

**A EFICIÊNCIA AEROPORTUÁRIA BRASILEIRA SOB A ÓTICA DE
MODELOS DEA EM REDES CONSIDERANDO INTERAÇÕES
ESTRATÉGICAS**

Felipe Alves Mendes Da Silva

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - PPGE
Universidade Federal de Pernambuco, Recife/PE, Brazil
felipe.alvess@ufpe.br

Francisco de Sousa Ramos

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – PPGE
Departamento de Economia /LabGRC
Universidade Federal de Pernambuco, Recife/PE, Brazil
francisco.ramos@ufpe.br

RESUMO

O presente estudo tem como objetivo avaliar a eficiência de aeroportos brasileiros administrados pela Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária (INFRAERO) utilizando uma abordagem conjunta de Análise Envoltória de Dados (DEA) e Teoria dos Jogos. Para realizar essa avaliação, conduziu-se um estudo com uma amostra de 31 aeroportos distribuídos em diferentes regiões do país, com dados referentes ao ano de 2019. O método proposto está estruturado com um modelo de rede de dois estágios com jogo não cooperativo. Nesta abordagem um dos estágios é considerado como líder e sua eficiência é otimizada primeiro, enquanto a eficiência do outro estágio é posteriormente otimizada sob esta condição. Os escores de eficiência também foram obtidos através do jogo centralizado. De acordo com os resultados, o aeroporto de Congonhas é globalmente eficiente. Mas de modo geral, a amostra apresenta uma baixa eficiência global e um melhor desempenho é obtido considerando o segundo estágio como líder.

PALAVRAS CHAVE. Análise Envoltória de Dados, Jogos não cooperativos, Aeroportos.

Tópicos: DEA- Análise Envoltória de Dados, Eficiência Aeroportuária, Teoria dos Jogos.

ABSTRACT

The present study aims to evaluate the efficiency of Brazilian airports managed by the Brazilian Airport Infrastructure Company (INFRAERO) using a joint approach of Data Envelopment Analysis (DEA) and Game Theory. To carry out this evaluation, a study was conducted with a sample of 31 airports distributed in different regions of the country, with data for the year 2019. The proposed method is structured with a two-stage network model with non-cooperative play. In this approach, one of the stages is considered the leader, and its efficiency is optimized first, while the efficiency of the other stage is later optimized under this condition. Efficiency scores were also obtained through the centralized game. According to the results, Congonhas airport is globally efficient. But in general, the sample has low overall efficiency, and a better performance is obtained considering the second stage as the leader.

KEYWORDS. Data Envelopment Analysis, Non-cooperative Games, Airports.

Paper topics: DEA- Data Envelopment Analysis, Airport Efficiency, Game Theory.

1. Introdução

Em um mundo cada vez mais globalizado é notória a velocidade de interligação entre as cidades e o mercado. Nesse viés, o transporte aéreo é um dos principais tipos de modais utilizados no mundo, sendo parte essencial da infraestrutura de transportes de qualquer país, pois amplia a integração entre regiões distantes e facilita as relações nacionais e internacionais, colaborando com o desenvolvimento da economia nacional e mundial [Pacagnella junior et al. 2020].

De acordo com o anuário de transporte aéreo da Agência Nacional de Aviação Civil [Anac 2022] a quantidade de passageiros transportados no mercado doméstico e internacional no Brasil alcançou a marca de 119,4 milhões em 2019, sendo o maior número já registrado na série histórica criada em 1972. Diante desse contexto, os aeroportos são considerados importantes instrumentos para viabilizar economicamente e tecnicamente o transporte aéreo doméstico ou internacional, tanto de mercadorias quanto de pessoas, em que, sua infraestrutura permite receber, armazenar e enviar mercadorias para o destino correto, bem como, o atendimento e manuseio de passageiros [Pacagnella junior et al. 2020].

Entretanto, esse crescimento acentuado no número de passageiros registrados nos últimos anos no Brasil, não é acompanhado por investimentos na infraestrutura dos aeroportos, o que tem gerado um grave problema para os serviços ofertados nos aeroportos devido à falta de aumento na capacidade operacional [Silva 2018]. Nesse contexto, [Wanke 2013] enfatiza que embora haja evidências de que os aeroportos administrados pelo setor público são menos eficientes do que aeroportos concedidos a iniciativa privada, a falta de investimentos por parte do governo, juntamente com a falta de avaliação sobre a eficiência dos aeroportos públicos colaboram com o aumento de gargalos operacionais e deficiência de capacidade.

Nessa perspectiva, a Análise Envolvória de Dados (*do inglês, Data Envelopment Analysis, DEA*) surge como uma das técnicas mais eficazes para medir a eficiência relativa de um conjunto de unidades de tomada de decisão (DMUs) com múltiplas entradas e saídas [Kao 2016]. No entanto, os modelos DEA tradicionais consideram as DMUs como “caixas pretas” e desconsideram a estrutura interna da DMU [Akbarian 2021].

Para sanar essa lacuna, os modelos DEA em rede consideram a estrutura interna DMU, permitindo uma análise mais detalhada [Lozano 2015]. Um dos modelos DEA em rede consideram a estrutura interna em dois estágios, em que um conjunto de medidas intermediárias conecta os dois estágios [Fang 2020].

No entanto, os modelos DEA para DMUs com estrutura ou processo de rede de dois estágios usam a abordagem DEA padrão, que não aborda possíveis conflitos entre os dois estágios decorrentes das medidas intermediárias [Du et al. 2011]. Nessa perspectiva, a abordagem da teoria dos jogos é bastante significativa para analisar os sistemas de dois estágios, o que pode ajudar os tomadores de decisão a identificar o subprocesso individual ineficiente e as direções de ajuste para cada uma das DMUs [Ma et al. 2014].

Mediante o exposto, o presente estudo tem como objetivo avaliar a eficiência de 31 aeroportos administrados pela Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária (INFRAERO) através da análise envoltória de dados em rede de dois estágios sob a ótica do modelo de jogo não cooperativo e centralizado. A amostra corresponde a 75,61% do total de aeroportos administrados pela INFRAERO. Desse modo, esse valor demonstra a relevância da amostra em representar o setor de aeroportos públicos brasileiro.

Para atingir tal objetivo, o corrente estudo está estruturado em cinco seções. Na seção 2, será apresentada uma breve revisão da literatura com os aspectos conceituais da técnica e estudos correlacionados. Em seguida, na seção 3, são expostos o método proposto, a coleta e análise dos dados. Posteriormente, os resultados obtidos são discutidos na seção 4. Por fim, na seção 5 serão apresentadas as considerações finais.

2. Revisão da Literatura

2.1 Modelos DEA em rede

Os modelos DEA tradicionais consideram as DMU's como "caixas pretas", desconsiderando a estrutura interna [Akbarian 2021]. No entanto, [Tavana e Khalili-Damghani 2014] enfatizam que ao ignorar a estrutura interna do sistema, não é possível identificar as fontes de ineficiência nas DMUs devido à falta de informação sobre o processo interno.

Os modelos DEA em rede considera os processos internos da DMU denominados multi-estágios com entradas, saídas e medidas intermediárias [Guo et al. 2017]. O que caracteriza os modelos de rede são os produtos intermediários, que diferentemente dos inputs exógenos (recursos) e dos outputs, os produtos intermediários são produzidos e consumidos dentro do sistema e, portanto, não são visíveis de fora [Kao 2016]. Logo, as abordagens de DEA em rede permitem uma análise mais detalhada das DMUs e conseqüentemente aumenta o poder discriminativo dos modelos [Lozano 2015].

De acordo com [Barat et al. 2019], a estruturas dos sistemas DEA em rede pode ser classificada em três tipos básicos: sistemas paralelos, sistemas em série e sistemas mistos. Nos sistemas paralelos cada DMU consiste em um conjunto de subunidades. No sistema em série, os componentes são conectados por produtos intermediários. Por fim, o sistema misto é caracterizado pela presença de estruturas paralelas e em série.

Em muitos casos, as DMUs consistem em estruturas de dois estágios com medidas intermediárias que atuam como saídas do primeiro estágio e entradas para o segundo estágio. No entanto, em alguns casos, como em sistemas de cadeia de suprimentos, os modelos DEA em rede consistem em mais de dois estágios [Halkos et al. 2014]. [Cook et al. 2010] classificam os modelos DEA de dois estágios em quatro categorias: (1) abordagem DEA padrão; (2) abordagem de decomposição de eficiência; (3) abordagem rede-DEA; (4) e abordagem da teoria dos jogos.

Diante da importância de se considerar a estrutura interna da DMU no cálculo da eficiência, diversos autores começaram a desenvolver trabalhos na direção DEA em redes. Alguns autores desenvolvem modelos para medir eficiências sob condições específicas, outros buscaram examinar propriedades de certos modelos ou aplicam modelos existentes para resolver problemas do mundo real [Kao 2014].

2.2 Eficiência Aeroportuária

A avaliação da eficiência aeroportuária vem sendo uma área de pesquisa de grande interesse, tendo nos últimos anos, números crescentes de estudos sobre esse assunto. Entretanto, a utilização do DEA no segmento aeroportuário não é algo novo na literatura. O estudo de [Gillen e Lall 1997] foi o pioneiro a utilizar o DEA para avaliar o desempenho de aeroportos.

A partir deste estudo inicial várias outras aplicações podem ser verificadas na literatura. [Lo Storto 2018] mediu a eficiência dos aeroportos italianos usando análise envoltória de dados baseada em folga de rede (NSBM-DEA). Segundo o autor, a eficiência é avaliada em três estágio: custos, operação e receitas. No estágio relacionado aos custos, a eficiência do aeroporto é medida em termos da utilização da infraestrutura física com seus custos operacionais. No estágio relacionado a operação, a eficiência é medida pela capacidade do aeroporto de realizar operações técnicas de forma eficiente. No estágio relacionado a receitas, a eficiência do aeroporto está ligada a capacidade de gerar o máximo de receitas para uma determinada demanda de mercado.

Pelo método DEA, [Lu et al. 2019] avaliaram a eficiência de 27 aeroportos chineses durante o período de 2014 a 2018. Nove variáveis, incluindo seis variáveis de entrada e três variáveis de saída, foram identificadas. Para análise das variáveis, os autores utilizam integração do método fuzzy de tomada de decisão com múltiplos critérios (MCDM). Além disso, foi realizada uma comparação dos níveis de eficiência com e sem pesos de critérios definidos.

[Özsoy e Örkücü 2021], utilizaram a análise envoltória de dados em dois estágios para explorar a eficiências de 43 aeroportos turcos em relação as suas estruturas físicas e operacionais.

Eles concluíram que as principais causas de ineficiência dos aeroportos turcos estão relacionadas com a estrutura operacional.

Embora existam modelos de rede aplicados no segmento aeroportuário, a integração das abordagens DEA e Teoria dos Jogos para o segmento ainda é incipiente na literatura. No contexto brasileiro, podemos citar o estudo de [Wanke 2013]. O autor avalia a eficiência dos aeroportos brasileiros por meio de um processo de duas etapas (eficiência da infraestrutura física e eficiência da consolidação dos voos). Um modelo DEA rede centralizado é usado para otimizar os estágios simultaneamente. Os resultados indicam que variáveis contextuais como operações de hub e localização de aeroportos, impactam a infraestrutura física e os níveis de eficiência de consolidação de voos de forma diferente.

3. Método de Pesquisa

Nesta seção serão apresentados os modelos DEA não cooperativo e cooperativo. Analisar o modelo não cooperativo é importante para os casos em que os gestores precisem priorizar um determinado subsistema. Desse modo, o gestor poderá alocar seus recursos no subsistema que é mais importante e por consequência também maximizar a eficiência do sistema. Por outro lado, analisar o modelo cooperativo (centralizado) é adequado para duas situações: A primeira quando o decisor escolhe priorizar a eficiência do sistema em detrimento da eficiência dos estágios, dessa maneira, se parte do pressuposto que os estágios cooperam para maximizar a eficiência do sistema, enquanto a segunda, no caso em que o decisor não tem informações suficiente para ter preferência entre um estágio ou outro. É importante salientar, que não existe uma predominância de abordagens cooperativas em relação as não cooperativas na maioria dos estudos considerando dois estágios e em muitos casos, ocorre a comparação dos resultados das duas abordagens [Torres e Ramos 2021].

3.1 DEA não cooperativo

Uma das abordagens não cooperativas é caracterizada pelo jogo de Stackelberg (líder-seguidor). Nessa abordagem, assume que um dos dois estágios possuem prioridade (estágio líder). A eficiência do estágio líder é mais importante sendo otimizada primeiro, e a eficiência do segundo estágio (seguidor) é posteriormente otimizada sujeita ao requisito de que a pontuação de eficiência do líder permanece inalterada. É importante ressaltar, que dependendo da escolha do estágio líder, na abordagem não cooperativa diferentes conjuntos de eficiências dos estágios e decomposição geral da eficiência podem ser produzidos [Fang 2020].

Dentre os modelos de rede presentes na literatura, o modelo de [Liang et al. 2008], se destaca por utilizar conceitos de Teoria dos Jogos. Os autores consideram a relação líder-seguidor na avaliação da eficiência da cadeia de suprimentos de dois estágios, que considerou o fabricante e o varejista como líder e seguidor. No modelo proposto por [Liang et al. 2008], é considerado que todos os outputs do primeiro estágio são os únicos inputs para o segundo estágio. Nesse viés, [Li et al. 2012] propuseram um modelo que considera inputs adicionais no segundo estágio, além dos outputs do primeiro estágio.

Assumindo o primeiro estágio como líder e o segundo estágio como seguidor. A eficiência do primeiro estágio para uma DMU específica é calculada usando o modelo CCR em sua forma linear, o qual está representado no Modelo 1.

$$e_1^{0*} = \max \sum_{d=1}^D w_d z_{d0}$$

$$s. a. \sum_{d=1}^D w_d z_{dj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0 \quad \forall j$$

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{i0} = 1$$

$$v_i, w_d \geq 0; \forall i, d \quad (1)$$

Após o cálculo da eficiência do estágio 1 (e_1^{0*}) é possível calcular a eficiência do estágio 2, de modo que a eficiência do primeiro estágio permanece inalterada, conforme representado no modelo 2.

$$e_2^{0*} = \max \sum_{r=1}^s u_r y_{r0}$$

$$s. a \sum_{d=1}^D w_d z_{dj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0 \quad \forall j$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{h=1}^H Q_h x_{hj}^2 - \sum_{d=1}^D w_d z_{dj} \leq 0 \quad \forall j$$

$$\sum_{h=1}^H Q_h x_{h0}^2 + \sum_{d=1}^D w_d z_{d0} = 1$$

$$\sum_{d=1}^D w_d z_{d0} - e_1^{0*} \sum_{i=1}^m v_i x_{i0} = 0$$

$$v_i, w_d, Q_h, u_r \geq 0; \forall i, d, h, r \quad (2)$$

A partir dos resultados dos modelos (1) e (2), é possível calcular a eficiência global do sistema, por meio do produto da eficiência do estágio 1 e 2: $e^{non,1} = e_1^{0*} * e_2^{0*}$. Da mesma forma, se assumimos estágio 2 como líder, a eficiência (π_2^{0*}) pode ser calculada usando o modelo CCR padrão, conforme representado nos modelos 3 e 4 expostos no Quadro 1.

Quadro 1- Modelos CCR estágio 2 como líder e estágio 1 como seguidor

$\pi_2^{0*} = \max \sum_{r=1}^s u_r y_{r0}$ $s. a \sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{h=1}^H Q_h x_{hj}^2 - \sum_{d=1}^D w_d z_{dj} \leq 0 \quad \forall j$ $\sum_{h=1}^H Q_h x_{h0}^2 + \sum_{d=1}^D w_d z_{d0} = 1$ $w_d, Q_h, u_r \geq 0; \forall d, h, r \quad (3)$	$\pi_1^{0*} = \max \sum_{d=1}^D w_d z_{d0}$ $s. a \sum_{d=1}^D w_d z_{dj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0 \quad \forall j$ $\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{h=1}^H Q_h x_{hj}^2 - \sum_{d=1}^D w_d z_{dj} \leq 0 \quad \forall j$ $\sum_{i=1}^m v_i x_{i0} = 1$ $\sum_{r=1}^s u_r y_{r0} - \pi_2^{0*} \left(\sum_{h=1}^H Q_h x_{h0}^2 + \sum_{d=1}^D w_d z_{d0} \right) = 0$ $v_i, w_d, Q_h, u_r \geq 0; \forall i, d, h, r \quad (4)$
---	--

A partir dos resultados dos modelos (3) e (4), é possível calcular a eficiência global do sistema, por meio do produto da eficiência do estágio 1 e 2: $\pi^{non,2} = \pi_1^{0*} * \pi_2^{0*}$.

3.2 DEA centralizado

Na abordagem cooperativa (centralizado) o processo de dois estágios é visto como um estágio em que os dois estágios determinam simultaneamente um plano ideal para maximizar a eficiência geral do sistema [MaghboulI et al. 2014]. De acordo com [Fang 2020], no modelo centralizado a eficiência geral da DMU é decomposta em um produto das pontuações de eficiência dos dois estágios e que as medidas intermediárias recebem os mesmos pesos, independentemente de serem vistas como entradas ou saídas.

No estudo de [Kao e Hwang 2008], os autores analisaram um conjunto de companhia de seguros em duas etapas: aquisição do prêmio e geração de lucro. Logo, a eficiência geral é mensurada através do produto da eficiência de aquisição premium e eficiência de geração de lucro. Além disso, [Liang et al. 2008] abordaram essa técnica de decomposição de eficiência como uma abordagem de jого centralizado.

[Li et al. 2012] estende os modelos de [Liang et al. 2008] e [Kao e Hwang 2008] ao considerar inputs adicionais no segundo estágio. A eficiência do primeiro estágio é calculada de acordo com o modelo 5. Nesse sentido, a eficiência do primeiro estágio θ_1^0 pode ser tratada como uma variável $\theta_1^0 \in [0, \theta_1^{0max}]$, e a eficiência global ($\theta^{cen,1,*}$) pode ser considerada como uma função de θ_1^0 , conforme representado no modelo 6. Os modelos 5 e 6 estão expostos respectivamente no Quadro 2.

Quadro 2 - Modelos 5 e 6 DEA centralizado

$\theta_1^{0max} = \max \sum_{d=1}^D w_d z_{d0}$ $s. a \sum_{d=1}^D w_d z_{dj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0 \quad \forall j$ $\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{h=1}^H Q_h x_{hj}^2 - \sum_{d=1}^D w_d z_{dj} \leq 0 \quad \forall j$ $\sum_{i=1}^m v_i x_{i0} = 1$ $v_i, w_d, Q_h, u_r \geq 0; \quad \forall i, d, h, r \quad (5)$	$\theta^{cen,1,*} = \max \theta_1^0 * \sum_{r=1}^s u_r y_{r0}$ $s. a \sum_{d=1}^D w_d z_{dj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0 \quad \forall j$ $\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{h=1}^H Q_h x_{hj}^2 - \sum_{d=1}^D w_d z_{dj} \leq 0 \quad \forall j$ $\sum_{h=1}^H Q_h x_{h0}^2 + \sum_{d=1}^D w_d z_{d0} = 1$ $\sum_{d=1}^D w_d z_{dj} - \theta_1^0 \sum_{i=1}^m v_i x_{i0} = 0$ $\theta_1^0 \in [0, \theta_1^{0max}] \quad v_i, w_d, Q_h, u_r \geq 0; \quad \forall i, d, h, \quad (6)$
---	--

O modelo 6 fornece a eficiência de todo o sistema de dois estágios em avaliação. A eficiência máxima do primeiro estágio é $\theta_1^{0+} = \theta_1^{0max}$. Logo, a eficiência mínima para o segundo estágio é $\theta_2^{0-} = ((\theta^{cen,1,*})/(\theta_1^{0+}))$. É importante salientar que não existe diferença na escolha da eficiência do estágio como uma variável, a mesma eficiência ótima global ótima deve ser obtida, ou seja, $\theta^{cen,1,*} = \theta^{cen,2,*}$. Assim como a decomposição de eficiência $\theta_1^{0+} = \theta_1^{0-}$ e $\theta_2^{0+} = \theta_2^{0-}$.

3.3 Dados e seleção de Variáveis

A seleção das variáveis representativas do sistema foi realizada através de análises bibliográficas. A descrição das variáveis selecionadas bem como a estatística descritiva estão expostas no Quadro 3. A INFRAERO administra 46 aeroportos no Brasil. Dentre os 46, foram coletados dados referentes a 31 aeroportos. Os dados utilizados correspondem ao ano de 2019 e foram obtidos no site da Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária (INFRAERO). O estudo tem por objetivo investigar o desempenho em condições consideradas normais, desse modo o ano de 2019 representa o último disponível para períodos pré-pandemicos.

Quadro 3: Descrição e estatística descritiva das variáveis

Variável	Descrição	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
x_1	Área Total da pista (m ²)	96.155,36	20.383,52	146.250	55.566
x_2	Capacidade do terminal de passageiros (m ²)	13.448	22.767,25	112.000	352
x_3	Capacidade do pátio (m ²)	36.821	25.251,53	107.000	12.047
z_1	Quantidade de aeronaves movimentadas	23.596	42.374,05	222.298	688
x_1^2	Quantidade de esteira de bagagem	2	1,72	9	1
x_2^2	Quantidade de balcões de check-in	21	17,23	78	4
y_1	Quantidade de passageiros movimentados	1.993.008	4.240.104,60	22.125.712	12.377
y_2	Movimentação de carga (kg)	2.843.291	3.930.283,87	19.565.061	10.445

Diante da análise bibliográfica e seleção das variáveis, optou-se por avaliar os processos aeroportuários em duas etapas: a primeira relacionada a infraestrutura física do aeroporto e a segunda relacionada a infraestrutura operacional do aeroporto. Mediante o exposto, a Figura 1 retrata a estrutura da modelagem proposta pelo estudo.

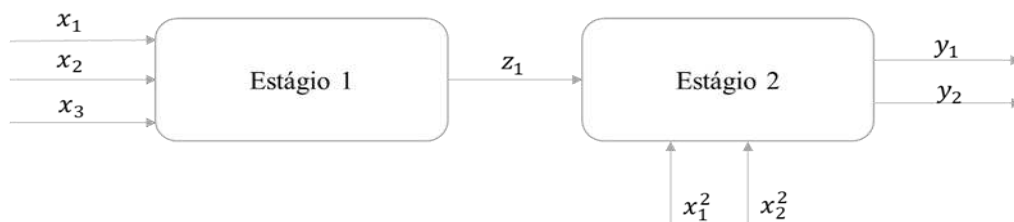


Figura 1: Estrutura proposta

No primeiro estágio, avalia-se a eficiência da infraestrutura física de cada aeroporto em utilizar os recursos disponíveis para produzir uma determinada quantidade de aeronaves movimentadas. No segundo estágio, avalia-se a eficiência da infraestrutura operacional em converter a quantidade de aeronaves movimentadas (variável intermediária) e os inputs adicionais para produzir a maior quantidade possível de passageiros e cargas movimentadas.

4. Resultados

4.1 Jogo não cooperativo

A Figura 2 ilustra a eficiência global e por estágio quando o primeiro estágio (Infraestrutura-física) é considerado o líder. Pode-se observar que quatro DMU's são eficientes no primeiro estágio: Aeroporto de Congonhas, Montes Claros, Santos Dumont e Uberlândia, ao passo que duas DMU's são eficientes no segundo estágio: Aeroporto de Belém e Congonhas. O aeroporto de Congonhas-SP obteve eficiência máxima nos dois estágios, sendo globalmente eficiente.

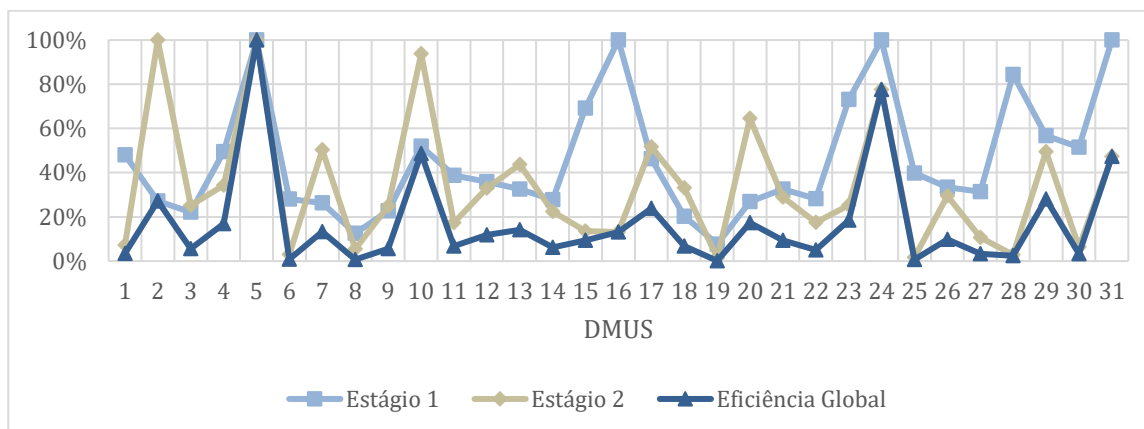


Figura 2: índice de eficiência quando o estágio 1 é líder

Quando o segundo estágio é considerado líder (Infraestrutura-operacional), as mesmas quatro DMU's são eficientes no primeiro estágio: Aeroporto de Congonhas, Montes Claros, Santos Dumont e Uberlândia, ao passo que quatro DMU's são eficientes no segundo estágio: Aeroporto de Belém, Congonhas, Foz do Iguaçu e Petrolina. O aeroporto de Congonhas-SP obteve eficiência máxima nos dois estágios, sendo globalmente eficiente, conforme detalhado na Figura 3.

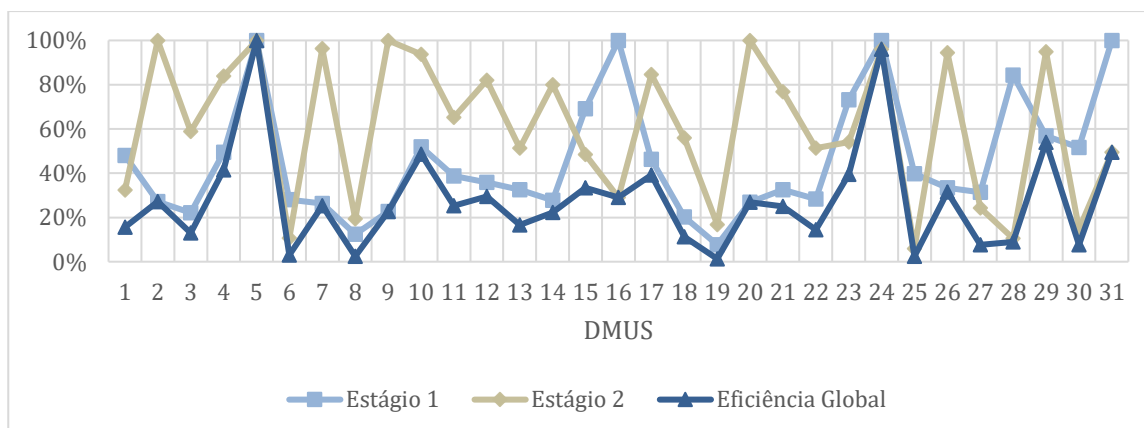


Figura 3: índice de eficiência quando o estágio 2 é líder

Em termos de comparação, o valor médio da eficiência global quando a infraestrutura-física foi considerada mais importante foi de 17,3%, versus os 28,07% de eficiência global quando a infraestrutura operacional foi considerada mais importante. Isso demonstra que os aeroportos estão sendo mais eficientes na utilização da infraestrutura operacional para converter o movimento de aeronaves em fluxos de passageiros e cargas do que na utilização da infraestrutura física para transformar em movimento de aeronaves.

A Tabela 1 demonstra o ranking das DMU's de acordo com o estágio considerado líder. Podemos observar que o aeroporto de Congonhas é 100% eficiente nos dois cenários, seguido pelo aeroporto Santos Dumont. O ótimo desempenho de Congonhas em ambos os estágios pode ser explicado pelo maior número de aeronaves e passageiros movimentados da amostra.

Tabela 1: Ranking dos aeroportos por estágio líder

Ranking (Estágio 1 líder)	Aeroportos	$e^{non,1,*}$	Ranking (Estágio 2 líder)	Aeroportos	$\pi^{non,2,*}$
1	Congonhas	1,000	1	Congonhas	1,000

2	Santos Dumont	0,776	2	Santos Dumont	0,960
3	Goiânia	0,486	3	Teresina	0,539
4	Uberlândia	0,473	4	Uberlândia	0,494
5	Teresina	0,281	5	Goiânia	0,486
6	Belém	0,271	6	Campo Grande	0,415
7	Navegantes	0,239	7	Santarém	0,395
8	Santarém	0,185	8	Navegantes	0,391
9	Petrolina	0,174	9	Marabá	0,335
10	Campo Grande	0,169	10	São Luíz	0,315
11	Londrina	0,142	11	Joinville	0,294
12	Curitiba	0,132	12	Montes Claros	0,290
13	Montes Claros	0,131	13	Belém	0,271
14	Joinville	0,118	14	Petrolina	0,269
15	São Luíz	0,099	15	Curitiba	0,253
16	Porto Velho	0,094	16	Imperatriz	0,253
17	Marabá	0,093	17	Porto Velho	0,250
18	Imperatriz	0,067	18	Foz do Iguaçu	0,226
19	Palmas	0,067	19	Macapá	0,222
20	Macapá	0,062	20	Londrina	0,167
21	Foz do Iguaçu	0,056	21	Altamira	0,155
22	Boa Vista	0,056	22	Rio Branco	0,145
23	Rio Branco	0,049	23	Boa Vista	0,130
24	Altamira	0,035	24	Palmas	0,113
25	Tabatinga	0,033	25	Tefé	0,089
26	Uberaba	0,032	26	Tabatinga	0,076
27	Tefé	0,024	27	Uberaba	0,076
28	Cruzeiro do Sul	0,008	28	Cruzeiro do Sul	0,030
29	Corumbá	0,007	29	Corumbá	0,024
30	São José dos Campos	0,006	30	São José dos Campos	0,024
31	Paulo Afonso	0,001	31	Paulo Afonso	0,013

Por outro lado, o aeroporto de Paulo Afonso apresentou o pior desempenho em ambos os estágios. A baixa eficiência é consequência da menor quantidade de aeronaves movimentadas da amostra, bem como a menor quantidade de passageiros e cargas movimentadas.

4.2 Jogo não cooperativo

A Tabela 2 demonstra os resultados da eficiência global e estágio do modelo centralizado, bem como os resultados do modelo não cooperativo. Verifica-se que as eficiências obtidas no modelo centralizado e no modelo não cooperativo com o estágio 2 como líder são as mesmas. Isso confirma que o segundo estágio (Infraestrutura-operacional) é mais importante, além de confirmar a robustez do modelo utilizado.

Tabela 2: Índices gerais de eficiência

DMU	Aerportos	Modelo Centralizado			Jogo de Stackelberg					
		θ_1^0	θ_2^0	$\theta^{cen,*}$	Estágio 1 como líder			Estágio 2 como líder		
					e_1^{0*}	e_2^{0*}	$e^{non,1,*}$	π_1^{0*}	π_2^{0*}	$\pi^{non,2,*}$
1	Altamira	0,481	0,323	0,155	0,481	0,072	0,035	0,481	0,323	0,155
2	Belém	0,271	1,000	0,271	0,271	1,000	0,271	0,271	1,000	0,271
3	Boa Vista	0,220	0,588	0,130	0,220	0,252	0,056	0,220	0,588	0,130
4	Campo Grande	0,495	0,838	0,415	0,495	0,342	0,169	0,495	0,838	0,415
5	Congonhas	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
6	Cruzeiro do Sul	0,281	0,107	0,030	0,281	0,029	0,008	0,281	0,107	0,030
7	Curitiba	0,262	0,963	0,253	0,262	0,503	0,132	0,262	0,963	0,253
8	Corumbá	0,125	0,194	0,024	0,125	0,054	0,007	0,125	0,194	0,024
9	Foz do Iguaçu	0,226	1,000	0,226	0,226	0,249	0,056	0,226	1,000	0,226
10	Goiânia	0,519	0,938	0,486	0,519	0,938	0,486	0,519	0,938	0,486
11	Imperatriz	0,388	0,652	0,253	0,388	0,173	0,067	0,388	0,652	0,253
12	Joinville	0,359	0,820	0,294	0,359	0,329	0,118	0,359	0,820	0,294
13	Londrina	0,325	0,514	0,167	0,325	0,437	0,142	0,325	0,514	0,167
14	Macapá	0,278	0,800	0,222	0,278	0,224	0,062	0,278	0,800	0,222
15	Marabá	0,692	0,484	0,335	0,692	0,135	0,093	0,692	0,484	0,335
16	Montes Claros	1,000	0,290	0,290	1,000	0,131	0,131	1,000	0,290	0,290
17	Navegantes	0,463	0,846	0,391	0,463	0,516	0,239	0,463	0,846	0,391
18	Palmas	0,202	0,560	0,113	0,202	0,331	0,067	0,202	0,560	0,113
19	Paulo Afonso	0,077	0,167	0,013	0,077	0,014	0,001	0,077	0,167	0,013
20	Petrolina	0,269	1,000	0,269	0,269	0,646	0,174	0,269	1,000	0,269
21	Porto Velho	0,325	0,768	0,250	0,325	0,289	0,094	0,325	0,768	0,250
22	Rio Branco	0,283	0,513	0,145	0,283	0,175	0,049	0,283	0,513	0,145
23	Santarém	0,731	0,540	0,395	0,731	0,253	0,185	0,731	0,540	0,395
24	Santos Dumont	1,000	0,960	0,960	1,000	0,776	0,776	1,000	0,960	0,960
25	São José dos Campos	0,398	0,059	0,024	0,398	0,016	0,006	0,398	0,059	0,024
26	São Luíz	0,334	0,944	0,315	0,334	0,295	0,099	0,334	0,944	0,315
27	Tabatinga	0,314	0,242	0,076	0,314	0,106	0,033	0,314	0,242	0,076
28	Tefé	0,844	0,106	0,089	0,844	0,028	0,024	0,844	0,106	0,089
29	Teresina	0,568	0,949	0,539	0,568	0,495	0,281	0,568	0,949	0,539
30	Uberaba	0,516	0,147	0,076	0,516	0,063	0,032	0,516	0,147	0,076
31	Uberlândia	1,000	0,494	0,494	1,000	0,473	0,473	1,000	0,494	0,494

5 Considerações Finais

O presente estudo teve como objetivo realizar uma análise da eficiência relativa de 31 aeroportos brasileiros administrados pela INFRAERO utilizando uma abordagem conjunta da análise envoltória de dados em rede (NDEA) em dois estágios e de teoria dos jogos, incorporando conceitos não cooperativos (Stackelberg) e cooperativos. O método proposto visa preencher a lacuna existente na literatura em relação a abordagem DEA em rede com teoria dos jogos no

segmento aeroportuário brasileiro, visto que estudos abordando essa integração entre essas duas abordagens no segmento aeroportuário ainda são escassos no contexto nacional.

A utilização de modelos DEA em rede com teoria dos jogos para o segmento aeroportuário possibilita aos gestores avaliar de maneira mais completa a situação atual dos aeroportos para direcionar esforços na mitigação de problemas relacionados a infraestrutura física e operacional, bem como, aumentar a eficiência para atender de forma adequada às demandas por seus serviços.

Inicialmente, foi implementado o modelo DEA não cooperativo, considerando a princípio o primeiro estágio (infraestrutura – física) como líder e o segundo estágio (infraestrutura – operacional) como seguidor e posteriormente vice-versa. De acordo com os resultados obtidos, apenas o Aeroporto de Congonhas localizado em São Paulo foi globalmente eficiente nos dois cenários. Além disso, foi possível observar que o índice de eficiência global foi maior quando o segundo estágio foi considerado como líder. Na implementação do modelo centralizado, foi observado que não houve alterações nos resultados obtidos com o modelo não cooperativo considerando o segundo estágio como líder. Isso ressalta que os aeroportos são mais eficientes em aproveitar suas infraestruturas operacionais do que sua infraestrutura física.

De modo geral, o desempenho verificado foi baixo, indicando necessidade de melhoria nos aeroportos. Para isso, é necessário que mais recursos sejam alocados nas áreas de infraestruturas por parte da INFRAERO, de maneira a melhorar a eficiência técnica dos aeroportos. Em termos de recomendações para pesquisas subsequentes, sugere-se uma análise comparativa da eficiência entre os aeroportos brasileiros públicos e privados.

Referências

- Anac (2022). Anuário do Transporte Aéreo (2019). // <https://www.gov.br/anac/pt-br/pt-br/assuntos/dados-e-estatisticas/mercado-de-transporte-aereo/anuario-do-transporte-aereo/dados-do-anuario-do-transporte-aereo>. Acessado: 21-01-2022.
- Akbarian, D. (2021). Network DEA based on DEA-ratio. *Financial Innovation*, 73(7): 1-7.
- Barat, M., Tohidi, G. e Sanei, M. (2019). DEA for nonhomogeneous mixed networks. *Asia Pacific Management Review*, 24(2): 161-166.
- Cook, W. D., Liang, L. e Zhu, J. (2010). Measuring performance of two-stage network structures by DEA: A review and future perspective. *Omega*, 38(6): 423-430.
- Du, J., Liang, L., Chen, Y., Cook, W. D. e Zhu, J. (2011). A bargaining game model for measuring performance of two-stage network structures. *European Journal Of Operational Research*, 210(2): 390-397.
- Fang, L. (2020). Stage efficiency evaluation in a two-stage network data envelopment analysis model with weight priority. *Omega*, 97: 0305-0483.
- Gillen, D. e Lall, A. (1997). Developing measures of airport productivity and performance: an application of data envelopment analysis. *Transportation Research Part e: Logistics and Transportation Review*, 33(4): 261-273.
- Guo, C., Wei, F., Ding, T., Zhang, L. e Liang, L. (2017). Multistage network DEA: decomposition and aggregation weights of component performance. *Computers & Industrial Engineering*, 113: 64-74.
- Halkos, G. E., Tzeremes, N. G. e Kourtzidis, S. A. (2014). A unified classification of two-stage DEA models. *Surveys In Operations Research And Management Science*, 19(1): 1-16.

- INFRAERO (2019). Capacidade Operacional. <https://transparencia.infraero.gov.br/capacidade-operacional/>. Acessado: 14-01-2022.
- INFRAERO (2019). Estatística. <https://transparencia.infraero.gov.br/estatisticas/>. Acessado: 13-01-2022.
- Kao, C. (2016). Efficiency decomposition and aggregation in network data envelopment analysis. *European Journal Of Operational Research*, 255(3): 778-786.
- Kao, C. (2014). Network data envelopment analysis: a review. *European Journal Of Operational Research*, 239(1): 1-16.
- Kao, C. e Hwang, S. (2008). Efficiency decomposition in two-stage data envelopment analysis: An application to non-life insurance companies in Taiwan. *European Journal of Operational Research*, 185: 418-429.
- Liang, L., Cook, W. D. e Zhu, J. (2008). Naval Research Logistics (NRL) Naval Research Logistics (NRL) Full Access DEA models for two-stage processes: game approach and efficiency decomposition. *Naval Research Logistics*, 55(7): 643-653.
- Li, Y., Chen, Y., Liang, L. e Xie, J. (2012). DEA models for extended two-stage network structures. *Omega*, 40(5): 611-618.
- Lostorto, C. (2018). The analysis of the cost-revenue production cycle efficiency of the Italian airports: a nsbm dea approach. *Journal Of Air Transport Management*, 72: 77-85.
- Lozano, S. (2015). Alternative SBM Model for Network DEA. *Computers & Industrial Engineering*, 82: 33-40.
- Lu, W., Park, S. H., Huang, T. e Yeo, G. T. (2019). An analysis for Chinese airport efficiency using weighted variables and adopting CFPR. *The Asian Journal Of Shipping And Logistics*, 35(4): 230-242.
- Ma, C., Liu, D., Zhou, Z., Zhao, W. e Liu, W. (2014). Game Cross Efficiency for Systems with Two-Stage Structures. *Journal Of Applied Mathematics*, 2014: 1-8.
- Nastis, S. A., Bournaris, T. e Karpouzou, D. (2019). Fuzzy data envelopment analysis of organic farms. *Operational Research*, 19: 571-584.
- Özsoy, V. S. e Örkücü, H. H. (2021). Structural and operational management of Turkish airports: a bootstrap data envelopment analysis of efficiency. *Utilities Policy*, 69: 101-180.
- Pacagnella junior, A. C., Hollaender, P. S., Mazzanati, G. V. e Bortoletto, W. W. (2020). Infrastructure and Flight Consolidation Efficiency of Public and Private Brazilian International Airports: a two-stage dea and malmquist index approach. *Journal Of Advanced Transportation*, 2020: 1-15.
- Silva, L. B. M. V. da (2018). ANÁLISE MULTICRITÉRIO DE DESEMPENHO DA INFRAESTRUTURA AEROPORTUÁRIA: estudo de caso nos principais aeroportos brasileiros. 74 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Angicos.
- Tavana, M. e Khalili-damghani, K. (2014). A new two-stage Stackelberg fuzzy data envelopment analysis model. *Measurement*, 53: 277-296.
- Torres, L. M. L. S. e Ramos, F. S. (2021). um modelo de dois estágios baseado no jogo de barganha de nash para avaliação de eficiência de distribuidoras brasileiras de energia. *LIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, João Pessoa. SOBRAPO.
- 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*, v. 31, p. 1-5.