

REPRESENTAÇÃO BI-DIMENSIONAL DOS AEROPORTOS BRASILEIROS: UMA NOVA METODOLOGIA PARA AVALIAR A EFICIÊNCIA DA INFRAESTRUTURA FÍSICA E OPERACIONAL COM A TEORIA DOS JOGOS

Mariana Rodrigues de Almeida

Alessandro Jackson Teixeira De Lima

Departamento de Engenharia de Produção
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Bruno Guimarães Torres

Departamento de Engenharia de Produção
Universidade Federal Fluminense

Wallace Giovanni Rodrigues Do Valle

Departamento de Engenharia de Produção
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

João Carlos Correia Baptista Soares de Mello

Departamento de Engenharia de Produção
Universidade Federal Fluminense

RESUMO

Este estudo utiliza a teoria dos jogos para avaliar a eficiência global e dos subprocessos dos processos dos aeroportos internacionais brasileiros com o uso da modelagem a Análise Envoltória de Dados em redes com a representação Bidimensional. Para o desenvolvimento da pesquisa, o estudo contempla 29 aeroportos distribuídos em diferentes regiões do país. Os dados foram coletados por meio do portal da Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária (Infraero). Essa modelagem foi constituída por dois estágios: (1) avaliação da eficiência estrutural física e (2) avaliação da eficiência operacional do sistema. A partir disso, calculou-se a eficiência global e dos estágios, que foram validadas quanto a sua unicidade por meio da teoria do jogo de barganha de Nash. Por fim, a utilização dessa modelagem forneceu resultados que sinalizaram que os aeroportos conseguem obter taxas mais altas de eficiência global, sobretudo no âmbito dos processos operacionais.

ABSTRACT

This study use game theory to evaluate the overall efficiency and subprocesses of Brazilian international airport processes with the use of Data Envelopment Analysis modeling in networks with Bidimensional representation. For the development of the research, the study contemplates 29 airports distributed in different regions of the country. The data were collected through the portal of the Brazilian Airport Infrastructure Company (INFRAERO). This modeling consisted of two stages: (1) evaluation of the physical structural efficiency and (2) evaluation of the operational efficiency of the system. From this, global and stage efficiency were calculated. The bargaining game model was applied to establish the unique optimal efficiency for the two-stages. Finally, the use of such modeling provided results that indicated that airports are able to achieve higher overall efficiency rates, especially in the context of operational processes.

1. INTRODUÇÃO

O transporte aéreo é um importante setor para prover o desenvolvimento da economia nacional e mundial, sobretudo com dado o suporte da infraestrutura em que oferta condicionando o deslocamento das cargas e fluxo de passageiros para diferentes lugares no globo. No entanto, essas operações logísticas requerem diferentes estratégias para atender os clientes e ainda visam aumentar a produtividade dos fluxos operacionais. Nesse caso, as companhias podem ser impactadas por diversos fatores, como, por exemplo: fatores climáticos ou técnicos das aeronaves. Quando são fatores não controláveis, não tem como realizar nenhum procedimento. Já em fatores controláveis, as companhias precisam realizar os gargalos de maneira rápida, pois caso contrário será multado o que impacta negativamente na organização. Esses fatores ocasionam gastos inesperados a fim de afetar a qualidade dos serviços das empresas. Com este ambiente, cada aeroporto apresenta diferentes padrões organizacionais o que se exige e requer

cada vez um compromisso com os clientes.

Nesse sentido, para identificar os gargalos do setor produtivo, requer investigar quais os processos produtivos estão ineficientes para que possa lhe oferecer um suporte na gestão organizacional baseado em métricas. A partir disso, o uso de metodologias quantitativas tem se ampliado cada vez mais em diferentes esferas. Aplicou-se Análise Envoltória de Dados que objetiva realizar um ranking para identificar quais são as unidades eficientes e ineficientes. Depois disso, ao avaliar os aeroportos mais eficientes, essas unidades podem servir como *benchmarking*, a fim de compilar as informações básicas necessárias a serem transferidas para outras regiões, de maneira a aumentar os rendimentos, ocasionando um ganho global.

A aplicabilidade desse modelo tem sido ampliada em diversas áreas o que se faz necessário o surgimento de novos modelos matemáticos, principalmente porque está cada vez mais complexo tentar capturar os efeitos da realidade por meio de modelagens.

Este artigo configura uma evolução gradual dos estudos realizados pelos autores (Wanke, 2013; Almeida, Mariano e Rebelatto, 2006) cuja pesquisa é direcionada para uma análise de eficiência dos aeroportos brasileiros com a modelagem de redes e utiliza de uma nova abordagem de Representação Bidimensional estendendo o trabalho desenvolvido por (Torres; Soares de Mello e Almeida, 2016) com aplicação do setor aéreo. Outra contribuição deste trabalho é conduzir aplicação do modelo centralizado com a proposta da barganha desenvolvido por Zhou *et al.* (2013)

A contribuição deste trabalho visa proporcionar uma melhor compreensão sobre eficiência dos aeroportos brasileiros internacionais a fim de introduzir um método para auxiliar na gestão e organização do setor de transporte. Devido às limitações de análises quantitativas da literatura sobre essa temática, o uso de uma técnica não paramétrica como a Análise Envoltória de Dados em Rede poderá fornecer uma metodologia para avaliar a eficiência da infraestrutura física e operacional dos aeroportos. A pesquisa também contribui para suprir a ausência de trabalhos sobre aeroportos internacionais brasileiros com o uso da Representação Bidimensional, o que possibilidade desenvolver, além de direcionar estratégias por parte dos gestores dos aeroportos e difunde melhor as políticas públicas de investimento do país.

O artigo está organizado em cinco tópicos. O primeiro apresentou a introdução deste estudo. O segundo tópico permeia a revisão de literatura sobre infraestruturas e a Análise Envoltória de Dados em rede e diferentes aplicações em aeroportos o que sistematiza um panorama de todos os trabalhos na temática. No terceiro tópico, discute-se o método desta pesquisa. No quarto tópico, são apresentados os resultados da avaliação de eficiência global e dos subprocessos dos aeroportos internacionais brasileiros no Brasil. Por fim, as considerações finais encerram o artigo com diferentes estratégias para consolidar este tipo de infraestrutura em países com baixo nível de investimento.

2. INFRAESTRUTURAS

A infraestrutura pode ser definida como o conjunto dos meios que pode viabilizar um serviço ou um bem público para sociedade sem exclusão da natureza do consumo. Yoshino e Nakahigashi (2000) definem a infraestrutura como o capital estocado que oferece serviços e produtos (ou bens) públicos para o bem estar social. Na visão do autor (Eberts, 1990), as infraestruturas são estruturas básicas para promover o crescimento e o funcionamento da economia, dado um desenvolvimento local, regional e nacional. O mercado, segundo Rodriguez (1998), utiliza dessas estruturas para maximizar sua lucratividade.

Mais precisamente, o trabalho desenvolvido por (Gramlich, 1994; Benitez, 1999) aponta que as infraestruturas são vetores para diminuir as disparidades econômicas, com o intuito de promover o desenvolvimento econômico e o social de uma região. Ainda assim, as

infraestruturas podem ser conceituadas como parte de um estoque de capital defasado e, por considerar o capital público como complementar, são atrativas para captar recursos estrangeiros. De acordo com Rodríguez (1998), ao longo da história econômica, a função e a evolução do capital privado têm sido analisadas em vários estudos, enquanto que o capital público pode figurar como secundário, possivelmente pelas dificuldades inerentes à sua análise. Logo, a literatura reafirma a grande importância da infraestrutura para o desenvolvimento econômico, sendo, assim, parte essencial de uma nação como a parceria em investimentos do setor privado e público.

Um dos seus principais papéis é favorecer estratégias para o desenvolvimento e crescimento econômico dos países. De acordo com Anderson et al. (2006), os investimentos públicos podem ter efeitos macroeconômicos e microeconômicos dependendo do tipo de cada infra-estrutura. Assim, um dado investimento pode contribuir mais que outros no desenvolvimento da economia. Sendo assim, Tatom (1993) avalia que as infraestruturas do setor público podem ter naturalmente um menor impacto na economia, como: prisões e prédios educacionais. Além disso, de acordo com Gramlich (1994), existem infraestruturas que apresentam difíceis medidas quantificáveis como emergência de hospital. Enquanto isso, estradas e pontes podem apresentar efeitos de benefícios econômicos e sociais maiores que os das demais infraestruturas.

3. ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS

Análise por Envoltória de Dados (DEA) é uma técnica baseada em programação linear, com o objetivo de medir o desempenho de unidades operacionais ou tomadoras de decisão (DMUs), quando a presença de múltiplas entradas e múltiplas saídas torna difícil realizar uma comparação. O objetivo da técnica DEA é construir um conjunto de referência convexo e as DMUs podem ser classificadas em unidades eficientes e ineficientes, tendo como referencial essa superfície formada. A Figura 1 ilustra esses conceitos da convexidade da curva.

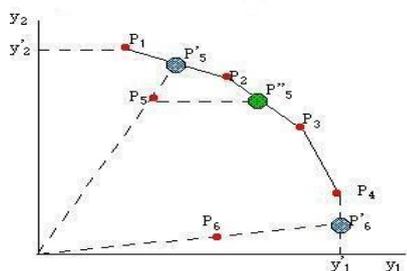


Figura 1: Fronteira de eficiência

Para implementar a metodologia DEA, adota-se cinco etapas: (1) Definição e seleção das DMU's a entrarem na análise; (2) Seleção das variáveis (*inputs* e *outputs*) que são relevantes e apropriadas para estabelecer a eficiência relativa das DMU's selecionadas; (3) Aplicação dos modelos DEA. Nesta fase é necessário definir além do modelo, qual a orientação desse modelo: se voltado para *input* ou *output*; (4) Calcula-se as medidas de eficiência e as metas para cada DMU ineficiente; e, (5) Determina-se o benchmark das DMUs ineficientes.

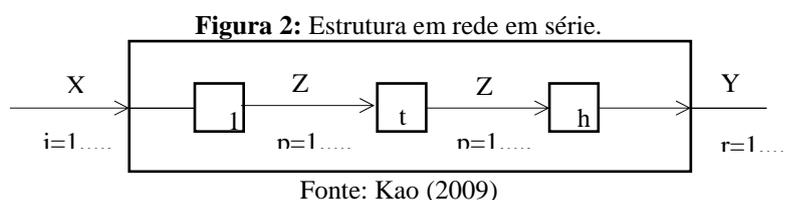
3.1. Modelos em rede

A premissa do modelo *Network* DEA (NDEA), é considerar que dentro da DMU, existem processos internos, cada um com um conjunto de inputs e outputs que são relacionados entre si. Os estudos clássicos visualizam os sistemas como um todo, ignorando os processos individuais dentro de um sistema (KAO, 2009). Para Farë e Grosskopf (2000), o sistema é classificado como uma caixa preta, na qual as entradas são transformadas em saídas e assim

medir a eficiência relativa.

O modelo NDEA mensura a eficiência do sistema (eficiência global) e eficiência dos estágios considerando a inter-relação dos processos no sistema e revelando as fontes de ineficiência. Logo, Kao (2009) recomenda uma decomposição da eficiência em que se calcula pelo produto da eficiência dos dois processos considerados pelo método multiplicativo com a média geométrica. Já Chen *et al.* (2009) sugerem a modelagem como a decomposição do método aditivo, pois o cálculo dos estágios intermediários é determinado pela média aritmética.

No modelo relacional em série de Kao (2009), cada etapa na série possui uma estrutura composta por processos em sequência. Neste modelo, a eficiência do sistema é o produto das eficiências dos processos. A Figura 2 ilustra a estrutura em rede em série. As entradas X_j são fornecidas para o estágio 1 (processo) para produzir produtos intermediários Z_p , estes que serão entradas para o próximo estágio a fim de produzir os produtos finais y_r .



Frente ao exposto, o modelo em rede (NDEA) também pode apresentar diferentes estruturas: 1 - série, este é uma modelagem muito utilizada na literatura; 2 - paralelo, apesar de não ser tão frequente na literatura, se torna muito interessante quando se tem processos distintos dentro da mesma organização; 3 - mista, quando se mescla os processos em série e paralelo ao mesmo tempo. Notavelmente, uma DMU apenas se classificará como eficiente se todos os seus subprocessos também forem eficientes, principalmente em modelos em série.

Além de diferentes tipos de modelos e estruturas de rede, a Network DEA apresenta algumas vertentes que particularizam a formulação matemática utilizada. Lozano, Moreno (2014) explicam que essa complexidade advinda de distintos problemas também é uma propriedade do NDEA, fato que resulta em uma necessidade de informações mais detalhadas em relação ao problema e variáveis que o compõe.

Para driblar as deficiências dos modelos tradicionais de decomposição da eficiência global, principalmente a não unicidade e flexibilidade das eficiências dos estágios, Despotis, Koronakos e Sotiros (2016) desenvolveram uma modelagem que compõe o desempenho global a partir das eficiências dos estágios, realizando o processo inverso dos modelos de decomposição de Chen *et al.* (2009) e Kao e Hwang (2008).

Por isso, emergiram outras vertentes eficazes para suprir as falhas identificadas nos modelos existentes e aperfeiçoá-los. A exemplo disso são os trabalhos de Yu e Shi (2014), Zhae Liang (2010) e Li (2017), que se fundamentaram nessa ideia de competição entre os estágios para fazerem uso do conceito de teoria dos jogos e alcançar os resultados desejados.

A teoria dos jogos desponta, então, como um meio de abordar a eficiência dos estágios de modo inflexível e justo, sem que isso afete diretamente o cálculo da eficiência global. O sistema com estrutura em rede pode apresentar multiplicidade na eficiência calculada para os estágios, ou seja, pode haver mais de uma eficiência “ótima”. Portanto, sugere-se que mais ênfase seja dada a essas abordagens teóricas de DEA, principalmente para modelar a avaliação da eficiência de processos em dois estágios (LI, 2017).

4. APLICAÇÃO DE TRABALHOS NO SETOR AÉREO

Nos últimos anos, alguns pesquisadores discutiram as eficiências operacionais das empresas

aeroportuárias e companhias aéreas. Barros e Peypoch (2009) estimaram o desempenho operacional de companhias aéreas da Europa utilizando DEA em dois estágios e concluíram que as empresas relativamente ineficientes adotassem um procedimento de gestão de referência para reavaliar a sua posição no mercado. Utilizando este mesmo método, baseado em folgas, Yu (2010) propôs que a eficiência da produção dos aeroportos taiwaneses pode não garantir a eficiência do serviço, avaliando também o excesso de insumos nos processos intermediários. Esse autor mediu o desempenho das operações de aeroportos considerando dois estágios: eficiência de produção (que gera produtos intermediários relacionados às capacidades de pistas de aterrissagem e de terminal) e de serviço.

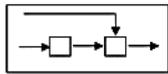
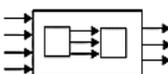
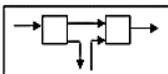
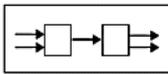
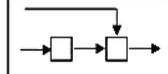
Zhu (2011) aplicou DEA em rede a partir de dois estágios com o objetivo de medir o desempenho de companhias aéreas nos Estados Unidos. Mais tarde, pesquisas em medição de desempenho em aeroportos tornaram-se constantes, exemplo disso é a utilização da ferramenta NDEA nos aeroportos do continente europeu e Sul- americano, que em maioria propõe uma modelagem por meio da mensuração da estrutura da edificação (Adler et al., 2013; Lozano et al., 2013; Wanke, 2013). Depois, corroborando com Yu (2010), Tavassoli et al. (2014) abordaram a técnica SBM-DEA em onze linha aéreas do Irã para medir a eficiência operacional e a eficácia do serviço, apresentando os princípios da entrada compartilhada.

Em Wanke (2013), a medição da eficiência em aeroportos brasileiros foi realizada através de um processo em dois estágios. No primeiro, os recursos de eficiência da infraestrutura física, como por exemplo: área terminal, espaços de estacionamento das aeronaves e pistas de aterrissagem estão relacionados ao número de pousos e decolagens por ano. No segundo estágio, estes dados de pousos e decolagens são usados como determinantes do número de passageiros por ano, bem como da taxa de transferência de carga.

Em Lozano et al. (2013), realizaram-se uma modelagem incluindo variáveis indesejáveis o que tornou o seu trabalho inédito para o período, pois não havia se utilizado até o momento esta categoria. Esses autores desenvolveram uma avaliação do desempenho das operações de aeroportos através de um modelo *network* DEA que considera dois processos (movimento de aeronaves e carregamento de aeronaves) com dois outputs finais (movimento anual de passageiros e manuseio anual de carga), um produto intermediário (movimentos do tráfego de aeronaves) e dois outputs indesejáveis (número de voos atrasados e atrasos de voos acumulados).

Analisando estes trabalhos, pôde-se observar como semelhança entre eles que a avaliação da eficiência em transportes aéreos com a utilização de modelos em rede de análise envoltória de dados utiliza-se, geralmente, de dois estágios para realizar a modelagem. Além disso, são comumente usadas variáveis relacionadas à capacidade e à qualidade dos serviços, exibido isto na Tabela 1.

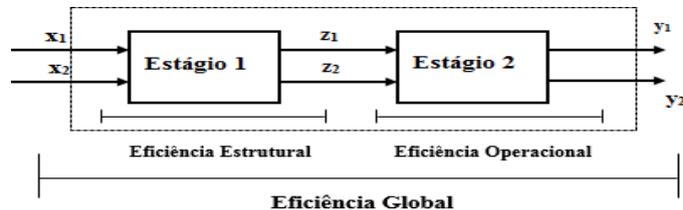
Tabela 1: Sistematização da literatura dos trabalhos na área de aeroportos com as diferentes tipologias de rede

Autor (es) e ano	Modelos	DMU's	Objetivo do estudo	Inputs	Produtos intermediários	Outputs	Tipologia de Rede
Barros & Peypoch (2009)	DEA em dois estágios	29 companhias aéreas europeias.	Avaliar o desempenho operacional das companhias aéreas.	Número de funcionários; custo operacional; Número de aeronaves.	Tendência; População; Baixo custo; Tripulação; Número de companhias aéreas.	Receita por passageiro km; EBIT (lucro antes de juros e impostos).	
Yu (2010)	SBM-DEA	15 aeroportos de um grupo de aeroportos em Taiwan.	Propor um modelo teórico baseado em folgas que permite interações multiprocessuais.	Número de funcionários; área da pista de decolagem; área de pátio e área do terminal.	Lado ar: Capacidade de pista disponível para movimentação da aeronave (voo e decolagem). Lado terra: Capacidade do terminal, medida em número de passageiros e quantidade de carga.	Número de movimentos de aeronaves. Número de passageiros e toneladas de carga.	
Zhu (2011)	NDEA em dois estágios	21 companhias aéreas dos EUA.	Medir o desempenho destas companhias.	Custo por assento disponível; Salários e benefícios por assento disponível; gasto de combustível por assento disponível; Custo de combustível e Número de galões de combustível usados.	Fator de carga e tamanho da frota.	Receita por passageiro em milhas.	
Wank (2013)	NDEA	63 aeroportos do Brasil.	Analisar a relação entre as operações dos aeroportos com as perspectivas de curto e longo prazo de sua infraestrutura.	Área do terminal (m ²); Espaços de estacionamento de aeronaves (m ²); Número de pistas de decolagem	Desembarque e decolagens por ano.	Número de passageiros por ano; Taxa de transferência de carga (kg/ ano).	
Adler et al. (2013)	DEA e NDEA	43 aeroportos europeus.	Desenvolver uma metodologia adaptada ao benchmark a partir de uma perspectiva gerencial baseando-se no custo e receita.	Custos com pessoal; Custos de materiais, terceirização e outros; Capacidade de pista declarada; Capacidade do terminal.	Número de passageiros internacionais; Número de passageiros domésticos; Toneladas de carga carregada e descarregada; Número de movimentos das aeronaves.	Receitas não aeronáuticas e Receitas aeronáuticas.	

5. MÉTODO DA PESQUISA

Neste artigo, propõe-se uma avaliação quantitativa da eficiência dos aeroportos internacionais brasileiros na fase de operação. A pesquisa contempla 29 aeroportos e os dados são referentes ao ano de 2017. A fim de identificar os fatores que impactam no desempenho dos aeroportos estabeleceu-se um modelo relacional network DEA, segmentado em duas fases. Na primeira, avalia-se o desempenho dos recursos da estrutura de cada aeroporto, enquanto na segunda etapa mensura-se a eficiência referente ao nível operacional, dada a capacidade instalada disponibilizada. Com esse modelo, calculou-se a eficiência individual de cada fase, além da eficiência global do sistema, conforme esquematizado na Figura 3.

Figura 3: Modelagem matemática para o setor aéreo.



O processo 1 (eficiência estrutural) usa alguma quantidade de X_1 , X_2 para produzir Z_1 , Z_2 . O processo 2 (eficiência operacional) usa certas quantidades de Z_1 , Z_2 , para produzir Y_1 , Y_2 . Cada parte do subprocesso fará parte do próximo processo. Finalmente, a soma das saídas do processo, Y_1 , Y_2 é igual à saída do sistema. Neste modelo, representamos a entrada i do processo t , $t = 1, 2$, para cada DMU j . A soma das entradas dos dois processos, $X(1) + X(2)$, é igual à entrada de o sistema X_{ij} , $i = 1, 2$, para $j = 1, \dots, 29$.

$$Ek = \max \quad u_1 Y_{1k} + u_2 Y_{2k} \quad (3)$$

s.t.

$$v_1 X_{1k} + v_2 X_{2k} = 1 \quad (3.1)$$

$$(u_1 Y_{1j} + u_2 Y_{2j}) - (v_1 X_{1j} + v_2 X_{2j}) \leq 0, j=1, \dots, 29 \quad (3.2)$$

$$(u_1 Y_{1j} + u_2 Y_{2j}) - (w_1 Z_{1j} + w_2 Z_{2j}) \leq 0, j=1, \dots, 29 \quad (3.3)$$

$$(w_1 Z_{1j} + w_2 Z_{2j}) - (v_1 X_{1j} + v_2 X_{2j}) \leq 0, j=1, \dots, 29 \quad (3.4)$$

$$u_1, u_2, v_1, v_2, w_1, w_2, > \varepsilon$$

Em que:

u_i : Utilidade do *output* i ; v_j : Utilidade do *input* j ; x_{jk} : Quantidade do *input* j da DMU k ; y_{ik} : Quantidade do *output* i da DMU k ; z : Quantidade de variáveis intermediárias; m : Número de *outputs*; n : Número de *inputs*. u : Coeficiente de retorno à escala dos *outputs*; v : Coeficiente de retorno à escala dos *inputs*; Ek : Eficiência.

Para cálculo e validação dos resultados subsequentes do sistema em rede, assume-se a recomendação de Kao e Hwang (2008) e Zhou *et al.* (2013), dentre outros autores, que sugerem a maximização das eficiências de cada estágio, conforme equações do Quadro 1. Isso ocorre porque se assume que os pesos ideais podem não ser exclusivos, isto é, pode haver mais de um valor de eficiência ótima para os estágios. Após a maximização, identificam-se também as eficiências mínimas para constituir um limite superior e inferior que abrigue a eficiência ótima e única por estágio.

Quadro 1: Eficiências máximas e mínimas por estágio

Estágio 1	Estágio 2
Eficiência máxima	
$e_0^{1+} = \max \sum_{b=1}^c w_b z_{b0}$ <p>s.t.</p> $\sum_{i=1}^m v_i x_{i0} = 1$ $\sum_{r=1}^s u_r y_{r0} = e_0^{\text{centralized}}$ $\sum_{b=1}^c w_b z_{bj} \leq \sum_{i=1}^m v_i x_{ij}$ $\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} \leq \sum_{b=1}^c w_b z_{bj}$ $v_i \geq \varepsilon, i = 1, \dots, m$ $w_b \geq \varepsilon, b = 1, \dots, c$ $u_r \geq \varepsilon, r = 1, \dots, s$	$e_0^{2+} = \max \sum_{r=1}^s u_r y_{r0}$ <p>s.t.</p> $\sum_{b=1}^c w_b z_{b0} = 1$ $\sum_{r=1}^s u_r y_{r0} = e_0^{\text{centralized}} \sum_{i=1}^m v_i x_{i0}$ $\sum_{b=1}^c w_b z_{bj} \leq \sum_{i=1}^m v_i x_{ij}$ $\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} \leq \sum_{b=1}^c w_b z_{bj}$ $v_i \geq \varepsilon, i = 1, \dots, m$ $w_b \geq \varepsilon, d = 1, \dots, c$ $u_r \geq \varepsilon, r = 1, \dots, s$
Eficiência mínima	
$e_0^{1-} = e_0^{\text{Centralizado}} / e_0^{2+}$	$e_0^{2-} = e_0^{\text{Centralizado}} / e_0^{1+}$

A partir dessa formulação matemática, dado que: z_{b0} é classificado como a quantidade de produto intermediário b e w_b descrito como o multiplicador virtual correspondente. Zhou *et al.* (2013) complementaram o modelo em rede de Kao e Hwang (2008) ao aplicar a teoria de Nash (1950, 1953) e desenvolver o jogo de barganha para cálculo de uma eficiência única e justa para os estágios. Isso ocorre porque em alguns casos há uma disputa entre as etapas de um sistema para obtenção do melhor valor de eficiência. Zhou *et al.* (2013) desenvolveram um método simplificado que utilizam essas eficiências mínimas e máximas para determinar uma única eficiência ótima, evitando as flutuações do modelo. A dissecação da eficiência ideal é apresentada como o produto principal da pesquisa de Zhou *et al.* (2013), em que se pode calcular uma eficiência justa para os estágios por meio das Equações 1 e 2.

$$e_1^* = \sqrt{e_1^- e_1^+} \quad (1)$$

$$e_2^* = \sqrt{e_2^- e_2^+} \quad (2)$$

As operações aeroportuárias estão tipicamente envolvidas nos negócios aeronáuticos, devido a sua função produção. Assim, as atividades operacionais das aeronaves podem incluir a disponibilidade da área do terminal e do pátio de aeronaves para a movimentação dos aviões, bem como a movimentação de carga e correio (Adler *et al.*, 2013; Lozano *et al.*, 2013; Wanke, 2013; Yu, 2010). As variáveis utilizadas para representar esta operacionalidade foram designadas desta forma:

- *Terminal de passageiros* m^2 (x_1): instalação aeroportuária dotada de facilidades para atendimento, embarque, desembarque e liberação o passageiro do transporte aéreo.
- *Pátio de aeronaves* m^2 (x_2): área definida em um aeródromo em terra com o propósito de acomodar aeronaves para embarque e desembarque de passageiros, carregamento ou descarregamento de cargas, correio, reabastecimento de combustível, estacionamento ou manutenção.
- *Movimentação de aeronaves* (z_1): soma dos pousos com as decolagens por tipo de tráfego, na qual não considera as movimentações das aeronaves militares.
- *Trânsito de carga aérea+correios* (z_2): fluxo interno do aeroporto da carga aérea e a mala postal, somados.
- *Movimentação de passageiros* (y_1): quantitativo de passageiros embarcados (passageiros de origem mais passageiros em conexão) somado ao quantitativo de desembarcados (passageiros de destino mais passageiros em conexão).
- *Movimentação de carga + correio* (y_2): quantidade de carga aérea que constituísse a carga dos porões das aeronaves somada a mala postal.

Na Tabela 2 são exibidos os dados coletados dos aeroportos internacionais do Brasil administrados pela Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária (INFRAERO). A partir desses dados, observa-se que existem aeroportos que não realizam transporte de cargas aéreas para o período analisado, o que torna interessante realizar este tipo de investigação.

Tabela 2: Estatísticas descritivas das variáveis de entrada e saída dos aeroportos / 2016

	Aerportos (DMU's)	Variáveis de entrada		Variáveis intermediárias		Variável de saída	
		(x1)	(x2)	(z1)	(z2)	(y1)	(y2)
		Terminal de passageiros m²	Pátio de aeronaves m²	Movimentação de aeronaves	Trânsito de carga aérea+ correios	Movimentação de passageiros	Movim. de carga + correio
1	SBBE	33.255,17	107.660	40.421	3.636.581	3.282.513	22.365
2	SBBV	4.798	68.490	5.972	83.601	291.163	696
3	SBCG	7.215	65.468	19.466	568.495	1.459.007	4.490
4	SBCP	540	13.300	19.387	9.981	194.487	13
5	SBCR	2.597	61.640	1.406	0	36.678	30
6	SBCT	11.2176	125.237	66.386	11.546.280	6.385.838	30.504
7	SBCY	9.354,25	51.756	51.292	2.000.970	2.840.559	9.760
8	SBCZ	3.500	17.440	5.159	0	80.081	92
9	SBEG	97.258,55	124.100	37.951	7.077.315	2.651.452	11.4023
10	SBFI	24.188,02	50.102	18.402	66.630	1.851.116	521
11	SBFL	9.440	20.187	44.250	873.880	3.536.435	8.481
12	SBFZ	35.660	134.767	53.133	8.759.501	5.706.489	46.054
13	SBJP	9.090	34.866,7	13.855	442.113	1.418.380	2.930
14	SBMO	22.000	83.445,89	19.748	228.847	1.995.069	2.177
15	SBMQ	5.382,83	42.476	9.488	293.731	568.873	3.064
16	SBNF	5.200	20.276	19.273	385.175	1.471.037	2.107
17	SBPA	5.310	142.750	79.738	3.002.245	7.648.743	25.120
18	SBFB	2.900	1.296	1.335	0	10.561	8
19	SBPK	1.098	16.200	1.745	0	38.238	32
20	SBPL	3.093	37.530,26	6.211	130.334	447.539	3.661
21	SBPP	1.075	10.164	2.449	0	3.744	0
22	SBPV	7.875	17.550	14.352	277.432	840.026	1.932
23	SBRF	52.000	110.526	69.108	5.248.415	6.811.676	40.479
24	SBSJ	864	16.931,30	10.912	12.471	56.709	49
25	SBSL	1.0700	48.687	18.880	827.464	1.320.847	6.460
26	SBSN	1.982	57.780,00	12.471	296.200	490.017	3.356
27	SBSV	69.750	25.5191,26	79.484	2.588.525	7.526.358	30.076
28	SBUG	800	10.634.44	820	0	29.613	12
29	SBVT	17.000	44.400	46.737	4.007.116	3.120.166	22.501

6. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O modelo NDEA foi aplicado aos 29 aeroportos internacionais do Brasil para determinar a eficiência relativa global de suas operações. A Tabela 3 exibe as pontuações da eficiência global e dos estágios, para todas as DMU's, registrando o *ranking* destes aeroportos.

Tabela 3: Avaliação de eficiência com a abordagem de Nash

DMU	Estágio 1			Estágio 2			Network DEA	$e_1^{+} Nash$	$e_2^{+} Nash$
	Mín	Ef. Global	Max	Mín	Ef. Global	Max			
28	SBUG	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
11	SBFL	1,0000	1,0000	1,0000	0,8016	0,8016	0,8016	1,0000	0,8016
9	SBEG	0,4931	0,4931	0,4931	1,0000	1,0000	0,4931	0,4931	1,0000
29	SBVT	0,6397	0,8181	0,8181	0,5230	0,5230	0,6688	0,4279	0,7235
23	SBRF	0,3059	0,4772	0,4772	0,6267	0,6267	0,9777	0,2991	0,3821
16	SBNF	0,3882	0,3887	0,3887	0,7504	0,7504	0,7513	0,2917	0,3885
17	SBPA	0,2648	0,2994	0,2994	0,8415	0,8415	0,9513	0,2519	0,2816
12	SBFZ	0,2507	0,5610	0,5610	0,4469	0,4469	1,0000	0,2507	0,3750
7	SBCY	0,4509	0,5109	0,5109	0,4851	0,4851	0,5497	0,2479	0,4800
22	SBPV	0,3728	0,3728	0,3728	0,5863	0,5863	0,2186	0,3728	0,5863
6	SBCT	0,2270	0,6651	0,6651	0,3055	0,3055	0,8951	0,2032	0,3886
10	SBFI	0,1659	0,1659	0,1659	1,0000	1,0000	1,0000	0,1659	1,0000
13	SBJP	0,1654	0,1654	0,1654	1,0000	1,0000	1,0000	0,1654	1,0000
1	SBBE	0,2044	0,3358	0,3358	0,4896	0,4896	0,8042	0,1644	0,2620
25	SBSL	0,1824	0,2056	0,2056	0,7152	0,7152	0,8062	0,1471	0,1937
27	SBSV	0,1397	0,1467	0,1467	0,9141	0,9141	0,9601	0,1341	0,1432
3	SBCG	0,1340	0,1435	0,1435	0,7009	0,7009	0,7504	0,1006	0,1387
14	SBMO	0,0957	0,0958	0,0958	0,9993	0,9993	1,0000	0,0957	0,9997
20	SBPL	0,0751	0,0751	0,0751	1,0000	1,0000	0,0751	0,0751	1,0000
15	SBMQ	0,1090	0,1090	0,1090	0,6426	0,6426	0,6426	0,0700	0,1090
4	SBCP	0,2920	0,6473	0,6473	0,0999	0,0999	0,2215	0,0647	0,4347
26	SBSN	0,1027	0,1027	0,1027	0,4928	0,4928	0,0506	0,1027	0,4928
18	SBPB	0,1258	0,4642	0,4642	0,0788	0,0788	0,2909	0,0366	0,2416
2	SBBV	0,0383	0,0394	0,0394	0,4936	0,4936	0,5084	0,0194	0,0388
8	SBCZ	0,0226	0,1220	0,1220	0,1547	0,1547	0,8357	0,0189	0,0525
24	SBSJ	0,1234	0,2839	0,2839	0,0517	0,0517	0,1190	0,0147	0,1872
19	SBPK	0,0120	0,0471	0,0471	0,2183	0,2183	0,8594	0,0103	0,0237
5	SBCR	0,0026	0,0101	0,0101	0,2599	0,2599	1,0000	0,0026	0,0501
21	SBPP	0,0372	0,1035	0,1035	0,0152	0,0152	0,0423	0,0016	0,0621

Observando as Tabelas 2 e 3, percebe-se uma tendência clara para os aeroportos que se apresentaram como ineficientes. Há um demasiado decréscimo relativo às taxas de eficiência do estágio 1 (E^1_k) para o estágio 2 (E^2_k). Isso pode ser explicado devido à concentração de atividades na movimentação de aeronaves e o trânsito de carga e de correio, isto é, atividades chaves para a função produção. Todavia, a disparidade da movimentação de passageiros é perceptível na quantidade de movimentação de carga. Portanto, pode comprovar empiricamente que as premissas gerenciam e afetam a eficiência das atividades aeroportuárias (Chen et al., 2017; Liu, 2017; Yu et al., 2017).

Nota-se que o aeroporto de Uruguaiiana (SBUG) obteve um escore satisfatório para designar-se como a mais eficiente em comparação com os demais, justifica-se isso pelo comportamento dos dados obtidos no ano de referência. Vale ressaltar que eficiência é diferente de produtividade, porém a produtividade poderá afetar a eficiência. Significa que os aeroportos evidenciados como ineficientes podem ter alcançado sua produtividade projetada, porém o cenário estratégico pode estar em conflito.

Foi possível identificar grandes oscilações nos resultados obtidos entre as eficiências mínimas, centrais e máximas dos subprocessos estabelecidos, conforme a Tabela 3. Assim, com o uso da teoria dos jogos com abordagem de barganha de Nash, determinou-se os valores de eficiência mais justa para os estágios 1 e 2, conforme apresentam as duas últimas colunas da referida Tabela 3, respectivamente. Nessa perspectiva, SBUG e SBFL foram classificados como eficientes no primeiro estágio. Já os aeroportos SBUG, SBPL, SBFI e SBJP foram classificados como eficientes no segundo estágios.

A Figura 4 apresenta a fronteira de eficiência para o primeiro e segundo estágio, em que as DMU's eficientes estão localizadas sob a fronteira. No primeiro estágio, há uma dispersão uniforme tanto para o *input* virtual quanto para o *output* virtual. As DMU's distribuídas acima da fronteira são, teoricamente, denominadas como supereficientes, entretanto essas posições no plano cartesiano são oriundas da disparidade dos dados não modificados. No estágio 2, nota-se o comportamento distribuído das DMU's ao longo do eixo do *input* virtual, conforme a Figura 5.

Figura 4: Representação bidimensional dos estágios 1
Representação Bidimensional e¹ centralizado

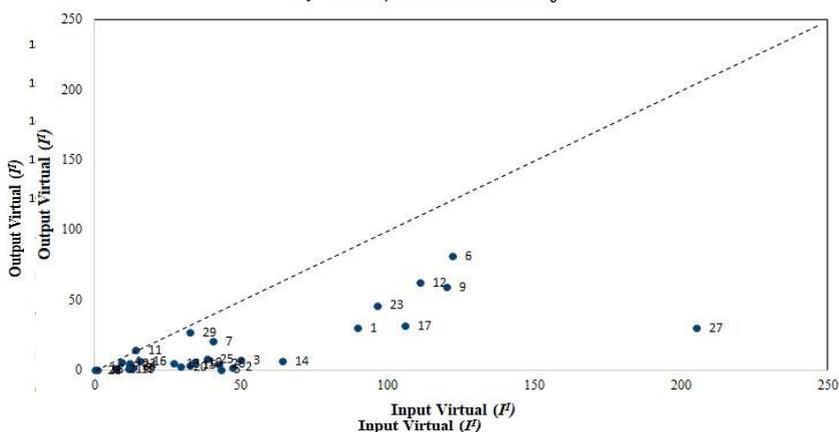


Figura 5: Representação bidimensional dos estágios 2

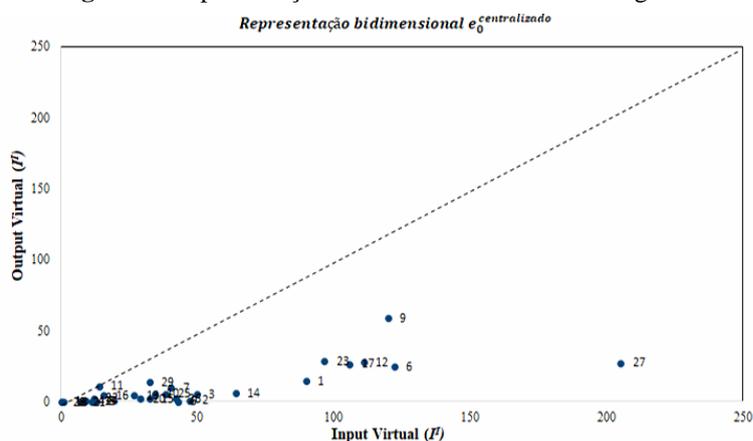
Considerando a infraestrutura física (estágio 1), além do aeroporto de Uruguaiiana, o aeroporto de Florianópolis (SBFL) obtiveram um nível de eficiência coerente em detrimento às taxas obtidas em sua eficiência global e do estágio dois, na qual não absorveu variações. No entanto, em se tratando da eficiência operacional, o aeroporto de Manaus (SBEG), sendo o único da região norte, obteve um peso satisfatório de eficiência. De acordo com os dados da Tabela 3,

seus pesos ótimos para a eficiência global e no estágio 1 não ultrapassaram 49%, menos da metade de sua eficiência no subprocesso dois.

Na região Nordeste, o aeroporto de Maceió (SBMO) atingiu índices estáticos nas eficiências que precedem o estágio dois. A participação desse aeroporto em movimentação de aeronaves, por exemplo, na rede da INFRAERO em 2016, foi apenas 1,25%, segundo o Anuário Estatístico Operacional (2017). Em contrapartida, os aeroportos de João Pessoa (SBJP) e Petrolina (SBPL), atingiram percentuais menores ao do anterior, porém o primeiro conquistou uma posição superior ao de João Pessoa. Dessa forma, o percentual de produtividade pode não caracterizar a eficiência.

Na análise de eficiência global, representada na Figura 6, é possível observar que a DMU eficiente, SBUG, está ente ao ponto nulo devido a escala de seus dados comparando com as demais DMU's. Verifica-se, também, que a DMU onze, na qual posiciona-se na segunda colocação está próxima à fronteira, o que significa que, sendo sua taxa de eficiência 80% poderá atingir seu ponto ótimo. As demais unidades dispersam ao eixo x identificando-se dessa forma os possíveis *outliers*.

Figura 6: Representação bidimensional da eficiência global



7. CONCLUSÃO

O objetivo deste estudo foi realizar uma análise da eficiência relativa dos aeroportos internacionais do Brasil. Utilizou-se a ferramenta Análise Envoltória de Dados em rede (NDEA) em dois estágios a fim de atribuir pesos relativos a cada DMU e da representação bidimensional para os estágios internos.

O estudo fornece dados relacionados às operações de movimentações de aeronaves, trânsito de carga e correio e sua movimentação, bem como a movimentação de passageiros dos aeroportos que operam com voos internacionais. A sua contribuição é a análise comparativa das DMU's em que a mais eficiente seja *benchmark* para as demais, podendo assim rever suas disposições físicas, princípios operacionais, e premissas estratégicas.

Identificou-se o índice de eficiência operacional dos aeroportos internacionais. Apontou-se uma DMU eficiente, na qual se situa na região Sul, o Aeroporto Internacional de Uruguaiana. Pôde-se identificar também, que os maiores índices concentram-se no estágio 1, onde duas DMU's foram eficientes. Enquanto isso, no estágio 2, seis DMU's foram eficientes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adler, N.; Liebert, V.; Yazhemsky, E. (2013). Benchmarking airports from a managerial perspective. *Omega*

- (United Kingdom). *Volume 41, Issue 2*, April 2013, Pages 442-458.
- Almeida, M. R.; Mariano, E. B.; Rebelatto, D. N. (2006). Análise De Eficiência Dos Aeroportos Internacionais Brasileiros. *Gestão da produção on line*, edição especial.
- Barros, C. P.; Peypoch, N. (2009). An evaluation of European airlines' operational performance. *International Journal of Production Economics*, 122(2), 525–533.
- Chang, Y. T.; Kevin Park, H.; Zou, B.; Kafle, N. (2016). Passenger facility charge vs. airport improvement program funds: A dynamic network DEA analysis for U.S. airport financing. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Volume 88, April 2016, Pages 76-93
- Chen, C-J.; Wua, H-L.; Lin, B-W. Evaluating the development of high-tech industries: Taiwan's science park. *Technological Forecasting & Social Change*, v. 73, p. 452–465, 2006.
- Chen, K.; Guan, J. Measuring the Efficiency of China's Regional Innovation Systems: Application of Network. *Regional Studies*, v. 46, ed. 3, p. 355–377, 2012.
- Farrell, M. J. (1957). The measurement of productive efficiency. *Journal of the Royal Statistical Society*, v. 120, ed. 3, p. 253–281.
- INFRAERO (2017). Anuário Estatístico Operacional. Brasília. Disponível em:<http://www4.infraero.gov.br/media/642485/anuario_2016.pdf>.
- Kao, C. (2009). Efficiency measurement for parallel production systems. *European Journal of Operational Research*, v. 196, ed. 3, p. 1107–1112.
- Liu, D. (2016). Measuring aeronautical service efficiency and commercial service efficiency of East Asia airport companies: An application of Network Data Envelopment Analysis. *Journal of Air Transport Management*. Volume 52, April 2016, Pages 11-22.
- Liu, D. (2017). Evaluating the multi-period efficiency of East Asia airport companies. *Journal of Air Transport Management*, vol. 59(C), pages 71-82.
- Lozano, S.; Gutiérrez, E.; Moreno, P. (2013). Network DEA approach to airports performance assessment considering undesirable outputs. *Applied Mathematical Modelling*. Volume 37, Issue 4, 15 February 2013, Pages 1665-1676.
- Mallikarjun, S. (2015). Efficiency of US airlines: A strategic operating model. *Journal of Air Transport Management*, 43, 46–56.
- Shao, Y.; Sun, C. (2016). Performance evaluation of China's air routes based on network data envelopment analysis approach. *Journal of Air Transport Management*. Volume 55, August 2016, Pages 67-75.
- Tavassoli, M.; Faramarzi, G. R.; Farzipoor Saen, R. (2014). Efficiency and effectiveness in airline performance using a SBM-NDEA model in the presence of shared input. *Journal of Air Transport Management*. Volume 34, January 2014, Pages 146-153
- Torres, B.; Soares de Mello, J. C.; Almeida, M. R. (2016). Representação bidimensional do Network DEA: um estudo de caso com avaliação de docentes. Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional (SBPO), *Anais...*
- Wanke, P. F. (2013). Physical infrastructure and flight consolidation efficiency drivers in Brazilian airports: A two-stage network-DEA approach. *Journal of Air Transport Management*, 31, 1–5.
- Yu, M. M. (2010). Assessment of airport performance using the SBM-NDEA model. *Omega*. Volume 38, Issue 6, December 2010, Pages 440-452.
- Zhu, J. (2011). Airlines Performance via Two-Stage Network DEA Approach. *Journal of CENTRUM Cathedra*, 4(2), 260–269.