

PRECIFICAÇÃO DINÂMICA E VIABILIDADE ECONÔMICA DE VERTIPORTOS: DO EFEITO CAUSAL À SIMULAÇÃO OPERACIONAL

Ronald Adomaitis da Silva¹; Andiará Cristine Mercini Fausto²; Renato Cesar Sato³

¹ Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA. (email: ronaldadomaitis@ita.br).

² Universidade Federal de São Paulo - UNIFESP. (e-mail: andiará.mercini@unifesp.br).

³ Universidade Federal de São Paulo - UNIFESP. (e-mail: rscato@unifesp.br).

Resumo: A Mobilidade Aérea Avançada (AAM) surge como uma alternativa promissora para desafios de mobilidade em áreas metropolitanas densas, com potencial para reduzir tempos de deslocamento e ampliar a conectividade urbana, configurando os vertiportos como infraestrutura-chave de integração entre aeronaves eVTOL e sistemas de transporte terrestre. A viabilidade econômica dessas operações depende não apenas de avanços tecnológicos e da engenharia aeronáutica, mas essencialmente de modelos de negócios sustentáveis e previsões de demanda com elevado grau de acurácia. Um desafio fundamental consiste em identificar com precisão a elasticidade-preço dos passageiros, variável que influencia diretamente a escolha modal, a utilização da frota e o desempenho operacional dos vertiportos. A literatura sobre previsão de demanda em mobilidade aérea urbana baseia-se predominantemente em abordagens correlacionais, que podem gerar estimativas enviesadas da sensibilidade ao preço quando a precificação dinâmica é influenciada por choques externos de demanda, como condições climáticas adversas ou congestionamentos em modos terrestres. Nessas situações, aumentos simultâneos de preço e demanda podem levar à subestimação da aversão tarifária dos passageiros e a projeções excessivamente otimistas de demanda. Este trabalho propõe o uso de uma metodologia que integra Inferência Causal por meio de *Double Machine Learning* (DML) e Modelagem Baseada em Agentes (ABM) para otimizar a gestão de demanda e receita em vertiportos urbanos. A metodologia fundamenta-se na técnica de ortogonalização com *cross-fitting* para superar o viés de seleção e a endogeneidade dos preços. Utilizamos dados sintéticos baseados em conceitos de operação (ConOps) de eVTOLs. O modelo estimou os parâmetros causais, controlando para os *confounders* observados, isolando o efeito causal do preço na decisão de escolha modal e eliminando o ruído provocado por fatores externos possivelmente correlacionados com preços elevados a maior demanda (como o conceito de *surge pricing* em dias de chuva). Os resultados obtidos mostraram que a sensibilidade ao preço estimada via DML ($-0,00596$; EP = $0,000267$; IC 95%: $[-0,00648, -0,00543]$) é significativamente maior do que a sugerida por correlações simples ($-0,00439$), indicando que modelos convencionais subestimam a rejeição à tarifa em até 35,6%. Para avaliar a consistência operacional desses resultados em uma segunda etapa, os parâmetros causais obtidos foram integrados a uma Modelagem Baseada em Agentes (ABM) que emula o fluxo de passageiros ao longo de um ciclo de 24 horas. Foram testados cenários de precificação dinâmica que revelaram que, apesar dos aumentos tarifários em períodos de saturação da infraestrutura terrestre conduzirem a um aumento da receita bruta, existe um "ponto crítico" onde a evasão da demanda compromete a eficiência da frota em operação naquele momento. Ademais, os resultados sugerem que a gestão baseada em evidências causais permite ao operador ou gestão do vertiporto identificar o equilíbrio ótimo entre lucratividade e acessibilidade, garantindo um Retorno sobre Investimento

(ROI) mais robusto. Conclui-se que o uso de algoritmos agnósticos à forma funcional (como *Random Forests*) dentro do *framework* de DML oferece uma ferramenta superior para o planejamento urbano e empresarial em cenários de precificação dinâmica e alta incerteza de demanda, permitindo identificar com maior precisão efeitos causais de preço e avaliar suas implicações operacionais.

Palavras-chave: EVTOL; Previsão de Demanda; Inferência Causal; *Double Machine Learning*; Modelagem Baseada em Agentes.

DYNAMIC PRICING AND ECONOMIC VIABILITY OF VERTIPORTS: FROM CAUSAL EFFECTS TO OPERATIONAL SIMULATION

Ronald Adomaitis da Silva¹; Andiará Cristine Mercini Fausto²; Renato Cesar Sato³

¹ Aeronautics Institute of Technology (ITA), Brazil. (e-mail: ronaldadomaitis@ita.br).

² Federal University of São Paulo (UNIFESP), Brazil. (e-mail: andiarra.mercini@unifesp.br).

³ Federal University of São Paulo (UNIFESP), Brazil. (e-mail: rcsato@unifesp.br).

Abstract: Advanced Air Mobility (AAM) has emerged as a promising alternative for addressing mobility challenges in dense metropolitan areas, with the potential to reduce travel times and enhance urban connectivity. In this context, vertiports serve as a key infrastructure component integrating eVTOL aircraft with ground transportation systems. The economic viability of these operations depends not only on technological advances and aeronautical engineering but fundamentally on sustainable business models and highly accurate demand forecasting. A central challenge lies in precisely identifying passengers' price elasticity of demand, a variable that directly influences modal choice, fleet utilization, and the operational performance of vertiports. The literature on demand forecasting in urban air mobility relies predominantly on correlational approaches, which may produce biased estimates of price sensitivity when dynamic pricing is influenced by external demand shocks, such as adverse weather conditions or congestion in ground transportation modes. In such situations, simultaneous increases in price and demand may lead to an underestimation of passengers' fare disutility and to overly optimistic demand projections. This study proposes a methodology that integrates causal inference through Double Machine Learning (DML) and Agent-Based Modeling (ABM) to optimize demand and revenue management in urban vertiports. The methodology relies on orthogonalization with cross-fitting to address selection bias and price endogeneity. Synthetic data based on Concepts of Operations (ConOps) for eVTOL systems were employed. The model estimates causal parameters while controlling for observed confounders, allowing the causal effect of price to be isolated on modal choice decisions and eliminating noise generated by external factors potentially correlated with both higher prices and increased demand (such as surge pricing during rainy conditions). The results indicate that the price elasticity estimated via DML (-0.00596 ; $SE = 0.000267$; 95% CI: $[-0.00648, -0.00543]$) is significantly greater than that suggested by simple correlations (-0.00439), indicating that conventional models may underestimate passengers' price sensitivity by up to 35.6%. To evaluate the operational consistency of these findings in a second stage, the estimated causal parameters were integrated into an Agent-Based Modeling (ABM) that emulates passenger flows over a 24-hour cycle. Dynamic pricing scenarios were tested, revealing that although fare increases during periods of ground infrastructure saturation may lead to higher gross revenue, a tipping point emerges at which demand attrition compromises fleet utilization efficiency. Furthermore, the results suggest that evidence-based management grounded in causal inference enables operators or vertiport managers to identify the optimal balance between profitability and accessibility, thereby ensuring a more robust Return on Investment (ROI). The study concludes that the use of function-form-agnostic algorithms (such as Random Forests) within the DML framework provides a superior tool for urban and business planning under conditions of dynamic pricing and high demand uncertainty, enabling more

precise identification of causal price effects and a clearer assessment of their operational implications.

Keywords: EVTOL; Demand Forecasting; Causal Inference; Double Machine Learning; Agent-Based Modeling.