

## OTIMIZAÇÃO NO TRANSPORTE URBANO: UMA SIMULAÇÃO INTERMODAL COM ÊNFASE NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

**S. S. A. Bortolazzo, E. Cavallazzi, A. M. Valente**

Departamento de Engenharia Civil – CTC - ECV

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial – PPGTG  
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

**RESUMO:** De um modo geral, pode-se afirmar que os padrões de produção e consumo de energia vêm sendo baseados nas fontes fósseis, o que gera emissões de poluentes locais, gases de efeito estufa (GEEs) e põem em risco o suprimento energético de longo prazo no planeta. No âmbito do transporte urbano, as cidades brasileiras se desenvolveram com ênfase no modo rodoviário. Assim, é relevante estudar a eficiência energética no transporte, para implementar boas soluções, que atendam os deslocamentos dos usuários, e promovam o uso eficiente dos recursos naturais. O objetivo geral deste artigo é estimar, em uma rede de transportes teórica, a eficiência energética do deslocamento de uma determinada demanda de passageiros, utilizando diferentes modos de transporte, a fim de medir a eficiência energética da rede. Especificamente, pretende-se verificar e comparar o consumo de energia e as emissões de gás carbônico no transporte intermodal, pelos modos ferroviário – Veículo Leve sobre Trilhos (VLT) e rodoviário - ônibus. A metodologia foi desenvolvida com base em pesquisa documental e bibliográfica para levantamento de dados, e aplicada técnica de pesquisa operacional para avaliação da eficiência energética da rede simulada. A revisão abrange o estudo do transporte, sua indispensabilidade e influência no meio ambiente. São abordadas a eficiência energética na matriz de transporte e o uso de pesquisa operacional como ferramenta de apoio para modelos de otimização. Ao final, foi possível identificar que a integração modal, sistema alimentador – distribuidor – é uma solução eficiente quanto ao consumo de energia e emissões de GEEs. A metodologia, mostrou-se satisfatória e pertinente, podendo ser utilizada para redes maiores e cenários reais. Como continuidade deste estudo está sendo desenvolvida uma contribuição metodológica para planejamento sustentável de transporte urbano de passageiros (MPTS-URB), a qual pretende estimar o custo monetário da eficiência energética a partir de dados de emissão de poluentes e consumo de energia pelos modos de transporte utilizados na rede.

**PALAVRAS-CHAVE:** Otimização, Transporte Intermodal, Transporte Ferroviário, Eficiência Energética.

**ABSTRACT:** In general, it can be said that patterns of energy production and consumption have been based on fossil fuels, which generates emissions of local pollutants; greenhouse gases (GHGs) and jeopardize the energy supply long-term on the planet. With regard to urban transport, Brazilian cities have developed with emphasis on road transport. Thus, it is relevant to study energy efficiency in transport, to implement good solutions that meet the movements of users, and promote the efficient use of natural resources. The aim of this paper is to estimate, on a network of fictitious transport, energy efficiency displacement of a given passenger demand using different modes of transport in order to measure the energy efficiency of the network. Specifically, we intend to verify and compare the energy consumption and carbon dioxide emissions in intermodal transport by rail modes - Light Rail (LRT) and bus - bus. The methodology was developed based on documentary and bibliographical research for data collection, and applied operations research technique to assess the energy efficiency of the simulated network. The review includes the study of transport, their indispensability and influence on the environment. Energy efficiency in the transport matrix and the use of operations research as a support tool for optimization models are discussed. Finally, it observed that the modal integration, feeder system - distributor system - is an efficient solution as the energy consumption and GHG emissions. The methodology proved to be satisfactory and relevant and can be used for larger networks and real scenarios. As a continuation of this study is developing a methodological contribution to sustainable planning of urban passenger transport ( MPTS - URB ), which aims to estimate the monetary cost of energy efficiency from data of emissions and energy consumption by transport modes used in the transport network

**KEYWORDS:** Optimization, Intermodal Transportation, Rail Transportation, Energy Efficiency.

### 1. INTRODUÇÃO

O transporte é essencial a vida moderna. É ele que torna possível a maior parte das atividades sociais e econômicas. Entretanto, apesar de indispensável, o transporte também influi no meio ambiente, visto ser uma atividade que demanda interferências no meio físico natural,

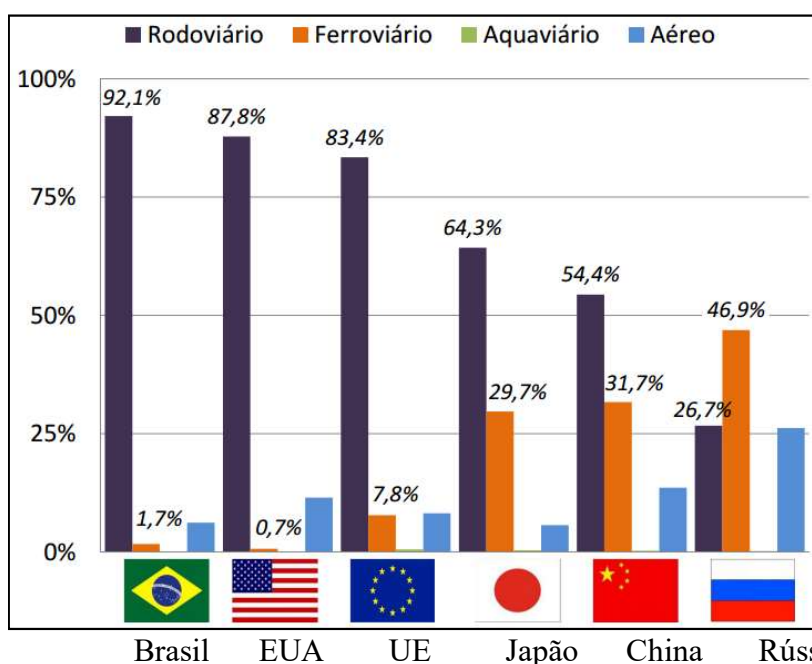
para a implantação de sua infraestrutura, e consumo de energia e combustíveis, para sua operação (D'AGOSTO, 2015).

Em 2012, o Brasil sediou a Conferência das Nações Unidas para o desenvolvimento sustentável (RIO +20), o encontro abordou assuntos sobre a conscientização da sociedade para a urgência de tratar de maneira responsável o meio ambiente, além disso, trouxe para o centro dos debates a Economia Verde<sup>1</sup>, forma mais concreta de economia para progredir na direção do Desenvolvimento Sustentável<sup>2</sup>.

O transporte de passageiro faz parte dos temas abordados na Economia Verde, no qual um dos princípios é a mudança para modelos ambientalmente mais eficientes de transporte – sistemas coletivos, trens urbanos, metrô e não motorizados. Segundo o relatório de Economia Verde do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) o investimento de apenas 0,16% do PIB global no transporte verde reduziria as emissões de gases de efeito estufa (GEE) em até 70% das emissões do setor de transporte até 2050, repercutindo também na redução em um terço a quantidade de veículos no modal rodoviário e o consumo de derivados de petróleo (UNEP,2011).

Nesse contexto, o transporte ferroviário pode ser um importante aliado tanto para a melhoria da mobilidade urbana quanto para o meio, principalmente porque atende uma alta capacidade de transporte emitindo menos gases GEE (EPE,2012). Segundo o Balanço do Setor Metroferroviário 2012/2013, houve um crescimento dos passageiros transportados sobre trilhos no Brasil, mas o crescimento da malha não acompanhou este aumento.

Para demonstrar essa questão, dados publicados pelo Ministério de Minas e Energia, referentes à distribuição modal do transporte de passageiros no Brasil, mostram que o modo por trilhos, entre trens urbanos e metrô, representa somente 1,7% do total de passageiros transportados no Brasil, conforme mostrado na Figura 1.



**Fig. 1 – Distribuição modal do transporte de passageiros. Um comparativo entre o Brasil e outros países (bilhões de passageiros/ km). Fonte: MME – EPE (2012).**

<sup>1</sup> Entende-se por Economia Verde uma economia que leva em consideração a finitude dos recursos naturais e os serviços prestado pela natureza no processo de tomada de decisão do comportamento dos agentes econômicos (IPEA, 2012).

<sup>2</sup> O desenvolvimento sustentável é um modelo que concilia o crescimento econômico, inclusão social e a proteção ambiental. (IPEA, 2012)

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. Eficiência Energética no Transporte

No que tange o transporte de passageiros, para Gonçalves et al. (2014) é sabido que as cidades brasileiras tiveram seu desenvolvimento urbano baseado no modo rodoviário. De um modo geral, pode-se afirmar que a qualidade de vida nessas cidades vem se deteriorando, provocando deseconomias em função dos congestionamentos, acidentes e impactos ambientais. Especialmente em regiões metropolitanas, tais problemas estão atualmente agravados, parte pela ausência de planejamento e coordenação intermodal dos gestores públicos, parte pela competição político-econômica entre os modos rodoviários e ferroviário nas soluções de transporte coletivo. Uma proposta de reestruturação do modelo atual deve incorporar conceitos que busquem articular os diferentes modos em um sistema único de transporte, visando a eficiência dos deslocamentos, a sustentabilidade das fontes de energia e recursos e a satisfação do usuário.

Para comprovar seu ponto de vista, Gonçalves et al. (2014) fez referência às boas práticas internacionais de desenvolvimento socioeconômico, tanto em regiões do mundo desenvolvido, como Estocolmo, quanto em regiões em acelerado desenvolvimento, como Singapura. No que se refere ao transporte urbano, essas cidades têm em comum a eficiência do sistema, que investe em técnicas de planejamento e coordenação intermodal, priorizando a conexão entre as regiões mais afastadas e subúrbios, a seus respectivos locais de trabalho, através de um sistema de transportes integrado, com prioridade do modal ferroviário.

Segundo o relatório do Balanço Energético Nacional - BEN (2012), o transporte rodoviário é responsável por 93% do consumo final de energia do setor de transportes, o que influencia, diretamente, na quantidade de dióxido de carbono - CO<sub>2</sub> emitido, e demonstra a ineficiência da matriz de transporte do Brasil, do ponto de vista ambiental. Assim, investir em outros modos de transporte, como o ferroviário, nos centros das grandes cidades e regiões metropolitanas traz, entre outros, ganhos na eficiência energética, visto que consome menos energia, ao mesmo tempo, em que produz menos poluentes e GEE na atmosfera.

As Tabelas 1 e 2 trazem respectivamente, dados referentes às emissões de poluentes locais<sup>3</sup> e de CO<sub>2</sub> por modo de transporte; e energia despendida por modo, por quilômetro, para uma pessoa realizar um deslocamento qualquer.

**Tabela 1 – Emissões de poluentes por modo de transporte em municípios com mais de 60.000 hab.**

Transporte	Emissões (milhões de toneladas/ano) em municípios com mais de 60.000 hab.		
	Poluentes locais*	CO <sub>2</sub>	Total
Coletivo	0,1	9,5	9,6
Individual Motorizado	1,5	16,3	17,8
Total	1,6	25,8	27,4

Fonte: adaptado pelo autor de Revista BNDES 60 anos – Perspectivas Setoriais (2015).

Segundo dados do IPEA (2012), o transporte motorizado, com base na queima de combustíveis fósseis, é responsável pela emissão de vários poluentes nocivos à saúde e que degradam o ambiente urbano, os chamados poluentes locais: monóxido de carbono (CO), os hidrocarbonetos (HC), os materiais particulados, os óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e os óxidos

<sup>3</sup> Os poluentes locais afetam especificamente as áreas de abrangência da operação do transporte. São os gases CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, HC, MP. (DE CARVALHO, C. H. R., 2011).

de enxofre (SOx). Na Tabela 3 são descritos alguns efeitos nocivos à saúde da alta concentração destes poluentes na saúde.

**Tabela 2 – Energia desprendida por pessoa por modo (kep/km).**

Modo de Transporte	Energia necessária por pessoa, por modo em kep (kg equivalente de petróleo)		
	1 km	10 km	100 km
VLT (trilhos)	0,010	0,10	1,0
Metrô (trilhos)	0,021	0,21	2,1
Ônibus	0,026	0,26	2,6
Individual Motorizado	0,055	0,55	5,5

Fonte: adaptado pelo autor de Revista BNDES 60 anos – Perspectivas Setoriais (2015).

**Tabela 3 – Efeitos nocivos dos principais poluentes veiculares locais.**

Poluente	Impacto
CO	Atua no sangue reduzindo sua oxigenação, podendo causar morte após determinado período de exposição.
NOx	Formação de dióxido de nitrogênio e na formação do <i>smog</i> fotoquímico <sup>4</sup> e chuva ácida. É um precursor do ozônio.
HC	Combustíveis não queimados ou parcialmente queimados, formam o <i>smog</i> e compostos cancerígenos. É um precursor do ozônio.
MP	Pode penetrar nas defesas do organismo, atingir os alvéolos pulmonares e causar irritações, asma, bronquite e câncer de pulmão. Sujeira e degradação de imóveis próximos aos corredores de transporte.
SOx	Precursor do ozônio, formando a chuva ácida e degradando vegetação e imóveis, além de provocar uma série de problemas de saúde.

Fonte: adaptado pelo autor de (DE CARVALHO, C. H. R., 2011)

Nesse contexto, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), através de uma pesquisa realizada na capital paulista em 2007, concluiu que a concentração de gás Ozônio<sup>5</sup> na atmosfera é mais excessiva nos grandes centros urbanos, sendo esses os mais atingidos, no âmbito da poluição atmosférica. Esse gás é formado a partir de outros gases que são emitidos principalmente pelos veículos, os quais reagem quando na presença de luz solar e calor. Apesar disso, em cidades pouco industrializadas, o setor de transportes acaba por contribuir com quase a totalidade das emissões dos poluentes atmosféricos, o que corrobora com a necessidade de políticas que promovam a redução da emissão veicular.

Na opinião de Santos, R.T. et al., 2015, o transporte coletivo deve ser pensado como projeto estruturador do desenvolvimento urbano, fruto de estudos consistentes, consubstanciados em um planejamento de longo prazo, discutido com a sociedade, e avalizado pelas instâncias técnicas competentes. Para Marcio de Almeida D'Agosto (2015), não existe substituto para a energia, pode-se até substituir uma fonte por outra, mas a atividade de transporte sem o consumo de alguma forma de energia parece não ser possível. Assim, pensamentos como esses vêm persuadir para o desenvolvimento de metodologias que otimizem o transporte. A exemplo das cidades, as redes intermodais podem promover a substituição modal, atraindo,

<sup>4</sup> Fenômeno fotoquímico caracterizado pela formação de uma espécie de neblina composta por poluição, vapor de água e outros compostos químicos. (DE CARVALHO, C. H. R., 2011).

<sup>5</sup> A concentração de ozônio na camada estratosférica é benéfica à humanidade, pois protege a incidência de raios ultravioleta prejudiciais à saúde. Ao contrário disso, a alta concentração de ozônio em altitudes mais baixas causa problemas respiratórios nos seres humanos (CETESP, 2007).

ao menos em parte, os usuários de automóveis para o transporte coletivo, o que promove a equalização da matriz de transporte, e conseqüentemente o uso eficiente dos recursos.

## 2.2. Pesquisa Operacional como Instrumento para Modelos de Otimização

A Pesquisa Operacional, ou simplesmente PO (*Operational Research* – Inglaterra; *Operations Research* – Estados Unidos; Investigação Operacional – Portugal) surgiu durante a Segunda Guerra Mundial (1939-1945) para a solução de problemas de natureza logística, tática e de estratégia militar. O avanço da PO, ao longo dos anos, se fez com o aumento da velocidade de processamento e memória dos computadores, possibilitando a solução de problemas cada vez mais complexos (FÁVERO & BELFIORE, 2013).

Em termos gerais, pode-se dizer que, PO consiste na utilização de um método científico – modelos matemáticos, estatísticos e algoritmos computacionais – que auxiliam no processo de tomada de decisão (ARENALES et. al., 2007)

Desde então, o uso de pesquisa operacional como apoio a tomada de decisão é largamente utilizado no âmbito do transporte. Neste artigo, a Pesquisa Operacional vem subsidiar o cálculo de eficiência energética em diferentes rotas (caminhos, trechos) de uma rede de transportes, a fim de contribuir para a tomada de decisão de qual caminho é mais eficiente. As referidas espécies do gênero Pesquisa Operacional, como os modelos, por exemplo, podem representar uma situação real que se pretende avaliar ou mesmo uma situação teórica, no sentido de se verificar uma alternativa planejada para o futuro.

Segundo Lisboa (2009), um modelo é a representação simplificada de um sistema real, podendo ser um projeto já existente ou um projeto futuro. No primeiro caso, pretende-se reproduzir o funcionamento do sistema real existente, de forma a aumentar a produtividade, enquanto no segundo o objetivo é definir a estrutura ideal do futuro sistema.

Lachtermacher (2009) conceitua modelo como um processo para tomada de decisões, o qual proporciona ao decisor a clareza, de definir seus objetivos. Além disso, esse autor explica que, a correta identificação e armazenamento das diferentes decisões que influenciam os objetivos, propicia a definição das principais variáveis envolvidas no processo de tomada de decisão e as próprias limitações do sistema.

Um modelo é composto por três elementos principais: as variáveis de decisão e parâmetros, a função objetivo e as restrições do modelo. O modelo aqui utilizado, foi o modelo de Programação em Redes, através do Problema de Transporte com Transbordo. Conceitualmente esse modelo é classificado na Pesquisa Operacional como Modelo Determinístico, no qual as variáveis envolvidas em sua formulação são constantes e conhecidas, resultante, assim, de uma única solução exata, podendo essa ser ótima ou não (FÁVERO & BELFIORE, 2013).

Os problemas de Programação em Redes são modelados por meio de uma estrutura chamada de grafos ou redes, que consiste em diversos nós, em que cada nó deve estar conectado a um ou mais arcos (ARENALES et. al., 2007). Esse conceito no âmbito do transporte de passageiros ou de cargas pode ser analogamente entendido como o conjunto de centralidades ou facilidades (*facilities*), os nós, conectados por corredores de transporte (caminhos, rotas) ou (*corridors*), os arcos, que representam uma rede de transportes, o grafo ou rede.

Nesse contexto, o Problema de Transporte com Transbordo é um tipo de modelagem de programação em rede, onde se considera, para uma determinada demanda (produtos ou passageiros), nós de origem, nós intermediários de transbordo (*facilities*) e nós de destino, conectados por corredores de transporte (*corridors*), cujo objetivo é transportar àquela demanda a um custo logístico<sup>6</sup> mínimo. Esses modelos podem ser resolvidos por programação linear, como o problema aqui proposto.

---

<sup>6</sup> Custo logístico será aqui entendido como o menor custo, ou custo ótimo, ou custo de maior eficiência para se transportar uma demanda específica de uma origem a um destino, passando por pontos de transbordo.

### 3. METODOLOGIA

A metodologia está baseada em referência bibliográfica e pesquisa operacional. As referências alimentaram os dados necessários para a elaboração do modelo, como dados de consumo de energia e de emissões de CO<sub>2</sub>, por modo de transporte e por quilômetro. Ainda, trouxeram modelos de cálculo de eficiência energética já estudados para diferentes veículos. A Pesquisa Operacional subsidiou a construção do modelo, através da elaboração da rede de transporte, por meio de um Problema de Transporte com Transbordo.

Para a elaboração da rede, foram considerados arcos como sendo os corredores de deslocamento e nós como sendo os pontos de origem, integração modal (transbordo), e destino. O traçado da rede é teórico, pois dessa forma foi possível construir rotas alternativas considerando os diferentes modos, visto que o objetivo é estimar a eficiência energética nessa rede.

#### 3.1. Definição do Problema

O objetivo a ser aqui alcançado é estimar a eficiência energética para o deslocamento – origem e destino – de uma determinada demanda. O problema está inserido na questão: eficiência do transporte de passageiros de regiões metropolitanas às áreas centrais. Para isso, foi criado um modelo de rede de transporte que considera diferentes modos como ônibus, VLT e automóvel, para transporte da demanda.

O caminho proposto para a solução desse modelo foi:

- 1) *Criar o modelo de rede de transporte integrado através do problema de transporte com transbordo;*
- 2) *Atribuir para cada nó, a demanda a ser atendida (passageiros) e a distância de percurso (km);*
- 3) *Calcular para cada arco, o consumo de energia (kj/pass.km) e as emissões de CO<sub>2</sub> (gCO<sub>2</sub>/pass.km)*
- 4) *Calcular o número de veículos para atender a demanda de acordo com a capacidade de transporte para cada modo.*

Os limitadores do modelo foram a falta de dados reais para uma rede de transporte intermodal integrado para cidades brasileiras, e conseqüentemente a localização dos pontos de transbordo. Assim, foi considerada uma rede teórica. Foram escolhidos como destino, o centro de uma cidade qualquer, como origem três localidades da região metropolitana dessa cidade e, como transbordo pontos hipotéticos. Foram também atribuídos valores teóricos de demanda de passageiros aos nós de origem e transbordo.

Para não induzir os resultados, os pontos de transbordo foram dispostos no mesmo local, não gerando distâncias diferentes entre as conexões, visto que, o objetivo aqui, é verificar as eficiências energéticas de cada percurso, chegando-se na mais eficiente.

#### 3.2. Levantamento dos Dados

Nessa etapa de construção do modelo, foram levantados dados reais (Tabela 4), no que cabe ao consumo de energia, emissão de CO<sub>2</sub> e capacidade de transporte; e dados teóricos (Tabela 5) no que cabe a demanda e aos locais de transbordo.

A Figura 2 apresenta a rede teórica de transporte intermodal criada para a aplicação neste estudo.

De acordo com D'Agosto (2015), existem vários conceitos para a eficiência energética. Será considerado nesse artigo o definido pelo IEA (2012), como sendo o nível de energia consumida para realizar determinado serviço. Assim, para ser mais eficiente, pode-se usar menos energia para o mesmo serviço e, ou ainda, realizar mais serviço mantendo o mesmo padrão de utilização de energia. Analogamente ao setor de transportes, esse conceito pode

ser entendido como: aumentar a quantidade transportada (carga ou passageiro) e, ou a distância de transporte, sem aumentar a energia. Ou ainda, mantendo-se o mesmo trabalho de transporte, reduzir a energia consumida para realiza-lo (GUIMARÃES, V. de A.; D'AGOSTO, M. et al., 2014).

**Tabela 4 – Dados reais**

Modo de Transporte	Emissões CO <sub>2</sub> (gCO <sub>2</sub> /pass.km) <sup>7</sup>	Energia média consumida <sup>8</sup> (kj/pass.km)	Capacidade de Transporte <sup>9</sup> (pass/veículo)
Ônibus Convencional com MCI* traseiro a diesel	16	266	80
Automóvel compacto com MCI gasolina	127	2.766	1,3
VLT	2	183	225

\* MCI = motor de combustão.

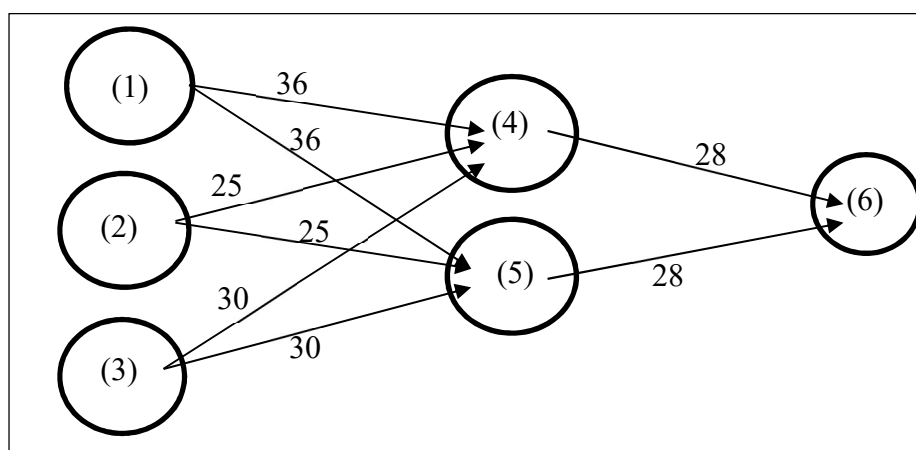
Fonte: adaptado pelo autor através de dados obtidos em DE ANDRADE, C. E. S. (2014); BITTENCOUT, I. A. (2014); Revista BNDES 60 anos – Perspectivas Setoriais (2015); D'AGOSTO (2015).

**Tabela 5 – Dados teóricos**

Pontos de Origem	Demanda (pass)	Distancia (km)	Ponto Transbordo (VLT)	Ponto Transbordo (Ônibus)	Distancia (km)	Ponto de Destino
(1)	180	36	(4)	(5)	28	(6)
(2)	250	25	(4)	(5)	28	(6)
(3)	200	30	(4)	(5)	28	(6)

Fonte: elaborado pelo autor

**Fig. 2 – Rede Teórica de Transporte Intermodal Integrado**



Fonte: elaborado pelo autor

<sup>7</sup> DE ANDRADE, C. E. S. (2014); BITTENCOUT, I. A. (2014)

<sup>8</sup> Energia necessária por pessoa, por modo em kj. Adaptado de Revista BNDES 60 anos – Perspectivas Setoriais (2015).

<sup>9</sup> D'AGOSTO (2015)

### 3.3. Cálculo da Eficiência Energética

Esta pesquisa considera para o cálculo da eficiência energética (E) o consumo de CO<sub>2</sub> desprendido para realizar determinado trabalho em uma determinada distancia ( $c_{ij}$  em kj/pass. km) e a quantidade em gCO<sub>2</sub> de emissões que esse trabalho gera para a atmosfera ( $e_{ij}$  em gCO<sub>2</sub>/ pass. km). Assim tem-se:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n E_{ij} = c_{ij} + e_{ij} \quad (1)$$

Pela dificuldade aqui encontrada em equivaler entre as respectivas unidades de  $c_{ij}$  e  $e_{ij}$ , foi atribuída para  $E_{ij}$  o termo u.e. (unidades de energia).

### 3.4. Variáveis de Decisão:

As variáveis de decisão foram definidas a partir da quantidade de passageiros transportados para cada itinerário. Assim tem-se:

$x_{ij,k}$  = quantidade de passageiros transportados da origem  $i$  até o ponto de transbordo  $k$ .  $i = 1, 2, 3$  e  $k = 4, 5$ .

$x_{kj}$  = quantidade de passageiros transportados do ponto de transbordo  $k$  até o destino  $j$ .  $k = 4, 5$  e  $j = 6$ .

Assim, tem-se:

*$x_{14}$  = passageiros transportados entre a origem 1 e o ponto de transbordo 4;*

*$x_{15}$  = passageiros transportados entre a origem 1 e o ponto de transbordo 5;*

*$x_{24}$  = passageiros transportados entre a origem 2 e o ponto de transbordo 4;*

*$x_{25}$  = passageiros transportados entre a origem 2 e o ponto de transbordo 5;*

*$x_{34}$  = passageiros transportados entre a origem 3 e o ponto de transbordo 4;*

*$x_{35}$  = passageiros transportados entre a origem 3 e o ponto de transbordo 5;*

*$x_{46}$  = passageiros transportados entre o ponto de transbordo 4 e o destino final 6;*

*$x_{56}$  = passageiros transportados entre o ponto de transbordo 5 e o destino final 6.*

### 3.5. Parâmetros:

$E_{ij,k}$  = eficiência energética da origem  $i$  ao destino  $j$  passando pelo ponto de transbordo  $k$ . Com  $i = 1, 2, 3$ ;  $j = 6$  e  $k = 4, 5$ .

$c_{ik}$  = consumo de energia para o transporte da origem  $i$  até o ponto de transbordo  $k$ .  $i = 1, 2, 3$  e  $k = 4, 5$ .

$c_{kj}$  = consumo de energia para o transporte do ponto de transbordo  $k$  até o destino  $j$ .  $k = 4, 5$  e  $j = 6$ .

$e_{ik}$  = emissão de CO<sub>2</sub> para o transporte da origem  $i$  até o ponto de transbordo  $k$ .  $i = 1, 2, 3$  e  $k = 4, 5$ .



$e_{kj}$  = emissão de CO<sub>2</sub> para o transporte do ponto de transbordo  $k$  até o destino  $j$ .  $k = 4, 5$  e  $j = 6$ .

$C_{ti}$  = capacidade de transporte da origem  $i$ .  $i = 1, 2, 3$ .

$d_j$  = demanda esperada no destino  $j$ .  $j = 6$ .

$L_{ik}$  = deslocamento em km (quilômetros) da origem  $i$  ao ponto de transbordo  $k$ .  $i = 1, 2, 3$  e  $k = 4, 5$ .

$L_{jk}$  = deslocamento em km (quilômetros) do ponto de transbordo  $k$  ao destino final  $j$ .  $k = 4, 5$  e  $j = 6$ .

Os deslocamentos entre os pontos de origem 1, 2 e 3 e os pontos de transbordo 4 e 5 são feitos por modo rodoviário, ônibus convencional com motor de combustão interna a diesel e capacidade para 80 passageiros. Assim como, os deslocamentos entre o ponto de transbordo 5 e o destino final 6. O deslocamento entre o ponto de transbordo 5 e o ponto final 6 é feito por veículo leve sobre trilhos (VLT) com capacidade para 225 passageiros.

### 3.6. Função Objetivo:

$$\min Z = \sum_{i=1}^3 \sum_{k=4}^5 (c_{ik} + e_{ik}) + \sum_{k=4}^5 (c_{k6} + e_{k6}) \quad (2)$$

*Em que:*

$$c_{ik} = (c_{ik} * x_{ik} * L_{ik}) \text{ com } i = 1, 2, 3 ; k = 4, 5;$$

$$e_{ik} = (e_{ik} * x_{ik} * L_{ik}) \text{ com } i = 1, 2, 3 ; k = 4, 5;$$

$$c_{kj} = (c_{kj} * x_{kj} * L_{kj}) \text{ com } k = 4, 5 \text{ e } j = 6;$$

$$e_{kj} = (e_{kj} * x_{kj} * L_{kj}) \text{ com } k = 4, 5 \text{ e } j = 6.$$

### 3.7. Restrições:

1. *A capacidade de transporte na origem deve ser respeitada:*

$$\sum_{i=1}^3 (x_{ik}) = C_{ti} \quad \text{com } k = 4, 5$$

2. *Toda a demanda do ponto final deve ser atendida:*

$$\sum_{i=1}^3 (x_{ik}) + \sum_{k=4}^5 (x_{k6}) = d_j \quad \text{com } k = 4, 5 \text{ e } j = 6.$$

3. *Conservação dos fluxos de entrada e saída:*

$$\sum_{i=1}^3 (x_{ik}) = \sum_{k=4}^5 (x_{k6}) \quad \text{com } k = 4, 5 \text{ e } j = 6.$$

4. *Respeitar a não negatividade de todas as variáveis de decisão:*

$$x_{ik}, x_{kj} \geq 0, i = 1, 2, 3 ; k = 4, 5 \text{ e } j = 6.$$

## 4. RESULTADOS

Utilizando a função Solver do programa Exel (Microsoft, 2014) para solucionar o problema, e os dados fornecidos nas Tabelas 4 e 5, foi calculada a eficiência energética para cada rota, calculando-se as emissões de CO<sub>2</sub> (gCO<sub>2</sub>/pass.km) e o consumo de energia (kj/pass.km) como mostrado na Tabela 6:

**Tabela 6 – Cálculo das emissões de CO<sub>2</sub> e do consumo de energia para cada rota**

Cálculo da Eficiência Energética por trecho: (calculados através dos dados das Tabelas 4 e 5)							
Cálculo de emissões de CO <sub>2</sub> (gCO <sub>2</sub> /pass.km)				Cálculo do consumo de energia (kj/pass.km)			
Transbordo	x4	x5	x6	Transbordo	x4	x5	x6
x1	576	576	0	x1	9.576	9.576	0
x2	400	400	0	x2	6.650	6.650	0
x3	480	480	0	x3	7.980	7.980	0
Ponto Final	x4	x5	x6	Ponto Final	x4	x5	x6
x4	0	0	56	x4	0	0	5.124
x5	0	0	448	x5	0	0	7.448

Fonte: Elaborado pelo autor

A Função Objetivo (2) foi calculada através da função SOMARPRODUTO do exel, em que, as matrizes das variáveis de decisão foram multiplicadas pelas respectivas matrizes de consumo de energia e emissões de CO<sub>2</sub>, respeitando as propriedades de multiplicação de matrizes.

Os resultados obtidos foram:  $x_{14} = 180$ ;  $x_{15} = 0$ ;  $x_{24} = 250$ ;  $x_{25} = 0$ ;  $x_{34} = 200$ ;  $x_{35} = 0$ ;  $x_{46} = 630$ ;  $x_{56} = 0$ . Em que toda a capacidade nos PO (1,2,3) destinou-se ao PT (4) e desse para o PF (6), resultando os valores ótimos de 5.949.300 kj de energia desprendida e 198.960 gCO<sub>2</sub> emitidos na atmosfera, considerando toda a demanda de 630 passageiros, com ótima eficiência energética. O Relatório de sensibilidade mostrou que para cada passageiro cuja rota fosse alterada, o Reduzido Custo (*reduce cost*) seria de 392 gCO<sub>2</sub> e 2.324 kj, totalizando um custo de eficiência energética de 2.716 u.e. (unidade de energia).

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De um modo geral pôde-se concluir que, investimentos no transporte urbano sobre trilhos, se devidamente planejados e gerenciados, são favoráveis ao deslocamento mais sustentável de passageiros. Na questão da eficiência energética, a rede intermodal aqui simulada mostrou que a integração entre os modos rodoviário, por ônibus, e ferroviário, por VLT, podem ser vistos como soluções mais eficientes quanto ao consumo de energia. O modo rodoviário sendo o alimentador de modos de maior capacidade, como o VLT, os quais podem ser alocados de modo a fazer os deslocamentos mais longos, por exemplo.

Tendo outro parâmetro aqui também apresentado, a capacidade dos veículos, e considerando, por exemplo, a substituição modal do transporte individual motorizado para o VLT, pelos dados aqui apresentados (Tabelas 2 e 4), em um percurso de 28 km, estima-se a redução de 504 quilograma equivalente de petróleo (kep) no consumo de energia para o transporte, além da redução aproximada de 307 carros nesse mesmo percurso (considerando 1,0 kep para cada quilômetro (km) percorrido, e a substituição modal do automóvel compacto (1,3 passageiros por veículo) para o VLT (400 passageiros para os 7 módulos do

trem). Se essa tendência se confirmar em outras 10 capitais do Brasil, por exemplo, multiplicaríamos por dez a economia de energia.

Quanto a metodologia, considera-se satisfatória e pertinente para problemas como este simulado nessa pesquisa – cálculo da eficiência energética no transporte intermodal, podendo, inclusive, ser utilizado para redes maiores e reais.

Como dificuldades, cabe ressaltar, o fato de não se ter encontrado uma equivalência nas unidades consideradas para as parcelas que compuseram a equação de Eficiência Energética, fazendo com que o resultado obtido seja a soma de parcelas de unidades diferentes. Assim, foram também calculadas, pela mesma modelagem do Solver, as parcelas isoladamente, através da separação dessas parcelas na função objetivo ( $FO-1 \text{ kj} + FO-2 \text{ gCO}_2$ ), para análise individual dos resultados.

Como continuidade a essa pesquisa, pretende-se aprofundar os conceitos sobre eficiência energética em transportes, indicadores, metodologias desenvolvidas, e principalmente, encontrar uma alternativa (método) para converter os consumos de energia e emissões de  $\text{CO}_2$ , em custo financeiro (R\$), a fim de direcionar as receitas obtidas dessas economias energéticas, em investimentos para o setor. Com esse propósito, já está em desenvolvimento uma contribuição metodológica para o planejamento de transporte sustentável aplicado a uma rede urbana de transportes de passageiros (MPTS-URB).

## 6. REFERÊNCIAS

Arenales, M.; Armentano, V.; Morabito, R.; Yanasse, H. **Pesquisa Operacional**. Rio de Janeiro: Elsevier Editora, 2007.

Associação Nacional dos Transportes de Passageiro sobre Trilhos. **Anuário metroferroviário 2013-2014**, Brasília.

Bortolazzo, S. A. **O VLT como alternativa de transporte urbano sustentável**. Especialização em Gestão estratégica do Território Urbano. Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, Porto Alegre, 2012.

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). **Relatório Anual de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo – 2007**. São Paulo, 2007.

D'Agosto, M. A. **Transporte, uso de energia e impactos ambientais: uma abordagem introdutória** – 1.ed. – Rio de Janeiro. Elsevier, 2015.

De Andrade, C. E. S.; Bittencourt, I. A. **Emissões de CO2 em Sistemas Metroviários: abordagem da energia de tração dos trens**. ANPET (2014)

Fleury, P.; Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável. **Logística no Brasil: situação atual e transição para uma economia verde**. Rio de Janeiro: FBDS, 2012. 43 p. (Coleção de estudos sobre diretrizes para uma economia verde no Brasil).

Gonçalves, J. A. M., Portugal, L. da Silva, Nassi, Carlos D. **A revitalização do sistema de trens de passageiros do Rio de Janeiro com base em dois sistemas ferroviários bem-sucedidos**. II Rio de Transportes, RJ, 2004.

Gonçalves, J. A. M., Portugal, L. da Silva, Nassi, Carlos D. **Proposta metodológica de apoio a tomada de decisões em um processo de revitalização de sistemas de trens metropolitanos**. XII Rio de Transportes, RJ, 2015.

Herdy, R. R.; Malburg, C. H. R.; Santos, R. T. **Transporte urbano: O papel do BNDES no apoio à solução dos principais gargalos de mobilidade**. In: BNDES 60 anos: perspectivas setoriais. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2012. p. 310-346.

IEA (2012) **Key World Energy Statistics 2012**.

Ministério de Minas e Energia - Empresa de Pesquisa Energética. **A matriz de transporte e o desenvolvimento sustentável**. São Paulo, 2012.

Ministério dos Transportes, **Banco de informações e mapas de transportes – BIT**, Brasília: Secretaria de Política Nacional de Transportes (SPNT) [citado em 2015 Ago 11]. Disponível em: <http://www2.transportes.gov.br/bit/03-ferro/ferro.html>

Souza, C. G. **Gargalos a serem superados**. Anuário metro ferroviário 2013-2014, Brasília, p. 23-25, 2013/2014.

Supervia. **Seminário BNDES**, Rio de Janeiro, 2005.

Valente, A.M.; Passaglia, E.; Novaes, A.G. **Gerenciamento de Transporte e Frotas**. 2ª ed. rev. São Paulo: Cengage Learning, 2012.

UNEP - United Nations Environment Programme, 2011, **Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication**.

---

Shadia S. Assaf Bortolazzo ([sha\\_assaf@yahoo.com.br](mailto:sha_assaf@yahoo.com.br))

Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial (PPGTG), Universidade Federal de Santa Catarina.

Rua João Pio Duarte Silva, s/n - Córrego Grande - Florianópolis-SC - CEP: 88040-970

Eugênio Cavallazzi, Dr. ([jecavallazzi@gmail.com](mailto:jecavallazzi@gmail.com))

Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial (PPGTG), Universidade Federal de Santa Catarina.

Rua João Pio Duarte Silva, s/n - Córrego Grande - Florianópolis-SC - CEP: 88040-970

Amir Mattar Valente, Dr. ([amir.labtrans@gmail.com](mailto:amir.labtrans@gmail.com))

Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial (PPGTG), Universidade Federal de Santa Catarina.

Rua João Pio Duarte Silva, s/n - Córrego Grande - Florianópolis-SC - CEP: 88040-970