

LAJBM. V. 14, N. 1, P. 25-42, jan-jun/2023. Taubaté, SP, Brasil.

ISSN: 2178-4833**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO PRODUTIVO DE SISTEMAS
METROVIARIOS EM CIDADES BRASILEIRAS****EVALUATION OF PRODUCTIVE PERFORMANCE OF
SUBWAY SYSTEMS IN BRAZILIAN CITIES**Adriano de Amarante¹Daniel Augusto de Souza²Júlio da Silva Dias³Carlos Roberto De Rolt⁴

Data de recebimento: 14/03/2023

Data de aceite: 27/04/2023

Resumo

O objetivo do trabalho é avaliar o desempenho produtivo de concessionárias de serviços metroviários em doze cidades brasileiras com auxílio da metodologia de Análise Envoltória de Dados – DEA. Empresas de metrô com menor relação insumos-produto e com áreas de concessão com maior densidade urbana tendem a ter maior eficiência produtiva. Foi possível utilizando esta metodologia desenvolver um ranqueamento das concessionárias utilizando variáveis quantitativas de forma objetiva. Este ranqueamento permite identificar as concessionárias com maior capacidade produtiva. O Metrô-SP em 2012 e ViaQuatro em 2016 foram as empresas que apresentaram maior produtividade relativa e os piores desempenhos foram da CBTU-Maceió em 2012 e CBTU-Fortaleza em 2016.

Palavras-chave: Análise Envoltória de Dados. Transporte metroviário. Eficiência. População metropolitana.

¹ Graduações em Ciências da Administração e em Ciências Econômicas pela Universidade Federal de Santa Catarina, mestrado em Economia pela Universidade Federal de Santa Catarina e doutorado em Economia Aplicada pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. É professor da Universidade do Estado de Santa Catarina. E-mail: adriano.amarante@udesc.br

² Graduação em Economia pela Universidade Federal de Santa Catarina, mestrado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Catarina e doutorado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina. É Professor efetivo Adjunto da UDESC - Universidade do Estado de Santa Catarina. E-mail: desouza.esag@gmail.com

³ Graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina, mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina e doutorado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Catarina. É professor da Universidade do Estado de Santa Catarina. E-mail: julio.dias@udesc.br

⁴ Graduações em Ciências da Computação e em Administração pela Universidade do Estado de Santa Catarina, especialização em Administração Pública pela Universidade do Estado de Santa Catarina, mestrado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Catarina e doutorado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Catarina. É professor associado da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC). E-mail: carlos.rolt@udesc.br

Abstract

The objective of this work is to evaluate the productive performance of subway service concessionaires in twelve Brazilian cities using the Data Envelopment Analysis (DEA) methodology. Subway companies with lower input-product ratios and concession areas with greater urban (population) density tend to have higher productive efficiency. It was possible using this methodology to develop a ranking of subway utilities using objective quantitative variables. This ranking allows to identify the concessionaires with greater productive capacity. Metrô-SP in 2012 and ViaQuatro in 2016 were the companies with the highest relative productivity and the worst performances were CBTU-Maceió in 2012 and CBTU-Fortaleza in 2016.

Keywords: Data Envelopment Analysis. Subway transport. Efficiency. Metropolitan population.

Introdução

Nos últimos anos a questão da mobilidade urbana vem sendo discutida amplamente em meio aos problemas de congestionamento e poluição. Para alguns o surgimento de um novo modelo de mobilidade como o compartilhamento de veículos leves como bicicletas, patinetes e automóveis de passeio, pode ser parte da solução em meio a baixa qualidade dos serviços de transporte coletivos urbanos em geral. No entanto a utilização de transportes por aplicativos, por exemplo, pode ampliar o congestionamento de vias normais e a intensificação do uso de ciclovias só vem a reposicionar o problema do congestionamento em vias alternativas. Neste caso, o problema a ser atacado não são as novas modalidades de deslocamento urbano, mas sim a baixa produtividade e qualidade do transporte público urbano.

A importância deste modal ficou evidente com o acolhimento de eventos esportivos de repercussão internacional e de requisitos mais complexos e qualificados de infraestrutura turística. Dentre estes eventos estão os Jogos Pan-americanos e Jogos Olímpicos sediados na cidade do Rio de Janeiro e Copa do Mundo de Futebol em que os jogos foram sediados nas principais capitais e cidades de cada Região do Brasil. Outro aspecto relevante é a consequência da densidade urbana sobre a produtividade dos sistemas de transporte.

Segundo informações do Sistema de Informação da Mobilidade Urbana – SIMOB da Associação Nacional de Transportes Públicos – ANTP (2014), em 2012 nos municípios brasileiros com mais de 60 mil habitantes, são realizadas em torno de 1,65 viagens diárias por habitante. Porém, este indicador muda de acordo com a população da cidade, este indicador é em média maior nas metrópoles, de 2,5 viagens diárias, e menor nas cidades com população inferior a cem

mil habitantes, de 0,9 viagens diárias, informação importante para intensificação da utilização do modal metroviário.

Neste trabalho⁵ o objetivo é avaliar o desempenho técnico e produtivo de concessionárias de serviços metroviários em doze cidades brasileiras com auxílio da metodologia de Análise Envoltória de Dados – DEA. Além disso, aqui busca-se verificar se a produtividade parcial evoluiu com o recebimento de eventos esportivos internacionais e inferir que se empresas de metrô com menor relação insumos-produto e com áreas de concessão com maior densidade urbana tendem a ter maior eficiência produtiva e de escala.

A metodologia DEA possibilitou desenvolver um ranqueamento das concessionárias utilizando variáveis quantitativas de forma objetiva. Este ranqueamento permite identificar as concessionárias com maior capacidade produtiva e técnica⁶, neste sentido o Metrô-SP em 2012 e ViaQuatro em 2016 foram as empresas que apresentaram maior produtividade relativa e os piores desempenhos foram da CBTU-Maceió em 2012 e CBTU-Fortaleza em 2016.

A seguir apresentam-se alguns estudos sobre o setor de transporte ferroviário e sobre a avaliação da eficiência para este setor. Na seção 3 apresenta-se a metodologia aplicada ao cálculo da eficiência e na seção 4 analisam-se os resultados obtidos com aplicação da metodologia DEA. Por fim, fazem-se algumas considerações finais.

Estudos de avaliação da eficiência no setor de transporte férreo e urbano

Em pesquisa bibliográfica de Liu et al (2013) pode-se contextualizar o desenvolvimento e o interesse de pesquisadores no estudo da eficiência por Análise Envoltória de Dados (DEA) aplicado aos vários setores da economia, sendo que investigações sobre a eficiência no setor de transporte em geral correspondeu a 249 ou 7,95% de um total de 3.134 artigos pesquisados.⁷ Já, estudos aplicados a análise do desempenho de sistemas ferroviários de transporte de carga e passageiros podem ser numerosos.⁸

⁵ Apresentado no 12º Knowledge Cities World Summit, Senac Santa Catarina de Florianópolis, em 2020.

⁶ Quando se pressupõe um fator de escala variável.

⁷ Lui et al (2016) apresenta um estudo bibliográfico sobre a fronteira da arte no desenvolvimento da Análise Envoltória de Dados, da utilização de *Bootstrapping* para regenerar os dados de insumo-produto e viabilizar testes de significância estatística até Redes de DEA e DEA dinâmico, por exemplo.

⁸ Mahmoudia *et al* (2018) faz um levantamento bibliográfico de estudos sobre DEA aplicado a transportes são focados ao transporte ferroviário.

No estudo de Hirooka (2000) apresenta um estudo sobre o desenvolvimento do setor de transporte ferroviário de passageiros na região metropolitana de Tóquio com objetivo de subsidiar um plano de gestão e investimentos para o setor e região. Pesquisas e desenvolvimentos da metodologia de medir e qualificar a eficiência pode ser observada em inúmeros artigos dedicados ao setor ferroviário, em Coelli & Perelman (1999) tem como objetivo analisar as diferenças entre as estimativas de eficiência técnica das ferrovias Europeias derivada de três métodos: (1) Estimativa de uma fronteira paramétrica eficiente e índice de eficiência técnica usando programação linear, (2) DEA para estimar os índices de eficiência técnica, e (3) construção de uma fronteira eficiente e ranqueamento por Mínimos Quadrados Ordinários Correlacionados. Como o setor produz multiprodutos e usa multinsumos, o elemento de saída e entrada para análise da eficiência é o resultado de uma função distância de multiprodutos-insumos para cada unidade de tomada de decisão (DMU) a depender da orientação. Foram estimados índices de eficiência para 17 sistemas ferroviários de países europeus.

Outro estudo é o de Christopoulos et al. (2001) sobre eficiência das companhias férreas de países da Europa Ocidental no período de 1969-92. Ainda pesquisando países dentro do continente europeu, o trabalho de Hilmola (2006) aplica o modelo DEA ao sistema ferroviário de um número maior de países para verificar a evolução da eficiência durante o período de 1980-2003 com destaque para os efeitos da liberdade econômica e o fim do regime comunista em países do Leste Europeu sobre indicadores de eficiência.

Vaidya (2014) avaliou o desempenho relativo de 26 organizações públicas de transporte urbano na Índia usando 19 critérios, tais como processos operacionais (produtividade dos veículos e trabalhadores), finanças (custos operacionais, rentabilidade e receitas) e número de acidentes (fatais e não fatais). Primeiro, avaliaram a importância desses grupos de critérios usando o Processo de Hierarquia Analítica (Analytic Hierarchy Process - AHP). Em seguida, avaliaram as organizações usando DEA. Por fim, como resultado foi desenvolvido um Número de Eficiência de Transporte (Transportation Efficiency Number - TEN) que quantificou o desempenho geral das unidades de análise com base nos critérios elencados.

Chen (2014) explorou a relação entre a operação de nova infraestrutura de transporte e a eficiência econômica regional com casos específicos de Taiwan High Speed Rail (THSR) em regiões no oeste de Taiwan, usando os dados anuais de 2004 a

2010 e aplicando o método de análise de envelopamento de dados (DEA) e modelo de regressão Tobit. Como resultado, concluiu que os Indicadores e Eficiência Econômica - IEE médios para essas regiões estão se deteriorando desde a operação inicial do THSR em 2007, o que indica que as influências negativas são mais graves do que as positivas após a operação do THSR. Outra conclusão foi de que os IEE para essas regiões melhoraram no início, mas pioraram no longo prazo, de acordo com os resultados estimados pelo modelo Tobit, o que implica que a construção de infraestrutura de transporte não estimularia o desenvolvimento econômico regional.

Wanke, Barros e Figueiredo (2016) analisaram um conjunto de modais de transporte em 285 cidades em diversos países entre os anos de 2009 e 2012, os autores exploraram por meio de uma abordagem de combinação em dois estágios de Análise Estocástica e Envelope de Dados (SDEA) e Regressão Beta para apoiar os resultados dos níveis de eficiência com foco na folga da capacidade produtiva. Como resultados identificaram uma resiliência superior dos modais de transporte de alta capacidade sobre modais alternativos nas grandes cidades. Outra contribuição dos autores foi a descoberta de que variáveis demográficas como população e renda, desempenham um papel importante na identificação de modais urbanos mais apropriados.

Sameni, Preston e Sameni (2016) analisaram a eficiência técnica, por meio do DEA, aplicaram uma metodologia baseada no DEA de dois estágios a partir de estudos comparativos de eficiência portuária e aeroportuária. A metodologia empregada analisou num primeiro estágio a 'eficiência técnica' relativa das estações para lidar com paradas de trem em relação à existência de capacidade na estação. O modelo do segundo estágio analisou a 'eficácia de serviço' para identificar até que ponto as paradas de trem em uma estação são transformadas no número de entradas, saídas e trocas de passageiros, levando em consideração a população da área de influência e as oportunidades de emprego. Os modelos foram aplicados a um estudo de caso das 96 estações de trem mais movimentadas da Grã-Bretanha e foram seguidos por duas regressões Tobit para avaliar o efeito do tipo e localização do tráfego nos resultados. Os autores concluíram que para eficiência técnica, todas as cinco estações com a maior pontuação de eficiência estão localizadas na área da Grande Londres. Para a eficácia do serviço, 14 estações estão localizadas na fronteira orientada para a saída, destas 13 estão na área da Grande Londres.

Liu et al. (2017) propuseram um modelo de Análise de Envoltória de Dados de Medida baseada em folga para avaliar a eficiência geral do setor de transporte terrestre e a eficiência individual dos subsetores de transporte ferroviário e rodoviário, considerando as emissões de CO₂. Os resultados empíricos levam a concluir, em primeiro lugar, que somente a província de Anhui foi eficiente a cada ano durante 2009 e 2012. Em segundo lugar, a região leste da China é a que apresenta a maior eficiência ambiental e, finalmente, que o desempenho do transporte ferroviário é maior que o do transporte rodoviário.

No trabalho de Constant, Machado e Mello (2017), os autores analisam e avaliam 119 sistemas de trens urbanos de grandes metrópoles pelo mundo. A partir de um modelo não radial de Análise Envoltória de Dados foi possível avaliar a eficiência dos sistemas e determinar as cidades alvo com sistema de transporte férreo de passageiros mais eficientes.

Hsiao et al (2017) investigaram os efeitos da alocação e otimização centralizada de recursos ferroviários na eficiência operacional geral da indústria ferroviária por meio do método DEA centralizado (CDEA). As variáveis selecionadas para o estudo foram: número de trabalhadores (administrativo/comercial e operadores de trânsito), área de construção e número de equipamentos e rotas de 112 estações do sistema ferroviário de Taiwan. O resultado do artigo indicou que o plano de longo prazo tem a maior proporção incremental de produção, seguido pelos planos de médio e curto prazo respectivamente. Uma melhor alocação de recursos indica uma proporção incremental mais alta da produção.

Em um estudo pioneiro de Azadeh, Salehi e Kianpour (2018) aplicaram conceitos de Engenharia de Resiliência (ER) a partir de um conjunto de métricas de saúde, segurança e ergonomia, por meio da Análise Envoltória de Dados para avaliar o desempenho do sistema de transporte férreo elétrico Teerã – Karaj. Para esse fim, primeiro foi elaborado um questionário com base nos conceitos estabelecidos para coleta de dados e avaliação de desempenho do sistema ferroviário. Em seguida, a abordagem DEA foi aplicada para avaliar as DMUs do sistema ferroviário. Nas suas conclusões os autores indicaram que houve um crescimento significativo no número de DMUs eficientes (67%) e um crescimento relativo no valor médio da eficiência total de 3,6%, considerando o conceito de ER. Em outras palavras, a ER desempenha um papel

significativo na promoção do desempenho do sistema. Os resultados também mostraram que o trabalho em equipe teve o maior impacto no desempenho do sistema ferroviário entre os fatores associados à ER. O teste de Spearman foi realizado para validar os resultados deste estudo. Por último, em um estudo recente, Foroutan e Bamdad (2023) aplicam Análise de Envoltória de Dados em Rede (NDEA) para 19 regiões ferroviárias iranianas, para avaliar a eficiência geral de cada estação de trem de passageiros a partir de uma avaliação de eficiência de cada processo, de custo, operação e receita dentro um sistema global.

Metodologia

Fonte dos dados é da ANTP – Associação Nacional de Transportes Público (2014-2018) nos relatórios gerais do Sistema de Informações da Mobilidade Urbana da Associação Nacional de Transportes Público (Simob/ANTP) referente aos anos de 2012 até 2016. Neste estudo foram obtidos dados sobre o número de passageiros, carros (vagões) e empregados por quilômetro transportado. Aqui, assume-se que uma concessionária que administra um sistema de trem urbano é considerada como participante da indústria metroviária.

Análise Envoltória de Dados tradicionalmente conhecida como DEA, sigla derivada do termo inglês *Data Envelopment Analysis* – DEA trata-se de um subconjunto de aplicações da programação linear. A metodologia de DEA pode ser empregada na avaliação do desempenho de Unidades de Tomada de Decisão, do inglês *Decision Making Unit* – DMU, podendo ser aplicada a economias locais e nacionais, empresas, organizações governamentais, associações, departamentos e divisões, grupo de estudantes ou de trabalhadores e agentes econômicos individuais. Os princípios do DEA datam de 1957 com Ferrel (1957) e são estendidos com os estudos de Charnes *et al* (1978) e Barnes *et al* (1984).

Neste artigo aplicamos a metodologia DEA, com orientação para os insumos, trata-se de um problema de programação linear (PL) em que maximiza-se uma métrica de produtividade de determinada DMU, sujeito a um conjunto de restrições na utilização de insumos por parte da DMU em questão e por parte das DMUs concorrentes. A primeira ideia de um problema de DEA com objetivo de determinar níveis de eficiência para um conjunto de empresas, aqui DMUs, pode ser dado pelo seguinte problema de maximização não linear:

$$\text{MAX}_{p_{1o}, p_{2o}, \dots, p_{io}, \dots, p_{no}, q_{1o}, q_{2o}, \dots, q_{jo}, \dots, q_{mo}, e_o} \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n p_{io} y_{io}}{\sum_{j=1}^m q_{jo} x_{jo}} \right\}$$

Sujeito à:

$$\frac{\sum_{i=1}^n p_{io} y_{i1}}{\sum_{j=1}^m q_{jo} x_{j1}} \leq 1$$

$$\frac{\sum_{i=1}^n p_{io} y_{i2}}{\sum_{j=1}^m q_{jo} x_{j2}} \leq 1$$

...

$$\frac{\sum_{i=1}^n p_{io} y_{io}}{\sum_{j=1}^m q_{jo} x_{jo}} \leq 1$$

...

$$\frac{\sum_{i=1}^n p_{io} y_{is}}{\sum_{j=1}^m q_{jo} x_{js}} \leq 1$$

...

$$\frac{\sum_{i=1}^n p_{io} y_{ik}}{\sum_{j=1}^m q_{jo} x_{jk}} \leq 1$$

$$p_{1o}, p_{2o}, \dots, p_{io}, \dots, p_{no} > 0$$

$$q_{1o}, q_{2o}, \dots, q_{jo}, \dots, q_{mo} > 0$$

Onde a função objetivo é um índice global de produtividade da DMU_o e as restrições representam um conjunto de índices globais de produtividade das DMU_s em relação a combinação de produtos e insumos escolhida pela DMU_o restritos a um valor menor que 1. Nesta formulação temos que p_i e y_i representam o peso e a quantidade do produto i para $i = 1, 2, \dots, n$; q_j e x_j representam o peso e a quantidade do insumo j para $j = 1, 2, \dots, m$, onde o índice $s = 1, 2, \dots, k$ representa as DMUs em que o indicador "o" representa a DMU_o maximizadora. Os pesos indicam a intensidade de utilização do insumo e ou a participação relativa do produto específico na produção total.

Para transformar este problema não linear em um programa linear, inclui-se uma restrição adicional $\sum_{j=1}^m q_{jo}x_{jo} = 1$ e faz-se algumas manipulações algébricas simples, logo a programação linear pode ser descrita como:

$$\text{MAX}_{p_{1o}, p_{2o}, \dots, p_{io}, \dots, p_{no}, q_{1o}, q_{2o}, \dots, q_{jo}, \dots, q_{mo}, e_o} \left\{ \sum_{i=1}^n p_{io} y_{io} \right\}$$

Sujeito à:

$$\sum_{i=1}^n p_{io} y_{i1} - \sum_{j=1}^m q_{jo} x_{j1} \leq 0$$

$$\sum_{i=1}^n p_{io} y_{i2} - \sum_{j=1}^m q_{jo} x_{j2} \leq 0$$

...

$$\sum_{i=1}^n p_{io} y_{io} - \sum_{j=1}^m q_{jo} x_{jo} \leq 0$$

...

$$\sum_{i=1}^n p_{io} y_{is} - \sum_{j=1}^m q_{jo} x_{js} \leq 0$$

...

$$\sum_{i=1}^n p_{io} y_{ik} - \sum_{j=1}^m q_{jo} x_{jk} \leq 0$$

$$\sum_{j=1}^m q_{jo} x_{jo} = 1$$

$$p_{1o}, p_{2o}, \dots, p_{io}, \dots, p_{no} > 0$$

$$q_{1o}, q_{2o}, \dots, q_{jo}, \dots, q_{mo} > 0$$

Nesta formulação os insumos apresentam retornos constantes de escala, conhecido como modelo CCR (Charnes *et al*, 1978), e tem como objetivo medir a eficiência produtiva

das DMUs, mas o modelo BCC (Barnes *et al*, 1984) pode medir a eficiência técnica, pois leva em conta retornos de escala variáveis, em que cada DMU pode apresentar um coeficiente de escala variável, assim uma DMU que tem dificuldade na obtenção de retornos com a mudança de escala de seus insumos pode ser tecnicamente eficiente apesar desta restrição em seu fator de escala. O problema de PL pode ser reescrito incluindo um fator de escala da DMUo nas equações como:

$$\text{MAX}_{p_{1o}, p_{2o}, \dots, p_{io}, \dots, p_{no}, q_{1o}, q_{2o}, \dots, q_{jo}, \dots, q_{mo}, e_o} \left\{ \sum_{i=1}^n p_{io} y_{io} - e_o \right\}$$

Sujeito à:

$$\sum_{i=1}^n p_{io} y_{i1} - \sum_{j=1}^m q_{jo} x_{j1} - e_o \leq 0$$

$$\sum_{i=1}^n p_{io} y_{i2} - \sum_{j=1}^m q_{jo} x_{j2} - e_o \leq 0$$

...

$$\sum_{i=1}^n p_{io} y_{io} - \sum_{j=1}^m q_{jo} x_{jo} - e_o \leq 0$$

...

$$\sum_{i=1}^n p_{io} y_{is} - \sum_{j=1}^m q_{jo} x_{js} - e_o \leq 0$$

...

$$\sum_{i=1}^n p_{io} y_{ik} - \sum_{j=1}^m q_{jo} x_{jk} - e_o \leq 0$$

$$\sum_{i=1}^n q_{io} x_{jo} = 1$$

$$p_{1o}, p_{2o}, \dots, p_{io}, \dots, p_{no} > 0$$

$$q_{1o}, q_{2o}, \dots, q_{jo}, \dots, q_{mo} > 0$$

$$e_o = \text{livre}$$

Onde $i = 1, 2, \dots, n$ indicam os tipos de produto, $j = 1, 2, \dots, m$ os tipos de insumo, $s = 1, 2, \dots, k$ representam as DMU_s em que o índice “o” representa a DMU_o maximizadora.

A partir da aplicação dos dois últimos problemas de maximização da programação linear obtêm-se os índices de eficiência produtiva e eficiência técnica, respectivamente. A eficiência de escala é a razão entre os índices de eficiência como BCC/CCR. Os cálculos utilizaram o software Excel e seu suplemento Solver. Na próxima seção, apresentam-se os resultados dos algoritmos e infere-se uma correlação forte entre a população da região metropolitana e o índice de eficiência produtiva e técnica.

Resultados

Em uma primeira etapa da análise incorporou-se a concessionária VIA4 ao processo de DEA no ano de 2016, como apresentado na Figura 1. A empresa metroviária VIA4 eleva a fronteira de eficiência produtiva, este resultado era esperado já que uma nova empresa tende a investir em tecnologia de equipamentos e processos mais avançados que as operadoras de metrô já estabelecidas. Novos carros e processos gerenciais e operacionais associados a novos equipamentos reduz a intensidade de insumos mediante um nível de produção. Esta primeira etapa é relevante para delinear políticas de melhoria técnica e produtiva do setor metroviário, pois sinaliza ao órgão regulador a possibilidade de melhoria de eficiência em concessionárias estabelecidas antes de 2015 e que estão operando.

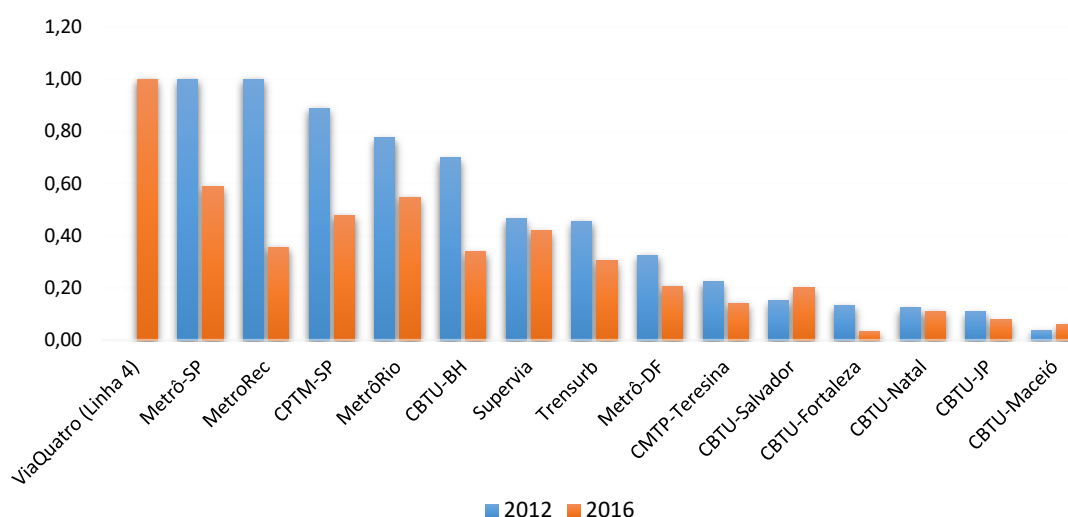


Figura 1: Índice de Eficiência de Escala (CCR) do setor metroviário brasileiro com a VIA4 2012-2016

Na segunda etapa da análise estudou-se um conjunto de 14 operadoras de metrô ou trem urbano com informações disponíveis para os anos de 2012 até 2016. Como as informações da operadora VIA4 não estão disponíveis para os anos de 2012 até 2014, optou-se por aplicar o DEA para avaliar a trajetória do desempenho apenas às 14 concessionárias com informações completas para o período de 2012 até 2016.

Na Tabela 1 são apresentados os índices de eficiência Produtiva (CCR), técnica (BCC) e de Escala (BCC/CCR), respectivamente, para três anos 2012, 2014 e 2016. O que se constata é que a concessionária Metrô-SP, permanece na fronteira da eficiência produtiva, técnica e de escala. O Metro-Recife está na fronteira de eficiência somente em 2012. Em termos de eficiência técnica, todas as concessionárias de metrô que operam na Região Sudeste do país (Metrô-SP, Metrô-Rio, CPTM-SP, Supervia-Rio e CBTU-BH) alcançaram a fronteira de eficiência no ano de 2016. A concessionária que atua na cidade de Salvador no estado da Bahia (Região Nordeste), CBTU-Salvador, também atinge a fronteira da eficiência técnica nos anos de 2014 e 2016.

Tabela 1 – Índices de Eficiência Produtiva (CCR), Técnica (BCC) e de Escala (BCC/CCR)

Índice de Eficiência	CCR			BCC			BCC/CCR		
	Ano			Ano			Ano		
DMU	2012	2014	2016	2012	2014	2016	2012	2014	2016
Metrô-SP	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Metrô-Rio	0,78	0,90	0,93	0,97	1,00	1,00	0,80	0,90	0,93
CPTM-SP	0,89	0,74	0,81	1,00	1,00	1,00	0,89	0,74	0,81
Supervia-Rio	0,47	0,54	0,71	0,80	0,97	1,00	0,58	0,56	0,71
Metro-Rec	1,00	0,59	0,69	1,00	0,65	0,75	1,00	0,91	0,93
CBTU-BH	0,70	0,62	0,58	1,00	1,00	1,00	0,70	0,62	0,58
Trensurb-Poa	0,46	0,51	0,52	0,74	0,74	0,76	0,61	0,69	0,69
Metrô-DF	0,33	0,39	0,35	0,36	0,47	0,43	0,91	0,84	0,81
CBTU-Salvador	0,15	0,39	0,34	0,21	1,00	1,00	0,72	0,39	0,34
CMTP-Teresina	0,22	0,24	0,24	0,34	0,38	0,69	0,67	0,64	0,35
CBTU-Natal	0,12	0,14	0,19	0,21	0,28	0,24	0,58	0,50	0,77
CBTU-JP	0,11	0,15	0,13	0,15	0,16	0,14	0,74	0,95	0,97
CBTU-Maceió	0,04	0,20	0,10	0,28	0,36	0,28	0,13	0,56	0,36
CBTU-Fortaleza	0,13	0,04	0,06	0,54	0,53	0,54	0,25	0,07	0,10

Fonte: Simob/ANTP (2014, 2016, 2018)

Na Tabela 1 é possível observar a evolução relativa individual da eficiência, não fica claro se existe um deslocamento positivo da fronteira de eficiência, assim neste estudo avalia-se de maneira preliminar a evolução da produtividade parcial das DMUs e do setor em geral.

Nas Tabelas 2 e 3 são apresentadas as evoluções dos índices de produtividade parcial na forma de índice. A produtividade parcial é a razão simples entre o produto e o insumo específico. No presente estudo, os cálculos das produtividades parciais podem ser dados como a razão entre o número de passageiros e o número de empregados multiplicado por 1000 e como a razão entre o número de passageiros e o número de carros (vagões) multiplicado por 100.

Na Tabela 2 apresenta-se a evolução dos Índices de Produtividade Parcial Passageiros/Empregados (IPT) destacando uma evolução positiva da produtividade para concessionárias do Nordeste como CBTU-Salvador com aumento de 19% ao ano na produtividade de seus empregados, CBTU-Natal com 8%, CBTU-JP com 76% e CBTU-Maceio com 44%.

Tabela 2 – Evolução dos Índices de Produtividade Parcial (1000*Passageiros/Empregados)

DMU	Ano					Taxa de Crescimento Médio Anual %
	2012	2013	2014	2015	2016	
Metrô-SP	107,54	105,54	103,48	95,10	95,96	-2,81
Metrô-Rio	83,41	87,38	93,40	84,15	89,52	1,78
CPTM-SP	95,50	92,59	76,27	74,92	78,06	-4,92
Supervia-Rio	50,09	54,00	56,22	67,21	68,34	8,08
Metro-Rec	52,23	65,14	61,43	57,60	58,06	2,68
CBTU-BH	75,13	85,08	64,46	52,95	55,32	-7,37
Trensurb-Poa	45,79	46,89	52,50	51,02	49,87	2,16
Metrô-DF	34,98	41,20	40,55	39,23	33,77	-0,88
CBTU-Salvador	16,28	25,00	29,92	32,71	32,71	19,06
CMTP-Teresina	24,14	24,14	25,27	23,08	23,08	-1,12
CBTU-Natal	13,25	13,64	13,27	21,24	18,02	7,99
CBTU-JP	1,32	18,18	15,38	13,77	12,69	75,91
CBTU-Maceió	2,27	17,46	20,93	17,05	9,83	44,20
CBTU-Fortaleza	14,29	14,88	3,00	5,41	5,41	-21,55
VIA-4	-	-	-	166,63	163,31	-2,00
Produtividade Média	44,02	49,37	46,86	53,47	52,93	4,72

Fonte: Simob/ANTP (2014, 2015, 2016, 2017, 2018)

O destaque negativo também foi da Região Nordeste do país com redução na produtividade do trabalho em -21,5% para CBTU-Fortaleza. No estudo geral não foi incluído a concessionária de metrô VIA4, mas o que se verifica é que esta nova empresa no setor entra com elevado índice de produtividade do trabalho e do capital, como descrito na Tabela 3.

Tabela 3 – Evolução dos Índices de Produtividade Parcial (100*Passageiros/Carros)

DMU	Ano					Taxa de Crescimento Médio Anual %
	2012	2013	2014	2015	2016	
Metrô-SP	109,87	109,64	107,74	96,88	95,69	-3,40
Metrô-Rio	70,84	73,01	86,52	65,62	69,80	-0,37
CPTM-SP	59,10	58,66	50,63	46,93	46,26	-5,94
Supervia-Rio	21,18	22,99	20,95	20,66	21,01	-0,20
Metro-Rec	194,15	243,41	63,70	69,69	66,46	-23,51
CBTU-BH	59,79	65,00	67,08	45,26	43,93	-7,42
Trensurb-Poa	51,60	54,20	42,61	51,34	50,18	-0,70
Metrô-DF	31,37	34,22	33,67	34,75	28,95	-1,99
CBTU-Salvador	13,13	31,67	42,22	21,88	21,88	13,62
CMTP-Teresina	23,33	23,33	25,56	23,33	23,33	0,00
CBTU-Natal	12,22	16,67	15,00	12,63	16,32	7,49
CBTU-JP	21,00	12,86	6,40	6,55	5,86	-27,31
CBTU-Maceió	5,33	7,33	11,25	8,15	6,30	4,24
CBTU-Fortaleza	11,29	11,61	4,29	5,12	5,12	-17,95
VIA-4	-	-	-	190,83	187,02	-2,00
Produtividade Média	48,87	54,61	41,26	46,64	45,87	-1,57

Fonte: Simob/ANTP (2014, 2015, 2016, 2017, 2018)

Na Tabela 3 apresenta-se a evolução dos Índices de Produtividade Parcial Passageiros/Carros (IPK) destacando uma evolução positiva da produtividade para concessionárias do Nordeste como CBTU-Salvador com aumento de 13,6% ao ano na produtividade por carro, CBTU-Natal com 7,5% e CBTU-Maceio com 4,2%. O destaque negativo novamente foi da Região Nordeste do país com redução na produtividade do capital, neste caso carros utilizados, foi de -23,5% para o Metro de Recife, -27,3% para concessionária de João Pessoa (CBTU –JP) e -18% para CBTU-Fortaleza. A Região Sudeste no geral teve desempenho negativo para este indicador de produtividade.

Cabe destacar, que no geral o desempenho evoluiu positivamente quanto a produtividade do trabalho que aumentou em 4,7% ao ano. No entanto a produtividade do capital decresceu aproximadamente 1,6% ao ano durante o período analisado. Este decréscimo pode ter origem na gestão para melhoria da qualidade na prestação dos serviços de transporte, na medida em que se oferecem assentos adicionais na introdução de novos vagões.

Tabela 4: Correlação de Pearson

Variáveis	População (2016)	Densidade em Habitantes/km ² (2016)
CCR (Eficiência Produtiva)	0,83	0,80
BCC (Eficiência Técnica)	0,67	0,61
BCC/CCR (Eficiência de Escala)	0,44	0,44

Fonte: Simob/ANTP (2018), IPEA (2015) e IBGE (2016)

Outra questão relevante é verificar quais as implicações da população e da densidade demográfica das regiões metropolitanas sobre os índices de eficiência. Uma breve análise exploratória utilizando o coeficiente de correlação de Pearson identifica forte correlação linear entre o índice de eficiência produtiva e as variáveis demográficas de população e densidade. Quando estima-se um coeficiente de determinação R^2 também verifica-se um efeito significativo da demografia sobre a eficiência produtiva. Na Figura 2, pode-se verificar uma correlação positiva, quando se observa a estimativa do coeficiente de determinação para uma equação *lin-log*⁹, principalmente quanto a população da área metropolitana e a eficiência produtiva, $R^2=0,7646$.

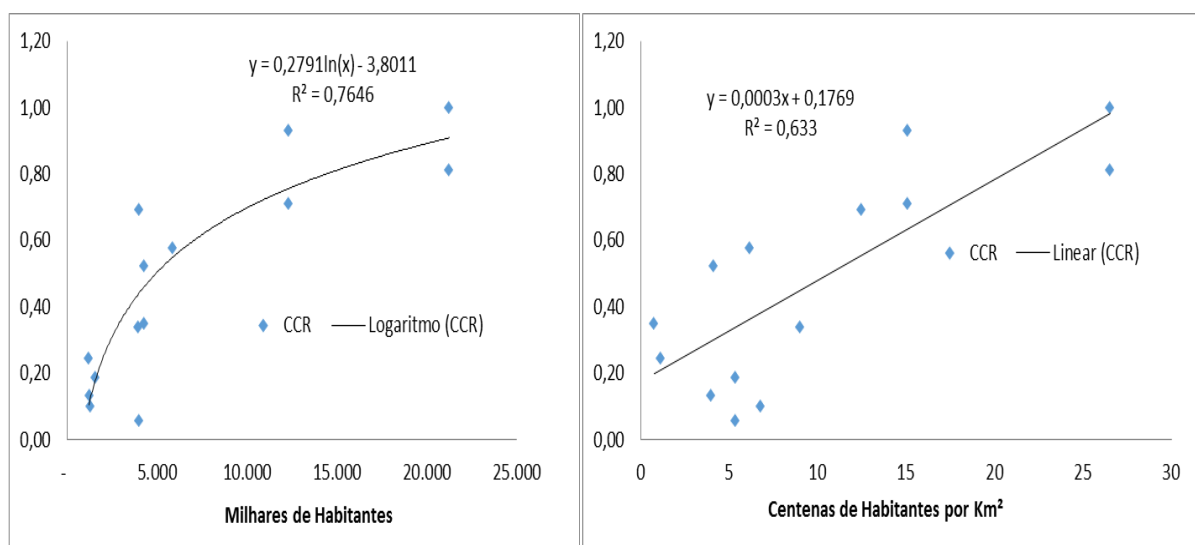


Figura 2: Índice de Eficiência de Escala (CCR) versus População e Densidade Demográfica em 2016

Quando se faz esta análise é possível supor que a eficiência depende muito do tamanho do mercado relevante, deixando pouca margem para tratar a ineficiência com realocação dos insumos, este resultado converge com estudos¹⁰ que indicam que insumos como capital (carros) e trabalho (empregado) em setores de infraestrutura são considerados não gerenciáveis, ou de baixa flexibilidade por dependerem de questões não controladas pela empresa.

⁹ Equação linear na variável dependente de eficiência e logarítmica na variável dependente população.

¹⁰ Segundo Coelli & Perelman (1999, p. 328) o trabalho e o capital são controlados por sindicatos e questões políticas sobrando pouca margem para gestão de insumos.

Considerações finais

Neste artigo ao avaliar a evolução das produtividades parciais pode-se inferir que os Jogos Olímpicos de 2016 influenciaram positivamente a produtividade dos transportes metroviários, a Metrô-Rio com índices de 84 (IPT) e 65,6 (IPK) em 2015 passaram para 89,5 (IPT) e 69,8 (IPK) em 2016, já a Supervia passou de 67,2 (IPT) e 20,7 (IPK) em 2015 passaram para 68,3 (IPT) e 21 (IPK). No geral o evento esportivo da Copa do Mundo de Futebol em 2014 não fica claro.

Quanto a relação entre a demografia e os índices de eficiência produtiva pode-se verificar uma correlação positiva, principalmente quanto a população da área metropolitana, $R^2=0,7646$. Uma questão importante e que serve para indicar estudos posteriores é que os fatores de produção, capital (carros) e trabalho (empregado) em setores de infraestrutura são considerados por alguns autores insumos não gerenciáveis, ou de baixa flexibilidade por dependerem de questões não controladas pela empresa. Logo, outros trabalhos podem testar esta hipótese e sugerir fatores gerenciáveis a serem estudados.

Agradecimentos: Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC) pelo apoio financeiro, ao Grupo de Pesquisa em Economia Aplicada (GEA) da UDESC ao qual foi possível desenvolver este trabalho ao fornecer suporte e estrutura física.

Referências

- Azadeh, A.; Salehi, V.; Kianpour, M. (2018) Performance evaluation of rail transportation systems by considering resilience engineering factors: Tehran railway electrification system. **Transportation Letters**, 10(1), p. 12–25, 2018.
- Banker, R. D.; Charnes, A.; Cooper, W. W. (1984) Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. **Management Science**, 30(9), p. 1078–92.
- Charnes, A.; Cooper, W. W.; Rhodes, E. (1978) Measuring the efficiency of Decision Making Units. **European Journal of Operational Research**, 2(6), p. 429–44.
- Chen, C. C. (2014) The operation of new transportation infrastructure and regional economic efficiency: a case study of high speed rail in western taiwan. **Regional and Sectoral Economic Studies**, 14(1), p. 179–94.
- Christopoulos, D.; Loizides, J.; Tsionas, E. G. (2001) Efficiency in European railways: not asinefficient as one might think. **Journal of Applied Economics**, 4(1), p. 63–88.
- Coelli, T.; Perelman S. (1999) A comparison of parametric and non-parametric distance functions: With application to European railways. **European Journal of Operational Research**, 117, p. 326–39.
- Constant, R. S.; Machado, L. G.; Mello, J. C. C. B. S. (2017) Análise da eficiência de trens metropolitanos através de um modelo DEA não radial. **XLIX Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**.
- Foroutan, S. L. F.; Bamdad, S. (2023) Efficiency measurement of railway passenger stations through network data envelopment analysis. **Research in Transportation Business & Management**, 46, p. 1-15. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2021.100767>
- Hilmola, O-P. (2007) European railway freight transportation and adaptation to demand decline: Efficiency and partial productivity analysis from period of 1980-2003. **International Journal of Productivity and Performance Management**, 56(3), p. 205–25. Doi: <https://doi.org/10.1108/17410400710731428>
- Hirooka, H. (2000) The Development of Tokyo's Rail Network. **Japan Railway and Transport Review**, 23, p. 22–31.
- Hsiao, B.; Shu, L-C.; Yuet, M-M.; Shen, L-K.; Wang, D-J. (2017) Performance evaluation of the Taiwan railway administration. **Annals of Operations Research**, 259, p. 119–56.
- Brasil. (2016) **Regiões Metropolitanas, Aglomerações Urbanas e Regiões Integradas de Desenvolvimento**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).
- Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA. (2015) **Plataforma Governança Metropolitana no Brasil**. Diretoria de Estudos e Políticas Regionais, Urbanas e Ambientais. Acessado em 18/11/2019: <http://brasilmetropolitano.ipea.gov.br/#dados>

Liu, H.; Zhang, Y.; Zhu, Q.; Chu J. (2017) Environmental efficiency of land transportation in China: A parallel slack-based measure for regional and temporal analysis. **Journal of cleaner production**, 142, p. 867–76.

Liu J. S.; Lu, L. Y. Y.; Lu, W-M.; Lin, B. J. Y. (2013) A survey of DEA applications. **Omega**, 41, p. 893–902. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2012.11.004>

Liu J. S.; Lu, L. Y. Y.; Lu, W-M. (2016) Research fronts in data envelopment analysis. **Omega**, 58, p. 33–45. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2015.04.004>

Mahmoudia, R.; Emrouznejadb, A.; Shetab-Boushehria, S-N.; Hejazia, S. R. (2018) The origins, development and future directions of data envelopment analysis approach in transportation systems. **Socio-Economic Planning Sciences**, accepted in 22 November 2018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.seps.2018.11.009>

Sameni, M. K.; Preston, J.; Sameni, M. K. (2016) Evaluating efficiency of passenger railway stations: A DEA approach. **Research in transportation business & management**, 20, p. 33–8.

ANTP. (2018) Relatório geral 2016. Sistema de Informações da Mobilidade Urbana da Associação Nacional de Transportes Público - Simob/ANTP.

_____. (2017) **Relatório geral 2015.** Sistema de Informações da Mobilidade Urbana da Associação Nacional de Transportes Público - Simob/ANTP.

_____. (2016) **Relatório geral 2014.** Sistema de Informações da Mobilidade Urbana da Associação Nacional de Transportes Público - Simob/ANTP.

_____. (2015) **Relatório geral 2013.** Sistema de Informações da Mobilidade Urbana da Associação Nacional de Transportes Público - Simob/ANTP.

_____. (2014) **Relatório geral 2012.** Sistema de Informações da Mobilidade Urbana da Associação Nacional de Transportes Público - Simob/ANTP.

Vaidya, O. S. (2014) Evaluating the performance of public urban transportation systems in India. **Journal of Public Transportation**, 17(4), p. 174–91.

Wanke, P.; Barros, C. P.; Figueiredo, O. (2016) Efficiency and productive slacks in urban transportation modes: A two-stage SDEA-Beta Regression approach. **Utilities Policy**, 41, p. 31–9.