

Tomada de Decisão Estratégica na Frota Offshore: Método MADRID na Seleção de eVTOLs para Otimização Operacional e Sustentabilidade

Silmara Scontre - UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE (UFF)

silmara_scontre@id.uff.br

Thiago Fernandes Lima – ESCOLA NAVAL (EN)

fernandes_lima81@yahoo.com.br

Marcos dos Santos - UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE (UFF)

marcosdossantos_doutorado_uff@yahoo.com.br

1. Resumo

A incorporação de veículos elétricos de decolagem e aterrissagem vertical (eVTOLs - *electric vertical take-off and landing*) em operações *offshore* representa um desafio estratégico de elevada complexidade, exigindo abordagens analíticas capazes de integrar múltiplas dimensões técnicas, operacionais, ambientais e regulatórias. Este estudo apresenta o Método MADRID, um *framework* estruturado de apoio à decisão desenvolvido especificamente para a seleção estratégica de plataformas eVTOL em frotas *offshore*. O método foi concebido para lidar com ambientes decisórios caracterizados por alta incerteza, interdependência entre critérios e restrições operacionais severas, típicas de operações marítimas e industriais remotas. O método MADRID organiza o processo decisório em etapas sistemáticas que contemplam a definição hierárquica de critérios, a mensuração objetiva de desempenho das alternativas e a consolidação analítica dos resultados em um ranking estratégico. A abordagem enfatiza transparência, rastreabilidade e reprodutibilidade, permitindo sua aplicação tanto por operadores quanto por formuladores de políticas públicas e planejadores de infraestrutura aérea avançada. A aplicabilidade do método é demonstrada por meio de um estudo de caso que avalia diferentes modelos de eVTOL a partir da eficiência operacional, sustentabilidade ambiental, segurança e aderência regulatória ao contexto *offshore*. Os resultados evidenciam a capacidade do Método MADRID de capturar *trade-offs* relevantes entre critérios críticos e de fornecer suporte consistente à tomada de decisão estratégica. Ao propor um *framework* dedicado à realidade *offshore*, este estudo contribui para o avanço metodológico na avaliação de tecnologias emergentes de mobilidade aérea avançada e oferece uma ferramenta robusta para apoiar a transição do setor *offshore* rumo a soluções mais sustentáveis, seguras e eficientes. Além de sua contribuição aplicada, este estudo amplia o escopo metodológico do Método MADRID ao

demonstrar sua adequação a contextos offshore de elevada criticidade operacional e incerteza tecnológica, caracterizados por fortes restrições regulatórias e não compensatoriedade entre critérios.

Palavras-chave: Método MADRID, MCDA, Mobilidade Aérea Avançada, Operações *Offshore*, Sustentabilidade

Abstract

The integration of electric vertical take-off and landing vehicles (eVTOLs) into offshore operations represents a highly complex strategic challenge, requiring analytical approaches capable of integrating multiple technical, operational, environmental, and regulatory dimensions. This study presents the MADRID Method, a structured decision-support framework specifically developed for the strategic selection of eVTOL platforms within offshore fleets. The method was designed to address decision-making environments characterized by high uncertainty, strong inter dependencies among criteria, and severe operational constraints, which are typical of offshore and remote industrial operations. The MADRID Method structures the decision-making process into systematic stages that include the hierarchical definition of criteria, objective performance measurement of alternatives, and analytical consolidation of results into a strategic ranking. The approach emphasizes transparency, traceability, and reproducibility, enabling its application by operators, policymakers, and advanced air mobility infrastructure planners. The applicability of the method is demonstrated through a case study evaluating different eVTOL models based on operational efficiency, environmental sustainability, safety, and regulatory compliance within the offshore context. The results highlight the ability of the MADRID Method to capture relevant trade-offs among critical criteria and to provide consistent support for strategic decision-making. By proposing a framework tailored to offshore realities, this study contributes to methodological advances in the assessment of emerging advanced air mobility technologies and offers a robust tool to support the offshore sectors transition to wardsafer, more efficient, and more sustainable solutions. Beyond its applied contribution, this study extends the methodological scope of the MADRID Method by demonstrating its suitability for offshore contexts characterized by high operational criticality, regulatory constraints, and non-compensatory decision structures.

Keywords: MADRID Method, MCDA, Advanced Air Mobility, Offshore Operations, Sustainability

1. Introdução

A Mobilidade Aérea Avançada (*Advanced Air Mobility - AAM*) vem se consolidando como um dos principais vetores de transformação dos sistemas de transporte contemporâneos, impulsionada pelo desenvolvimento de aeronaves elétricas de decolagem e pouso vertical (eVTOLs), por avanços regulatórios e pela crescente demanda por soluções mais eficientes e sustentáveis. Grande parte das aplicações iniciais da AAM estão concentradas em ambientes urbanos, mas existe um interesse crescente na adaptação dessas tecnologias para operações *offshore*, nos setores de energia, óleo e gás e logística marítima, onde existe uma dependência de transporte aéreo elevada.

As operações *offshore* apresentam um conjunto específico de desafios operacionais, ambientais e regulatórios, incluindo condições meteorológicas adversas, restrições de espaço físico, elevados requisitos de segurança e altos custos operacionais associados ao uso de helicópteros convencionais. Com a chegada das aeronaves, os eVTOLs surgem como uma alternativa potencialmente vantajosa, oferecendo menor emissão de ruído, redução de custos operacionais e maior alinhamento com metas de descarbonização. Para a aquisição dessas aeronaves para ambientes marítimos críticos exige decisões estratégicas complexas, uma vez que os modelos disponíveis diferem em desempenho técnico, maturidade regulatória, robustez de sistemas e adequação ao contexto *offshore*.

A seleção de modelos de eVTOL para esse tipo de operação caracteriza-se como um problema decisório multicritério, com múltiplas alternativas que devem ser avaliadas com critérios heterogêneos e conflitantes. A presença de incertezas associadas a tecnologias emergentes reforça a necessidade de abordagens estruturadas que permitam integrar dados quantitativos, critérios qualitativos e julgamentos objetivos de forma transparente e rastreável.

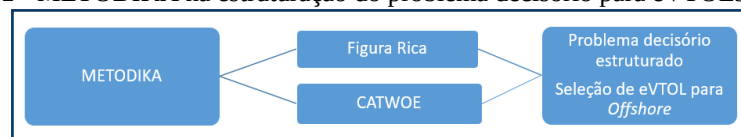
Este estudo tem como objetivo aplicar o Método MADRID como *framework* de apoio à decisão para a seleção estratégica de aeronaves eVTOL tripuladas destinadas a operações *offshore*. O método combina técnicas de estruturação de problemas, ponderação objetiva de critérios, clusterização de alternativas e ordenação multicritério, permitindo lidar com a complexidade do espaço decisório sem a exclusão prematura de alternativas. A pesquisa será norteadada em

como estruturar e apoiar, de forma robusta e transparente, a seleção de eVTOLs tripulados para operações *offshore* considerando múltiplos critérios técnicos, operacionais, ambientais e regulatórios, contribuindo tanto para o avanço metodológico no uso de ferramentas multicritério aplicadas à Mobilidade Aérea Avançada quanto para o debate sobre a viabilidade e os requisitos estratégicos da adoção de eVTOLs em ambientes *offshore*.

Abordagens contemporâneas de apoio à decisão enfatizam que a aplicação de modelos quantitativos ou a adoção de decisões intuitivas tende a gerar resultados inconsistentes ou enviesados. Plataformas metodológicas dedicadas à estruturação de problemas complexos, como o METODIKA, destacam que a compreensão sistêmica do problema deve preceder qualquer tentativa de avaliação ou comparação formal de alternativas, que é fundamental para explicitar e alinhar perspectivas entre *stakeholders* e reduzir vieses cognitivos.

O METODIKA atua como elemento orientador da fase de estruturação do problema, a partir da qual são definidos instrumentos específicos voltados à compreensão sistêmica e conceitual do contexto analisado (Figura 1).

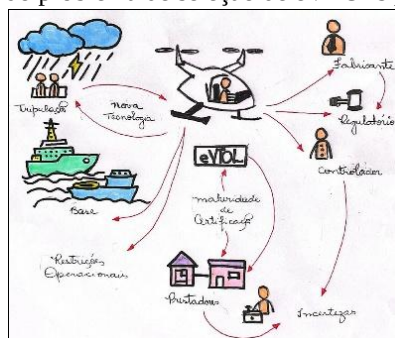
Figura 1 - METODIKA na estruturação do problema decisório para eVTOLs *offshore*.



Fonte: Autores (2025)

No processo de estruturação do problema, a Figura Rica (Figura 2) é um recurso visual que apoia a identificação e a análise das interações, conflitos e fluxos presentes no sistema estudado.

Figura 2- Descrição do problema de seleção de eVTOLs por meio da Figura Rica



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Na fase de estruturação do problema, a CATWOE (Tabela 1), foi aplicada para sintetizar os componentes do sistema sob análise, identificando clientes, atores, processo de transformação, visão de mundo, proprietários e restrições ambientais, pois favorece o alinhamento da

compreensão do problema entre os *stakeholders* e auxilia na definição dos critérios empregados na etapa multicritério.

Tabela 1 - Estruturação do problema decisório por meio do CATWOE.

Elementos	C (clientes)	A (autores)	T (transformação)	W (Visão do mundo)	O (proprietários)	E (restrições ambientais)
Descrição	Operadores e trabalhadores de <i>offshore</i> ; sociedade beneficiada por soluções mais seguras e sustentáveis	Pilotos; operadores logísticos; fabricantes de eVTOL; equipes de manutenção; autoridades regulatórias aeronáuticas; gestores de infraestrutura <i>offshore</i>	Transformar a necessidade complexa de transporte aéreo <i>offshore</i> seguro, eficiente e sustentável em um problema estruturado de seleção estratégica de modelos de eVTOL.	Operações <i>offshore</i> são ambientes de alto risco, onde segurança e confiabilidade têm prioridade; abordagem de tecnologias de sistemática e responsável	Tomadores de decisão; gestores corporativos; autoridades regulatórias	Regulamentação aeronáutica vigente; condições meteorológicas severas; limitações tecnológicas atuais; infraestrutura <i>offshore</i> existente (<i>helidecks</i> , bases costeiras); exigências de segurança e tolerância a falhas

Fonte: Autores (2025)

A questão de pesquisa que fundamenta este estudo está em como apoiar, de maneira estruturada e transparente, a seleção estratégica de aeronaves eVTOL tripuladas destinadas a operações *offshore*, através de múltiplos critérios técnicos, econômicos, ambientais e regulatórios. Assim, o objetivo geral do artigo é propor e aplicar o Método MADRID como *framework* de apoio à tomada de decisão na seleção de eVTOLs tripulados para o setor *offshore*, integrando técnicas de ponderação objetiva, clusterização e ordenação multicritério. Diante desse contexto, este estudo busca responder à seguinte questão de pesquisa: como apoiar, de forma estruturada, transparente e não eliminatória, a seleção estratégica de aeronaves eVTOL tripuladas destinadas a operações *offshore*, considerando múltiplos critérios técnicos, operacionais, ambientais e regulatórios? Para tanto, propõe-se a aplicação do Método MADRID como um *framework* integrado de apoio à decisão, combinando estruturação sistêmica do problema, ponderação objetiva de critérios, clusterização de alternativas e ordenação multicritério.

As principais contribuições do estudo residem na ampliação do domínio de aplicação do Método MADRID para o contexto offshore, na integração formal entre *Soft Systems Methodology* e MCDA em decisões aeronáuticas estratégicas, e na geração de subsídios analíticos para operadores e formuladores de políticas no processo de adoção de eVTOLs em ambientes marítimos críticos.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Mobilidade Aérea Avançada e eVTOLs

A Mobilidade Aérea Avançada (*Advanced Air Mobility – AAM*) refere-se a um ecossistema emergente de soluções aeronáuticas que incorpora novas tecnologias de propulsão elétrica ou híbrida, automação avançada e novos modelos operacionais para transporte de passageiros e cargas (Al Haddad *et al.*, 2020; Postorino; Gori, 2020). No centro desse ecossistema encontram-

se as aeronaves elétricas de decolagem e pouso vertical (*electric Vertical Take-Off and Landing eVTOLs*), caracterizadas por arquiteturas de propulsão distribuída, elevada eficiência energética e potencial de redução de emissões e ruído em comparação com aeronaves convencionais (Brunelli; Ditta; Postorino, 2023).

Estudos recentes destacam o rápido avanço tecnológico dessas aeronaves, impulsionado por investimentos privados, políticas públicas de descarbonização e iniciativas regulatórias voltadas à certificação de aeronaves de nova geração (Di Mascio *et al.*, 2022). Observa-se que grande parte dos estudos se concentra em aplicações urbanas, enquanto aplicações em ambientes industriais e *offshore* permanecem menos exploradas, apesar de seu elevado potencial estratégico (Wuet *al.*, 2021).

2.2 Operações Offshore e desafios aeronáuticos

As operações *offshore* representam um dos modelos mais exigentes para a aviação civil, envolvendo longas distâncias sobre água, condições meteorológicas adversas, restrições de infraestrutura e elevados requisitos de segurança operacional (Hall *et al.*, 2021; Liu; Hu; Chen, 2022). Os helicópteros convencionais têm sido o principal meio de transporte de pessoal e cargas para plataformas marítimas, apesar de seus altos custos operacionais e impacto ambiental significativo.

As aeronaves eVTOLs tripuladas surgem como alternativas promissoras para missões de curta e média distância, transporte de equipes reduzidas e operações de apoio logístico, porém a adoção dessas aeronaves em ambiente *offshore* impõe requisitos adicionais, como redundância de sistemas críticos, compatibilidade com *helidecks* existentes e aderência a normas regulatórias rigorosas (Ayres, Jr., 2024; Calogero, 2024). Esses fatores reforçam a necessidade de abordagens analíticas capazes de integrar múltiplas dimensões de avaliação de forma sistemática.

2.3 Estruturação de problemas complexos em sistemas sociotécnicos

Plataformas metodológicas contemporâneas voltadas ao apoio à decisão reforçam a importância dos *Problem Structuring Methods (PSMs)* como etapa inicial em processos decisórios complexos. O METODIKA, 2024 enfatiza que a adequada estruturação do problema precede a aplicação de métodos quantitativos, reduzindo o risco de decisões baseadas em modelos matemáticos corretos, porém desalinhados com o sistema real.

Essa perspectiva é relevante na AAM *offshore*, por conta dos dados técnicos incompletos ou assimétricos entre fabricantes. A utilização de PSMs contribui para alinhar expectativas entre *stakeholders*, delimitar o escopo do problema e garantir que os critérios de avaliação reflitam os objetivos estratégicos do sistema. (Alinezhad; Khalili, 2019).

A seleção estratégica de aeronaves eVTOL tripuladas para operações *offshore* caracteriza-se como um problema sociotécnico complexo, envolvendo múltiplos atores, objetivos potencialmente conflitantes, restrições regulatórias e elevados níveis de incerteza tecnológica. Para lidar com essa complexidade ainda na fase introdutória do estudo, adotou-se uma abordagem de estruturação sistêmica do problema, fundamentada na *Soft Systems Methodology (SSM)*.

Foi utilizada a Figura Rica (*Rich Picture*) como representação visual do sistema decisório, permitindo explicitar de forma holística os principais atores, fluxos de informação, restrições operacionais, conflitos e objetivos associados à incorporação de eVTOLs em operações *offshore*. Esse tipo de representação favorece o pensamento sistêmico e a construção de uma compreensão compartilhada do problema, caracterizados por elevada complexidade e múltiplas interdependências (Checkland; Scholes, 1990; Checkland, 1999; Armson, 2011).

A técnica CATWOE foi empregada para estruturar os elementos do sistema analisado, identificando Clientes, Atores, Processo de Transformação, Visão de Mundo, Proprietários do Sistema e Restrições Ambientais. O CATWOE permite traduzir a representação visual da Figura Rica em uma formulação lógica e coerente do problema, reduzindo problemas conceituais e alinhando diferentes perspectivas dos *stakeholders* envolvidos (Checkland; Poulter, 2010). A análise CATWOE contribuiu para a delimitação das fronteiras do sistema decisório e para a definição dos critérios de avaliação utilizados na etapa multicritério.

2.4 Métodos Multicritério de Apoio à Decisão (MCDA)

Os Métodos Multicritério de Apoio à Decisão (*MultiCriteria Decision Analysis - MCDA*) constituem um conjunto de abordagens utilizadas para avaliar alternativas sob múltiplos critérios, em contextos caracterizados por *trade-offs* e objetivos conflitantes (Pan; Luo; Chen, 2021). Esses métodos permitem integrar critérios quantitativos e qualitativos, fornecendo uma base estruturada para comparação e ordenação de alternativas.

Na literatura, diferentes métodos MCDA têm sido aplicados a problemas de transporte e infraestrutura. A aplicação desses métodos a tecnologias emergentes exige cautela, uma vez que disponibilidade plena de dados ou estabilidade tecnológica nem sempre são atendidos. (Xu; Liu; Zhang, 2020).

O Método MADRID (*Multicriteria Analysis for Decision-support in Innovation and Development*) foi desenvolvido para lidar com problemas decisórios associados à inovação, tecnologias emergentes e sistemas complexos (Corriça *et al.*, 2024, 2025); Carvalho, 2022). Diferente de abordagens compensatórias, o MADRID combina estruturação do problema, ponderação objetiva baseada na informação contida nos dados e técnicas de clusterização para redução da complexidade decisória.

Essa abordagem torna o MADRID adequado para a avaliação de modelos de eVTOL em ambiente *offshore*, onde encontra-se múltiplas alternativas em diferentes estágios de maturidade tecnológica e regulatória. Além disso, o método permite lidar com incertezas e heterogeneidade de dados, preservando coerência analítica e rastreabilidade decisória (Stanujkic *et al.*, 2021).

O Método MADRID surge como um *framework* para apoiar decisões complexas fornecendo a base conceitual para a metodologia evidenciando que a seleção estratégica de eVTOLs para operações *offshore* necessita de uma abordagem integrada, capaz de articular fundamentos da AAM, desafios específicos do ambiente marítimo, técnicas de estruturação de problemas e métodos multicritério avançados.

3. Metodologia

Este estudo explora o Método MADRID (*Multicriteria Analysis for Decision Through Ranking and Integrated Decomposition*) como *framework* de apoio à decisão para a seleção estratégica de modelos de eVTOL tripuladas aplicáveis a operações *offshore*. O método foi proposto por Corriça *et al.* (2024, 2025) para lidar com problemas caracterizados por grande número de alternativas, múltiplos critérios e heterogeneidade informacional, sendo adequado a contextos de elevada incerteza tecnológica.

O Método MADRID evita a eliminação de alternativas, internalizando diferenças de maturidade tecnológica e status regulatório como critérios de avaliação (Corriça *et al.*, 2024, 2025). Essa característica torna o método pertinente ao domínio da Mobilidade Aérea Avançada, onde

existem soluções em diferentes estágios de desenvolvimento. (Al Haddad *et al.*, 2020; Brunelli; Ditta; Postorino, 2023).

O método integra *Problem Structuring Methods (PSMs)*, técnicas de normalização e ponderação, clusterização não supervisionada e ordenação multicritério, garantindo coerência lógica, rastreabilidade analítica e transparência decisória.

Diferentemente de métodos multicritério amplamente utilizados, como AHP, TOPSIS ou ELECTRE, que tendem a assumir estruturas compensatórias ou exigem a exclusão prévia de alternativas, o Método MADRID foi concebido para contextos de inovação e incerteza, nos quais soluções se encontram em diferentes estágios de maturidade tecnológica e regulatória. Sua abordagem não eliminatória e orientada à informação contida nos dados permite preservar alternativas emergentes no processo decisório, aspecto particularmente relevante em domínios como a Mobilidade Aérea Avançada *offshore*.

3.1 Alternativas e Critérios da matriz de decisão

As alternativas correspondem a modelos eVTOL tripuladas, com processo formal de certificação iniciado junto a autoridades aeronáuticas (FAA, EASA, ANAC) e potencial de aplicação em operações *offshore*, considerando requisitos como alcance mínimo, capacidade de carga, segurança e viabilidade operacional sobre água.

O problema decisório é definido por um conjunto de alternativas: $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_{10}\}$. A seleção final resultou em dez alternativas, número considerado adequado para assegurar diversidade tecnológica sem comprometer a robustez analítica do estudo, conforme recomendado pelo *framework* MADRID (Tabela 2).

Tabela 2 - Descrição das alternativas

	Alternativas	Fabricante	País de origem	Link oficial
A1	Archer Midnight	Archer Aviation	Estados Unidos	https://www.archer.com/
A2	Joby S4	Joby Aviation	Estados Unidos	https://www.jobyaviation.com/
A3	VX4 / Valo	Vertical Aerospace	Reino Unido	https://vertical-aerospace.com/
A4	ALIA-250	BETA Technologies	Estados Unidos	https://www.beta.team/
A5	Lilium Jet	Lilium GmbH	Alemanha	https://lilium.com/
A6	Eve eVTOL	Eve Air Mobility (Embraer)	Brasil	https://eveairmobility.com/
A7	CityAirbus NextGen	Airbus	França	https://www.airbus.com/
A8	Jaunt Journey	Jaunt Air Mobility	Estados Unidos	https://jauntairmobility.com/
A9	VoloCity	Volocopter GmbH	Alemanha	https://www.volocopter.com/
A10	VoloConnect	Volocopter GmbH	Alemanha	https://www.volocopter.com/

Fonte: Autores (2025)

A opção por aeronaves eVTOL tripuladas justifica-se pelos requisitos atuais de segurança operacional, certificação e transporte de pessoal crítico em operações *offshore*, nos quais soluções totalmente não tripuladas ainda apresentam limitações regulatórias e operacionais significativas.

3.2 Critérios da matriz de decisão

Foram determinados um conjunto de critérios: $C = \{c_1, c_2, c_3, \dots, a_{10}\}$, com 10 critérios organizados em seis dimensões: operacional, técnica, segurança, regulatória, ambiental e estratégica (Tabela 3). Essa definição atende ao princípio de avaliação multicritério completa, conforme discutido na literatura de apoio à decisão (Alinezhad; Khalili, 2019).

Tabela 3 - Descrição dos critérios

Critérios		Descrição	Unidade Medida	Monotonicidade
C1	Custo	Custo médio estimado do eVTOL	US\$	Minimização
C2	Alcance operacional	Distância máxima operacional com reserva mínima	km	Maximização
C3	Velocidade máxima	Velocidade máxima de cruzeiro	Km/h	Maximização
C4	Carga útil	Capacidade máxima de carga útil transportável	Kg	Maximização
C5	Capacidade de passageiros	Número máximo de passageiros (excluindo piloto)	Passageiros	Maximização
C6	Ruído operacional	Nível de ruído medido ou declarado em cruzeiro	dB	Minimização
C7	Tempo de recarga	Tempo necessário para recarga total ou preparação entre voos	Minutos	Minimização
C8	Maturidade de certificação	Estágio do processo regulatório	Escala ordinal 1-5	Maximização
C9	Adequação ao ambiente offshore	Grau de compatibilidade com operações offshore	Escala ordinal 1-5	Maximização
C10	Redundância e arquitetura de segurança	Nível de redundância de sistemas críticos	Escala ordinal 1-5	Maximização

Fonte: Autores (2025)

Os critérios foram classificados em critérios de benefício (quanto maior, melhor desempenho) e critérios de custo (quanto menor, melhor desempenho), de modo a orientar corretamente o processo de normalização e evitar distorções na comparação entre alternativas.

3.4 Construção da matriz de decisão

A matriz de decisão inicial é definida como:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1,10} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2,10} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{10,1} & x_{10,2} & \cdots & x_{10,10} \end{bmatrix}$$

onde, x_{ij} representa o desempenho da alternativa a_i no critério c_j . Os valores da matriz podem ser obtidos a partir de dados técnicos públicos, documentação regulatória ou julgamento estruturado de especialistas, aceita em MCDA (Checkland; Poulter, 2010). A tabela 4 apresenta a matriz de decisão.

Tabela 4 - Matriz de decisão

Critérios Alternativas	Custo US\$ Mi	Alcance Km	Velocidade Km/h	Carga Kg	Passageiro unidade	Ruído dB	Recarga min	Certificação Escala 1-5	Offshore Escala 1-5	Segurança Escala 1-5
Monotonicidade	min	max	max	max	max	min	min	max	max	max
A1 Archer Midnight	5.0	161	241	453	4	45	10	4	3	5
A2 Joby S4	4.8	161	322	450	4	48	8	4	3	5
A3 VX4 / Valo	4.5	161	241	513	4	50	8	3	3	5
A4 ALIA-250	4.0	463	285	635	5	50	9	4	5	5
A5 Lilium Jet	6.0	300	300	500	6	48	10	3	4	5
A6 Eve eVTOL	3.5	100	237	480	4	48	8	3	3	4
A7 CityAirbus NextGen	5.5	210	280	320	4	50	8	3	4	5
A8 Jaunt Journey	4.2	80	120	500	4	50	10	3	2	4
A9 VoloCity	2.0	35	110	250	1	50	10	4	1	4
A10 VoloConnect	3.8	100	250	340	2	48	10	3	2	4

Fonte: Autores (2025)

3.5 Normalização da matriz de decisão

A matriz foi obtida por meio de normalização linear min-max, assegurando comparabilidade entre critérios de diferentes naturezas e unidades. Critérios de custo e de benefício foram tratados de forma distinta, conforme estabelecido no Método MADRID. O procedimento garante que todos os valores normalizados pertençam ao intervalo [0,1], preservando as relações relativas de desempenho entre as alternativas. (Tabela5).

Para critérios de maximização:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)}$$

Para critérios de minimização:

$$r_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)}$$

resultando na matriz normalizada: $R = [r_{ij}]$

Tabela 5 - Matriz normalizada

Critérios Alternativas	Custo US\$ Mi	Alcance Km	Velocidade Km/h	Carga Kg	Passageiro unidade	Ruído dB	Recarga min	Certificação Escala 1-5	Offshore Escala 1-5	Segurança Escala 1-5
A1 Archer Midnight	0.30	0.31	0.54	0.00	0.60	1.00	0.00	1.00	0.50	1.00
A2 Joby S4	0.34	0.31	1.00	0.00	0.60	0.00	0.00	1.00	0.50	1.00
A3 VX4 / Valo	0.40	0.31	0.54	0.41	0.60	0.00	0.00	0.00	0.50	1.00
A4 ALIA-250	0.50	1.00	0.75	1.00	0.80	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00
A5 Lilium Jet	0.00	0.63	0.81	0.41	1.00	0.00	0.00	0.00	0.75	1.00
A6 Eve eVTOL	0.63	0.15	0.43	0.41	0.60	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00
A7 CityAirbus NextGen	0.13	0.44	0.72	0.41	0.60	0.00	0.00	0.00	0.75	1.00
A8 Jaunt Journey	0.45	0.10	0.04	0.41	0.60	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00
A9 VoloCity	1.00	0.00	0.00	0.41	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
A10 VoloConnect	0.55	0.15	0.61	0.41	0.20	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00

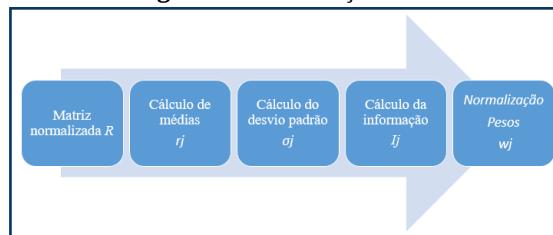
Fonte: Autores (2025)

3.6 Ponderação dos critérios (DIBR)

O método DIBR foi adotado por permitir a obtenção de pesos objetivos a partir da variabilidade e da informação contida nos dados, reduzindo a dependência de julgamentos subjetivos e tornando-o particularmente adequado a contextos caracterizados por incerteza tecnológica e assimetria informacional, como o da seleção de eVTOLs.

Ademais, a escolha do DIBR é coerente com a literatura que destaca a importância da ponderação estruturada em problemas complexos (Xu; Liu; Zhang, 2020). (Fluxograma 1)

Fluxograma 1 - Descrição do DIBR



Fonte: Autores (2025)

Os pesos dos critérios foram obtidos por meio do *Decision Information Based Ranking* (DIBR), que utiliza a informação estatística contida na matriz normalizada. O procedimento é descrito pela fórmula de média, desvio padrão, e a definição da quantidade de informação associada a cada critério.

Os pesos w_j foram calculados com base na fórmula: $w_j = \frac{I_j}{\sum_{k=1}^m I_k}$

onde I_j é a quantidade de informação associada ao critério C_j , calculada como: $I_j = \sigma_j \cdot \bar{r}_j$

A Tabela 6 apresenta os pesos dos critérios obtidos pelo método DIBR

Tabela 6 - Ponderação dos critérios (DIBR)

Alternativas	r_j	σ_j	I_j	w_j
A1 Archer Midnight	0.63	0.19	0.120	0.086
A2 Joby S4	0.55	0.16	0.088	0.071
A3 VX4 / Valo	0.61	0.28	0.171	0.150
A4 ALIA-250	0.58	0.14	0.081	0.068
A5 Lilium Jet	0.60	0.23	0.138	0.115
A6 Eve eVTOL	0.52	0.05	0.026	0.023
A7 CityAirbus NextGen	0.47	0.00	0.000	0.000
A8 Jaunt Journey	0.73	0.25	0.183	0.152
A9 VoloCity	0.69	0.18	0.124	0.106
A10 VoloConnect	0.78	0.33	0.257	0.228

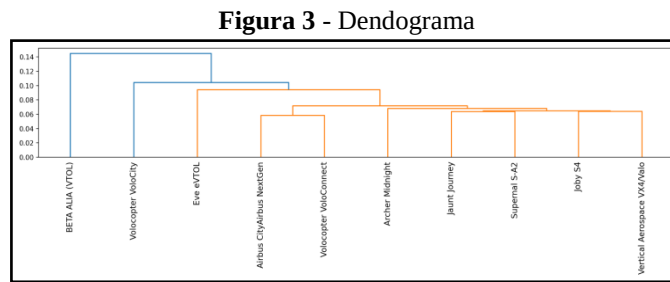
Fonte - Autores (2025)

3.7 Clusterização das alternativas

Para reduzir a complexidade do espaço decisório, aplicou-se a clusterização hierárquica aglomerativa, utilizando o critério *single linkage* e a distância euclidiana. A dissimilaridade entre duas alternativas a_i e a_k foi calculada por:

$$d(a_i, a_k) = \sqrt{\sum_{j=1}^{10} (v_{ij} - v_{kj})^2}$$

O número ótimo de *clusters* foi determinado com base no índice de silhueta (Rousseeuw, 1987), conforme já descrito na metodologia. A Figura 3 apresenta o dendrograma hierárquico resultante da clusterização das alternativas. (Corriça *et al*, 2024.2025)



Fonte: <https://madrid.shinyapps.io/madrid/>

3.8 Determinação do número ótimo de *clusters*

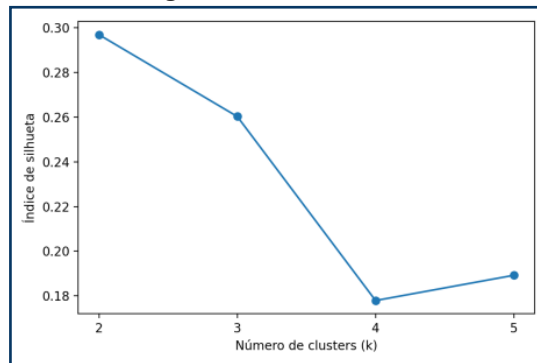
A definição do número ótimo de *clusters* foi realizada por meio do índice de silhueta, proposto por Rousseeuw (1987) e Corriça *et al* (2024, 2025). Para cada alternativa a_i o coeficiente de silhueta $s(i)$ é calculado como:

$$s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}}, \text{ onde:}$$

$a(i)$ é a distância média de $a(i)$ em relação às demais alternativas pertencentes ao mesmo *cluster*; $b(i)$ é a menor distância média de $a(i)$ em relação às alternativas de qualquer outro *cluster*. O valor de $s(i)$ varia no intervalo $[-1, 1]$, sendo valores próximos de 1, indicativos de uma alocação adequada da alternativa ao seu *cluster*. O número de *clusters* adotado é aquele que maximiza o valor médio do índice de silhueta, assegurando o melhor compromisso entre coesão interna e separação entre grupos.

A Figura 4 apresenta os valores médios do índice de silhueta para diferentes quantidades de *clusters*, sendo selecionado o valor de *k* que maximiza esse indicador para seguir a análise.

Figura 4 - Silhueta média



Fonte: <https://madrid.shinyapps.io/madrid/>

3.9 Ordenação final das alternativas pelo método MABAC

A ordenação final das alternativas foi realizada utilizando o Método MABAC. As alternativas foram comparadas com base na área de fronteira, definida como a média geométrica dos valores

ponderados para cada critério: $g_j = (\prod_{i=1}^n v_{ij})^{\frac{1}{n}}$

O desempenho global de cada alternativa foi calculado como a soma das distâncias de cada alternativa à fronteira: $S_i = \sum_{j=1}^{10} w_j r_{ij}$

O ranking final das alternativas (tabela 7), foi obtido por ordenação decrescente de S_i .

Tabela 7 - Ranking final das alternativas

Alternativas	S_i	Ranking
A6 Volocopter Volocitty	0.844	1°
A3 Vertical Aerospace VX4	0.699	2°
A8 Eve Air Mobility EVE-100	0.662	3°
A4 Beta Technologies ALIA-250	0.624	4°
A1 Archer Midnight	0.560	5°
A7 City Airbus NextGen	0.519	6°
A2 Joby S4	0.300	7°
A9 Jaunt Journey	0.262	8°
A5 Lilium Jet	0.230	9°
A10 Ehang VT-30	0.172	10°

Fonte: Autores (2025)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação do Método MADRID permitiu avaliar de forma estruturada o conjunto de dez aeronaves eVTOL tripuladas selecionadas, integrando múltiplos critérios técnicos, operacionais, ambientais e regulatórios relevantes ao contexto *offshore*. O processo resultou em um *ranking* final multicritério, obtido por meio do método MABAC, bem como na identificação de padrões de desempenho por meio da clusterização hierárquica.

Os resultados indicam que a alternativa A6 (*Volocopter VoloCity*) apresentou o melhor desempenho global, posicionando-se em primeiro lugar no *ranking*. Esse resultado decorre de seu elevado nível de redundância de sistemas críticos, maturidade regulatória e adequação ao contexto *offshore*, critérios que receberam pesos elevados na etapa de ponderação objetiva (DIBR). Embora não apresente o menor custo nem o maior alcance absoluto, seu equilíbrio multicritério mostrou-se superior quando consideradas as exigências operacionais e de segurança típicas de ambientes marítimos.

As alternativas A3 (*Vertical Aerospace VX4*) e A8 (*Eve Air Mobility EVE-100*) ocuparam a segunda e terceira posições, respectivamente. Ambas se destacaram por apresentarem bom desempenho em critérios operacionais fundamentais, como alcance, capacidade de carga e número de passageiros, além de um nível satisfatório de maturidade tecnológica. Esses resultados sugerem que aeronaves com maior capacidade operacional, mesmo associadas a custos mais elevados, podem apresentar vantagem estratégica quando avaliadas sob uma visão sistêmica.

As alternativas como A10 (*EHang VT-30*) e A5 (*Lilium Jet*) apresentaram desempenho inferior no *ranking* final. O resultado do VT-30 está associado a limitações relacionadas à certificação e à adequação ao ambiente *offshore*, enquanto o *Lilium Jet* apresentou penalizações decorrentes de custos elevados e maior complexidade operacional. Esses resultados evidenciam que soluções tecnologicamente avançadas nem sempre se traduzem em melhor desempenho estratégico quando analisadas sob múltiplos critérios.

A análise de clusterização complementa o *ranking* multicritério ao revelar padrões de similaridade entre as alternativas. O dendrograma e o índice de silhueta indicaram a formação de dois *clusters* principais. O primeiro *cluster* é composto por alternativas com alto desempenho multicritério, por apresentar maior robustez operacional, melhor aderência regulatória e maior

confiabilidade de sistemas. O segundo *cluster* reúne alternativas com desempenho intermediário ou menor alinhamento aos requisitos específicos de operações *offshore*.

A convergência entre os resultados da clusterização e do *ranking* MABAC reforça a consistência da análise, uma vez que as alternativas posicionadas no topo do *ranking* tendem a pertencer ao *cluster* de maior desempenho. Essa coerência metodológica evidencia a capacidade do Método MADRID de fornecer suporte consistente tanto para problemas de classificação quanto de ordenação de alternativas.

Os resultados obtidos sugerem que a seleção de eVTOLs para operações *offshore* deve priorizar critérios associados à segurança, maturidade regulatória e robustez de sistemas, mesmo em detrimento de métricas econômicas ou de desempenho isolado. Em ambientes de elevada criticidade operacional, como plataformas marítimas, falhas sistêmicas podem acarretar riscos significativos, justificando a maior importância atribuída a critérios não financeiros.

O estudo demonstra que abordagens multicritério estruturadas são adequadas para apoiar decisões estratégicas em contextos de inovação, nos quais os dados são heterogêneos e incompletos. O uso integrado de ponderação objetiva, clusterização e ordenação multicritério mostrou-se eficaz para lidar com essas características.

Embora não tenha sido conduzida uma análise formal de sensibilidade, a convergência observada entre os resultados da ponderação objetiva, da clusterização hierárquica e do *ranking* final sugere estabilidade estrutural da solução obtida. Pequenas variações nos pesos dos critérios mais relevantes tenderiam a afetar marginalmente a ordenação intermediária, sem alterar substancialmente as alternativas de melhor desempenho, o que reforça a robustez conceitual da abordagem adotada.

5. Limitações do Estudo

Como limitações do estudo, destaca-se a dependência de dados técnicos de domínio público, os quais podem sofrer alterações à medida que os programas de certificação e o desenvolvimento tecnológico dos eVTOLs avancem. Além disso, o setor ainda enfrenta restrições estruturais relevantes, especialmente relacionadas ao elevado custo de materiais e à escassez de mão de obra especializada. Esses fatores já impactaram negativamente algumas empresas analisadas (*Lilium e Airbus*), ocasionando a paralisação de estudos e atrasos em processos de certificação de aeronaves, o que reduz o número de fabricantes efetivamente consolidados e certificados

para sustentar a continuidade e a escalabilidade dos projetos de Mobilidade Aérea Urbana. Nesse contexto, estudos futuros podem incorporar análises de sensibilidade, cenários prospectivos e critérios adicionais, como custos de ciclo de vida, impactos logísticos e a ampliação do conjunto de alternativas avaliadas.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo demonstrou a aplicabilidade do Método MADRID como *framework* de apoio à decisão estratégica na seleção de aeronaves eVTOL tripuladas para operações *offshore*, um contexto caracterizado por elevada criticidade operacional, restrições regulatórias rigorosas e incertezas tecnológicas. Ao integrar estruturação sistêmica do problema, ponderação objetiva de critérios, clusterização e ordenação multicritério, o trabalho evidencia a adequação do método a problemas decisórios não compensatórios associados à inovação.

Os resultados evidenciaram que alternativas com maior maturidade regulatória, redundância de sistemas e adequação operacional ao ambiente marítimo tendem a apresentar melhor desempenho global, reforçando a importância de uma avaliação sistêmica que vá além de critérios isolados de custo ou alcance. A convergência entre os resultados do *ranking* MABAC e da clusterização hierárquica reforça a consistência interna da abordagem adotada.

Do ponto de vista metodológico, o estudo contribui ao demonstrar a aplicabilidade do Método MADRID em um novo domínio, distinto de aplicações anteriores, ampliando seu escopo para o setor *offshore* e para a Mobilidade Aérea Avançada. A utilização de dados objetivos e a transparência das etapas analíticas favorecem a reprodutibilidade e a adaptação do modelo a outros contextos decisórios.

Do ponto de vista acadêmico, o estudo contribui para a literatura de MCDA ao expandir o domínio de aplicação do Método MADRID e ao demonstrar a viabilidade da integração formal entre *Soft Systems Methodology* e métodos multicritério em sistemas sociotécnicos complexos. Sob a ótica gerencial, os resultados oferecem subsídios analíticos para operadores *offshore*, fabricantes e reguladores na avaliação estratégica de eVTOLs, destacando a prioridade de critérios de segurança, maturidade regulatória e robustez sistêmica em detrimento de métricas isoladas de desempenho ou custo.

A pesquisa demonstra que o Método MADRID constitui uma ferramenta adequada para apoiar a tomada de decisão estratégica em ambientes complexos e inovadores, oferecendo subsídios



consistentes para a transição de operações *offshore* rumo a soluções aéreas mais seguras, eficientes e sustentáveis.

7. Agradecimentos

Os autores expressam seus agradecimentos ao Prof. Dr. Manuel Ayres Junior e à Profa. Ma. Kely Cristina Góis de Azevedo pelo apoio, pelas valiosas contribuições. Suas considerações, expertise e reflexões críticas foram fundamentais para o aprimoramento da abordagem teórica e metodológica, contribuindo de forma significativa para a consistência e a qualidade final do estudo.

8. Referências

AL HADDAD, C. *et al.* **Urbanairmobility: a comprehensive review and comparative analysis with autonomous and electric ground transportation.** Transportation Research Part C: Emerging Technologies, v. 120, p. 102772, 2020.

ALINEZHAD, A.; KHALILI, J. **New methods and applications in multicriteria decision making.** International Journal of Applied Decision Sciences, v. 12, n. 1, p. 1–22, 2019.

ARMSON, Rosalind. **Growing wings on the way: systems thinking for messy situations.** Axminster: Triarchy Press, 2011.

AYRES JR., Manuel. **Vertiportos: desafios regulatórios e operacionais para implantação na Região Metropolitana de São Paulo.** São Paulo: SEESP, 2024.

BAURANOV, A.; RAKAS, J. **Designing vertiport networks for Urban Air Mobility.** Transportation Research Part C: Emerging Technologies, v. 132, p. 103421, 2021.

BRUNELLI, M.; DITTA, C. C.; POSTORINO, M. N. **New infrastructures for Urban Air Mobility systems: a systematic review on vertiport location and capacity.** Journal of Air Transport Management, v. 112, p. 102460, 2023.

CALOGERO, A. **Vertiport Security & Facilitation: A Risk-Based Approach.** Brasília: Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), 2024. (Apresentação no ANAC AAM 2024).

CECUTTA, S. **AAM Readiness Index: Measuring industry progress across key use cases.** Brasília: Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), 2024. (Apresentação no ANAC AAM Summit 2024).

CHECKLAND, Peter; SHOLES, Jim. **Soft systems methodology in action.** Chichester: John Wiley & Sons, 1990.

CHECKLAND, P.; POULTER, J. **Soft Systems Methodology**. In: Systems approaches to managing change. London: Springer, 2010.

CORRIÇA, José Victor de Pina; PELLANDA, Paulo Cesar; GOLDSCHMIDT, Ronaldo Ribeiro. **Seleção de veículos aéreos não tripulados para a Marinha do Brasil: um novo método de apoio à tomada de decisão por meio do aprendizado de máquina não supervisionado**. In: Anais do XIII Simpósio de Engenharia de Produção (SIMEP). 2025. DOI: 10.29327/simepanais.1074709.

DIAKOULAKI, D.; MAVROTAS, G.; PAPAYANNAKIS, L. **Determining objective weights in multiple criteria problems: the CRITIC method**. Computers & Operations Research, v. 22, n. 7, p. 763–770, 1995.

DI MASCIIO, M. *et al.* **Vertiport sand regulatory frameworks for Advanced Air Mobility: a systematic review**. Drones, v. 6, n. 4, p. 87, 2022.

GOWER, J. C.; ROSS, G. J. S. **Minimums panningt reesand single linkage cluster analysis**. Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics), v. 18, n. 1, p. 54–64, 1969.

HALL, A. *et al.* **Safety risk modeling for Urban Air Mobility operations**. Journal of Air Transportation, v. 29, n. 2, p. 45–59, 2021.

KIM, H.; MAVRIS, D. **An analytical framework for societal acceptance of Urban Air Mobility**. AIAA Journal of Aircraft, v. 58, p. 1–17, 2021.

LIU, Z.; HU, J.; CHEN, X. **Safety analysis and risk modeling for electric VTOL operations in urban environments**. Aerospace Science and Technology, v. 128, p. 107662, 2022.

METODIKABR. **Plataforma metodológica para apoio à decisão**. Disponível em: <https://www.metodikabr.com>. Acesso em: 10 nov. 2025.

MÜHLHAUSEN, T. *et al.* **Sound perception and acceptance of eVTOL aircraft in urban areas: experimental evidence**. Applied Acoustics, v. 207, p. 109285, 2023.

PAN, B.; LUO, X.; CHEN, Z. **Applications of CRITIC weighting in transportation systems: a comprehensive review**. Transportation Research Review, v. 12, p. 201–220, 2021.

PAMUČAR, D.; ČIROVIĆ, G. **The selection of transport and handling resources in logistics centers using Multi-Attributive Border Approximation area Comparison (MABAC)**. Expert Systems with Applications, v. 42, n. 6, p. 3016–3028, 2015. DOI: 10.1016/j.eswa.2014.11.057

POSTORINO, M.; GORI, S. **Air transport infrastructures in the era of Urban Air Mobility: models, challenges, and opportunities**. Transport Policy, v. 99, p. 77–89, 2020.

ROUSSEEUW, P. J. **Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis**. Journal of Computational and Applied Mathematics, v. 20, p. 53–65, 1987. DOI: 10.1016/0377-0427(87)90125-7.



SANTOS, M.; CARVALHO, F. **Systems thinking and multicriteria modeling for risk assessment in emerging aviation in frastructures.** *Systems*, v. 10, n. 3, p. 75–92, 2022.

SANTOS, M.; ALMEIDA, J. **Hybrid multicriteria models for sustainable transportin frastructure planning: anintegrated CRITIC–WISP approach.** *Journal of Urban Mobility*, v. 7, p. 44–59, 2023.

SANTOS, M. *et al.* **Decision frameworks for UAM corridor design using hybrid MCDAtechniques.** *Digital Aviation Journal*, v. 2, n. 1, p. 1–16, 2024.

STANUJKIĆ, D. *et al.* **The Weighted Influence Superiority and Inferiority Ranking Method (WISP).** *Facta Universitatis. Series Mechanical Engineering*, v. 19, n. 3, p. 447–463, 2021.

WU, Z. *et al.* **Urban air mobility network design and demand for casting.** *Engineering*, v. 7, n. 8, p. 1101–1115, 2021.

XU, Z.; LIU, F.; ZHANG, Y. **Objective weighting based onen tropyand CRITIC for multicriteria decision-making.** *PLOS ONE*, v. 15, n. 5, e0231892, 2020.