgam esta última informação, foi adotada a extensão de linha (EXT) como a terceira parcela para esta multiplicação, pois foi considerado que na maioria das empresas os vagões retornam vazios. Sendo assim, a variável Extensão de Linha (EXT) também foi desconsiderada pela alta correlação com o *output* TKU.

Na terceira etapa da aplicação da metodologia DEA trata-se da definição do modelo DEA, sendo escolhido o BCC orientado a saída para avaliação da eficiência das ferrovias. A escolha foi realizada em função da variação da escala dos volumes de MFe e PLMFe movimentados, que variam de 2 a 235 milhões de toneladas por ano. A equalização das ferrovias é feita pela metodologia por meio de alocação de pesos e pelo fator de escala, evitando assim o viés resultante de pesos atribuídos subjetivamente (Merkert *et al.*, 2010).

A orientação a entrada não é viável pelo fato de minimizar a quantidade de locomotivas e vagões ou a capacidade do trem, o que 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 porque se o tempo de reposta da empresa for demorado, ela poderá perder espaço para o concorrente, além do valor baixo que conseguiria com a venda dos ativos. Por estes motivos, faz mais sentido trabalhar com a orientação a saída, ou seja, aumentar o transporte do MFe e PLMFe, fato este desejado pelas empresas.

A quarta etapa caracteriza-se pelo levantamento dos dados, que foram coletados referentes ao ano de 2016. As principais fontes para obtenção das informações foram os relatórios institucionais das empresas proprietárias das ferrovias escolhidas como DMU. Dentre estes relatórios, citam-se: relatórios de sustentabilidade, de investidores e de resultados, todos referentes ao ano de 2016 (Quadro 2). Nas pesquisas foram encontrados os valores das variáveis: quantidade de locomotivas em operação, quantidade de vagões em operação, carga por eixo, trem tipo de maior predominância, extensão de linha, tonelada útil e tara do vagão das ferrovias. Para encontrar a tara do vagão, foi necessário pesquisar qual é o tipo de vagão utilizado por cada empresa e o seu peso quando vazio. A grande dificuldade deste artigo foi a obtenção dos dados, desde a identificação de quais seriam as empresas no cenário mundial que

possuem ferrovias com perfil procurado até a disponibilização das informações procuradas. Os dados foram coletados durante oito meses, por meio de pesquisas e entrevistas. Não foi encontrado outro estudo que tivesse levantado os dados detalhados das ferrovias envolvidas.

Observa-se no Quadro 3 que existe grande dispersão dos dados, influenciados pela variação do porte das ferrovias, que movimentam volumes desde 2 milhões até 235 milhões de toneladas por ano. Como a amostra é pequena e seleta, foi decidido manter todas as DMU, tendo em vista que a metodologia DEA pode ser utilizada em variáveis com ampla dispersão e medidas diferentes.

Quadro 3: Dados das variáveis aplicadas no DEA

DMU	CLT			CLT	VAG	LOC	TKU		TKU
	CGE	TAR	TTP				EXT	TUJ	
EFVM	28	18	252	23.310	19.135	325	601	103	61.723
EFC	33	20	330	36.300	18.135	289	997	148	147.656
NEWM	38	20	268	34.840	4.000	178	426	222	94.382
RTRR	40	21	167	23.297	4.529	75	242	35	8.570
RTHA	40	21	236	32.922	6.971	116	328	235	77.161
FMG	42	20	250	37.000	4.600	53	620	173	107.260
RHILL	45	22	232	36.749	1.196	21	344	55	18.920
QNSL	36	20	265	32.860	1.000	20	418	18	7.608
CART	30	18	200	20.400	1.340	30	420	25	10.500
AML	30	18	70	7.140	195	4	243	2	510
IOL	33	21	68	7.398	1.100	17	390	27	10.491
MAUR	30	20	210	21.000	1.200	31	704	17	11.686
MÍNIMO	28	18	68	7.140	195	4	242	2	510
MÁXIMO	45	22	330	37.000	19.135	325	997	235	147.656
MÉDIA	35	20	212	26.101	5.283	97	478	88	46.372
MEDIANA	34	20	234	28.085	2.670	42	419	45	15.303
DESVIO PADRÃO	5	1	75	10.361	6.280	106	209	81	47.452
CURTÓSE	-1,19	-0,42	0,49	-0,57	1,60	0,61	1,72	-1,04	-0,40
ASSIMETRIA	0,32	-0,68	-0,90	-0,76	1,66	1,36	1,29	0,77	0,94

4. RESULTADOS

Para obtenção dos resultados previstos na quinta etapa da aplicação da metodologia DEA, foi utilizado o *software Frontier Analyst v.4.3.0*. Os resultados obtidos pelo modelo BCC *output* mostram que cinco ferrovias apresentam o índice de eficiência igual a 1, caracterizando-as como eficientes. Elas são: Estrada de Ferro Carajás (EFC), Mount Newman (NEWN), Fortescue (FMG), Arcelor Mittal Libéria (AML) e Iron Ore Line (IOL). As demais que possuem o índice de eficiência abaixo de 1 foram consideradas como ineficientes. A Figura 3 apresenta graficamente o índice de eficiência que cada empresa alcançou. Para as DMU que não atingiram a eficiência, o modelo BCC *output* determina alvos que estas devem perseguir por meio do aumento do TKU.

A Figura 4 apresenta as DMU que possuem folgas em uma ou mais variáveis de entrada que podem ser ajustadas para melhorar a eficiência e as DMU que precisam adequar sua produção (TKU) para atingir a fronteira de eficiência. A Figura 5 resume quais são as variáveis que demandam modificações, com o detalhamento do incremento da variável de saída e as folgas que as variáveis de entrada possuem e que podem ser eliminadas.

A partir dos dados das Figuras 3, 4 e 5, a seguir serão realizadas as análises sobre as DMU (ferrovias) estudadas. Com o resultado obtido foi possível identificar que cinco ferrovias são eficientes, sendo elas: Estrada de Ferro Carajás (EFC), Mount Newman (NEWN), Fortescue (FMG), Arcelor Mittal Libéria (AML) e Iron Ore Line (IOL). As ferrovias Robe River (RTRR), QNS&L, Cartier (CART) e Maurítânia (MAUR) precisam aumentar mais do 100% de seu TKU para se tornarem eficientes (o que é algo praticamente impossível de ser alcançado na prática do mercado). As ferrovias Estrada de Ferro Vitória Minas (EFVM), Hamersley (RRHA) e Roy

Hill (RHILL) precisam aumentar o TKU entre 30% e 45% (que são valores razoáveis de serem alcançados com o crescimento da demanda de MFe e PLMFe no mundo).

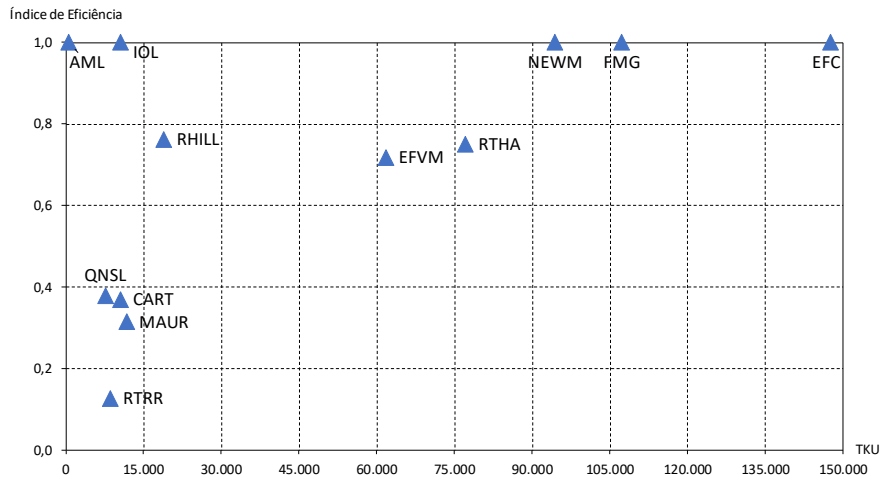


Figura 3: Resultados

DMU	BCC OUTPUT			
	Índice Eficiência BCC OUT	CLT observado (ton)	CLT alvo (ton)	Variação (%)
EFVM	0,718	23.310	-	-
EFC	1,000	36.300	-	-
NEWM	1,000	38.840	-	-
RTRR	0,127	23.297	-	-
RTHA	0,750	32.922	-	-
FMG	1,000	37.000	-	-
RHILL	0,762	36.749	14.010	-62%
QNSL	0,378	32.860	12.699	-61%
CART	0,369	20.400	15.094	-26%
AML	1,000	7.140	-	-
IOL	1,000	7.398	-	-
MAUR	0,314	21.000	17.510	-17%

DMU	BCC OUTPUT			
	Índice Eficiência BCC OUT	VAG observado (unidade)	VAG alvo (unidade)	Variação (%)
EFVM	0,718	19.135	10.479	-45%
EFC	1,000	18.135	-	-
NEWM	1,000	4.000	-	-
RTRR	0,127	4.529	-	-
RTHA	0,750	6.971	-	-
FMG	1,000	4.600	-	-
RHILL	0,762	1.196	-	-
QNSL	0,378	1.000	-	-
CART	0,369	1.340	-	-
AML	1,000	195	-	-
IOL	1,000	1.100	-	-
MAUR	0,314	1.703	-	-

DMU	BCC OUTPUT			
	Índice Eficiência BCC OUT	LOC observado (unidade)	LOC alvo (unidade)	Variação (%)
EFVM	0,718	325	167	-49%
EFC	1,000	289	-	-
NEWM	1,000	178	-	-
RTRR	0,127	75	64	-15%
RTHA	0,750	116	98	-16%
FMG	1,000	53	-	-
RHILL	0,762	21	-	-
QNSL	0,378	20	-	-
CART	0,369	30	-	-
AML	1,000	4	-	-
IOL	1,000	17	-	-
MAUR	0,314	31	-	-

DMU	BCC OUTPUT			
	Índice Eficiência BCC OUT	TKU*10 ⁶ observado (ton.km)	TKU*10 ⁶ alvo (ton.km)	Variação (%)
EFVM	0,718	61.723	86.007	39%
EFC	1,000	147.656	-	-
NEWM	1,000	94.382	-	-
RTRR	0,127	8.570	67.320	686%
RTHA	0,750	77.146	102.872	33%
FMG	1,000	107.260	-	-
RHILL	0,762	18.920	24.843	31%
QNSL	0,378	7.608	20.108	164%
CART	0,369	10.500	28.425	171%
AML	1,000	510	-	-
IOL	1,000	10.491	-	-
MAUR	0,314	11.686	37.184	218%

Figura 4 – Alvos das DMU

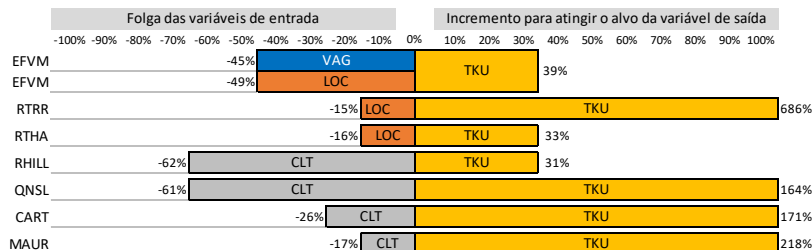


Figura 5 – Ajustes das variáveis

O modelo DEA aponta as DMU que apresentam folgas nas variáveis de entrada: CLT, VAG e LOC. A causa da ineficiência pode ser também a falta de volume MFe e PLMFe, podendo existir minas com a produção em *ramp up* e ferrovia já capacitada para a configuração final dessa produção, configurando temporariamente excesso de material rodante (VAG e LOC). Ou minas com exaustão de sua produção, tendo volumes decrescentes e material rodante em excesso. Outro fato importante é verificação da idade média dos ativos (VAG e LOC), pois frotas antigas demandam mais manutenção, o que reduz o indicador de Disponibilidade Física (DF), exigindo assim, aquisição de mais locomotivas e vagões para a compensação deste indicador. Todavia, a redução destes ativos 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 conseguiria com a venda dos ativos.

Para reduzir a capacidade líquida do trem (CLT), se faz necessário avaliar as parcelas que são envolvidas no cálculo desta variável, que são elas: carga por eixo (CGE), tara do vagão (TAR) e trem tipo de maior predominância (TTP). Tara do vagão não faz sentido mudar porque é uma consequência do peso do vagão. No entanto, existe um forte apelo para a redução deste valor pelos operadores ferroviários para diminuir a carga na linha férrea, podendo conseqüentemente aumentar a quantidade de MFe a ser transportado. Mas esta medida demanda investimentos do fornecedor dos ativos. A redução da carga por eixo 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. E reduzir a quantidade de vagões do trem tipo não aparenta ser uma boa opção, tendo em vista uma perda de escala no transporte em vias já capacitadas para o trem tipo existente. Logo, a redução da variável CLT não se mostra adequada para ferrovias.

A EFVM foi a única ferrovia que o modelo apontou ajustes em três das quatro variáveis trabalhadas. Das DMU analisadas, esta ferrovia é a única que possui bitola métrica, o que reduz sua capacidade de transporte quando comparada as demais ferrovias. Este fator também leva a uma restrição de capacidade da via, o que dificulta o aumento da carga por eixo ou a quantidade de vagões em sua composição de trem. Para que esta ferrovia se torne eficiente, o modelo BCC *output* sugere um aumento de 39% em seu TKU, passando de 61.723 milhões para 86.007 milhões. Além disso, é sugerida a eliminação de folgas nos *inputs*, reduzindo a quantidade de vagões de 19.135 para 10.479 e quantidade de locomotivas, de 325 para 167 unidades. No entanto, caso o mercado demande mais MFe e o aumento da frota seja necessário, o processo de aquisição de material rodante demanda tempo, pois além do tempo de fabricação, existe o período de comissionamento para que estes equipamentos estejam aptos para entrar em operação. Logo, esta redução precisa ser analisada com mais critério, fazendo mais sentido priorizar a produção para maximizar o uso dos ativos existentes.

A EFC é a única ferrovia entre as DMU estudadas que possui bitola de 1,60m. Ela é considerada pela metodologia DEA como eficiente, que não demanda nenhum ajuste. Este resultado era esperando, pois em três publicações da revisão bibliográfica (Paixão *et al.* (2008), Santos (2011), Pereira *et al.* (2015)) esta ferrovia também apresentou índice de eficiência igual a 1. A EFC possui alto valor de TKU, com a quantidade de locomotivas e vagões condizentes com a produção. A ferrovia Mount Newman é a única ferrovia australiana ativa da BHP após a paralização da mina Yarrrie em 2014, que era atendida pela ferrovia Goldsworthy. Ela possui bitola standard de 1,435m e atende quatro complexos mineradores, 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 *output* poderá mantê-la como uma ferrovia eficiente.

A Rio Tinto possui dois corredores logísticos, compreendidos pelas ferrovias Robe River e Hamersley. A Robe River apresentou o índice de eficiência mais baixo da amostra e requer maior intervenção. O resultado sugeriu um aumento bem expressivo da quantidade de TKU, passando de 8.570 milhões para 67.320 milhões, e uma redução na quantidade de locomotivas de 15%, saindo de 75 para 64 unidades. Já a ferrovia Hamersley, a intervenção é menor. O resultado sugeriu que o TKU seja maximizado de 77.146 milhões para 102.872 milhões, representando um acréscimo de 33%. E uma redução de 16% na quantidade de locomotivas, saindo de 116 para 98 unidades. 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 a exaustão de várias minas. No entanto, ela mantém uma quantidade de material rodante superior ao necessário porque ela possui projetos de expansão temporariamente suspensos, só aguardando uma retomada crescente da demanda por MFe para ativá-los. Uma avaliação mais criteriosa se faz necessária para verificar se essa reserva de material rodante não está superdimensionada em relação ao volume previsto nos novos projetos.

A Fortescue possui 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 Roy Hill é a mais recente ferrovia construída, que entrou em operação em 2015, com 45 toneladas por eixo, bitola standard e movimentação apenas de MFe. Seu índice de eficiência é 0,762 e demanda ajustes no TKU e CLT. Para a variável de saída é sugerida a maximização do TKU de 31%, indo de 18.920 milhões para 24.843 milhões. Para a Capacidade Líquida do trem, é apontada uma oportunidade de redução de 62%, passando de 36.749 para 14.010 toneladas. A ferrovia foi capacitada para uma produção de MFe futura (*in ramp up*), que ainda não foi atingida em sua plenitude em 2016. Logo, não faz sentido reduzir os *inputs* (locomotiva e vagões) pois a produção de MFe deverá atingir patamares que poderão levar a empresa à eficiência.

A ferrovia canadense QNS & L da IOC, de bitola standard, faz o transporte exclusivo de PLMFe e foi considerada como ineficiente devido ao índice de eficiência igual a 0,378. Os resultados apontam uma necessidade de aumento do TKU de 7.608 milhões para 20.108 milhões, o que representa um acréscimo de 164%. E uma possível redução do CLT em 61%, saindo de 32.860 para 12.699 toneladas. A unidade produtiva de PLMFe não está capacitada para este aumento tão expressivo, além disso é preciso avaliar se o mercado absorveria toda este incremento de produção. A opção operar trens menores não é adequado, pois perderia escala no transporte.

A ferrovia canadense Cartier da Arcelor Mittal transporta PLMFe na África, sendo as operações retomadas em 2015. É uma ferrovia de pequeno porte, com movimentação de apenas 2,1 milhões de toneladas ao ano de MFe. Sua frota é pequena e seu trem é composto por uma locomotiva e 70 vagões, o que dificulta torna-la como referência para as demais ferrovias. Pode-se dizer que a quantidade de locomotivas e vagões está coerente com a sua produção e a capacidade por trem está adequada para o volume movimentado, tornando-a eficiente. A ferrovia sueca Iron Ore Line (IOL) ou Malmbanan (sueco) possui bitola standard e movimentação de MFe e PLMFe para exportação. Ela também foi considerada como uma ferrovia eficiente,

alcançando o índice igual a 1. A ferrovia africana Maurítânia foi considerada como ineficiente, com índice igual a 0,314. Foi demandado um ajuste significativo na quantidade de TKU, indo de 11.686 milhões para 37.184 milhões, caracterizando um aumento de 218%. No cenário atual este aumento dificilmente seria alcançado porque as empresas de pequeno porte estão reduzindo sua produção de MFe e as empresas de médio/grande porte estão mantendo estável sua produção, ambas incentivadas pela incerteza do mercado e grandes oscilações do preço do MFe. A SNIM também apresentou um planejamento de longo prazo de estabilidade, inviabilizando um aumento tão expressivo. E o outro ajuste sugerido foi no valor do CLT, diminuindo de 21.000 para 17.510 toneladas. Esta medida poderia melhorar a eficiência técnica, mas é preciso avaliar na ótica financeira, calculando quanto seria o aumento dos custos com esta decisão de reduzir o volume a ser transportado por cada trem.

Após os resultados e as análises apresentadas anteriormente, pode-se ver que o método proposto baseado na metodologia DEA se apresenta como uma boa ferramenta de avaliação das ferrovias especializadas de MFe e PLMFe, com suas características distintas das outras ferrovias, e, desta forma, os gestores dessas ferrovias poderão se valer das informações apresentadas neste artigo para auxiliar na sua tomada de decisão para melhorias futuras visando tornar sua ferrovia mais eficiente ou se manter na fronteira de eficiência.

5. CONCLUSÕES

Este artigo propôs a aplicação da metodologia DEA BCC com orientação a saída para determinar a eficiência das ferrovias de transporte de MFe e PLMFe, que são propriedades das empresas mineradoras/pelotizadoras. Doze ferrovias foram consideradas como unidades observadas, consideradas como DMU. Como variáveis de entrada foram escolhidas a capacidade líquida por trem (CLT), a quantidade de vagões em operação (VAG) e a quantidade de locomotivas em operação (LOC). Como variável de saída, foi escolhida a tonelada quilômetro útil (TKU), que representa a tonelada útil transportada pela distância percorrida.

Com o resultado obtido foi possível identificar que cinco ferrovias são eficientes, sendo elas: Estrada de Ferro Carajás (EFC), Mount Newman (NEWN), Fortescue (FMG), Arcelor Mittal Libéria (AML) e Iron Ore Line (IOL). As ferrovias Robe River (RTRR), QNS&L, Cartier (CART) e Maurítânia (MAUR) precisam aumentar mais do 100% de seu TKU para se tornarem eficientes. As ferrovias Estrada de Ferro Vitória Minas (EFVM), Hamersley (RRHA) e Roy Hill (RHILL) precisam aumentar o TKU entre 30% e 45%. Várias análises sobre como aumentar a eficiência das ferrovias foram realizadas, desde análises a nível macro, até análises de cada uma das ferrovias estudadas.

A metodologia foi considerada como satisfatória pois determinou a eficiência de cada DMU e entende-se que o modelo BCC orientado a saída foi o mais adequado para ferrovia, pois apontou as possibilidades de aumento da produção (TKU). Por meio da revisão bibliográfica não foi encontrada, até o presente momento, nenhuma publicação que tratasse exclusivamente de ferrovias deste negócio e nem estudos que utilizassem as mesmas variáveis. Propõe-se como possível continuação da pesquisa a avaliação do segundo estágio da cadeia logística do MFe e PLMFe, que são os Portos. Recomenda-se utilizar TKU da ferrovia como variável de entrada na avaliação da eficiência dos portos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPES (75528452/2016) e CNPq (307439 / 2016-0) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres - 2016. Disponível em: <<http://www.antt.gov.br/>> Acesso em: 24 de fevereiro de 2018.
- Banker, R. D.; A. Charnes e W. W. Cooper (1984) Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis. *Management Science*, 30(9), p.1078-1092.
- Caldas, M. A. F.; P. D. Gabriele; R. L. Carvalhal e T. G. Ramos (2012) A eficiência do transporte ferroviário de cargas: uma análise do Brasil e dos Estados Unidos. In *Congreso Latino-Iberoamericano De Investigación Operativa-Simpósio Brasileiro De Pesquisa Operacional (Claio-Sbpo)*, v. 16, p. 1775-1786. Rio de Janeiro.
- Cantos, P.; J. M. Pastor e L. Serrano (2012) Evaluating European railway deregulation using different approaches. *Transport Policy*, v. 24, p. 67-72.
- Charnes, A.; W. W. Cooper e E. Rhodes (1978) Measuring the Efficiency of Decision Making Units. *European Journal of Operational Research*, 2(6), 429-444.
- Ferreira, C. M. C. e A. P. Gomes (2009) *Introdução à análise envoltória de dados: teoria, modelos e aplicações*. Editora UFV. Viçosa.
- Guide, Banxia Frontier Analyst User (2001) *Frontier analyst professional (Version 3.0)*. Glasgow, UK: Banxia Holdings Ltd.
- Hilmola, O-P. (2010) Building efficiency from bottom-up? Analysing global railway freight. *International Journal of Logistics Economics and Globalisation*, v. 2, n. 2, p. 139-150.
- Jorge-Moreno, J. e L. I. Garcia-Cebrian (1999) Measuring of production efficiency in the European railways. *European Business Review*, v. 99, n. 5, p. 332-344.
- Kutlar, A.; A. Kabasakal e M. Sarikaya (2013) Determination of the efficiency of the world railway companies by method of DEA and comparison of their efficiency by Tobit analysis. *Quality & Quantity*, v. 47, n. 6, p. 3575-3602.
- Merkert, R.; A. S. J. Smith e C. A. Nash (2010) Benchmarking of train operating firms – a transaction cost efficiency analysis. *Transportation Planning and Technology*, v. 33, n. 1, p. 35-53.
- Meza, L. A.; L. Biondi Neto; J. C. C. B. S. Mello e E. G. Gomes (2005). ISYDS-Integrated System for Decision Support (SIAD-Sistema Integrado de Apoio à Decisão): a software package for data envelopment analysis model. *Pesquisa Operacional*, v. 25, n. 3, p. 493-503.
- Movahedi, M. M.; S. Saati e A. R. Vahidi (2007) Iranian railway efficiency (1971-2004): An application of DEA. *J. Contemp. Math. Sciences*, v. 2, n. 32, p. 1569-1579.
- Oum, T. H. e C. Yu (1994) Economic efficiency of railways and implications for public policy: A comparative study of the OECD countries railways. *Journal of transport Economics and Policy*, p. 121-138.
- Paiva Junior, H. D. (2000) Avaliação de desempenho de ferrovias utilizando a abordagem integrada DEA/AHP. *Dissertação de mestrado*. Universidade Estadual de Campinas, SP.
- Paixão, R. B. e C. Y. Khoury (2008) Eficiência no Transporte Ferroviário de Cargas Brasileiro: um Estudo com a Análise Envoltória de Dados. *XXXII Encontro da ANPAD*.
- Pereira, M. A.; F. S. Da Rosa e R. J. Lunkes (2015) Análise da eficiência ferroviária no Brasil nos anos entre 2009 a 2013. *Revista Transportes*, v. 23, n. 3, p. 56-63.
- Reis, J. C.; K. T. Sacramento; J. C. C. B. S. D. Mello e L. A. Meza (2017) Avaliação de eficiência das ferrovias brasileiras: uma aplicação do método multicritério para seleção de variáveis em DEA e Representação Gráfica Bidimensional. *Revista Espacios*, v. 38, n. 14, p. 16.
- Santos, M. S. (2011) Avaliação da eficiência produtiva das ferrovias de carga no Brasil: uma aplicação da metodologia DEA. *Dissertação de Mestrado*, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 78 fl.
- STATISTA (2018) - Disponível em: <http://www.statista.com/>. Acesso em: 12 de janeiro de 2018.
- 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*, v. 42, n. 10, p. 1283-1294.
- Yu, M-M. e E. T. J. Lin (2008) Efficiency and effectiveness in railway performance using a multi-activity network DEA model. *Omega*, v. 36, n. 6, p. 1005-1017.

Renata Guimarães de Oliveira Fontan (regol.fontan@gmail.com)

Rodrigo de Alvarenga Rosa (rodrigo.a.rosa@ufes.br)

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo

Santo - Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras – Vitória, ES, Brasil