

XXII SITRAER 2025

Simpósio de Transporte Aéreo



ANÁLISE MULTIMÉTODO DE ESTIMADA DA CAPACIDADE HORÁRIA EM AEROPORTOS COM INFRAESTRUTURA LIMITADA

José Larocerie¹, Michelle Galvão², Ítalo Guedes¹, Viviane Falcão¹

1. Universidade Federal de Pernambuco

2. Universidade Federal de Goiás

* Corresponding author e-mail address: jlarocerie@gmail.com

PAPER ID: SIT1241009

ABSTRACT

This work presents a comparative analysis of the hourly runway capacity at three Brazilian airports – Aracaju (SBAR), Juazeiro do Norte (SBJU) and Maceió (SBMO) - using the FAA (1995), MCA 100-14 (2015) and MCA 100-26 (2025) methods. Simulations were applied based on empirical data on runway occupancy time, separation between aircraft, adverse conditions (VFR/IFR) and fleet mix. The results reveal that capacity values estimated by the FAA method tend to overestimate operational potential, while MCA methods, especially MCA 100-26, incorporate relevant operational and cognitive factors. The analysis highlights the importance of contextual criteria in methodological selection and proposes recommendations for adopting estimates compatible with the reality of air port concessions and infrastructure management.

Keywords: Capacidade Horária, Aeroportos, Pista, MCA, FAA.

PAPER ID: SIT1241009

1 INTRODUÇÃO

A capacidade horária de pista de um aeródromo representa o número teórico máximo de movimentos de pousos e decolagens que podem ocorrer em uma hora, sob determinadas condições operacionais, geométricas e meteorológicas. Trata-se de uma métrica essencial para o planejamento, projeto e gestão de aeroportos, influenciando diretamente o dimensionamento de infraestruturas associadas, como pátios, pistas de táxi e terminais de passageiros ou carga (FAA, 1995; DECEA, 2015). A adequada estimativa da capacidade de pista permite identificar gargalos, fundamentar projetos de ampliação e assegurar conformidade com os padrões da Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO, 2005; Correia *et al.*, 2008; de Neufville & Odoni, 2013; ICAO, 2014).

Dentre os métodos existentes para a estimativa dessa capacidade, destacam-se dois: o método norte-americano descrito na circular FAA AC 150/5060-5 “Airport Capacity and Delay” (FAA, 1995), amplamente difundido internacionalmente, e o método brasileiro MCA 100-14, desenvolvido pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) com base nas características específicas da operação aérea e infraestrutura nacional (DECEA, 2015).

O método da FAA (1995) é predominantemente empírico, fundamentado em observações e padrões operacionais extraídos de aeroportos dos Estados Unidos. Ele define capacidades de pista em função do índice mix de aeronaves - uma ponderação do percentual de aeronaves por classes de peso - e das condições de operação visual (VFR) ou por instrumentos (IFR). No entanto, o método apresenta limitações significativas, conforme apontado no próprio relatório técnico do Projeto Básico

do Aeroporto Internacional de Aracaju - Santa Maria (SBAR), como a desconsideração de saídas rápidas, ausência de taxiways longitudinais, restrições operacionais locais e interferência entre aeroportos próximos, fatores frequentemente presentes em aeroportos brasileiros de médio porte (Aena, 2021a).

Em função dessas particularidades, o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), por meio do Comando da Aeronáutica (COMAER), estabeleceu o manual normativo MCA 100-14 – Capacidade do Sistema de Pistas, em vigor de abril de 2015 até julho de 2025 (DECEA, 2025). Esse documento instituiu um método analítico-probabilístico mais aderente às condições operacionais brasileiras, incorporando parâmetros como o tempo médio de ocupação da pista no pouso (TOPP) e na decolagem (TOPD), mix real de aeronaves, geometria da infraestrutura, frequência de uso de cabeceiras e condições meteorológicas locais (DECEA, 2015). Tais elementos são modelados por meio de técnicas de simulação, como o método Monte Carlo. A aplicação dessa metodologia passou a ser exigida pela ANAC e pelos operadores aeroportuários, como a AENA Brasil, em diversos projetos de concessão e requalificação da infraestrutura aeroportuária nacional (AENA, 2021a; AENA, 2021b).

Importante destacar que, em 2 de julho de 2025, a publicação MCA 100-14 foi oficialmente revogada pela Portaria DECEA/DNOR1 nº 1.788, sendo substituída pela nova MCA 100-26 – Capacidade ATC (DECEA, 2025). Este novo manual unificou os critérios para avaliação da capacidade de pistas e de setores de controle de tráfego aéreo (ATC), incluindo, além dos parâmetros técnicos herdados da MCA 100-14, variáveis adicionais como o número de referência (que expressa a capacidade cognitiva dos controladores de tráfego aéreo com base nos tempos médios de comunicação e de tarefas simultâneas), tempo de comunicação controlador-aeronave, tempo de atividade secundária e fatores cognitivos associados à carga de trabalho dos controladores. Essa mudança representa um avanço metodológico significativo, refletindo a necessidade de se integrar a análise de infraestrutura física à capacidade humana de gestão do tráfego aéreo.

Assim, fica claro que a capacidade horária de pista com rigor técnico é indispensável para garantir a segurança, eficiência e viabilidade econômica dos aeroportos brasileiros, atual preocupação dos gestores aeroportuários e reguladores da aviação civil. A superestimação dessa capacidade, como pode ocorrer ao se aplicar o método da FAA sem ajustes, pode levar a decisões equivocadas no planejamento aeroportuário e na modelagem de concessões. Por outro lado, a subestimação pode comprometer investimentos e gerar gargalos artificiais.

Neste contexto, este artigo apresenta uma análise comparativa fundamentada empiricamente da capacidade horária de pista nos aeroportos de Aracaju (SBAR), Juazeiro do Norte (SBJU) e Maceió (SBMO), com base em estudos desenvolvidos para a AENA Brasil. Tais estudos utilizaram, inicialmente, o método da FAA e foram posteriormente recalculados segundo os critérios estabelecidos pela metodologia nacional MCA 100-14. Embora as análises tenham sido conduzidas sob a vigência da instrução anterior, este trabalho discute também, de forma crítica e prospectiva, as implicações metodológicas decorrentes da substituição normativa pela MCA 100-26, oferecendo subsídios técnicos para futuras estimativas de capacidade em aeroportos brasileiros à luz do novo marco regulatório.

2 MODELOS DE ESTIMATIVA DE CAPACIDADE DE PISTA

Esta seção apresenta a evolução das metodologias aplicadas à estimativa da capacidade horária de pistas aeroportuárias, com ênfase nos modelos FAA, MCA 100-14 e MCA 100-26. Discute-se a transição de abordagens empíricas para modelos probabilísticos e cognitivos, considerando as particularidades operacionais dos aeroportos brasileiros e diretrizes internacionais para gestão integrada do tráfego aéreo.

2.1 Método FAA AC 150/5060-5 (FAA, 1995)

A metodologia de estimativa da capacidade horária de pistas apresentada na FAA AC 150/5060-5 é uma das mais difundidas no planejamento aeroportuário internacional. Baseia-se em uma abordagem empírica e tabular, construída a partir de observações de desempenho operacional em aeroportos norte-americanos durante as décadas de 1980 e 1990, com o objetivo de fornecer estimativas simplificadas da capacidade máxima sob diferentes configurações de pistas e condições de operação (FAA, 1995). O método estrutura-se em torno de três elementos centrais:

- Tipo de configuração de pista: pista única, paralelas independentes, paralelas dependentes, pistas cruzadas;
- Condições meteorológicas predominantes: operações sob regras de voo visual (VFR) ou por instrumentos (IFR);
- Índice mix de aeronaves (Aircraft Mix Index): variável calculada a partir da proporção de aeronaves classificadas em quatro categorias (A a D), que influencia diretamente as separações mínimas e tempos médios de operação.

A estimativa da capacidade é então extraída de tabelas fornecidas pelo próprio manual, que associam os parâmetros acima a valores típicos de movimentos por hora. Por exemplo, em uma pista única sob VFR e com mix leve (classe A), a capacidade pode ultrapassar 90 movimentos por hora; já em IFR com mix pesado (classe D), esse valor pode cair para menos de 50 movimentos/hora (FAA, 1995). Apesar da ampla adoção internacional, o método apresenta limitações importantes quando aplicado fora do contexto para o qual foi concebido. A metodologia ignora características operacionais críticas, como a presença (ou ausência) de saídas rápidas, pistas de táxi longitudinais, restrições locais de cabeceira ou interferência de tráfego com aeródromos próximos. Também não contempla a variabilidade dos tempos reais de ocupação da pista para pouso (TOPP) e decolagem (TOPD), assumindo implicitamente valores médios. Além disso, adota separações fixas entre aeronaves por categoria de peso, desconsiderando avanços recentes em estratégias de separação.

Outro ponto crítico reside na exclusão de fatores humanos e cognitivos, como a carga de trabalho dos controladores ou a complexidade setorial do espaço aéreo, que influenciam diretamente a capacidade de controle do tráfego aéreo — aspectos atualmente integrados em metodologias como o MCA 100-26 (DECEA, 2025).

Sever & Turan (2024) demonstraram, em seu estudo com Monte Carlo aplicado ao complexo aeroportuário de Istambul, que a capacidade de pista não deve ser tratada como um valor fixo, mas sim como uma distribuição probabilística que reflete incertezas operacionais, tais como tempo de ocupação e flutuação do tráfego. Esse modelo reforça a necessidade de métodos que incorporem variabilidade real e sensibilização estocástica — elementos ausentes no modelo FAA, mas presentes nas normas brasileiras MCA 100 14 e MCA 100 26.

Essas limitações tornam-se particularmente evidentes em aeroportos brasileiros de médio porte, como Aracaju (SBAR), Juazeiro do Norte (SBJU) e Maceió (SBMO), cujos estudos técnicos revelam frequente ausência de taxiways paralelas, cabeceiras únicas ativas, variações meteorológicas significativas e predominância de aeronaves regionais. A aplicação direta do modelo FAA, nesses casos, pode resultar em superestimativas da capacidade real, comprometendo diagnósticos de viabilidade operacional e fundamentos para concessões aeroportuárias (AENA, 2021a; 2021b).

Assim, embora continue sendo uma referência útil para benchmarking ou análises comparativas, o método da FAA requer adaptações e complementações quando aplicado a contextos operacionais diversos, como o brasileiro. Essa constatação motivou a adoção, por parte da ANAC e da AENA Brasil, da metodologia nacional estabelecida pelo MCA 100-14, posteriormente evoluída

para o modelo mais abrangente do MCA 100-26, como abordado nas seções seguintes.

2.2 Método MCA 100-14 (DECEA, 2015)

A metodologia MCA 100 14 – Capacidade do Sistema de Pistas, estabelecida pela Portaria DECEA nº 78/DGCEA, de 23 de março de 2015, regulamentou no Brasil a avaliação da capacidade de pistas de aeródromos controlados. Esse documento normativo foi elaborado pelo Subdepartamento de Operações (SDOP) do DECEA com o objetivo de fornecer um modelo analítico-probabilístico, mais condizente com a realidade operacional, geométrica e meteorológica dos aeroportos brasileiros (DECEA, 2015).

Diferentemente do modelo empírico norte-americano, o método MCA 100-14 é analítico-probabilístico, construído a partir de princípios de modelagem matemática e simulação computacional. A capacidade é definida como o número máximo de movimentos que podem ser realizados em uma pista, por hora, sob condições específicas, levando-se em consideração as características locais de operação e infraestrutura. Entre os parâmetros centrais do modelo destacam-se:

- Tempo de Ocupação da Pista para Pouso (TOPP) e para Decolagem (TOPD);
- Mix real de aeronaves com base em dados estatísticos específicos de cada aeródromo;
- Distribuição percentual de uso por cabeceira, considerando direção e frequência de ventos;
- Geometria da pista e das taxiways;
- Frequência horária de operações, diferenciando períodos de pico e vale;
- Separações reais aplicadas pelo controle de tráfego aéreo (ATC).

Tais parâmetros são inseridos em um modelo computacional baseado em simulação Monte Carlo, no qual se realizam milhares de iterações com variações aleatórias controladas, permitindo a obtenção de uma distribuição de probabilidade da capacidade horária de pista. O resultado da simulação expressa, de forma estatística, os valores de capacidade mínima, média e máxima, com percentis associados.

A aplicação da metodologia MCA 100 14 exige dados reais e atuais, coletados em campo e por sistemas de vigilância ATS (como radar e gravações ATIS/ADS-B). O modelo considera também restrições operacionais específicas, como indisponibilidade de cabeceira noturna, prioridade para voos comerciais ou limitação de operações simultâneas em função de topografia ou ruído.

Nos estudos realizados para os aeroportos de Juazeiro do Norte (SBJU) e Aracaju (SBAR), verificou-se que a aplicação da metodologia MCA 100 14 resultou em estimativas de capacidade mais conservadoras e realistas em comparação ao método FAA, refletindo adequadamente gargalos operacionais e geométricos. Por exemplo, no caso de SBJU, a ausência de taxiway paralela e a necessidade de *backtrack* após o pouso limitaram significativamente o *throughput* de aeronaves por hora, o que foi capturado com precisão pelo modelo MCA (AENA, 2021a; 2021b).

A partir de sua publicação, a MCA 100 14 passou a ser obrigatória para todos os estudos de capacidade submetidos ao DECEA, ANAC e operadores privados no Brasil. Sua adoção foi também recomendada em processos de concessão aeroportuária e reavaliação da infraestrutura, conforme registrado nos relatórios técnicos da AENA. Em 2025, com a publicação da nova MCA 100 26 – Capacidade ATC, essa metodologia foi formalmente revogada e substituída, mas seus princípios técnicos permanecem como base para o novo modelo integrado que será abordado na Seção 2.3.

2.3 Considerações Críticas do Método MCA 100-26 (DECEA, 2025)

A publicação da MCA 100-26 – Capacidade ATC em julho de 2025 pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA, 2025a) representou um marco na evolução das metodologias de estimativa de capacidade no contexto aeroportuário e do espaço aéreo brasileiro. Este novo manual

substitui a antiga MCA 100-14, que estava em vigor desde 2015, promovendo uma integração entre a capacidade da infraestrutura física (sistema de pistas) e a capacidade do sistema de controle de tráfego aéreo (ATC).

A principal limitação dos estudos de capacidade horária aplicados aos aeroportos de Aracaju (SBAR), Juazeiro do Norte (SBJU) e Maceió (SBMO), realizados sob a vigência da MCA 100-14, reside em parâmetros físicos e operacionais da pista, tais como: tempo de ocupação (TOPP/TOPD), frequência de uso de cabeceiras, mix de aeronaves, separações mínimas, presença de taxiways paralelas e condições meteorológicas. Embora essa abordagem já represente um avanço considerável em relação ao método FAA, ela não contempla a dimensão cognitiva e organizacional do sistema ATC, fator que se mostra cada vez mais determinante na limitação da capacidade total de um aeródromo, especialmente em cenários com crescimento da demanda e maior complexidade de operação.

O manual MCA 100-26 avança ao incluir novas variáveis que expressam a capacidade humana e organizacional dos controladores de tráfego aéreo, como:

- Número de Referência (NRef): índice representativo da carga cognitiva dos controladores, derivado da média de aeronaves sob responsabilidade simultânea e da complexidade das tarefas executadas (DECEA, 2025);
- Tempo de Comunicação Controlador-Aeronave (TCCA): estimativa da carga comunicacional por aeronave em diferentes fases do voo;
- Tempo de Atividade Secundária (TAS): indicador do comprometimento da atenção com atividades paralelas;
- Fatores Cognitivos: elementos derivados da literatura sobre desempenho humano em ambientes de alta densidade informacional e multitarefa, como apresentado em ICAO (2014) e Eurocontrol (2021).

Estudos internacionais já vinham apontando, há mais de uma década, a necessidade de incorporar modelagens estocásticas e multivariadas para representar melhor as interações entre aeroportos, setores ATC e fatores humanos (Reitmann et al., 2019; Sever & Turan, 2024). Os resultados dessas abordagens sugerem que a capacidade total de um sistema aeroportuário não é unicamente função da infraestrutura, mas também do limite de absorção operacional do sistema ATC, o qual varia conforme tecnologia de vigilância, carga de trabalho, tempo de reação e procedimentos empregados.

Neste contexto, os estudos conduzidos nos três aeroportos sob a MCA 100-14 apresentaram três limitações relevantes que podem ser superadas pela adoção da MCA 100-26:

1. Desconsideração da Capacidade do Setor de Controle TMA/CTR: Nos três casos analisados, foi presumida a disponibilidade plena do setor ATC, sem avaliação da carga de trabalho ou tempo de coordenação com APPs ou ACCs vizinhos.
2. Ausência de Fatores Humanos na Modelagem: Os estudos consideraram parâmetros técnicos e operacionais fixos, como se o desempenho do controlador fosse invariável — hipótese superada por estudos em Fatores Humanos (ICAO, 2006; Eurocontrol, 2021).
3. Limitações na análise de cenários interativos ou multiplexados: As metodologias anteriores não permitem capturar efeitos de saturação cruzada entre múltiplos aeródromos ou setores ATC próximos - problema tratado em Sever & Turan (2024) com simulações de Monte Carlo, alinhadas com a abordagem do novo manual.

Portanto, a MCA 100-26 oferece uma nova métrica normativa, em outras palavras, trata-se de uma reformulação metodológica necessária à complexidade atual da aviação nacional, que requer avaliações que transcendam o “número de movimentos por hora” e incorporem elementos de

desempenho humano, dinâmica de rede e interoperabilidade de sistemas. No entanto, a aplicação plena desse modelo ainda enfrenta desafios técnicos e operacionais significativos.

A ausência de diretrizes normativas específicas para a coleta e parametrização de variáveis sensíveis – como carga de trabalho, tempo de comunicação e coordenação intersetorial – compromete a replicabilidade e a auditabilidade dos estudos. Além disso, a dependência de dados empíricos que não estão sistematicamente disponíveis no contexto brasileiro limita a abrangência das análises e pode comprometer a equidade na avaliação de capacidade entre aeroportos concessionados e públicos. Ainda que o modelo proponha uma abordagem sistêmica, sua implementação carece de validação empírica robusta, especialmente no que se refere à integração efetiva entre capacidade de pista, setor ATC e rede aeroportuária.

A MCA 100-26 ainda carece de mecanismos robustos para incorporar estratégias de gerenciamento colaborativo da capacidade, como o *Collaborative Decision Making* (CDM) e o uso de margens operacionais flexíveis (*adaptive buffers*), ambos recomendados pelo ICAO Doc 9854 (ICAO, 2006) como fundamentos do gerenciamento tático e resiliente do tráfego aéreo. Tais lacunas limitam a aplicação da metodologia em cenários operacionais com alta incerteza e infraestrutura restrita — realidade predominante em diversos aeroportos regionais brasileiros, especialmente em ambientes operacionais heterogêneos e com restrições estruturais relevantes, como ocorre em grande parte dos aeroportos regionais brasileiros.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção apresenta uma análise empírica da estimativa de capacidade horária de pista em três aeroportos brasileiros — Aracaju (SBAR), Juazeiro do Norte (SBJU) e Maceió (SBMO). Utiliza-se como base os métodos descritos na Seção 2: FAA (1995), MCA 100-14 (DECEA, 2015) e MCA 100-26 (DECEA, 2025). A análise destacará os efeitos práticos das variáveis de infraestrutura, operação e carga cognitiva do ATC sobre a capacidade estimada em cada abordagem. Os dados foram extraídos dos relatórios técnicos da AENA Brasil, entre 2019 e 2022, e complementados por parâmetros estabelecidos nas normas vigentes. A Tabela 2 a seguir sintetiza as principais características metodológicas dos três modelos, incluindo sua natureza, equação representativa e variáveis-chave.

Tabela 2: Características Metodológicas dos Modelos de Estimativa de Capacidade Horária de Pista

Método	Fórmula Representativa	Natureza do Modelo	Variáveis-Chave
FAA (1995)	$CP = f(\text{configuração, VFR/IFR, Mix})$ (valor tabelado) (Eq.1)	Empírico/ tabular	Mix de aeronaves, condição meteorológica, tipo de pista
MCA 100-14 (2015)	$CP = \frac{3600}{TOP + \bar{s}}$ (via simulação) (Eq.2)	Analítico- probabilístico	TOPP/TOPD, mix real, uso de cabeceiras, meteorologia
MCA 100-26 (2025)	$CP_{ATC} = \min\left(\frac{3600}{TOPP_m + \bar{s}}, \frac{3600}{TCCA \times N_a + TAS \times 3600}\right)$ (Eq.3)	Probabilístico- cognitivo	TOPP, separação, TCCA, carga cognitiva, TAS

Fonte: Adaptado de FAA (1995); DECEA (2015; 2025) e análise dos autores sobre os relatórios AENA (2021a; 2021b).

Onde:

CP: Capacidade horária da pista (movimentos por hora) | TOP: Tempo médio de ocupação da pista (em segundos)

\bar{s} : Separação média entre aeronaves (em segundos) | TOPP: Tempo de Ocupação da Pista para Pouso (em segundos)

TOPD: Tempo de Ocupação da Pista para Decolagem (em segundos) | TOPP_m: Valor médio do tempo de ocupação da pista para pouso

considerado na simulação (em segundos) | TCCA: Tempo de Comunicação Controlador-Aeronave (em segundos por aeronave) | N_a:

Número médio de aeronaves sob responsabilidade simultânea do controlador | TAS: Tempo de Atividade Secundária do controlador

(fração do tempo total, adimensional) | Mix: Proporção de tipos de aeronaves (categorias A, B, C, D), conforme definidos pela FAA ou DECEA | VFR / IFR: Condições meteorológicas de operação (Visual Flight Rules / Instrument Flight Rules)

f (...): Função empírica que retorna valores tabelados de capacidade com base na configuração de pista, tipo de operação e mix

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Seção 4 tem por finalidade estimar a capacidade horária de pista nos aeroportos de Aracaju (SBAR), Juazeiro do Norte (SBJU) e Maceió (SBMO), utilizando metodologias consagradas — FAA (1995), MCA 100-14 (2015) e MCA 100-26 (2025). A partir de dados operacionais e simulações, busca-se comparar os resultados entre métodos e caracterizar as limitações técnicas e operacionais de cada aeródromo sob diferentes condições de operação (VFR/IFR).

4.1 Estimativas de Capacidade

4.1.1. Estimativa via Método FAA (1995)

Com base na configuração de pista única e predominância de condições VFR, o método FAA estima uma capacidade horária de 52 movimentos/hora, considerando mix de aeronaves classe C. Este valor é derivado da tabela padrão da AC 150/5060-5, sem ajustes locais para infraestrutura ou operação. Contudo, essa estimativa desconsidera o tempo real de ocupação de pista observado, que, conforme dados empíricos, excede 50 segundos em média para pousos e 60 segundos para decolagens. A aplicação direta deste resultado ao SBAR desconsidera limitações críticas, como a extensão incompleta da taxiway e os tempos reais de ocupação da pista, o que pode resultar em superestimação da capacidade real.

O Aeroporto de Juazeiro do Norte opera com pista única (13/31), sem taxiway paralela em toda a extensão, o que exige manobras de *backtrack* e impacta significativamente o tempo de ocupação da pista. Essa característica operacional, somada a uma demanda concentrada em horários de pico e infraestrutura limitada, torna SBJU um cenário relevante para aplicação comparativa dos métodos de estimativa de capacidade. Considerando pista única com operações segregadas e meteorologia predominantemente VMC, a estimativa nominal de capacidade horária situa-se em torno de 30 movimentos/hora. No entanto, o método não considera o impacto de *backtrack*, nem restrições específicas da infraestrutura local, podendo superestimar a capacidade prática do aeródromo.

O Aeroporto Internacional de Maceió - Zumbi dos Palmares (SBMO) apresenta configuração operacional com pista única (12/30) e *taxiway* paralela funcional ao longo de toda a extensão da pista, o que permite operações sem necessidade sistemática de *backtrack*. Essa infraestrutura contribui para a redução do tempo de ocupação da pista (TOPP/TOPD) e para a otimização da fluidez operacional. A meteorologia local é caracterizada por períodos de visibilidade reduzida, especialmente entre os meses de abril e junho, quando há maior incidência de operações por instrumentos (IFR).

Conforme o método empírico estabelecido pela Federal Aviation Administration (FAA, 1995), a capacidade horária de pista é determinada com base em tabelas paramétricas que consideram três fatores principais: tipo de operação (VFR ou IFR), mix de aeronaves e configuração de pistas. Para o Aeroporto Zumbi dos Palmares (SBMO), adota-se a condição de pista única, com operações mistas e predomínio de condições IFR durante cerca de 60% do tempo, conforme evidenciado nos dados meteorológicos sazonais.

O mix de aeronaves registrado no período de 1º de setembro de 2021 a 31 de agosto de 2022, segundo o relatório técnico da Infracea (2022), indica predominância de aeronaves da categoria D (88%), como Airbus A320 e Boeing 737, e uma parcela de 12% da categoria C, como o Embraer 195. Tal perfil operacional é típico de aeroportos de médio porte com predominância de voos domésticos regulares. Com base nos parâmetros apresentados na Tabela 2, a capacidade bruta estimada para configuração de pista única com mix moderado e predominância IFR situa-se entre 28 e 30 movimentos/hora, sob condições ideais.

4.1.2. Estimativa via MCA 100-14 (2015)

A aplicação do método MCA 100-14 ajustou essa estimativa à realidade operacional, utilizando simulação Monte Carlo com base em registros de mix de aeronaves com 81% categoria D (médio porte), 19% categoria C (pequeno porte), frequência de uso da cabeceira 11 (82%), e ausência de saídas rápidas, com taxiway paralela parcial, exigindo manobras de *backtrack* para algumas posições. O tempo médio de ocupação de pista (TOP) foi de 40 segundos para a decolagem (TOPD) e 53 segundos para o pouso (TOPP). Separação média aplicada (\bar{S}): 109 segundos (FAA, 1995; DECEA,

2015).

A estimativa do mix operacional de 81% de aeronaves categoria D (ex.: A320, B737, E195-E2) e 19% categoria C (ex.: ATR-72) foi obtida por meio da análise da frota regular identificada nos sistemas da ANAC (SIROS/SISINPAER/SARPA) e confirmada por observações de campo via FlightRadar24 e imagens de satélite (Google Earth) no período de abril a junho de 2024. As principais companhias operantes — Gol, LATAM e Azul — utilizam predominantemente jatos de fuselagem estreita, condizentes com a categoria D segundo os critérios da ICAO. Com base na equação da MCA 100-14, substituindo na fórmula (Eq.2), é possível calcular o tempo médio de ocupação ponderado:

$$CP = \frac{3600}{TOP + \bar{S}} = \frac{3600}{47,54 + 109} = \frac{3600}{156,54} \approx 22,99 \text{ mov/h} \quad (2)$$

Onde:

- TOP representa o tempo médio de ocupação de pista (ponderado entre decolagem e pouso);
- \bar{S} é o tempo médio de separação entre aeronaves (considerado como 109 s).

Portanto, a capacidade nominal (CPN) estimada foi de aproximadamente 23 movimentos por hora. Este valor já reflete as restrições impostas pela ausência de saídas rápidas e a necessidade de *back-track* em algumas posições. Considerando fatores de indisponibilidade, preferências operacionais e perda por separações reais, a capacidade prática limitada (CPL) foi ajustada para cerca de 20 movimentos por hora, conforme recomendado na metodologia do DECEA (2015).

Para o SBJU, foram utilizados os dados do relatório técnico da AENA (2021b), com base no ano-base de 2019. Os parâmetros observados foram: Tempo médio de ocupação da pista (TOP): 65 s e Separação média entre aeronaves (\bar{S}): 88 s

$$\text{Aplicando a fórmula (Eq.2) do método: } CP = \frac{3600}{TOP + \bar{S}} = \frac{3600}{65 + 88} = \frac{3600}{153} \approx 23,5 \text{ mov/h.} \quad (2)$$

Essa estimativa reflete as limitações operacionais geradas pela ausência de saídas rápidas e pelo uso de *backtrack*, representando uma avaliação mais aderente à realidade do SBJU.

Para o Aeroporto Zumbi dos Palmares (SBMO), adotou-se uma estimativa parametrizada com base em padrões médios da categoria D, conforme observado em estudos semelhantes em outros aeroportos com mix operacional comparável (ex.: SBAR e SBJU), respeitando a proporção de 88% de aeronaves categoria D e 12% categoria C (Infracea, 2022). Assumindo valores típicos médios conservadores para aeródromos com esse perfil: TOP estimado: 58 segundos (valor de referência obtido por analogia ao SBJU) \bar{S} estimado: 92 segundos (com base em separações médias padrão para operações IFR com mix predominante D).

$$\text{Substituindo-se na Eq.2: } CP_{ATC} = \frac{3600}{TOP + \bar{S}} = \frac{3600}{58 + 92} = \frac{3600}{150} \approx 24,0 \text{ mov/h} \quad (2)$$

4.1.3. Estimativa via MCA 100-26 (2025)

No contexto do método MCA 100-26, mesmo na ausência de estudo formalmente publicado para o Aeroporto de Aracaju (SBAR), foi conduzida uma simulação exploratória com base nos dados operacionais reais disponíveis, incorporando variáveis cognitivas associadas à atuação do controle de tráfego aéreo (ATC). A equação utilizada, conforme apresentada na (Eq.3), contempla dois limites possíveis para a capacidade de pista, sendo o menor deles adotado como a capacidade efetiva. A Eq.3 utilizada foi apresentada na Tabela 2, onde:

$$CP_{ATC} = \min\left(\frac{3600}{55 + 93}, \frac{3600}{(9 \times 4) + (0,07 \times 3600)}\right) = \left(\frac{3600}{148}, \frac{3600}{288}\right) \approx \min 24,3 \frac{\text{mov}}{\text{h}}, 12,5 \frac{\text{mov}}{\text{h}} \quad (3)$$

Assumindo os seguintes parâmetros típicos para aeródromos com baixa automação e complexidade média: TCCA = 9 s/aeronave | Na = 4 aeronaves simultâneas | TAS = 0,07 (7% do tempo

dedicado a atividades secundárias) | Tempo médio de ocupação da pista (TOP) = 55 segundos | Separação média entre aeronaves (\bar{S}) = 93 segundos.

Desse modo, embora a capacidade física-operacional do aeródromo seja estimada em 24,3 movimentos por hora (valor superior ao obtido pela metodologia MCA 100-14, de aproximadamente 23 mov/h), a limitação cognitiva do controlador — especialmente em cenários de multitarefa sem apoio automatizado — impõe um teto operacional de 12,5 movimentos por hora, evidenciando a necessidade de mitigação da carga de trabalho para alcançar níveis de eficiência compatíveis com a infraestrutura disponível. Para SBJU, foram considerados os seguintes parâmetros: TCCA = 9 s/aeronave, $N_a = 4$ aeronaves simultâneas, TAS = 0,07, TOP = 65 s. e $\bar{S} = 88$ s.

$$\text{Tem-se: } CP_{ATC} = \min\left(\frac{3600}{153}, \frac{3600}{36+252}\right) \approx \min 23,5 \frac{\text{mov}}{\text{h}}, 12,5 \frac{\text{mov}}{\text{h}} \quad (3)$$

Os valores de TOP = 65 s e $\bar{S} = 88$ s utilizados para o SBJU foram estimados indiretamente, com base nas condições operacionais descritas nos relatórios da AENA (2021b), tais como ausência de taxiway paralela plena, necessidade de *backtrack*, e predominância de aeronaves categoria C/D. Tais parâmetros seguem os referenciais médios empregados em estudos prévios de capacidade em aeródromos regionais de configuração similar, conforme DECEA (2025) e ICAO (2016).

Dessa forma, a capacidade final limitada pela carga cognitiva do controlador de tráfego aéreo (ATCO) é estimada em aproximadamente 12,5 movimentos/hora, conforme preconiza a estrutura probabilístico-cognitiva do modelo MCA 100-26 (DECEA, 2025). Esse valor representa o menor entre os limites físico-operacional (23,5 mov/h, derivado do tempo médio de ocupação da pista e da separação entre aeronaves) e o limite cognitivo (12,5 mov/h), este último resultante da combinação entre a taxa de comando do controlador (TCCA), o número de aeronaves simultaneamente monitoradas (N_a), e o percentual de tempo consumido com tarefas secundárias (TAS).

Essa limitação cognitiva está diretamente relacionada ao contexto operacional do Aeroporto de Juazeiro do Norte, onde se observa baixo nível de automação nos sistemas de apoio ao ATC, layout de pista com uso frequente de *backtrack*, exigindo mais intervenções do controlador e maior carga de coordenação entre posições torre, solo e aproximação; carência de saídas rápidas e ausência de taxiway paralela, resultando em ocupações prolongadas da pista e aumento da complexidade tática no gerenciamento da sequência de pousos e decolagens e concentração de movimentos em janelas horárias estreitas, o que intensifica picos de carga cognitiva, especialmente em horários de início e fim de ondas operacionais. A aplicação do método MCA 100-26 em Maceió (SBMO) adotou-se os seguintes parâmetros: Tempo médio de ocupação da pista (TOP): 58 s, Separação média entre aeronaves (\bar{S}): 92 s, Tempo de coordenação cognitiva por aeronave (TCCA): 9 s/aeronave (valor padrão em cenários de média complexidade com baixa automação, conforme DECEA, 2025) | Número de aeronaves simultâneas sob vigilância (N_a): 4, Tempo de atenção a tarefas secundárias (TAS): 7% (valor assumido conforme MCA 100-26). A Eq.3 de capacidade ATC aplicada segue a forma:

$$CP_{ATC} = \left(\frac{3600}{58+92}, \frac{3600}{(9 \times 4) + (0,07 \times 3600)}\right) = \left(\frac{3600}{150}, \frac{3600}{288}\right) \approx \min (24,0 \frac{\text{mov}}{\text{h}}, 12,5 \frac{\text{mov}}{\text{h}}) \quad (3)$$

Este resultado indica que, embora a infraestrutura física permita um desempenho próximo a 24 movimentos/hora, a limitação da capacidade cognitiva do ATC em ambiente com baixa automação e elevado número de funções paralelas impõe um teto operacional inferior.

5 CONCLUSÕES

Este estudo comparou três metodologias distintas de estimativa de capacidade horária de pista FAA (1995), MCA 100-14 (2015) e MCA 100-26 (2025) — aplicadas aos aeroportos regionais de Aracaju (SBAR), Juazeiro do Norte (SBJU) e Maceió (SBMO), com base em dados operacionais reais, simulações Monte Carlo e parâmetros ajustados à realidade local. Os resultados demonstram que:

- O método FAA tende a superestimar a capacidade nominal ao desconsiderar variáveis críticas como tempo real de ocupação de pista, manobras de *backtrack* e ausência de saídas rápidas.
- O MCA 100-14 apresentou maior aderência operacional ao incorporar o tempo médio de ocupação da pista e a separação entre aeronaves de forma explícita.
- O método MCA 100-26, por sua vez, revelou-se o mais abrangente ao integrar elementos cognitivos e multitarefa do controle de tráfego aéreo, impondo um limite prático inferior à capacidade nominal estimada.

Diante disso, para desdobramentos futuros, recomenda-se uma abordagem hierarquizada e complementar entre os métodos, na qual, estimativas iniciais (FAA) sejam refinadas com dados empíricos (MCA 100-14) e validadas sob aspectos humanos e operacionais (MCA 100-26). Para a regulação e gestão aeroportuária, tal abordagem permitirá diagnósticos mais robustos e decisões mais alinhadas à realidade do sistema.

6 REFERÊNCIAS

- AENA Brasil (2021a). *Projeto Básico – Aeroporto Santa Maria / Aracaju–SE – SBAR – Memorial de Cálculo da Capacidade de Pistas e Pátio. Documento SBAR-GRL-000-2002-00, rev. 00*. Aracaju: AENA Brasil.
- AENA Brasil (2021b). *Memorial de Cálculo da Capacidade de Pista e Pátio – Aeroporto de Juazeiro do Norte – SBJU. Documento SBJU-GRL-000-2007, rev. 0A*. Juazeiro do Norte: AENA Brasil.
- ANAC - Agência Nacional de Aviação Civil (2020). Guia de internacionalização de aeroportos brasileiros. Brasília: ANAC. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/setor-regulado/aerodromos/guia-de-internacionalizacao-de-aeroportos.pdf>. Acesso em: 17 jul. 2025.
- Budd, L., Pitfield, D. E., & Irvine, B. (2011). *Sustainable air transport system: A stakeholder perspective. Journal of Air Transport Management*, 17(6), 347–353. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2011.05.003>
- Correia, A. R., Wirasinghe, S. C., & de Barros, A. G. (2008). *A global index for level of service evaluation at airport passenger terminals*. *Transportation Research Part E*, 44(4), 607–620.
- de Neufville, R., & Odoni, A. (2013). *Airport Systems: Planning, Design, and Management*. 2nd ed. McGraw-Hill.
- DECEA (2015). *MCA 100-14 – Capacidade do Sistema de Pistas*. Rio de Janeiro: Departamento de Controle do Espaço Aéreo.
- DECEA (2025). *Manual de Capacidade ATC – MCA 100-26*. Portaria DECEA/DNOR1 nº 1.788, de 18 de junho de 2025. Rio de Janeiro: Departamento de Controle do Espaço Aéreo. Disponível em: <https://publicacoes.decea.mil.br/publicacao/mca-100-26>
- EUROCONTROL (2010). *Human Performance in Air Traffic Management Safety*. A White Paper. EUROCONTROL / FAA Action Plan 15 Safety, September. Disponível em: <https://www.eurocontrol.int>.
- FAA – Federal Aviation Administration (1995). AC 150/5060-5 – Airport Capacity and Delay. Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation.
- ICAO – International Civil Aviation Organization. (2005a). Doc 9854 – Global Air Traffic Management Operational Concept. International Civil Aviation Organization.
- ICAO – International Civil Aviation Organization (2005b) Doc 9157 – Aerodrome Design Manual, Part 2 – Taxiways, Aprons and Holding Bays. 4rd ed. Montréal: ICAO.
- ICAO – International Civil Aviation Organization (2008). Manual on Air Traffic Management System Requirements. Doc 9882. Montréal: ICAO, 2008. Disponível em: <https://www.icao.int>.
- ICAO – International Civil Aviation Organization (2014) Doc 8168 – Procedures for Air Navigation Services – Aircraft Operations (PANS-OPS). Vol. II, 6th ed. Montréal: ICAO.
- INFRAEIA (2022). *Estudo de Viabilidade Técnica da Segurança Operacional da Instalação de ALS no Aeroporto Internacional de Maceió (SBMO) – Fase I e Fase II*. Relatórios Técnicos. Brasília, DF.
- Reitmann, A., Fricke, H., & Kaul, A. (2019). *Modeling air traffic delay propagation with agent-based simulations in multi-airport environments*. In: 13th USA/Europe ATM R&D Seminar. Viena, Áustria. Disponível em: https://www.atmseminar.org/seminarContent/seminar13/papers/ATM_Seminar_2019_Reitmann_final.pdf
- Sever, B., & Turan, Ö. (2024). *A Monte Carlo approach for capacity and delay analyses of multiple interacting airports in Istanbul metroplex*. *The Aeronautical Journal*, 128(1327), 1935–1960. DOI: <https://doi.org/10.1017/aer.2024.24>