

# **AVALIAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA NA INTERMODALIDADE PARA O TRANSPORTE REGIONAL DE CARGA – O CASO DO CALCÁRIO SIDERÚRGICO**

**Cintia Machado de Oliveira<sup>1,3</sup>**  
**Marcio de Almeida D'Agosto<sup>1</sup>**  
**George Vasconcelos Goes<sup>1</sup>**  
**Lino Guimarães Marujo<sup>2</sup>**  
**Daniel Neves Schmitz Gonçalves<sup>1</sup>**  
**Mariane Gonzalez da Costa<sup>1</sup>**

Programa de Engenharia de Transportes (PET/Coppe)<sup>1</sup>

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Programa de Engenharia de Produção (PEP/Coppe)<sup>2</sup>

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca<sup>3</sup>

## **RESUMO**

Na última década, o conhecimento sobre a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) do transporte rodoviário tem crescido substancialmente, sob o conceito de transporte rodoviário verde. Assim, abre-se possibilidades para novos estudos sobre a efetividade da utilização desse modo para o transporte de carga, especialmente o regional. O objetivo deste trabalho é desenvolver um procedimento que possibilite a escolha de alternativas não usuais para o transporte de produto de baixo valor agregado que apresente desempenho superior à alternativa de transporte especializado, considerando os aspectos econômico e ambiental. A aplicação do procedimento para a situação escolhida de transporte de calcário mostra que a alternativa de transporte especializado (A1TE), embora atenda aos requisitos tradicionais do transporte de produtos de baixo valor agregado, por utilizar o transporte ferroviário por cerca de 90% do percurso, apresenta desempenho inferior a duas das alternativas não usuais de transporte (A2NUT e A3NUT).

## **ABSTRACT**

In the last decade, knowledge about reducing greenhouse gases (GHG) emissions and road transport has grown substantially, considering the concept of green road transport. Thus, possibilities for further studies on the effectiveness of using this mode for cargo transportation are encouraged. The objective of this work is to develop a procedure to assess non-usual alternatives for the transportation of low value-added products, instead of the specialized transport alternative, from the economic and environmental aspects. Results show that the specialized transport alternative (A1TE), while meeting the traditional requirements for the transport of low value-added products, since it uses rail transport for about 90% of the journey, performs less than two of the non-usual transport alternatives (A2NUT and A3NUT).

## **1. INTRODUÇÃO**

O consumo energético final do Brasil tem no setor de transportes aproximadamente 34% da sua representatividade (EPE, 2017). Dessa participação, estima-se que o modo rodoviário (passageiro e carga) consuma 93,69% da energia final, enquanto que o modo ferroviário consome 1,37% da energia utilizada pelo setor de transportes (Pereira Jr, 2018). Além disso, a intensidade energética do modo ferroviário de carga é aproximadamente de 123 kJ/t.km, enquanto que o modo rodoviário consome uma média próxima de 1.739 kJ/t.km (Gonçalves e D'Agosto, 2017). Apesar disso, no Brasil, a malha ferroviária é de somente 28.000 km (ANTF, 2014), destes, somente 9.800 km da malha são efetivamente utilizados (majoritariamente pelas companhias EFC, MRS e EFVM), enquanto que 7.800 km são subutilizados e 10.400 km da malha não são utilizados.

Apesar da eficiência no uso da energia pelo modo ferroviário, a matriz de transporte brasileira é concentrada no modo rodoviário, impactando o desempenho do transporte multimodal de carga. Convencionalmente, os serviços ferroviários e por embarcação (aquático) são oferecidos

no Brasil apenas na existência de um volume de carga suficiente e um negócio potencialmente lucrativo para o operador de transporte (ANTT, 2016). Convencionalmente, esse raciocínio tem sido aplicado no transporte de do setor primário (*commodities*) na existência de um ramal ferroviário que conecte os pontos de origem e destino. No entanto, em países emergentes, o conceito de sincromodalidade (Marcucci, 2014), que melhoraria a efetividade das operações intermodais, não tem sido aplicado, tanto pelo poder público como pela iniciativa privada.

No contexto do embarcador, a definição sobre a estratégia de suprimento mais atrativa nos aspectos econômico e ambiental (eficiência) depende, sobretudo, da infraestrutura de transporte disponível e da eficiência das plataformas intermodais. Esta situação exige que o embarcador disponha de um procedimento que permita a avaliação destas alternativas de forma a garantir custos e níveis de serviço semelhantes ao que se obteria por meio do transporte convencional para *commodities* (ferrovia), sem comprometer o desempenho de aspectos ambientais associados à: (i) intensidade energética; e (ii) emissão de poluentes atmosféricos e de gases de efeito estufa (GEE).

Na última década, o conhecimento sobre a redução das emissões de GEE do transporte rodoviário tem crescido substancialmente, sob o conceito de transporte rodoviário verde (*green road freight transportation*) (Demir *et al.*, 2014). Desta forma, tem-se repensado a forma de se transportar carga pelo modo rodoviário através do conceito de eficiência (Bektas *et al.*, 2018; Guajardo *et al.*, 2018). No setor primário, a decisão sobre qual modo utilizar nem sempre pode estar associada a um modo de maior capacidade, caso não existam plataformas intermodais eficientes ou implique em rotas substancialmente mais longas.

Este artigo busca avaliar alternativas para o transporte de produtos primários (de baixo valor agregado), oferecendo ganhos em eficiência por meio do desenvolvimento de um protocolo de avaliação. Para isso, conduziu-se uma revisão bibliográfica sobre os métodos, a estrutura e as variáveis empregadas para a avaliação de desempenho dos modos de transporte especializados e alternativas de transporte não usuais para o transporte de produtos de baixo valor agregado. Após isso, o protocolo desenvolvido é aplicado para avaliar as estratégias de suprimento de calcário siderúrgico na Região Sudeste do Brasil, ou seja, em um cenário de economia emergente.

## **2. REVISÃO DA LITERATURA**

O processo siderúrgico é considerado grande consumidor de energia de origem fóssil e consequentemente um grande emissor de poluentes atmosféricos locais e GEE (Weigel *et al.*, 2016). Uma das fontes consumidoras dessa energia é o transporte dos insumos, que utiliza predominantemente óleo diesel de petróleo (Wadud, 2016). Nessa linha, a avaliação de desempenho é um procedimento para a escolha da melhor combinação de modos para o transporte de carga como forma de reduzir o consumo energético (Wei *et al.*, 2007), Fontana *et al.* (2009) e Leal Jr. e D'Agosto (2011a) sinalizaram uma nova abordagem para a avaliação de desempenho de alternativas de transporte de carga, acrescentando a consideração dos aspectos ambientais e sociais a abordagem anterior que se limitava aos aspectos econômicos. Isso pode ser feito de forma integrada, como considera o conceito de eficiência (D'Agosto e Ribeiro, 2004) ou analítica, como no caso de comparação de medidas representativas de aspectos econômicos e ambientais (Leal Jr. e D'Agosto, 2011b).

Ravibabu (2013) descreve os seguintes atributos associados ao aspecto econômico: custo total do transporte, tempo total de trânsito, confiabilidade e perdas e danos (segurança) como os que mais influenciam a escolha da melhor combinação de alternativas para o transporte de cargas. No caso do transporte de carga por meio da utilização de contêiner, Ravibabu (2013) considera ainda, outros dois atributos, aptidão para containerização e urgência. Nealer *et al* (2012) indicam o custo operacional e o tempo como atributos importantes em análises de viabilidade econômica para o transporte. O consumo de energia, um atributo de relevância econômica, quando está associado ao maior custo variável do transporte e ambiental e quanto está associado ao consumo de combustíveis fósseis e emissão de poluentes atmosféricos e GEE, é considerado na totalidade dos trabalhos, sendo citado por Nealer *et al.*, (2012) na avaliação de potenciais políticas relativas a escolha de alternativas de transporte de cargas. Os atributos relacionados ao aspecto ambiental contribuem para estabelecer a imagem das alternativas de transporte sob a ótica da sustentabilidade ambiental, fator qualitativo de decisão mencionado por Vernimmen *et al.*, (2008).

Considerando os aspectos ambientais, a emissão de poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa (GEE) são atributos sugeridos por D'Agosto e Ribeiro (2004), Woxenius e Bergqvist, (2011) e Leal Jr. e D'Agosto (2011a, 2011b), o que ratifica a preocupação com os impactos ambientais locais, regionais e globais no contexto das mudanças climáticas. A emissão de enxofre, por estar associado à formação de material particulado e ser um poluente atmosférico de ação local e regional, é um atributo significativo na indução de mudanças na escolha de alternativas de transporte realizadas em áreas com concentração de população. Em estudos como o de Panagakos *et al.* (2014) e Holmgren *et al.* (2014) verificou-se o desempenho de alternativas de transporte frente ao estabelecimento de zonas de baixa emissão de enxofre nas regiões do mar Mediterrâneo, mar do Norte e mar Báltico.

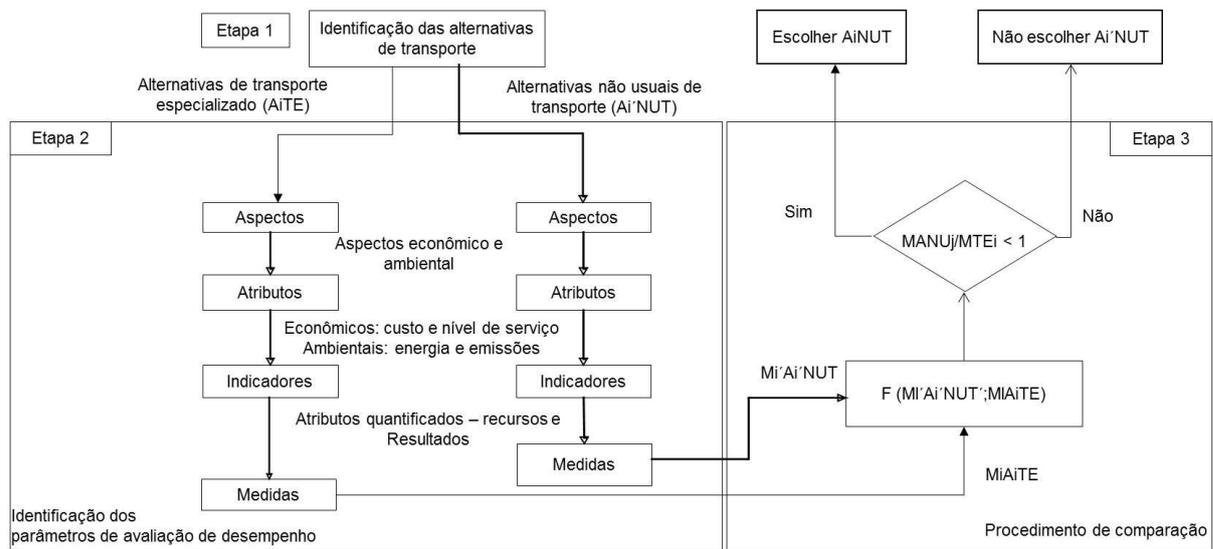
Em síntese, para o aspecto econômico, a revisão bibliográfica aponta para os atributos: (1) custo, (2) tempo, (3) confiabilidade e (4) segurança. No caso do aspecto ambiental, os atributos usualmente considerados são: (1) consumo de energia, (2) poluentes atmosféricos e (3) dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). A quantificação destes atributos se faz por meio da identificação de indicadores de desempenho.

### 3. MÉTODO

A Figura 1 sintetiza o procedimento proposto, baseado em uma abordagem integrada de ecoeficiência (D'Agosto e Ribeiro, 2004). A Etapa 1 do procedimento (Figura 1) considera a identificação das alternativas de transporte. Entende-se que seja possível identificar um conjunto de alternativas relacionadas ao transporte especializado ( $A_{iTE} - i: 1...n$ ) e outro conjunto de alternativas não usuais para o transporte de carga de baixo valor agregado ( $A_{iNUT} - i': 1...n'$ ). O transporte especializado está associado a modos de transporte ou combinação de modos de transporte de grande capacidade. Já as alternativas não usuais para o transporte de carga de baixo valor agregado consideram o uso de outros modos de transporte ou suas combinações que permitam a oferta de serviço nos preceitos da ecoeficiência.

Uma vez que  $A_{iTE}$  e  $A_{iNUT}$  tenham sido identificadas, passa-se a Etapa 2 do procedimento, que permitirá a identificação dos parâmetros de avaliação de desempenho de forma estruturada, considerando aspectos, atributos, indicadores e medidas, nesta ordem. A identificação das alternativas realizada na Etapa 1 do procedimento determinará os indicadores de desempenho capazes de quantificar os atributos de desempenho, compondo um conjunto de medidas de

desempenho específicas ( $M_{iA_{iTE}}$  – medida de desempenho  $l - l$ : 1..o - da alternativa de transporte especializado  $i$ ;  $M_{iA_{iNUT}}$  – medida de desempenho  $l' - l'$ : 1..o' - associada a alternativa não usual de transporte  $i'$ ) que relacionam recursos e resultados para cada alternativa de transporte. Admitindo que cada uma das alternativas de transporte, especializadas ( $A_{iTE}$ ) ou não usuais ( $A_{iNUT}$ ), sejam compostas por uma combinação de  $j$  ( $j$ : 1..p) modos de transporte, que atuam em segmentos de tráfego conectados por  $k$  ( $k$ : 1..p+1) terminais de transbordo.



Legenda:  $A_{iTE}$  – alternativa de transporte especializado  $i$ ;  $A_{iNUT}$  – alternativa não usual de transporte  $i'$ ;  $M_{iA_{iNUT}}$  – medida de desempenho  $l'$  associada a alternativa não usual de transporte  $i'$ ;  $M_{iA_{iTE}}$  – medida de desempenho  $l$  da alternativa de transporte especializado  $i$ .

**Figura 1:** Procedimento desenvolvido na pesquisa.

A Tabela 1 mostra as medidas de desempenho recomendadas no trabalho. As equações 1 a 5 representam os indicadores dos aspectos econômico e ambiental.

**Tabela 1:** Medidas de desempenho recomendadas <sup>(1)</sup>.

| Aspectos  | Atributos                               | Medidas   |                 |         |
|-----------|---|---|-----------------|---------|
|           |   | Denominação   | Sigla           | Unidade |
| Econômico | Custo                                   | Custo da alternativa $i$ ( $i'$ )                                       | $CA_{i(i')}$    | R\$/t   |
|           | NS - Tempo                              | Tempo médio de transporte da alternativa $i$ ( $i'$ )                   | $TA_{i(i')}$    | h       |
|           | NS - Confiabilidade                     | Confiabilidade média da alternativa $i$ ( $i'$ )                        | $VTA_{i(i')}$   | %       |
|           | NS - Segurança                          | Custo com perdas de carga na operação da alternativa $i$ ( $i'$ )       | $CPA_{i(i')}$   | R\$/t   |
| Ambiental | Consumo de energia                      | Consumo médio de energia da alternativa $i$ ( $i'$ )                    | $CE_{i(i')}$    | MJ/t    |
|           | Emissão de poluentes atmosféricos e GEE | Emissão média do poluente atmosférico $p$ pela alternativa $i$ ( $i'$ ) | $EP_{1, (i')p}$ | g/t     |
|           |   | Emissão média de $CO_2$ pela alternativa $i$ ( $i'$ )                   | $ECO_{2i (i')}$ | kg/t    |

Notas: (1) – as medidas de desempenho recomendadas são consistentes com o resultado da revisão bibliográfica.

Os indicadores de desempenho que compõem cada uma das medidas de desempenho têm referência nos trabalhos de D'Agosto e Ribeiro, (2004) e Leal Jr e D'Agosto (2011a). No aspecto econômico, o indicador geral é representado pela Equação 1.

$$CA_{i(i')} = \frac{\sum_{j=1}^m CT_j \cdot D_j}{VT_{i(i')}} + \sum_{k=1}^n CM_k + COC_{i(i')} \quad (1)$$

Em que: CA: Custo da alternativa i (i') [R\$/t]  
 CT<sub>j</sub>: Custo de Transporte pelo modo de transporte j [R\$/km]  
 D<sub>j</sub>: Distância percorrida pelo modo de transporte j [km]  
 VT<sub>i(i')</sub>: Quantidade de produto transportado pela alternativa i (i') [t]  
 CM<sub>k</sub>: Custo de manuseio no terminal k [R\$/t]  
 COC<sub>i</sub>: Custo de operação do equipamento na alternativa i (i') [R\$/t]

No tocante ao nível de serviço, os indicadores são o tempo médio de transporte de cada alternativa (em horas), a confiabilidade média (em percentual da variação do tempo e viagem) e o custo com perdas de produtos durante o transporte (R\$/t). O aspecto ambiental é descrito nas equações 2 a 5.

$$CF_{i(i')} = \frac{\sum_{j=1}^m FCCFT_j \cdot D_j}{VT_{i(i')}} + \sum_{k=1}^n FCCFN_k \quad (2)$$

Em que CF<sub>i(i')</sub> - Consumo médio de combustível fóssil pela alternativa i (i') [l/t]  
 FCCFT<sub>j</sub> - Fator de consumo de combustível fóssil pelo modo de transporte j [l/km]  
 D<sub>j(i')</sub> - Distância percorrida pelo modo de transporte j [km]  
 VT<sub>i(i')</sub> - Quantidade de produto transportado pela alternativa i (i') [t]  
 FCCFN<sub>k</sub> - Fator de consumo de combustível fóssil para movimentação no nó k [l/t]

$$CE_{i(i')} = CF_{i(i')} FCECF + \sum_{k=1}^n CECT_k \quad (3)$$

Em que CE<sub>i(i')</sub> - Consumo energético médio da alternativa i (i') [MJ/t]  
 FCECF - Fator de conteúdo energético do combustível fóssil [MJ/kg]  
 CECT<sub>k</sub> - Consumo energético médio de movimentação no terminal k [MJ/t]

$$EP_{i(i'),p} = \frac{\sum_{j=1}^m FET_{p,j} \cdot D_j}{VT_{i(i')}} + \sum_{k=1}^n FEM_{p,k} \quad (4)$$

Em que EP<sub>i(i'),p</sub> - Emissão do poluente atmosférico p pela alternativa i (i') [g/t]  
 FET<sub>p,j</sub> - Fator de emissão do poluente atmosférico p pelo modo de transporte j [g/km]  
 D<sub>j</sub> - Distância percorrida pelo modo de transporte j [km]  
 VT<sub>i(i')</sub> - Quantidade de produto transportado pela alternativa i (i') [t]  
 FEM<sub>p,k</sub> - Fator de emissão do poluente atmosférico p para movimentação no nó k [g/t]  
 p - Poluente atmosférico (p: CO, NMHC, NO<sub>x</sub>, MP)

$$ECO_{2i(i')} = CF_{i(i')} FCO_2 \quad (5)$$

Em que ECO<sub>2i(i')</sub> - Emissão média de CO<sub>2</sub> pela alternativa i (i') [kg/t]  
 FCO<sub>2</sub> - Fator de emissão de CO<sub>2</sub> para o combustível fóssil [kg/l]

Para todas as medidas (l e l') onde houver a necessidade de tratamento estatístico considera-se que estas seguem uma função densidade de probabilidade normal, sendo essa hipótese testada por meio do teste *Kolmogorov-Smirnov*. Para a normalização das medidas de desempenho, sugere-se a Equação 6, para o caso de “quanto menor melhor” e a Equação 7 para o caso de “quanto maior melhor”.

$$MN_{i(i')l(l')} = \frac{M_{i(i')l(l')}min}{M_{i(i')l(l')}} \quad (6)$$

Em que: MN<sub>i(i')l(l')</sub> - Resultado normalizado da medida l(l') para a alternativa i(i');  
 M<sub>i(i')l(l')}min - Menor valor da medida l(l') para a alternativa i(i');  
 M<sub>i(i')l(l')}</sub> - Valor da medida l(l) para a alternativa i(i').</sub>

$$MN_{i(i')l(l')} = \frac{M_{i(i')l(l')}}{M_{i(i')l(l')}max} \quad (7)$$

Em que: MN<sub>i(i')l(l')</sub> - Resultado normalizado da medida l(l') para a alternativa i(i');

$M_{i(i')l(l')\max}$  – Maior valor da medida  $l(l')$  para a alternativa  $i(i')$ ;  
 $M_{i(i')l(l')}$  – Valor da medida  $l(l')$  para a alternativa  $i(i')$ .

A partir dos resultados obtidos por meio das Equações 6 e 7, é possível estabelecer comparação isolada entre as medidas de desempenho normalizadas  $MN_{l'A_i'NUT}$ , associadas a alternativa não usual de transporte e as medidas de desempenho normalizadas  $MN_{l'A_{iTE}}$ , associadas a alternativa de transporte especializado, considerando esta última como referencial para avaliação (Equação 8).

$$\frac{MN_{l'A_i'NUT}}{MN_{l'A_{iTE}}} > 1; \text{ então, } MN_{l'A_i'NUT} \text{ melhor que } MN_{l'A_{iTE}} \quad (8)$$

Estabelecendo uma das  $A_{iTE}$  como referência para avaliação de cada uma das  $A_i'NUT$ , a comparação isolada entre as medidas de desempenho normalizadas  $MN_{l'A_i'NUT}$ , associadas a alternativa não usual de transporte e as medidas de desempenho normalizadas  $MN_{l'A_{iTE}}$ , associadas a alternativa de transporte especializado pode ser obtida por meio da Equação 9.

$$\sum_{l=1}^m MN_{l'A_i'NUT} / \sum_{l=1}^m MN_{l'A_{iTE}} > 1 \text{ então } A_i'NUT \text{ melhor que } A_{iTE} \quad (9)$$

Os resultados obtidos por meio da Equação 9 também permitem que se estabeleça uma hierarquia entre as alternativas não usuais de transporte e as alternativas de transporte especializado. Caso se deseje realizar um teste de sensibilidade, é possível introduzir pesos, variando de 0 a 1, para as medidas de desempenho, de forma a valorizar um dos aspectos.

#### 4. APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO

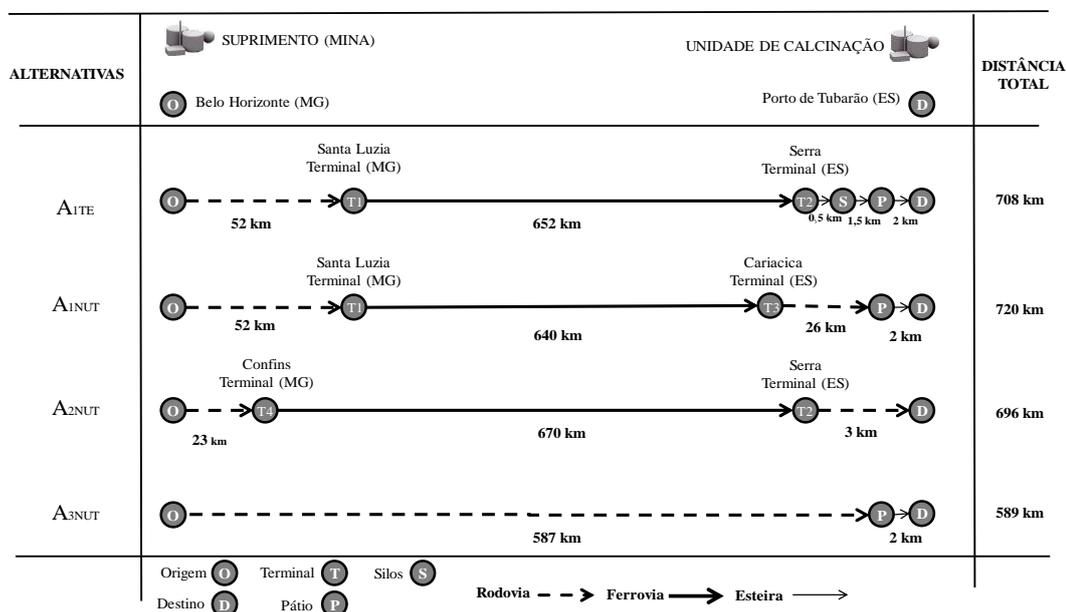
O método foi aplicado na siderúrgica ArcelorMittal Tubarão (AMT), importante empresa do setor primário. Para a produção de uma tonelada de aço são necessárias aproximadamente 2,7 toneladas de insumos, destacando-se o minério de ferro, o carvão e o calcário. O calcário, embora imprescindível para a fabricação do aço, representa uma fração de 0,04% na sua composição (IAB, 2011), situação que o coloca em posição desfavorável perante o minério de ferro e o carvão siderúrgico, na competição pela oferta de transporte especializado. Por outro lado, o calcário caracteriza-se por possuir baixo custo de aquisição, isso faz do transporte um dos itens mais onerosos e importantes como componente do custo final deste produto. Para o transporte do calcário, o modo rodoviário, que apresenta os maiores custos e impactos ambientais, é o mais utilizado, seguido pelo ferroviário e o aquático, que é utilizado de forma combinada, juntamente com outros modos de transportes terrestres (rodoviário e ferroviário) (Poso, 2007; CNT, 2011; Coelho Neto, 2006 e Castro, 2002).

O calcário é um material composto por inúmeras partículas de rocha, caracterizando-o como uma carga tipo granel que é transportado em lotes de grande volume e peso. Tomando como base a localização dos principais fornecedores de calcário na região metropolitana de Belo Horizonte, a alternativa ( $A_{iTE}$ ) de transporte especializado utiliza conjuntos compostos por caminhão trator 6x2 e semirreboque caçamba basculante de 3 eixos e 30 m<sup>3</sup> de capacidade com peso bruto total (PBT) de 23 t que fazem o transporte do calcário da mina (O) por 52 km de rodovia até o terminal ferroviário de Santa Luzia (T1) em Minas Gerais onde o produto é basculhado e vagões gôndola são carregados por pás carregadeiras. O calcário é transportado por 652 km de ferrovia (Estrada de Ferro Vitória Minas – EFVM) até o Terminal de Serra (T2) no Espírito Santo, onde viradores basculham o calcário nas esteiras transportadoras que alimentam silos ou direcionam o produto para pátios completando o percurso (4 km) até a unidade de calcinação (D).

Em função das limitações de oferta de transporte ferroviário especializado para o transporte de

calcário, optou-se por três alternativas não usuais para o transporte de calcário (Figura 2, Tabela 2). Na primeira alternativa, foi preciso substituir 12 km de transporte ferroviário por 26 km de transporte rodoviário (conjuntos compostos por caminhão trator 6x2 e semirreboque caçamba basculante de 3 eixos e 30 m<sup>3</sup> de capacidade com PBT de 23 t em segmento próximo ao terminal de destino, trocando o Terminal de Serra pelo Terminal de Cariacica (T3) e compondo uma alternativa de transporte do tipo rodo-ferro-rodo (A<sub>1NUT</sub>).

A segunda alternativa utiliza o transporte intermodal rodoferroviário na forma rodo-ferro-rodo (A<sub>2NUT</sub>) com utilização de contêineres e foi adotada com o objetivo de reduzir a degradação da carga transportada uma vez que todo o produto é movimentado dentro de um recipiente fechado. Em A<sub>2NUT</sub> o calcário é carregado em contêineres de 20 pés por meio de recuperadores. Os contêineres são carregados em conjuntos de PBT de 23 t formados por caminhão trator 6x2 e semirreboque plataforma que trafegam por 23 km de rodovia até o Terminal de Confins (T4) em Minas Gerais, onde empilhadeiras (*reach stackers*) transferem os contêineres para vagões plataforma. A composição ferroviária trafega por 670 km até o Terminal de Serra (T2) no Espírito Santo onde os contêineres são novamente transferidos para conjuntos de PBT de 23 t formados por caminhão trator 6x2 e semirreboque plataforma que trafegam por 3 km de rodovia até a unidade de calcinação (D), onde o produto é basculado. A terceira alternativa (A<sub>3NUT</sub>) utiliza integralmente o modo rodoviário (pela rodovia BR-262) por meio de conjuntos compostos por caminhão trator 6x2 e semirreboque caçamba basculante de 3 eixos e 30 m<sup>3</sup> de capacidade com PBT de 23 t, que ligam a mina (O) em Belo Horizonte ao pátio (P) do Porto de Tubarão no Espírito Santo e esteiras transportadoras para fazer a entrega final (2 km) para a unidade de calcinação.



**Figura 2:** Diagramas ilustrativos (sem escala) das alternativas de transporte de calcário.

**Tabela 2:** Características complementares das alternativas para transporte de calcário.

| Alternativas      | Divisão modal <sup>(1)</sup> |            |         | Total | Terminais de transbordo |                           |
|-------------------|------------------------------|------------|---------|-------|-------------------------|---------------------------|
|                   | Rodoviário                   | Ferrovário | Esteira |       | Número                  | Equipamento               |
| A <sub>1TE</sub>  | 7,3%                         | 92,1%      | 0,6%    | 100%  | 4                       | Pá carregadeira           |
| A <sub>1NUT</sub> | 10,8%                        | 88,9%      | 0,3%    | 100%  | 3                       | Pá carregadeira           |
| A <sub>2NUT</sub> | 3,7%                         | 96,3%      | 0,0%    | 100%  | 2                       | Empilhadeira de contêiner |

| Alternativas      | Divisão modal <sup>(1)</sup> |            |         |       | Terminais de transbordo |                 |
|-------------------|------------------------------|------------|---------|-------|-------------------------|-----------------|
|                   | Rodoviário                   | Ferrovário | Esteira | Total | Número                  | Equipamento     |
| A <sub>3NUT</sub> | 99,7%                        | 0,0%       | 0,3%    | 100%  | 1                       | Pá carregadeira |

Fonte: elaboração própria.

Nota: (1) em percentual da distância

Os valores de tempo de operação e de consumo de energia, na forma de combustível (óleo diesel) para as locomotivas e caminhões e energia elétrica para as correias transportadoras, foram obtidos pelo acompanhamento da operação em campo ao longo do ano de 2014. Os valores de custo foram obtidos por meio de consulta ao mercado. As perdas foram estimadas pela diferença entre a massa de produto embarcado na origem e recebido no destino final (unidade de calcinação), considerando a operação ao longo de todo o ano de 2014. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3:** Valores dos indicadores de desempenho coletados em campo.

|                   | Caminhão      |           |                                 | Locomotiva    |           |                                 | Custo [R\$/t] | Correia Transportadora |                                 | Pá Carregadeira |                                 | Empilhadeira de contêiner |                                 |
|-------------------|---------------|-----------|---------------------------------|---------------|-----------|---------------------------------|---------------|------------------------|---------------------------------|-----------------|---------------------------------|---------------------------|---------------------------------|
|                   | Custo [R\$/t] | Tempo (h) | Energia [ldiesel/ttransportada] | Custo [R\$/t] | Tempo (h) | Energia [ldiesel/ttransportada] |               | Tempo (h)              | Energia [ldiesel/ttransportada] | Tempo (h)       | Energia [ldiesel/ttransportada] | Tempo (h)                 | Energia [ldiesel/ttransportada] |
| A <sub>1TE</sub>  | 8,42          | 1,50      | 0,57                            | 47,66         | 109,48    | 2,78                            | 14,89         | 0,04                   | 0,32                            | 1,44            | 0,12                            | 0,00                      | 0,00                            |
| A <sub>1NUT</sub> | 13,43         | 1,50      | 0,68                            | 46,60         | 99,58     | 2,74                            | 16,28         | 0,02                   | 0,60                            | 2,09            | 0,12                            | 0,00                      | 0,00                            |
| A <sub>2NUT</sub> | 6,01          | 1,77      | 0,16                            | 39,33         | 66,81     | 2,51                            | 20,25         | 0,00                   | 0,00                            | 0,00            | 0,00                            | 1,08                      | 0,47                            |
| A <sub>3NUT</sub> | 65,83         | 19,81     | 6,39                            | 0,00          | 0,00      | 0,00                            | 2,24          | 0,02                   | 0,60                            | 0,69            | 0,28                            | 0,00                      | 0,00                            |

A Tabela 4 mostra os fatores de emissão para cada equipamento utilizado nas estratégias de transporte. Os fatores de conteúdo energético e de emissão de CO<sub>2</sub> considerados para o óleo diesel foram de 40,87 MJ/l e 2,671 kg/l, respectivamente (MMA, 2011).

**Tabela 4:** Fatores de emissão de poluentes atmosféricos e emissão de CO<sub>2</sub>

| Equipamento            | CO <sub>2</sub> | CO             | HCNM           | NO <sub>x</sub> | MP             |
|------------------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|
|                        | [kg/ldiesel]    | [gpoluente/km] | [gpoluente/km] | [gpoluente/km]  | [gpoluente/km] |
| Caminhão pesado        | 2,671           | 4,05           | 1,38           | 29,33           | 0,57           |
| Pá carregadeira        | 2,671           | 4,05           | 1,38           | 29,33           | 0,57           |
| Empilhadeira contêiner | 2,671           | 4,05           | 1,38           | 29,33           | 0,57           |
| Locomotiva manobra     | 2,671           | 26,00          | 6,80           | 74,00           | 3,40           |
| Locomotiva tração      | 2,671           | 28,00          | 7,00           | 104,00          | 8,40           |

Fonte: elaboração própria a partir de MMA (2011) e Lewis *et al.* (2009).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 5 apresenta os valores obtidos para as medidas de desempenho conforme estabelecido no item 3 por meio do conjunto de Equações de 1 a 8. A normalização dos valores apresentados na Tabela 5, leva aos resultados apresentados na Tabela 6.

**Tabela 5:** Valores das medidas e desempenho para cada uma das alternativas.

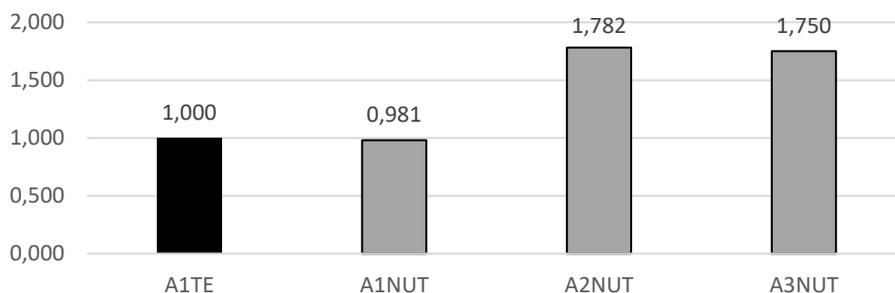
| Aspectos          | Econômico |        |      |         |        | Ambiental |                  |                                |                              |        |
|-------------------|-----------|--------|------|---------|--------|-----------|------------------|--------------------------------|------------------------------|--------|
|                   | Medidas   | CA     | TA   | VTA     | CPA    | CE        | EP <sub>CO</sub> | EP <sub>H<sub>2</sub>CNM</sub> | EP <sub>NO<sub>x</sub></sub> | EPMP   |
|                   | [R\$/t]   | [h]    |      | [R\$/t] | [MJ/t] | [g/t]     | [g/t]            | [g/t]                          | [g/t]                        | [kg/t] |
| A <sub>1TE</sub>  | 70,97     | 112,46 | 0,09 | 33,22   | 126,82 | 22,30     | 5,88             | 92,58                          | 5,70                         | 9,38   |
| A <sub>1NUT</sub> | 76,31     | 103,19 | 0,09 | 26,20   | 139,43 | 23,62     | 6,32             | 101,29                         | 5,83                         | 10,32  |
| A <sub>2NUT</sub> | 65,59     | 69,66  | 0,03 | 5,91    | 113,06 | 20,98     | 5,43             | 84,50                          | 5,60                         | 8,39   |
| A <sub>3NUT</sub> | 68,07     | 20,52  | 0,04 | 9,08    | 240,24 | 22,99     | 7,83             | 166,51                         | 3,24                         | 17,80  |

Legenda: CA - custo médio de transporte da alternativa; TA - tempo médio de transporte da alternativa; VTA - confiabilidade da alternativa; CPA - custo médio com perdas de carga na operação da alternativa; CE - consumo médio de energia da alternativa; EP - emissão média do poluente atmosférico pela alternativa; E<sub>CO<sub>2</sub></sub> - emissão média de CO<sub>2</sub> pela alternativa.

**Tabela 6:** Valores normalizados das medidas e desempenho para cada uma das alternativas.

| Aspectos          | Econômico |       |       |       |       | Ambiental |       |                      |                   |       |
|-------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-----------|-------|----------------------|-------------------|-------|
|                   | Medidas   | CA    | TA    | VTA   | CPA   | CE        | EPCO  | EPH <sub>2</sub> CNM | EPNO <sub>x</sub> | EPMP  |
| A <sub>1TE</sub>  | 0,924     | 0,111 | 0,333 | 0,178 | 0,891 | 0,941     | 0,923 | 0,913                | 0,568             | 0,894 |
| A <sub>1NUT</sub> | 0,860     | 0,121 | 0,312 | 0,226 | 0,811 | 0,888     | 0,859 | 0,834                | 0,556             | 0,813 |
| A <sub>2NUT</sub> | 1,000     | 0,180 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000     | 1,000 | 1,000                | 0,579             | 1,000 |
| A <sub>3NUT</sub> | 0,964     | 1,000 | 0,744 | 0,651 | 0,471 | 0,913     | 0,693 | 0,507                | 1,000             | 0,471 |

A Figura 3 apresenta os resultados da comparação das medidas de desempenho para cada uma das alternativas de forma agregada. A alternativa de transporte especializado A<sub>1TE</sub> (rodo-ferro) é considerada como referência adotando o valor de 1,00 e quanto maior o valor obtido para cada uma das medidas de desempenho avaliadas para as demais alternativas, melhor seu desempenho, sendo candidata a ser considerada em substituição ao transporte especializado.

**Figura 3:** Resultado da comparação das alternativas de forma agregada.

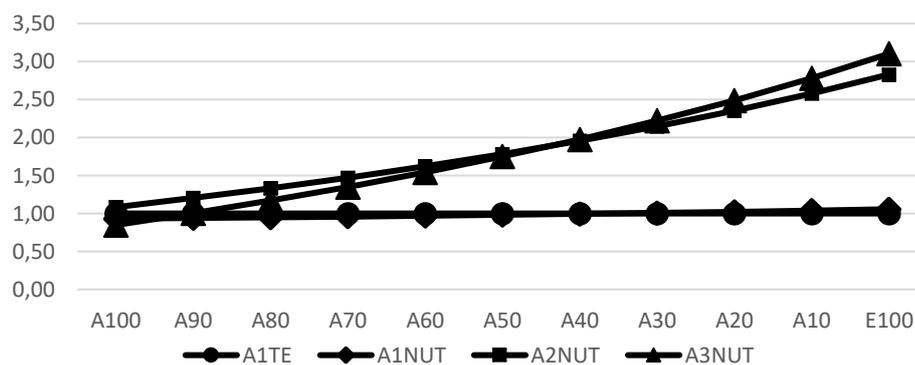
Observa-se que A<sub>1NUT</sub> apresenta resultados para as medidas de desempenho muito semelhantes aos obtidos para A<sub>1TE</sub>, com desempenho inferior em até 9%, com exceção dos resultados obtidos para o custo com perdas de carga na operação, onde apresentou desempenho superior em 27% e tempo médio de transporte, com desempenho superior em 9%. Este melhor resultado está associado ao fato desta alternativa realizar uma operação de transbordo a menos e metade da distância de transporte por esteira transportadora que A<sub>1TE</sub> conforme pode ser verificado na Tabela 2. Em função da introdução de 26 km adicionais (+3,5%) de transporte rodoviário, os resultados obtidos para as medidas de desempenho de custos, confiabilidade, consumo de energia e emissão de poluentes atmosféricos e GEE's apresentaram valores piores se comparados aqueles obtidas para A<sub>1TE</sub>. Dessa forma, A<sub>1NUT</sub> não atende ao principal requisito de ter desempenho igual ou superior a alternativa de transporte especializado para as medidas de desempenho associadas ao aspecto econômico (custo e nível de serviço).

A alternativa que considera a combinação intermodal rodo-ferro-rodo e utiliza contêineres

(A<sub>2NUT</sub>) apresenta desempenho superior para todas as medidas de desempenho, se comparada a A<sub>1TE</sub>. A utilização do maior segmento por ferrovia (670 km), do menor por rodovia (26 km), apresentar distância total de transporte 2% menor, a metade dos transbordos e o manuseio do produto ser realizado dentro de contêineres fechados, que minimizam as perdas por degradação do calcário, principal diferencial desta alternativa em relação às demais, leva a redução do custo em 8%, do consumo de energia, oda emissão de CO<sub>2</sub> em 12% e da emissão de poluentes atmosféricos entre 2% (MP) e 9,5% (NO<sub>x</sub>). Esta configuração privilegia em particular as três medidas de desempenho de nível de serviço (tempo médio de transporte, confiabilidade média e custo médio com perdas de carga na operação) que apresentam valores 60%, 200% e 460% superiores aos obtidos por A<sub>1TE</sub>, respectivamente.

O transporte de calcário pelo modo rodoviário (A<sub>3NUT</sub>) apresenta desempenho superior a A<sub>1TE</sub> para todas as medidas de desempenho relacionadas ao aspecto econômico, em particular para aquelas associadas o nível de serviço, como tempo médio de transporte 4,5 vezes melhor que o obtido para A<sub>1TE</sub>, reflexo de considerar uma distância 17% menor e realizar três transbordos a menos que A<sub>1TE</sub> (Tabela 2). Porém, o uso intensivo do transporte rodoviário, por distância 11,2 vezes maior que A<sub>1TE</sub>, penaliza as medidas de desempenho relacionadas ao aspecto ambiental, apresentando consumo de energia, emissão de CO<sub>2</sub> e de poluentes atmosféricos quase 89% maiores que as da alternativa de referência, com exceção para a emissão de material particulado (-80%), reflexo da predominância do uso no Brasil de tecnologia de propulsão mais moderna em caminhões que em locomotivas.

Quanto à análise de sensibilidade, a Figura 5 apresenta o resultado obtido quando se aplica uma escala de pesos (100% a 0%) que vai de A100, situação hipotética quando só se consideraria o aspecto ambiental (100% de peso no aspecto ambiental e 0% de peso no aspecto econômico – sendo equivalente a somente considerar na avaliação de desempenho as medidas associadas ao aspecto ambiental) na escolha das alternativas até E100 (0% de peso no aspecto ambiental e 100% de peso no aspecto econômico), situação usual, quando só se considera o aspecto econômico (custo e nível de serviço) para a escolha das alternativas.



**Figura 4:** Resultado da aplicação dos pesos para os aspetos ambiental e econômico.

Observa-se que A<sub>1NUT</sub> é muito pouco sensível a introdução progressiva dos aspectos ambientais em sua avaliação de desempenho, apresentando resultados muito próximos aos de A<sub>1TE</sub> para todas as situações consideradas (de A100 a E100), com variação relativa de -12%.

O comportamento observado para A<sub>1NUT</sub> não ocorre para A<sub>2NUT</sub> e A<sub>3NUT</sub>, que apresentam, respectivamente, variação relativa de -62% e -73% se comparados os resultados de E100 com

A100. Porém, o mais importante é que A<sub>2NUT</sub> é a única alternativa que mantém desempenho superior a A<sub>1TE</sub> (+8%) na situação A100. Embora A<sub>3NUT</sub> apresente desempenho 9% superior a A<sub>2NUT</sub> na situação E100, A<sub>3NUT</sub> é mais sensível à introdução do aspecto ambiental na sua avaliação, de forma A<sub>2NUT</sub> torna-se melhor que A<sub>3NUT</sub> a partir da situação A40 (40% de peso no aspecto ambiental e 60% de peso no aspecto econômico), chegando a ficar 21% melhor que A<sub>3NUT</sub> na situação A100.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados apresentados a partir da aplicação do procedimento proposto mostram ser possível escolher uma alternativa não usual para o transporte de produto de baixo valor agregado que apresente desempenho superior à alternativa de transporte especializado sob a ótica do aspecto econômico, considerando os indicadores de custo e nível de serviço, sem comprometer o desempenho do aspecto ambiental, situação imprescindível à garantia dos padrões atuais de responsabilidade ambiental das empresas.

O procedimento proposto depende da disponibilidade de dados a partir do monitoramento rotineiro das operações de transporte e da estimativa de fatores de emissão de poluentes atmosféricos e GEE que podem ser obtidos em inventários de emissões produzidos por instituições públicas. A aplicação do procedimento para a situação escolhida de transporte de calcário mostra que a alternativa de transporte especializado (A<sub>1TE</sub>), embora atenda aos requisitos tradicionais do transporte de produtos de baixo valor agregado, por utilizar o transporte ferroviário por cerca de 90% do percurso, apresenta desempenho inferior a duas das alternativas não usuais de transporte (A<sub>2NUT</sub> e A<sub>3NUT</sub>). Neste contexto, a manutenção dos critérios usuais de avaliação de desempenho de alternativas de transporte, considerando apenas o aspecto econômico, levaria a escolha de A<sub>3NUT</sub>, onde predomina o modo rodoviário (Figura 4 para a situação E100). A introdução do aspecto ambiental na avaliação de desempenho de alternativas de transporte, por meio do procedimento proposto, evidencia que a melhor escolha seria A<sub>2NUT</sub>, sendo a única que mantém desempenho superior a A<sub>1TE</sub> (+8%) na situação hipotética quando só se consideraria o aspecto ambiental e continua sendo a melhor alternativa quando se considera o aspecto ambiental em equidade com o aspecto econômico (A100 até A50 na Figura 4).

Embora a aplicação do procedimento tenha considerado quatro alternativas de transporte, isto não representa uma limitação e um número maior de alternativas pode ser considerado, dependendo apenas da disponibilidade de dados e do aprimoramento do processo de cálculo. Para facilitar a aplicação do procedimento, recomenda-se que um banco de dados com valores representativos da operação de cada uma das alternativas de transporte seja mantido atualizado. A consideração de outros aspectos ambientais, como a geração de ruídos e de resíduos líquidos e sólidos, bem como a introdução do aspecto social parece ser o aprimoramento natural a ser introduzido no procedimento de avaliação de desempenho de alternativas de transporte em trabalhos futuros.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida R.M. Análise empírica dos fatores determinantes e das estratégias de internacionalização da siderurgia brasileira. Dissertação de M.Sc., UFMG, Administração, Belo Horizonte, 2004.
- ANTT (2016). Corredores Logísticos Multimodais Desenvolvimento de Redes Transeuropeias de Transporte e Implantação do Conceito do Corredor no Brasil. São Paulo, 2016.
- Bektaş, T., Ehmke, J. F., Psaraftis, H. N., & Puchinger, J. (2018). The Role of Operational Research in Green Freight Transportation. *European Journal of Operational Research*.
- Carvalho, C.R.V., Conceição Neto, A.S., Almeida, H.M., Fialho, L.B., Silva, M.V. Otimização da logística de

- abastecimento em uma indústria siderúrgica: um estudo de caso. Em: XXIV Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Florianópolis, SC, Brasil, 2004.
- Castro, N. Estrutura, desempenho e perspectiva do transporte ferroviário de carga. Pesquisa e planejamento econômico, ppe, v.32, n.2, ago.2002.
- CNT, 2011. Confederação Nacional do Transporte. Informe econômico do setor de transportes, 2011. Disponível em:<<http://www.cnt.org.br/Imagens%20CNT/PDFs%20CNT/Informe%20Econ%20C3%B4mico/InformeEconomico07-2011.pdf>> Acesso em 03 de dezembro de 2011.
- Coelho Neto, G.; Ribeiro, P.C.C.. “Transporte em uma empresa da indústria siderúrgica brasileira”. In: XXVI ENEGEP, Fortaleza, CE, Brasil, 9-11 outubro, 2006.
- D’Agosto, M. de A e Ribeiro, S. K. (2004). Eco-efficiency management program (EEMP) – a model for road fleet operation. Transportation Research D, 9, 497-511.
- Demir, E., Bektaş, T., & Laporte, G. (2014). A review of recent research on green road freight transportation. European Journal of Operational Research, 237(3), 775-793.
- Fontana, A., Faria, P., Moreira, M. E. P. e Montenegro, N. G. S. D. “Escolha do modal com maior índice socioeconômico ambiental para o transporte de soja a granel entre Cuiabá-MT e Santarém-PA”. In: XXII ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Vitória, ES, Brasil, 2009.
- Gonçalves, D. N. S.; D’Agosto, M. A. Cenários prospectivos futuros para o uso de energia em transportes no Brasil e as emissões de GEE Cenário Business as Usual (BAU) - 2050. 2017.
- Guajardo, M. (2018). Environmental benefits of collaboration and allocation of emissions in road freight transportation. In Sustainable Freight Transport (pp. 79-98). Springer, Cham.
- Holmgren, J.; Nikopoulou, Z.; Ramstedt, L.; Woxenius, J. (2014) “Modelling modal choice effects of regulation on low-sulphur marine fuels in Northern Europe”.
- IAB, 2011. Anuário Estatístico 2011. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2011.
- Leal Junior, I.C.; D’Agosto, M.A. “Modal choice evaluation of transport alternatives for exporting bio-ethanol from Brazil”. Transportation research part D, v. 16, pp.201-207, 2011b.
- Leal Junior, I.C.; D’Agosto, M.A. “Modal choice for transportation of hazardous materials: the of land models of transport of bio-ethanol in Brazil”. Journal of Cleaner Production. V. 19, pp. 229-240, Jan-Fev. 2011a.
- Lewis, P.E.; Rasdorf, W.; Frey, H.; Pang, S.; Kim, K.. “Requirements and incentives for reducing construction vehicle emissions and comparison of nonroad diesel engine emissions data sources”. Journal of construction engineering and management. Vol. 5; pp. 341-351, 2009.
- Marcucci, Edoardo. Regulating Transport in Europe. 2014.
- MMA, 2011. 1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários, Ministério do Meio Ambiente, Brasília, DF.
- Nealer, R.; Matthews, H. S.; Mellon, C. H.C. (2012) “Assessing the energy and greenhouse gas emissions mitigation effectiveness of potential US modal freight policies”
- Panagakos, G.P.; Stamatopoulou, E. V.; Psaraftis, H. N. (2014) “The possible designation of the Mediterranean Sea as a SECA:A case study”.
- Pereira Jr, A.O. Matriz energética do estado do Rio de Janeiro: 2017-2031. Rio de Janeiro: Synergia, 2018.
- Poso, A.T.. O processo de reestruturação da siderurgia mundial e brasileira: o caso da Companhia Siderúrgica Nacional. Dissertação de M.Sc., USP, São Paulo, SP, Brasil, 2007.
- Ravibabu, M. (2013) “A nested logit model of mode choice for inland movement of export shipments: A case study of containerised export cargo from India”
- Vernimmen, B.; Dullaert, W.; Willemé, P.; Witlox, F. (2008) “Using the inventory-theoretic framework to determine cost-minimizing supply strategies in a stochastic setting”
- Wadud, Z. (2016) “Diesel demand in the road freight sector in the UK: Estimates for different vehicle types”
- Wei, Y.; Liao, H.; Fan, Y. (2007). “An empirical analysis of energy efficiency in China's iron and steel sector”. Energy. Vol. 32, Issue 12, Pag. 2262-2270, December 2007.
- Weigel, M.; Fishedick, M.; Marzinkowski, J.; Winzer, P. (2016) “Multicriteria analysis of primary steelmaking technologies”.
- Woxenius, J.; Bergqvist, R. (2011) “Comparing maritime containers and semi-trailers in the context of hinterland transport by rail”.