

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



Rafael Pereira Martins

**ANÁLISE DE MÉTODOS MULTICRITÉRIOS DE APOIO À
DECISÃO APLICADOS À SELEÇÃO DE SÍTIOS
AEROPORTUÁRIOS REGIONAIS**

Trabalho de Graduação

2019

Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

Rafael Pereira Martins

**ANÁLISE DE MÉTODOS MULTICRITÉRIOS DE APOIO À
DECISÃO APLICADOS À SELEÇÃO DE SÍTIOS
AEROPORTUÁRIOS REGIONAIS**

Orientador

Prof. Dr. Marcelo Xavier Guterres (ITA)

ENGENHARIA CIVIL-AERONÁUTICA

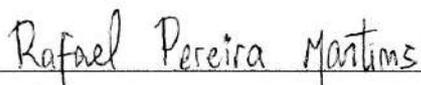
SÃO JOSÉ DOS CAMPOS

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

2019

ANÁLISE DE MÉTODOS MULTICRITÉRIOS DE APOIO À DECISÃO APLICADOS À SELEÇÃO DE SÍTIOS AEROPORTUÁRIOS REGIONAIS

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação



Rafael Pereira Martins

Autor



Prof. Dr. Marcelo Xavier Guterres (Instituto Tecnológico de Aeronáutica)

Orientador



Prof. Dr. Eliseu Lucena Neto

Coordenador do Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

São José dos Campos, 21 de novembro de 2019

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Divisão de Informação e Documentação

Martins, Rafael Pereira

Análise de Métodos Multicritérios De Apoio à Decisão Aplicados à Seleção de Sítios Aeroportuários Regionais / Rafael Pereira Martins.

São José dos Campos, 2019.

74f.

Trabalho de Graduação – Engenharia Civil-Aeronáutica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2019. Orientador: Prof. Dr. Marcelo Xavier Guterres.

1. Seleção de sítios aeroportuários regionais. 2. Métodos multicritérios de apoio à decisão. 3. MCDA. 4. AHP 5. ELECTRE 6. PROMETHEE I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Análise de Métodos Multicritérios de Apoio à Decisão Aplicados à Seleção de Sítios Aeroportuários Regionais.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MARTINS, Rafael Pereira. **Análise de Métodos Multicritérios de Apoio à Decisão Aplicados à Seleção de Sítios Aeroportuários Regionais**. 2019. 74f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Rafael Pereira Martins

TÍTULO DO TRABALHO: Análise de Métodos Multicritérios de Apoio à Decisão Aplicados à Seleção de Sítios Aeroportuários Regionais.

TIPO DO TRABALHO/ANO: Graduação / 2019

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.



Rafael Pereira Martins

Rua H8B, 234 – Campus do CTA

12.228-461, São José dos Campos – SP

Aos meus familiares e amigos.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a minha família por sempre acreditar e investir em mim, essa é mais uma conquista nossa.

Aos amigos que tornaram essa caminhada mais agradável e descontraída, obrigado pela convivência ao longo desses anos.

Ao professor Guterres, meu orientador, por ter possibilitado a realização deste trabalho de forma agradável.

Resumo

Uma das formas de buscar o desenvolvimento e integração do território brasileiro é a aviação regional, que exige a construção de novos aeroportos. Escolher um local para um novo aeroporto significa ponderar variáveis de diversas naturezas. Nesse contexto, a seleção de sítios aeroportuários regionais envolve a necessidade de se atender diversos critérios, que muitas das vezes não são intuitivamente comparáveis. Dessa forma, os métodos multicritérios constituem importante ferramenta de apoio no processo decisório. O presente trabalho comparou o resultado do método AHP, com os de outros dois métodos, ELECTRE e PROMETHEE, quando aplicados à Metodologia de Escolha de Sítios Aeroportuários (MESA) desenvolvida por profissionais do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). Os resultados foram obtidos a partir de um estudo de caso no Sudoeste Paranaense e mostraram-se satisfatórios diante do pequeno espaço amostral. Ainda, para validar as respostas obtidas, realizou uma análise de sensibilidade, a partir da variação de parâmetros inerentes aos métodos.

Palavras-chave: sítios aeroportuários regionais, métodos multicritérios de apoio à decisão, MCDA, AHP, ELECTRE, PROMETHEE.

Abstract

One of the ways to pursue the development and integration of the Brazilian territory is regional aviation, which requires the construction of new airports. Choosing a location for a new airport means weighing variables of various kinds. In this context, the selection of regional airport sites involves the need to meet several criteria, which are often not intuitively comparable. Thus, multi-criteria methods are an important support tool in the decision-making process. The present work compared the results of the AHP method with those of two other methods, ELECTRE and PROMETHEE, when applied to the Airport Site Selection Methodology (MESA) developed by professionals of the Aeronautical Technology Institute (ITA). The results were obtained from a case study in Southwest Paranaense and were satisfactory given the small sample space. Also, to validate the answers obtained, a sensitivity analysis was performed, based on the variation of parameters inherent to the methods.

Keywords: regional airport sites, multi-criteria decision analysis, MCDA, AHP, ELECTRE, PROMETHEE.

Lista de Figuras

Figura 1 – Território grande, malha pequena.	17
Figura 2 – Oito passos para o processo de tomada de decisão.	22
Figura 3 – Fluxograma do método AHP.	29
Figura 4 – Exemplo de grafo da relação de sobreclassificação.	35
Figura 5 – Fluxograma do método ELECTRE I.	35
Figura 6 – Tipos de critérios generalizados (<i>Pd</i>: função de preferência).	37
Figura 7 – Fluxograma do método PROMETHEE II.	40
Figura 8 – Redução da área de busca.	43
Figura 9 – Árvore de decisão.	46
Figura 10 – Estrutura de relações.	54
Figura 11 – Estrutura de relações da simulação 1.	63
Figura 12 – Estrutura de relações nos casos em que $s \in 0,750; 0,800$.	65
Figura 13 – Estrutura de relações nos casos em que $v \in 0,200; 0,250$.	67
Figura 14 – Estrutura de relações nos casos em que $v \in 0,300; 0,350$.	67
Figura 15 – Estrutura de relações nos casos em que $v \in 0,400; 0,450$.	68

Lista de Quadros

Quadro 1 – Relações básicas de preferências.....	25
Quadro 2 – Relações combinadas de preferência.....	26
Quadro 3 – Escala relativa de importância de Saaty.	29
Quadro 4 – Métodos da família ELECTRE.....	33
Quadro 5 – Relações binárias do método ELECTRE I.....	34
Quadro 6 – Critérios classificatórios do MESA.....	45
Quadro 7 – Natureza dos critérios classificatórios do MESA.	46

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Índice aleatório.	31
Tabela 2 – Medidas dos critérios.	48
Tabela 3 – Medidas dos critérios normalizadas.	48
Tabela 4 – Prioridades do grupo ITA (todos os especialistas).	49
Tabela 5 – Prioridades do grupo SAC (todos os especialistas).	49
Tabela 6 – Prioridades do grupo SO (todos os especialistas).	50
Tabela 7 – Prioridades do grupo ITA (especialistas consistentes).	51
Tabela 8 – Prioridades do grupo SAC (especialistas consistentes).	51
Tabela 9 – Prioridades do grupo SO (especialistas consistentes).	51
Tabela 10 – AIP para o conjunto de especialistas consistentes.	52
Tabela 11 – Resultados finais da ordenação AHP.	52
Tabela 12 – Pesos dos critérios empregados no ELECTRE I.	53
Tabela 13 – Matriz de concordância.	53
Tabela 14 – Matiz de discordância.	53
Tabela 15 – Matriz de veto.	54
Tabela 16 – Índices de preferência em relação ao sítio S-02.	55
Tabela 17 – Índices de preferência em relação ao sítio S-2A.	55
Tabela 18 – Índices de preferência em relação ao sítio S-2C.	55
Tabela 19 – Índices de preferência em relação ao sítio S-03.	56
Tabela 20 – Índices de preferência em relação ao sítio S-04.	56
Tabela 21 – Fluxos positivo e negativo para cada alternativa.	56
Tabela 22 – Fluxo líquido para cada alternativa.	57
Tabela 23 – Ordenamento das alternativas segundo o fluxo líquido.	57

Tabela 24 – Desvio padrão dos pesos dos critérios.	58
Tabela 25 – Estimativas estatísticas.	58
Tabela 26 – Pesos dos critérios utilizados na análise de sensibilidade do método AHP.	59
Tabela 27 – Prioridades globais dos sítios em cada simulação.	60
Tabela 28 – Classificação final dos sítios em cada simulação.	60
Tabela 29 – Pesos dos critérios da análise de sensibilidade método ELECTRE I.	61
Tabela 30 – Matriz de veto da simulação 1.	62
Tabela 31 – Matriz de veto das simulações 2 a 12.	62
Tabela 32 – Matriz de veto das simulações com $s \in 0,550; 0,600; 0,650; 700$.	63
Tabela 33 – Matriz de veto das simulações em que $s \in 0,750; 0,800$.	64
Tabela 34 – Matriz de veto das simulações em que $s \in 0,850; 0,900; 0,950; 1,000$.	64
Tabela 35 – Matriz de veto das simulações em que $v = 0,150$.	65
Tabela 36 – Matriz de veto das simulações em que $v \in 0,200; 0,250$.	66
Tabela 37 – Matriz de veto das simulações em que $v \in 0,300; 0,350$.	66
Tabela 38 – Matriz de veto das simulações em que $v \in 0,400; 0,450$.	66
Tabela 39 – Fluxos líquidos dos sítios aeroportuários para cada simulação.	68
Tabela 40 – Posição dos sítios aeroportuários para cada simulação quanto à preferência.	69
Tabela 41 – Fluxos líquidos para diferentes valores de limite de indiferença.	70
Tabela 42 – Ordenação das alternativas para diferentes valores de limite de indiferença.	70

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Relevância do tema	16
1.2	Definição do problema	18
1.3	Objetivo principal da pesquisa	18
1.4	Objetivos intermediários da pesquisa	19
1.5	Estrutura do trabalho	19
2	APOIO À DECISÃO MULTICRITÉRIO	20
2.1	Processo de decisão multicritério	20
2.2	Modelagem de preferência.....	24
2.3	Métodos multicritérios de apoio à decisão	26
2.3.1	AHP – <i>Analytic Hierarchy Process</i>	28
2.3.2	ELECTRE – <i>Elimination et Choix Traduisant Réalité</i>	32
2.3.3	PROMETHEE – <i>Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations</i>	36
3	SELEÇÃO DE SÍTIOS AEROPORTUÁRIOS	41
4	METODOLOGIA	44
5	RESULTADOS	48
5.1	AHP.....	49
5.2	ELECTRE I.....	52
5.3	PROMETHEE II	55
5.4	Análise de Sensibilidade	57
5.4.1	AHP	58
5.4.2	ELECTRE I	61
5.4.3	PROMETHEE II.....	68
5.5	Discussão de Resultados.....	71
6	CONCLUSÃO	72
7	BIBLIOGRAFIA	73

1 Introdução

A aviação regional no Brasil busca promover o desenvolvimento de cidades nas quais atua e de localidades próximas. A ineficiência das ferrovias e do transporte fluvial, além das estradas malconservadas, configuram a precariedade da infraestrutura de transportes no país. O transporte aéreo regional surge, então, como alternativa para integração de certas regiões. Cidades de pequeno e médio porte ganham conexão entre si e com grandes centros urbanos, de forma que essa inclusão procura desenvolver e estimular o crescimento dessas áreas. Ademais, há a necessidade de garantir a cobertura em regiões de difícil acesso e de fronteiras com outros países (1).

Isso implica em uma maior movimentação na economia local, com aumento e melhoria da rede hoteleira, de bares e restaurantes, além do comércio em geral. Somado a isso, o advento das empresas aéreas de baixo custo também contribui para o crescimento do transporte aéreo regional, que se tornou acessível a parte da população que não utilizava este modo de transporte.

Além disso, a possibilidade de comércio com outras regiões e, até mesmo, outros países também passa a existir, de forma a atrair a instalação de novas empresas de diversos setores e gerar mais benefícios socioeconômicos para a região, como a geração de empregos diretos e indiretos em função do aeroporto.

Nesse contexto, os investimentos necessários são elevados e podem ser feitos de quatro formas: pela União, por empresas especializadas da Administração Federal Indireta, mediante convênio com os Estados ou Municípios, e por concessão ou autorização (2).

Uma das etapas mais importantes em planejamento de aeroportos é a escolha do sítio onde vai ser implantado o aeródromo. Na prática, o lugar ideal dificilmente pode ser encontrado, de forma que a tarefa passa a ser selecionar a opção que provoca menos transtornos para o aeroporto e para as comunidades vizinhas. Logo, é fundamental conhecer as finalidades para as quais o aeroporto vai ser implantado e definir, *a priori*, os critérios para a seleção do melhor sítio, a fim de evitar que o processo seja enviesado.

Em suma, o principal problema que surge nos dias de hoje para implantação de aeroportos recai sobre aspectos relativos à comunidade, não apenas em termos de relacionamento urbano, mas também envolvendo aspectos ambientais e de preservação cultural e histórica. A manutenção da harmonia com a comunidade requer que o aeroporto seja longe o

bastante para evitar que os incômodos gerados pela atividade aérea não perturbem, e próximo o suficiente para garantir boa acessibilidade.

São critérios, segundo a ICAO (3):

- espaço aéreo desobstruído e possibilidades de expansões;
- meteorologia – ventos e condições atmosféricas compatíveis;
- solo com suporte e condições de drenagem adequadas;
- disponibilidade de serviços de utilidade pública (água, energia, telefone etc.);
- acessibilidade – vias, estradas, ferrovias, portos e transporte público; e
- distância do centro gerador de demanda.

A dificuldade em se atender a todos esses critérios é evidente e, portanto, antes de se iniciar a escolha, é indicado se definir os critérios adequados para então se proceder à seleção. A análise técnica deve procurar se ater somente aos aspectos relacionados com os critérios adotados previamente, enquanto ao tomador de decisão cabe analisar as questões políticas envolvidas.

A tomada de decisão é um processo cada vez mais complexo. As incertezas nas escolhas, as variáveis de risco e o comportamento do indivíduo, aliados a fatores internos da organização, podem influenciar a imprecisão na tomada de decisão em ambientes organizacionais. A utilização de um método que facilite o processo decisório em ambientes de risco e incerteza, que apoie a estrutura da análise de decisão, e mostre a transparência aos interessados é muito importante (4).

Enfim, os Métodos Multicritério de Apoio à Decisão (MCDA – *Multi-Criteria Decision Analysis*), desenvolvidos ao longo da segunda metade do século passado, possibilitam o trabalho com subjetividade e incertezas em problemas complexos (5). Existem vários métodos de MCDA, porém todos executam, basicamente, os mesmos passos e empregam a mesma ferramenta principal: a Matriz de Comparação. O que diferencia um método do outro é a forma com que os passos são executados, isto é, a maneira com que os componentes da Matriz de Comparação são obtidos e utilizados (6).

Nesse sentido, podemos citar o emprego do Método de Análise Hierárquica (AHP – *Analytic Hierarchy Process*) na seleção de sítios aeroportuários regionais, vide o caso da Ilha de Samothraki (7) e do estudo realizado por Sennaroglu e Celebi (8). Aprender com a literatura

é válido não só pelo conhecimento, mas também pela possibilidade de estimular a aplicação de métodos técnicos em projetos de interesses públicos.

1.1 Relevância do tema

A seleção de um sítio aeroportuário consiste em um problema de decisão complexo, com a necessidade de avaliação de vários critérios para uma escolha final entre diferentes alternativas. A Análise de Decisão Multicritério padroniza o processo de tomada de decisão através de modelagem matemática, auxiliando o tomador de decisão a resolver problemas nos quais existem diversos objetivos a serem alcançados simultaneamente.

Algumas tendências prevalecem nos aeroportos e na indústria da aviação no início do século 21 (9):

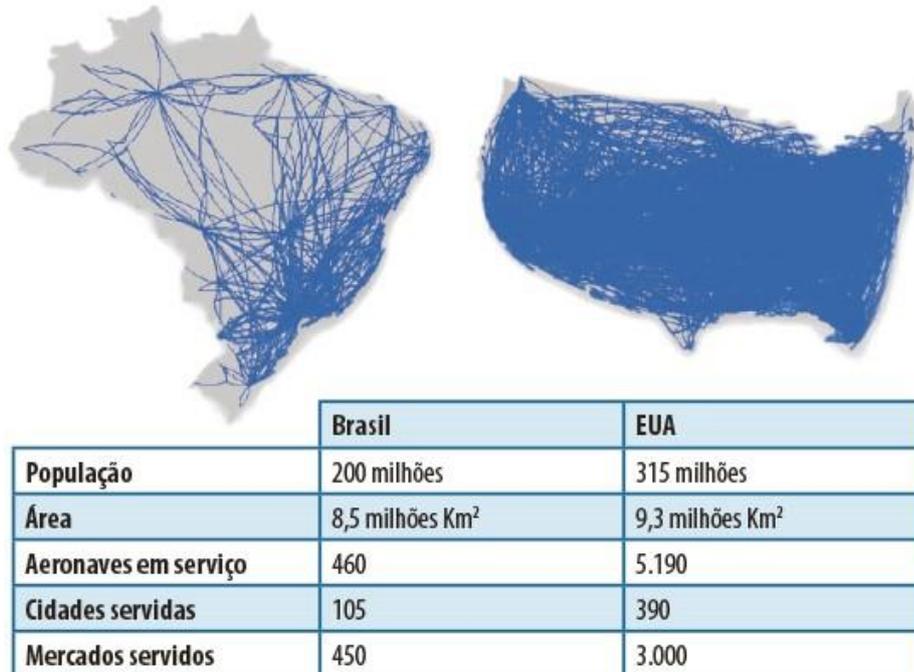
- Crescimento a longo prazo: em torno de 5 % ao ano no mundo, resultando no dobro do tráfego a cada 15 anos, exigindo expansões e melhorias contínuas.
- Comercialização: o aumento da gestão de negócios em uma economia de mercado substituindo a propriedade estatal em um ambiente regulado, tendência que faz do desempenho econômico e da eficiência critérios essenciais ao sucesso de projetos, além de severas mudanças conceituais.
- Globalização: a formação de alianças de companhias aéreas transnacionais e de gestores de aeroportos, sinalizando a implementação de melhores práticas mundiais para prover serviços aeroportuários.

Nesse contexto, o Programa de Desenvolvimento da Aviação Regional (PDAR), lançado no fim de 2012, previa um investimento de R\$ 7,3 bilhões em 270 aeroportos regionais a fim de aumentar o número de rotas operadas pelas empresas aéreas, incorporar novos aeroportos à rede de transporte aéreo regular e ampliar o acesso da população brasileira a serviços aéreos. Sob a ótica do programa, a expansão da malha aeroportuária contribuiria para integração do território nacional, fortalecimento dos centros de turismo, desenvolvimento dos polos regionais e garantia de acesso às comunidades da Amazônia Legal. A ideia era deixar 96 % da população a pelo menos 100 quilômetros de um terminal de passageiros. No início de 2018, 40 milhões de pessoas estavam a uma distância maior do que essa de um aeroporto (10).

No entanto, duas notas técnicas de procuradores da República alertaram para o fato de que, entre os 270 aeroportos a receberem investimentos, pelo menos 20 apresentavam distância inferior a 100 quilômetros entre um e outro. Em seis casos, a distância era inferior a 60 quilômetros. A Secretaria de Aviação Civil (SAC) teria listado a hierarquia das cidades quanto a seus dados socioeconômicos sem estudar o potencial de demanda individual de cada uma delas (11).

A título de comparação, os EUA, com uma população 57 % maior que a brasileira, tinha 3,5 vezes mais cidades servidas por voos regionais e mais de 10 vezes o número de aeronaves em serviço. A situação descrita é ilustrada na Figura 1.

Figura 1 – Território grande, malha pequena.



Fonte: (11).

Logo, os métodos MCDA são importantes ferramentas capazes de reduzir subjetividades e auxiliar na escolha de sítios aeroportuários, de forma que sejam realizados os melhores investimentos com o dinheiro público disponível.

Diante desse cenário, a equipe de profissionais do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) desenvolveu a Metodologia de Escolha de Sítios Aeroportuários (MESA), que busca estabelecer diretriz iniciais para a busca de áreas viáveis para implantação de um aeroporto, bem como o processamento de critérios para identificação de sítios potenciais.

1.2 Definição do problema

Ainda que problemas como a subjetividade sejam eliminados com a utilização do método AHP, há carência de literaturas que atestem as vantagens deste perante os outros métodos de MCDA que serão avaliados ao se tratar da escolha de sítios aeroportuários. Desta forma, dada a relevância socioeconômica e a complexidade logística da implementação de um aeroporto, faz-se o seguinte questionamento: “As vantagens do método AHP se destacam em relação às vantagens dos demais Métodos Multicritérios de Apoio à Decisão quando aplicado ao MESA?”.

Nesse contexto, a pesquisa será restrita devido à ampla quantidade de métodos MCDA existentes, isto é, analisará os resultados da seleção de sítio aeroportuário segundo os métodos escolhidos a partir da relevância em número de citações bibliográficas:

- AHP – *Analytic Hierarchy Process*
- ELECTRE – *Elimination and Choice Expressing Reality*
- PROMETHEE – *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*

A aplicação dos métodos MCDA exige a determinação de critérios e respectivos pesos para que a Matriz de Comparação seja implementada. O presente trabalho tomará como base os critérios do MESA, desenvolvido por profissionais do ITA.

1.3 Objetivo principal da pesquisa

O objetivo principal deste trabalho, caso a resposta do problema seja positiva, é confirmar a tendência da literatura quanto ao emprego do método AHP. Em outras palavras, busca-se verificar se, dentre os MCDA estudados, o método AHP é o que melhor se adapta à metodologia MESA.

1.4 Objetivos intermediários da pesquisa

A partir da definição do problema e do objetivo principal, definiu-se alguns objetivos intermediários a fim de direcionar o estudo de forma a alcançar o propósito final:

- revisar e implementar os métodos que serão analisados; e
- realizar um estudo de caso considerando o projeto da SAC: Diagnósticos, estudos e pesquisas visando inovação e aperfeiçoamento do sistema de aviação civil brasileiro

O estudo de caso mencionado consiste na escolha de um sítio aeroportuário capaz de atender aos municípios de Pato Branco-PR e Francisco Beltrão-PR, ambos no sudoeste paranaense.

1.5 Estrutura do trabalho

O presente trabalho será detalhado ao decorrer dos capítulos subsequentes, retomando as principais ideias abordadas no primeiro capítulo. Além disso, os métodos serão desenvolvidos e conclusões obtidas.

Uma revisão dos métodos multicritérios de apoio à decisão é realizada no capítulo 2 por serem as ferramentas empregadas no estudo.

O capítulo 3 contempla restrições básicas da seleção de sítios aeroportuários segundo órgãos normativos e fiscalizadores brasileiros. Na sequência, a metodologia e modelos utilizados para encontrar as soluções dos problemas de seleção são apresentados no capítulo 4.

A obtenção de resultados e análises de sensibilidade são realizadas no capítulo 5, que aliado aos capítulos teóricos mencionados permite a elaboração de uma conclusão no capítulo 6. Referências bibliográficas encontram-se no capítulo 7.

2 Apoio à Decisão Multicritério

2.1 Processo de decisão multicritério

A dinâmica social exige dos tomadores de decisões a capacidade de escolha diante de diferentes alternativas. No entanto, diversas vezes as alternativas e informações disponíveis não fornecem o suporte necessário para execução da ação mais adequada. Nesse contexto, boas decisões podem ser alcançadas de forma mais eficientes quando processos de tomada de decisão são utilizados. Um processo de decisão claro e transparente depende da realização de perguntas e da obtenção de respostas suficientes para essas perguntas, a fim de esclarecer a situação às partes interessadas.

De maneira geral, pode-se dizer que uma decisão é tomada quando se escolhe realizar ou abdicar de fazer algo, seja no âmbito local, regional ou nacional. No setor público, frequentemente essas decisões estão atreladas a políticas de desenvolvimento regional, planos de crescimento, execução de estratégias, e inúmeros outros fatores.

O problema de decisão de múltiplos critérios se caracteriza por apresentar ao menos dois objetivos que não podem ser atingidos simultaneamente. Esse tipo de problema pode ser expresso matematicamente pela Equação 1:

$$\text{Max}\{f_1(a), \dots, f_n(a)\}; a \in K \quad (1)$$

onde K é um conjunto infinito de ações e $f_i, i = 1, \dots, n$, critérios a serem maximizados, e cada critério é aplicação de K em \mathfrak{R} . Fato é que não há solução ótima, visto que os objetivos são conflitantes e não há como realizar compensações entre eles (12).

Na maioria dos problemas cotidianos familiares, por exemplo, decisões baseadas na intuição são capazes de produzir resultados aceitáveis, ao passo que envolvem poucos objetivos e apenas um ou dois tomadores de decisão. No que diz respeito à seleção de sítios aeroportuários regionais, os problemas são mais complexos. A maioria das decisões envolvem múltiplos objetivos, vários decisores, e estão sujeitas a revisão externa. Um processo de tomada de decisão disciplinado e transparente possui (13):

- estrutura para abordar problemas complexos;

- fundamentação para decisões;
- consistência no processo de tomada de decisão;
- objetividade;
- hipóteses, critérios e valores documentados utilizados na tomada de decisão; e
- decisões que são replicáveis, passíveis de revisão e de fácil compreensão.

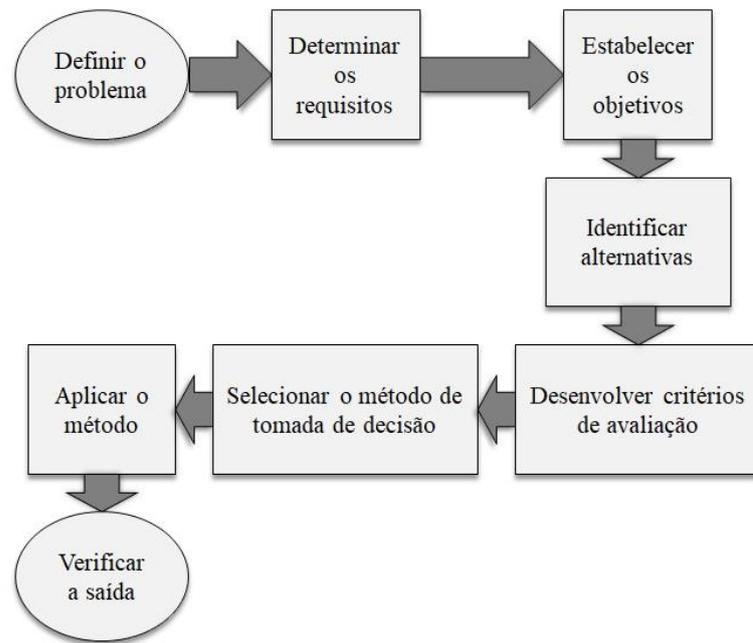
A prioridade número um na tomada de decisão é estabelecer quem são os tomadores de decisão e as partes interessadas na decisão. Sendo assim, identificar os tomadores de decisão no início do processo diminui a chance de haver discordância sobre a definição dos problemas, requisitos, metas e critérios.

De forma abrangente, em processos comuns de tomada de decisão, seguir os oito passos (14) apresentados na Figura 2 permite a obtenção de uma resposta satisfatória. O primeiro passo para tomar uma boa decisão é definir o problema. Assim, é necessário identificar as causas, limitações de hipóteses, condições de contorno e assuntos relacionados às partes interessadas. Na segunda etapa, os requisitos – condições que devem ser satisfeitas por quaisquer soluções obtidas – devem ser estipulados de acordo com o julgamento de especialistas ou quaisquer outras restrições técnicas.

A terceira fase consiste em esclarecer os objetivos, os quais devem ser declarados de forma positiva (o que deve ser alcançado, não o que não deve ser alcançado). Por vezes, alguns objetivos podem ser conflitantes, mas não há necessidade de eliminar conflitos entre os objetivos nem definir um grau de importância relativa entre eles. O estabelecimento de objetivos pode sugerir novos requisitos, a reformulação de requisitos anteriormente definidos ou a conversão de requisitos em objetivos. Sendo assim, entender os requisitos e objetivos torna-se fundamental para definir alternativas.

Em seguida, a definição de alternativas representa o quarto passo. Alternativas representam a alteração da condição preliminar em condição preferida (14). Logo, cada opção deve ser apresentada de forma clara o suficiente para que seja possível entender como o problema é resolvido e no que difere das outras.

Figura 2 – Oito passos para o processo de tomada de decisão.



Fonte: O autor.

No entanto, normalmente nenhuma das alternativas é a melhor para todos os objetivos e, por isso, a que melhor se aproxima dos objetivos pode ser selecionada mediante alguns critérios de avaliação (15). Esses critérios devem ser estipulados de acordo com os objetivos, ser capazes de diferenciar as alternativas e auxiliar na escolha daquela que melhor se adequa às preferências do tomador de decisão. A próxima etapa do processo decisório envolve, portanto, a definição de critérios de avaliação.

Cada critério deve mensurar uma característica importante e ser independente dos outros critérios. De forma, geral devem ser (16):

- capazes de distinguir as alternativas;
- abrangentes o suficiente para cobrir todos os objetivos;
- não redundantes;
- operacionais – compreensíveis a ponto de o tomador de decisão entender as implicações das alternativas; e
- numericamente limitados, a fim de manter as dimensões do problema tangíveis.

Vale ressaltar que os critérios podem abranger naturezas subjetivas ou objetivas. A subjetividade dos tomadores de decisão é fruto das percepções individuais e devem ser consideradas no processo de decisão. É fundamental que o modelo traduza as reais preferências do decisor (17).

Durante a estruturação do processo decisório, é fundamental compreender o contexto no qual a decisão está inserida. A natureza do problema vai direcionar a escolha do método multicritério a ser utilizado. Há quatro tipos de problemáticas (18):

- Problemática de seleção – a melhor alternativa ou subconjunto de alternativas é selecionado através da comparação entre as ações possíveis. Como exemplo, a cadeia de suprimentos de uma organização é constituída por fornecedores que passaram por um processo de avaliação e seleção.

- Problemática de classificação – cada ação possível é alocada em uma classe ou categoria, segundo normas estabelecidas, e o resultado do processo está na organização das ações. Em problemas de análise de risco de crédito, por exemplo, clientes podem ser classificados como de baixo, médio ou alto risco de inadimplência.

- Problemática de ordenação – tem como objetivo ordenar as ações possíveis conforme uma hierarquia. A título de exemplo, empresas de comércio digital, na busca constante de um eficiente relacionamento com os clientes, estabelecem uma ordem de prioridade de ações que permitem aumentar o nível de satisfação e fidelidade desses clientes.

- Problemática de descrição – descreve e relata as consequências das ações possíveis. Esse tipo de problemática ajuda a responder as seguintes questões: Que tipo de critérios devemos impor ao problema? Que tipo de resultados tentaremos obter? Que tipo de procedimento parece ser o mais adequado para orientar a busca à solução?

É importante mencionar que é possível utilizar mais de um tipo de problemática em um problema multicritério. Sendo assim, é preciso compreender o tipo de problema abordado ao passo que, em alguns casos, é possível empregar a problemática de ordenação para solucionar problemáticas de seleção ou classificação.

Após a escolha do método de tomada de decisão e aplicação a cada uma das alternativas, as saídas devem ser verificadas a fim de garantir que o método selecionado de fato

soluciona o problema. A resposta final deve, portanto, atender aos requisitos e ser a que melhor se aproxima dos objetivos, respeitados os critérios de avaliação.

Sendo assim, após a execução dos oito passos propostos, o tomador de decisão passa a ter conhecimento de qual é, dentro dos parâmetros estabelecidos, o melhor caminho a ser seguido diante da situação de múltiplas respostas.

2.2 Modelagem de preferência

A modelagem de preferência tem como objetivo analisar a relação de preferência do decisor dentre duas ações possíveis. O termo preferência é usualmente utilizado quando as comparações entre as alternativas são feitas segundo relações binárias (comparações pareadas). É essa modelagem, também capaz de lidar com situações de incertezas, que trata o significado dos dados no contexto da decisão, ao transformar em relações as informações disponíveis. Além disso, permite incorporar ao modelo as subjetividades do tomador de decisão (19).

Em geral, a modelagem de preferência ocorre por meio de relações binárias, cada uma delas associada a duas ações e responsáveis por descrever a presença ou ausência de determinada propriedade (20).

Antes de prosseguir, por motivos didáticos, consideremos um conjunto de elementos reais A , com $\{a, b, c\} \subset A$, e uma relação binária ρ no conjunto A . Então, são verdadeiras as seguintes definições:

1. Uma relação é dita reflexiva se $\forall x \in A$, tem-se $(x, x) \in \rho$;
2. Uma relação é dita simétrica se $\forall (a, b) \in \rho$, tem-se $(b, a) \in \rho$;
3. Uma relação é dita transitiva se $(a, b) \in \rho$ $(b, c) \in \rho$ implicam $(a, c) \in \rho$.

Além disso, o sistema de preferência de uma ação a em relação à ação b é composto por quatro situações (20):

- I (Indiferença): representa uma situação na qual existem razões claras e positivas que justificam a equivalência entre as ações. Relação binária reflexiva e simétrica;

- *P* (Preferência estrita): representa uma situação na qual existem razões claras e positivas que justificam a preferência significativa em favor de uma das ações. Relação binária assimétrica;

- *Q* (Preferência fraca): representa uma situação na qual existem razões claras e positivas, que invalidam a preferência estrita em favor de uma das duas ações, mas essas razões são insuficientes para deduzir uma preferência estrita em favor de outra ação ou a indiferença entre ambas ações, não permitindo que qualquer uma das situações anteriores seja definida como a apropriada. Relação binária assimétrica;

- *R* (Incomparabilidade): representa a ausência de razões claras e positivas que justificam qualquer uma das três situações anteriores. Relação binária simétrica.

As associações das quatro situações aos tipos de relações em forma de notação matemática são apresentadas no Quadro 1:

Quadro 1 – Relações básicas de preferências.

Situação	Notação matemática	Propriedades
Indiferença (<i>I</i>)	alb	aIa $alb \Rightarrow bIa$
Preferência Estrita (<i>P</i>)	aPb	$aPb \Rightarrow \neg bPa$
Preferência Fraca (<i>Q</i>)	aQb	$aQb \Rightarrow \neg bQa$
Incomparabilidade (<i>R</i>)	aRb	$aRb \Rightarrow bRa$

Fonte: O autor.

Na teoria clássica de decisão, vigoram apenas as situações de indiferença e preferência estrita. As situações de preferência fraca e incomparabilidade são tratadas como se não houvesse qualquer relação entre as ações, ou então são aproximadas para situações de indiferença e preferência estrita.

A combinação das quatro situações fundamentais permite criar novas situações que refletem melhor a realidade dos tomadores de decisão:

- Não-preferência (\sim): as ações são indiferentes ou incomparáveis sob a perspectiva do decisor;
- Preferência (em sentido amplo) (\succ): o agente de decisão não consegue diferenciar preferência estrita ou fraca entre duas ações;
- Presunção de preferência (J): no limite, a preferência fraca por uma ação pode se tornar indiferença;
- K-preferência (K): situação na qual há preferência estrita ou incomparabilidade entre as ações;
- Superação (S): união de três situações (preferência estrita, preferência fraca e indiferença), sem haver distinção.

A representação matemática dessas novas situações é apresentada no Quadro 2.

Quadro 2 – Relações combinadas de preferência.

Situação	Notação matemática
Não-preferência (\sim)	$a \sim b \Leftrightarrow aIb \vee aRb$
Preferência (em sentido amplo) (\succ)	$a \succ b \Leftrightarrow aPb \vee aQb$
Presunção de preferência (J)	$aJb \Leftrightarrow aQb \vee aIb$
K-preferência (K)	$aKb \Leftrightarrow aPb \vee aRb$
Superação (S)	$aSb \Leftrightarrow aPb \vee aQb \vee aIb$

Fonte: Adaptado de (20).

2.3 Métodos multicritérios de apoio à decisão

Os métodos multicritérios de apoio à decisão surgiram com o objetivo de auxiliar o tomador de decisão a resolver problemas com objetivos conflitantes. Além disso, têm como finalidade dar suporte durante todo o processo de tomada de decisão de forma que todos os elementos da decisão e consequências das ações potenciais fiquem evidentes. Nesse contexto, em meados da década de 1970, surgiram os primeiros métodos multicritérios de apoio à decisão, que abordavam problemas com múltiplos objetivos de maneira diferente.

A resolução de um problema multicritério consiste em auxiliar o decisor a dominar os dados (geralmente complexos) e avançar para decisão final. Na literatura encontram-se diversos problemas MCDA e suas aplicações dependem da natureza das informações disponíveis. Há três grupos de métodos: programação matemática multiobjetivo, teoria da utilidade multiatributo, e métodos de sobreclassificação (*outranking methods*) (21).

A programação matemática multiobjetivo busca encontrar a solução ótima para a função-objetivo. Nessa classe de problemas apesar de muitas vezes ser difícil encontrar a solução, há um grande número de aplicações encontradas na literatura.

Sob outra perspectiva, a Teoria da Utilidade Multiatributo (*Multi-attribute Utility Theory* – MAUT) compõe uma corrente denominada Escola Americana, cujos pilares são os princípios axiomáticos oriundos do trabalho de von Neuman e Morgenstern. A teoria caracteriza-se pela otimização de uma única função-utilidade que agrega os diferentes critérios.

Nesse contexto, o trabalho de Keeney e Raiffa (22) sobre funções de valor multiatributo e teoria de utilidade multi-atributo também exerce influência na Escola Americana. Para eles, a utilidade adequada é designada para cada ação, e a melhor ação é aquela da qual se obtém a maior utilidade esperada.

Ademais, os métodos de sobreclassificação, ou *outranking*, serviram de inspiração para Escola Francesa ou Escola Europeia. Essas relações remetem àquelas nas quais há incomparabilidade entre duas ações: o tomador de decisão “não pode”, “não sabe como” ou “não quer decidir”.

Outra característica dos métodos multicritérios refere-se à análise de compensação entre os atributos. Essa compensação busca verificar se é viável trocar as vantagens de um atributo pelas desvantagens de outro. Caso o tomador de decisão escolha um critério ao invés de outro, faz-se necessário estabelecer uma relação de compensação (23). Nesse sentido, os métodos de superação ou da Escola Francesa são ditos não compensatórios, enquanto a teoria da utilidade multiatributo ou os métodos da Escola Americana são vistos como compensatórios.

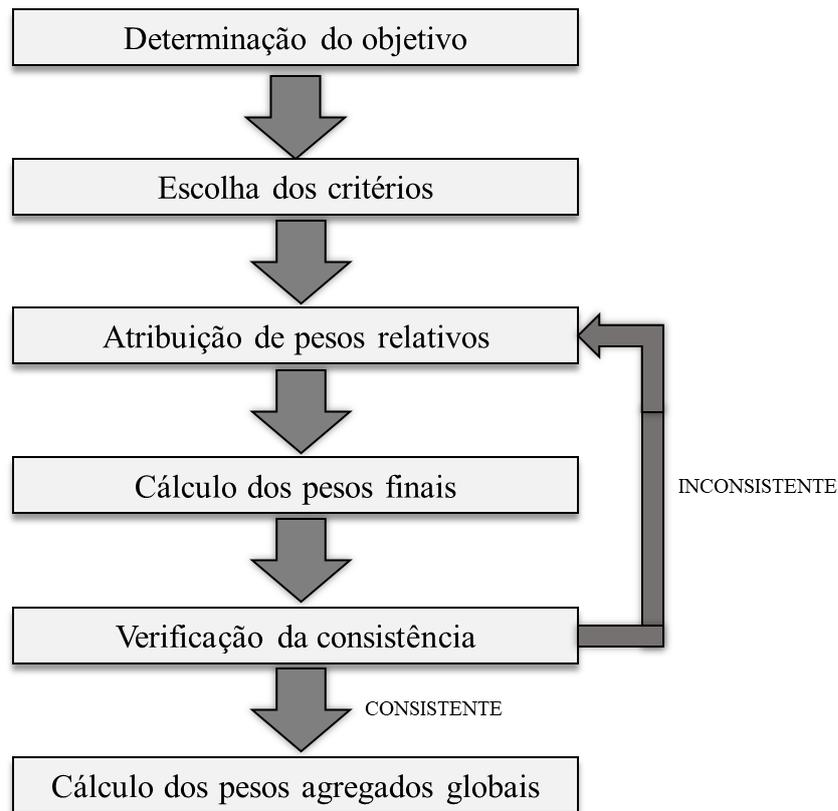
Os métodos da Escola Europeia agregam todas as informações oriundas do decisor sem efetuar operação de síntese ao utilizarem conceitos de superação. Sob outra perspectiva, os métodos da Escola Americana têm o objetivo de agregar todas as informações mediante uma síntese, no caso do MAUT, que provém da função utilidade multiatributo (5).

2.3.1 AHP – *Analytic Hierarchy Process*

O Processo Analítico de Hierarquia, ou AHP, foi um dos métodos pioneiros de tomada de decisão com múltiplos critérios. Desenvolvido por Thomas L. Saaty na década de 1970 (24) (25), tem como finalidade organizar os objetivos ou critérios em uma hierarquia que traduz a preferência dos decisores, com as alternativas dispostas na base da pirâmide de preferência. As comparações entre as alternativas são realizadas par a par entre os elementos da hierarquia, sejam alternativas ou critérios de decisão. Os cálculos da metodologia são regidos pelo Teorema de Perron-Frobenius (5).

A tomada de decisão em um ambiente organizado permite visualizar com clareza as prioridades do problema. Nesse sentido, a aplicação do método AHP pode ser dividida em etapas, também apresentadas na Figura 3:

1. Definir o objetivo.
2. Escolher os critérios.
3. Atribuir pesos relativos entre os critérios, em uma matriz de comparação.
4. Calcular um vetor com os pesos finais dos critérios.
5. Verificar a consistência dos resultados obtidos.
6. Calcular um vetor com os pesos agregados globais.

Figura 3 – Fluxograma do método AHP.

Fonte: O autor.

A partir de uma escala de importância é possível verificar o nível de significância relativa entre critérios, tomados dois a dois. Em suma, o tomador de decisão deve traduzir o julgamento verbal em um valor numérico, segundo a pontuação da escala fundamental, a fim de viabilizar a avaliação par a par dos critérios. O resultado de cada comparação é um elemento da matriz de comparação. Matematicamente, dados n critérios, a matriz de comparação A de dimensões $n \times n$ é composta por elementos a_{ij} que representam a importância do critério i em relação ao critério j . Os valores de a_{ij} são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 – Escala relativa de importância de Saaty.

Valor de a_{ij}	Interpretação
1	O critério i é tão importante quanto o critério j
3	O critério i é um pouco mais importante do que o critério j
5	O critério i é mais importante que o critério j

Continua

Valor de a_{ij}	Interpretação
7	O critério i é bem mais importante que o critério j
9	O critério i é indiscutivelmente mais importante que o critério j
2, 4, 6 e 8	Quando necessário são atribuídos valores intermediários

Fonte: Adaptado de (24).

A construção da matriz de comparação segue as seguintes regras:

- $a_{ji} = 1/a_{ij}$, indicativo de que, se a $a_{ij} = 1$, $a_{ji} = 1/k$ para todo $k > 0$; e
- $a_{ii} = 1$, para todo i .

A matriz A é ilustrada pela Equação 2:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ 1/a_{13} & 1/a_{23} & 1 & \cdots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & 1/a_{3n} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Dispostas as regras, a matriz de comparação é sempre uma matriz quadrada, recíproca e positiva. Nesse contexto, tem-se que uma das propriedades da matriz positiva é obedecer ao Teorema de Perron-Frobenius, o qual garante que o autovetor associado ao autovalor de maior valor absoluto possui somente componentes positivos. Trata-se de um aspecto interessante para o método AHP, visto que o melhor processo para obter o vetor de prioridades dos elementos da matriz de comparação é o método do autovetor à direita (25).

No que diz respeito à obtenção de autovalores e autovetores de matrizes, dois métodos são empregados: algébrico e numérico. O cálculo algébrico parte da equação característica da matriz, enquanto o método numérico está presente na literatura para matrizes recíprocas e consistentes sob a perspectiva de dois algoritmos: o método da média dos valores normalizados e o método da média geométrica. O presente trabalho empregará o método da média geométrica.

Após obter a matriz de comparação, o vetor coluna de prioridades W tem como elementos o produto dos elementos de cada linha de A elevado ao inverso da ordem da matriz, conforme a Equação 3:

$$w_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}} \quad (3)$$

Os elementos do vetor de pesos dos critérios são então normalizados segundo a Equação 4:

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_{k=1}^n w_k} \quad (4)$$

Sendo assim, pode-se obter o máximo autovalor $\lambda_{m\acute{a}x}$ conforme a Equação 5:

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{[A\bar{W}]_i}{\bar{w}_i} \quad (5)$$

O índice de consistência, finalmente, é definido pela Equação 6:

$$CI = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} \quad (6)$$

A associação do índice de consistência com o índice de aleatório para matrizes de ordem 1 a 10, proposto na Tabela 1, permite calcular a razão de consistência.

Tabela 1 – Índice aleatório.

<i>n</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>RI</i>	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49

Fonte: Adaptado de (25).

A razão de consistência, descrita pela Equação 7:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (7)$$

analisa os julgamentos da matriz de comparação.

Finalmente, faz-se necessário obter os vetores de prioridades das matrizes de comparação referentes às alternativas sob cada subcritério, dos subcritérios em relação aos seus

critérios superiores, e dos critérios em relação ao objetivo. São gerados, então, os valores finais das alternativas.

As pontuações finais podem ser utilizadas para identificar a alternativa preferida, classificar as alternativas em um número limitado de categorias, classificar as alternativas em uma ordem subjetiva de preferência e alocar recursos às respectivas alternativas com base nas preferências relativas existentes. A análise de sensibilidade, no entanto, mostra que a ordem de classificação dos escores finais varia de acordo com os desvios da escala fundamental, de modo que os procedimentos de classificação e a alocação de recursos devem ser realizados com muito cuidado (26).

Parece ser mais fácil para o decisor aceitar o AHP quando a execução das alternativas não pode ser medida (quando as cores das alternativas são comparadas, por exemplo, ao design, à elegância e ao estilo) e quando os critérios são comparados com base na sua importância relativa no problema da decisão (27).

2.3.2 ELECTRE – *Elimination et Choix Traduisant Réalité*

O acrógrama ELECTRE significa Eliminação e Escolha como Expressão da Realidade (*Elimination et Choix Traduisant Réalité*) e foi desenvolvido por Bernard Roy na década de 1960 com a finalidade de resolver um problema de escolha de uma melhor ação (alternativa) de um conjunto de ações, levando em consideração vários critérios que influenciavam na escolha.

Ao contrário da Escola Americana, os métodos da Escola Francesa admitem a incomparabilidade entre duas alternativas. Assim, os modelos são mais flexíveis por não imporem ao decisor necessariamente uma classificação hierárquica das alternativas. Além disso, não é calculada nenhuma função matemática para definir o valor das alternativas (28).

O primeiro método desenvolvido foi o ELECTRE I, em 1968, por Bernard Roy. Em seguida, outros métodos foram criados, fundamentados no ELECTRE I e seguindo a relação de superação entre as alternativas. Além disso, essa família incorpora os conceitos de modelagem de preferência, descritos na seção 2.2.

Assim, os métodos ELECTRE diferem entre si no que diz respeito ao tipo de problemática (seleção, classificação, ordenação), dentre outras características, conforme o Quadro 4. Todos partem do mesmo princípio, diferenciando-se apenas nos procedimentos matemáticos finais, fazendo com que cada versão possua um resultado específico. Por se tratar

de um estudo que envolve a seleção de sítios aeroportuários, este trabalho analisará apenas o método ELECTRE I.

Quadro 4 – Métodos da família ELECTRE

Versão	Autor	Ano	Tipo de Problema	Tipo de critério
I	Roy	1968	Seleção	Simple
II	Roy e Bertier	1973	Ordenação	Simple
III	Roy	1978	Ordenação	Pseudo
IV	Roy e Hugonard	1982	Ordenação	Pseudo
IS	Roy e Skalka	1985	Seleção	Pseudo
TRI	Yu Wei	1992	Classificação	Pseudo

Fonte: Adaptado de (4).

Dado um conjunto de opções, deseja-se obter um subconjunto G ou Kernel de ações: qualquer ação pertencente a G sobreclassifica qualquer ação fora de G (29). Nesse contexto, a determinação do subconjunto N de ações variáveis tem como pilares os índices de concordância e de discordância, além de limiares de concordância e de discordância. Ademais, um peso w_j é atribuído para cada critério, de forma que o valor aumenta conforme o grau de importância do atributo (30).

Cada par ordenado (a, b) de ações é associado a um índice de concordância, definido pela Equação 8:

$$C(a, b) = \sum_{j: g(a) \geq g_j(b)} w_j \quad (8)$$

com $\sum w_j = 1$.

O índice de concordância varia no intervalo $[0,1]$ e pode ser interpretado como uma métrica para o quanto a alternativa a é favorecida em relação a b , isto é, o quanto “ a sobreclassifica b ”. De forma semelhante, tem-se que o índice de discordância, também definido no intervalo $[0,1]$, representa a desvantagem da alternativa a sobre a alternativa b e é descrito pela Equação 9:

$$D(a, b) = \begin{cases} 0, & \text{se } g_j(a) \geq g_j(b) \forall j \\ \max\{g_j(b) - g_j(a)\}, & \text{se } g_j(a) < g_j(b) \end{cases} \quad (9)$$

Já a relação de sobreclassificação S é definida pelo limiar de concordância (s) e pelo limiar de discordância (v). Logo, a sobreclassifica b se, e somente se (Equação 10):

$$aSb \Leftrightarrow \begin{cases} C(a, b) \geq s \\ D(a, b) \leq v \end{cases} \quad (10)$$

Vale ressaltar que, em geral, o limiar de concordância (s) pertence ao intervalo $\left[0,5, \min_{j \leq n} w_j\right]$, onde n é o número de critérios (31).

Nesse contexto, pode-se verificar que existem apenas as relações de preferência estrita e indiferença, conforme mencionado na seção 2.2. A situação é apresentada no Quadro 5:

Quadro 5 – Relações binárias do método ELECTRE I

aSb	bSa	Relação
V	F	aPb
F	V	bPa
V	V	aIb
F	F	aRb

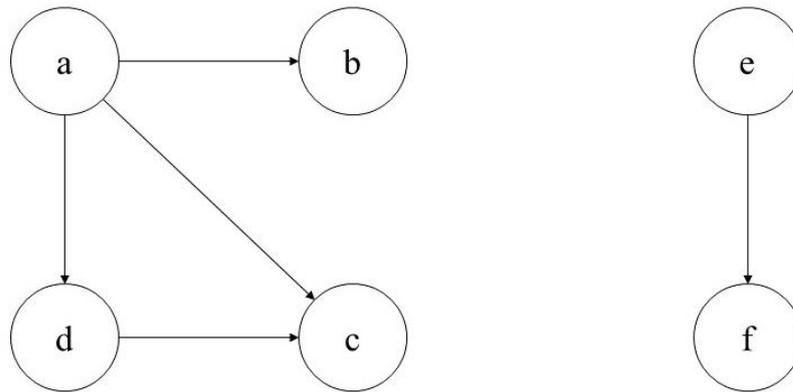
Fonte: Adaptado de (4).

Em suma, busca-se obter parte das ações entre todas as ações possíveis (A) em um subconjunto G de alternativas, de tal forma que:

- cada ação de A que não pertence a G é superada por pelo menos uma ação de G , isto é, $\forall a \in A \setminus G, \exists b \in G | bSa$;
- cada ação em G é incomparável com a relação de sobreclassificação, isto é, $\forall a, b \in G, \neg aSb, \neg bSa$.

Na teoria dos grafos, o subconjunto G é denominado Kernel. Em termos práticos, trata-se do conjunto de alternativas que não foram dominadas por qualquer outra alternativa, no caso do ELECTRE I. Ademais, necessariamente, para toda alternativa que não pertence ao kernel, existe uma alternativa contida no kernel que a supera. A estrutura de relações do ELECTRE I pode ser representada em grafos orientados conforme a Figura 4.

Figura 4 – Exemplo de grafo da relação de sobreclassificação.

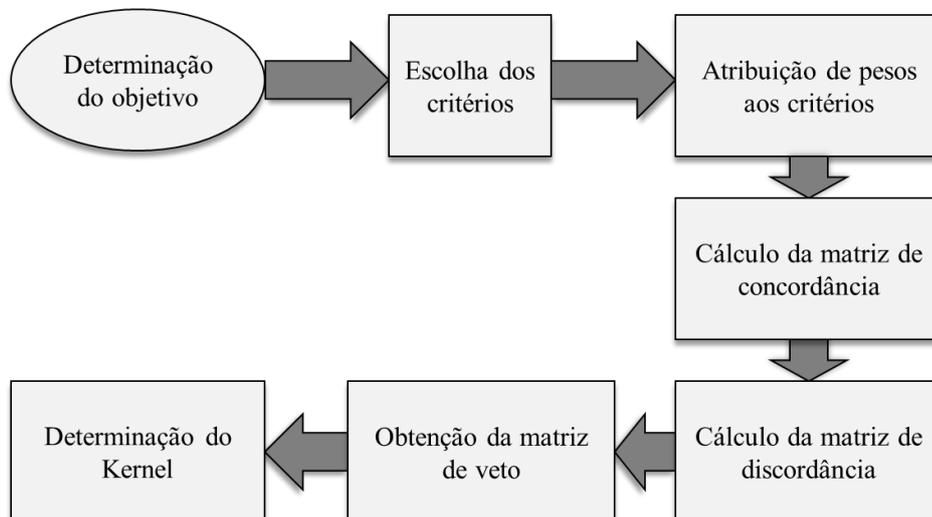


Fonte: Adaptado de (4).

Considerando que cada ação é representada por um círculo e que cada relação de sobreclassificação é indicada por uma seta, temos as seguintes relações: aSb , aSc , aSd , dSc , eSf . Nesse caso, o Kernel é formado pelas alternativas a e e .

A sequência de etapas do ELECTRE I é apresentada de forma resumida na Figura 5.

Figura 5 – Fluxograma do método ELECTRE I.



Fonte: O autor.

2.3.3 PROMETHEE – *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*

Em 1982, Jean-Pierre Brans apresentou o método PROMETHEE, desenvolvido com o objetivo de gerar um método mais simples e que envolvesse menos parâmetros. A concepção do PROMETHEE se deu a partir do ELECTRE e, de forma semelhante, trata-se de um método comparativo no qual relações de superação são estabelecidas. No entanto, nenhuma das alternativas é eliminada no processo de comparação emparelhada e, ao invés disso, as alternativas são ordenadas de acordo com os critérios e preferências do tomador de decisão (32). Apesar de ambas metodologias serem vulneráveis à subjetividade, o PROMETHEE se mostra mais robusto às variações nos parâmetros, uma vez que parâmetros do ELECTRE que podiam gerar dificuldade de mensuração ao decisor foram excluídos. Sendo assim, possui vantagem na aplicação principalmente em sistemas de preferências nebulosas, fornecendo maior solidez aos resultados (5).

O desempenho de cada uma das alternativas mediante determinado critério é representado pelas relações binárias e, dessa forma, é possível comparar as alternativas entre si. Dadas duas ações a e b e A o conjunto de alternativas possíveis, com $a, b \in A$, pode-se definir a função de preferência contida no intervalo $[0,1]$ (33), conforme a Equação 11:

$$P_j(a, b) = F_j[d_j(a, b)] \quad (11)$$

onde

$$d_j(a, b) = g_j(a) - g_j(b) \quad (12)$$

A partir disso, o índice de preferência, o qual mensura o nível de preferência da ação a em relação a b para todos os critérios é descrito pela Equação 13:

$$\Pi(a, b) = \sum_{j=1}^k w_j P_j(a, b) \quad (13)$$

onde w_j é o peso para cada critério g_j , $j = 1, \dots, k$.

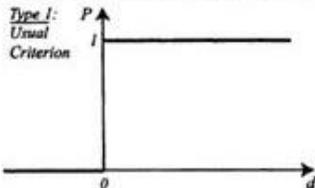
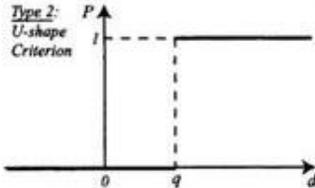
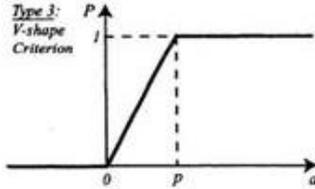
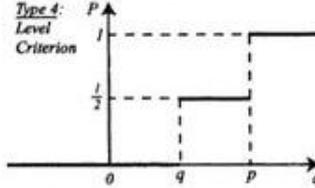
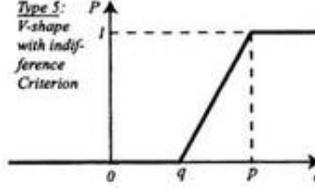
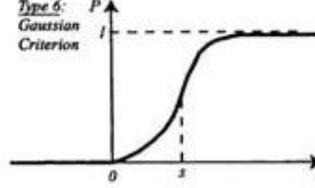
Logo, tem-se as seguintes situações possíveis:

- $\Pi(a, b) = 0$ indica indiferença ou não preferência por a em relação a b ;

- $\Pi(a, b) \simeq 0$ indica preferência fraca por a em relação a b ;
- $\Pi(a, b) \simeq 1$ indica preferência forte por a em relação a b ;
- $\Pi(a, b) = 1$ indica preferência estrita por a em relação a b .

Definida a função preferência, calcula-se o grau de preferência da ação potencial que tem maior desempenho. Nesse contexto, o par $\{g_j(\cdot), P_j(a, b)\}$ é denominado critério generalizado e, ainda, seis tipos de critérios generalizados são propostos, conforme a Figura 6.

Figura 6 – Tipos de critérios generalizados ($P(d)$): função de preferência).

Generalised criterion	Definition	Parameters to fix
<p>Type 1: Usual Criterion</p> 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 & d > 0 \end{cases}$	–
<p>Type 2: U-shape Criterion</p> 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ 1 & d > q \end{cases}$	q
<p>Type 3: V-shape Criterion</p> 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ \frac{d}{p} & 0 \leq d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p
<p>Type 4: Level Criterion</p> 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{1}{2} & q < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p, q
<p>Type 5: V-shape with indif- ference Criterion</p> 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{d-q}{p-q} & q < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p, q
<p>Type 6: Gaussian Criterion</p> 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 - e^{-\frac{d^2}{2s^2}} & d > 0 \end{cases}$	s

Fonte: (31).

Diferentemente do ELECTRE, a associação dos critérios a gráficos pode facilitar a determinação dos parâmetros. No caso de haver informações precisas sobre estes, pode-se dizer que o PROMETHEE fornece uma técnica sofisticada de modelagem. A precisão com que os limites são estabelecidos no momento em que são definidos os tipos de critérios generalizados corroboram a afirmação de que se trata de uma ferramenta refinada (34).

Os parâmetros presentes na Figura 6 serem definidos têm o seguinte significado:

- q é o limite de indiferença;
- p é o limite de preferência estrita; e
- s é um valor entre em q e p .

A aplicação de cada um dos métodos da família PROMETHEE é descrita na literatura (33):

- PROMETHEE I – pré-ordem parcial das alternativas, voltado para problemática de ordenação;
- PROMETHEE II – pré-ordem completa das alternativas, voltado para problemática de ordenação;
- PROMETHEE III – ampliação da noção de indiferença, tratamento probabilístico de fluxos (preferência intervalar);
- PROMETHEE IV – pré-ordem parcial ou completa das alternativas, voltado para problemática de seleção e hierarquia em situações nas quais o conjunto de soluções viáveis é contínuo;
- PROMETHEE V – extensão do PROMETHEE II, com a introdução de restrições, identificadas no problema, às alternativas selecionadas (filosofia de otimização inteira); e
- PROMETHEE VI – pré-ordem parcial ou completa das alternativas, voltado para problemática de seleção e ordenação em situações em que o decisor não é capaz de estabelecer um valor fixo de peso para cada critério.

Conforme mencionado na seção 2.1, a problemática de ordenação pode ser utilizada em questões que envolvam a seleção de alternativas. Dessa forma, o PROMETHEE II será o método estudado neste trabalho.

Escolhida a função de preferência P , calcula-se então os fluxos de superação positivo e negativo para cada alternativas, descritos respectivamente pelas Equação 14 e Equação 15:

$$\Phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{a_j \in A} \Pi(a, b) \quad (14)$$

$$\Phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{a_j \in A} \Pi(b, a) \quad (15)$$

O fluxo positivo mensura o quanto uma alternativa domina outra e o fluxo negativo mostra o quanto esta mesma alternativa é dominada. Trata-se de uma ferramenta interessante quando se deseja comparar os desempenhos de cada alternativa.

Finalmente, o fluxo de superação líquido é então obtido pela Equação 16:

$$\Phi(a) = \Phi^+(a) - \Phi^-(a) \quad (16)$$

No PROMETHEE II são evitadas as situações de incomparabilidade e, portanto, são avaliadas as seguintes condições (Equação 17):

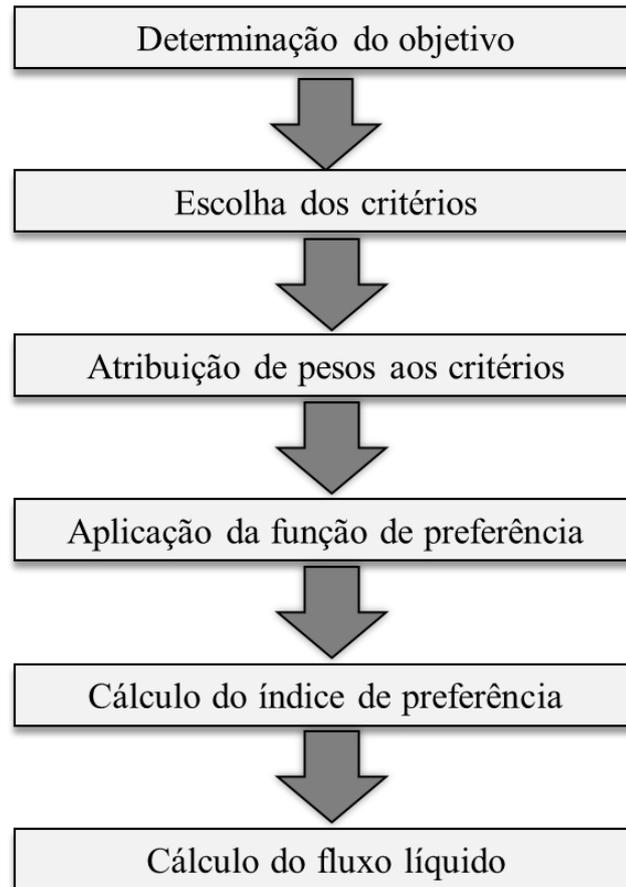
$$\begin{cases} aP_{II}b \text{ (} a \text{ sobreclassifica } b \text{) se, e somente se, } \Phi(a) > \Phi(b) \\ aI_{II}b \text{ (} a \text{ é indiferente a } b \text{) se, e somente se, } \Phi(a) = \Phi(b) \end{cases} \quad (17)$$

Além disso, são válidas as seguintes propriedades (Equação 18):

$$\begin{cases} -1 \leq \Phi(a) \leq 1 \\ \sum_{x \in A} \Phi(a) = 0 \end{cases} \quad (18)$$

Por motivos didáticos, os passos do método PROMETHEE foram ilustrados na Figura 7.

Figura 7 – Fluxograma do método PROMETHEE II



Fonte: O autor.

3 Seleção de Sítios Aeroportuários

A importância do transporte aéreo é incontestável, visto que é um dos setores mais dinâmicos da economia mundial e responde de forma direta e quase imediata às flutuações conjunturais, tanto políticas quanto econômicas. Além disso, estimula o intercâmbio de pessoas e mercadorias e as relações econômicas.

Embora traga diversos benefícios para a população residente em sua área de influência, o aeroporto também impõe uma série de restrições ao aproveitamento das propriedades localizadas no seu entorno. Nesse contexto, destaca-se a importância da atuação dos órgãos responsáveis no controle de ocupação do solo na região próxima ao aeroporto.

As necessidades de desenvolvimento econômico de uma região muitas vezes sugerem a implantação de um novo aeroporto. Basicamente, há dois cenários possíveis: a infraestrutura aeroportuária existente não pode ser expandida e, portanto, as necessidades da região não são mais atendidas; ou a localidade ainda não possui aeródromo.

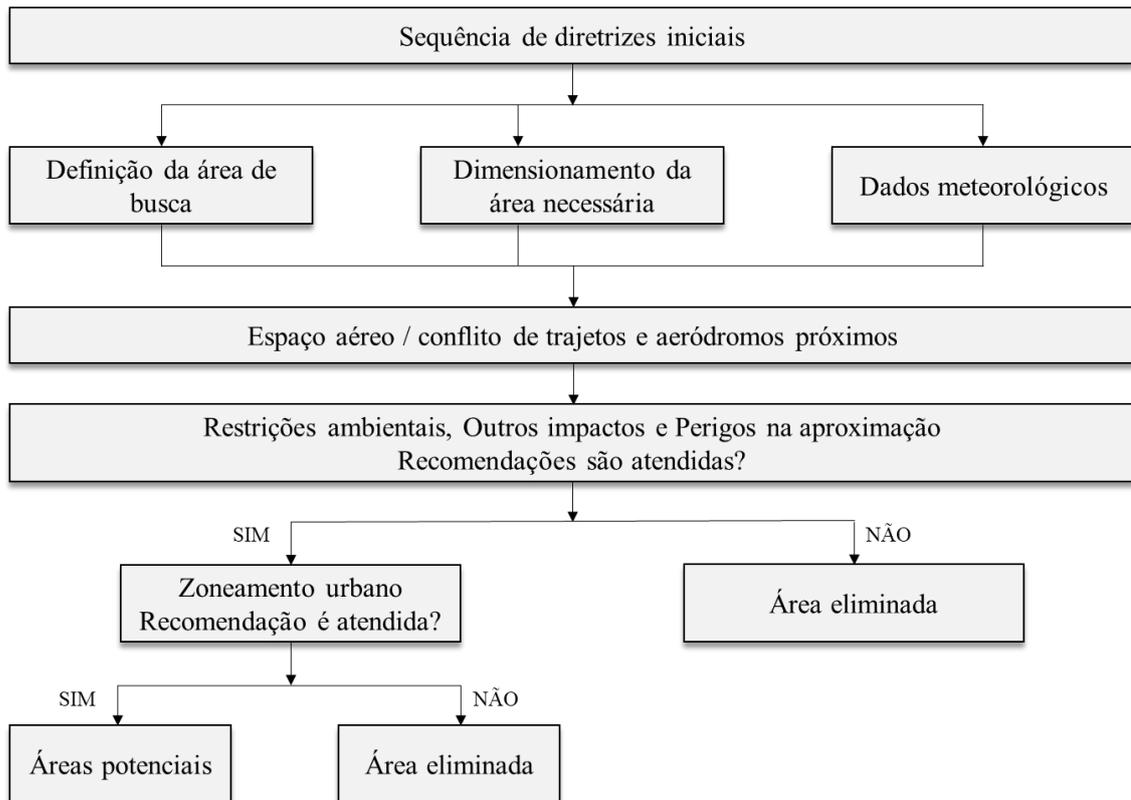
Após a localização e identificação de possíveis áreas com características necessárias e potencial para atender à implantação de um aeroporto com o porte pretendido, o processo de avaliação é realizado por uma equipe técnica multidisciplinar. Essa equipe, então, coleta dados relativos à localidade a fim de analisar os seguintes aspectos (35):

- principais características socioeconômicas da região a ser atendida pelo aeródromo;
- distâncias da unidade aeroportuária ao centro gerador de demanda e a outros centros próximos;
- identificação de aeródromos na área de influência da área em estudo;
- vias de acesso: características e distância em relação às localidades atendidas;
- dados meteorológicos históricos de pelo menos cinco anos relativos à temperatura e aos ventos (direção, frequência e intensidade);
- dimensões e orientação da área em relação aos ventos predominantes;
- tipos de ocupação do solo na área proposta e no seu entorno;

- identificação e caracterização das possíveis implantações de natureza perigosa (lixões, aterros sanitários, matadouros e outros que possam atrair pássaros);
- identificação da existência de áreas de proteção ambiental na área de influência do projeto;
- caracterização do valor das terras nos locais indicados com potencial para atender ao aeroporto;
- topografia da área e de seu entorno, a fim de julgar possíveis obstáculos à navegação aérea e a necessidade de transposição de terra;
- caracterização preliminar geológica do tipo de solo e das possibilidades de drenagem, visando à implantação do aeroporto;
- identificação de serviços e instalações quanto ao fornecimento de energia elétrica, meios de comunicação telefônicas, abastecimento de água, tratamento de esgoto e lixo, entre outros.

Nesse contexto, a aplicação dos critérios eliminatórios do MESA pode ser melhor compreendida pela sequência de diretrizes iniciais para redução da área de busca é apresentada na Figura 8.

Figura 8 – Redução da área de busca.



Fonte: Adaptado de (36).

4 Metodologia

Conforme abordado na seção 2, os três métodos que serão analisados neste trabalho têm como parâmetros de entrada critérios preestabelecidos e pesos atribuídos a cada um desses critérios. Sendo assim, as informações do projeto InovaAC da SAC serão utilizadas, mais especificamente aquelas relacionadas ao estudo de caso da escolha de um sítio aeroportuário capaz de atender aos municípios de Francisco Beltrão e Pato Branco, ambos localizados no sudoeste paranaense.

A descrição e a métrica adotadas pelo MESA para cada critério classificatório são aprofundadas a seguir (36):

- Geologia – *GEO* (quanto maior, melhor): refere-se à natureza do solo (resistência e estabilidade) e à influência na obra de implantação de pistas, pátios e edificações do aeródromo. É calculado pela média aritmética da maior resistência à penetração do solo segundo o ensaio DCP (*Dynamic Cone Penetrometer*), até alcançar 3 metros de profundidade, realizado em três pontos do sítio potencial (próximo a cada posição de cabeceira e próximo ao ponto central da pista).
- Topografia – *TOPvol* (quanto menor, melhor): refere-se ao impacto do volume de movimentação de terra (oriundo da variação altimétrica no sítio potencial) associada à obra de implantação do aeródromo. É calculado pelo volume de terra (em m³, somando corte e aterro) entre o terreno natural e a faixa de pista do aeródromo, considerando essa faixa posicionada na horizontal e na cota média do terreno ao longo do eixo mais favorável para a implantação da pista no sítio potencial considerado.
- Ruído e zoneamento urbano – *RUI* (quanto menor, melhor): refere-se ao incômodo sonoro (impacto do ruído) a ser causado pela operação do aeródromo nas áreas adjacentes e próximas ao sítio potencial. Na avaliação desse incômodo utiliza-se o Plano de Zoneamento Urbano Municipal (Plano Diretor da Cidade), caso exista. Além disso, a quantificação é feita pela contagem do número de edificações dentro da curva de 65 dB, segundo o PBZR previsto na RBAC 161 da ANAC.
- Distância do polo gerador de demanda – *DIS* (quanto menor, melhor): refere-se à distância efetiva do sítio potencial a um ponto de referência associado ao centro gerador

de demanda (CGD) da cidade. Este é representado pela Igreja Matriz, Prefeitura, ou outro marco da concentração da demanda por transporte aéreo na cidade. É dado pela menor distância efetiva (em km) a partir do ponto em estrada (municipal, estadual ou federal) mais próximo do baricentro do sítio potencial até o CGD. Nos casos de busca de sítio para mais de uma cidade e, portanto, mais de um CGD, deve-se adotar a maior das distâncias a cada CGD.

- **Acessibilidade terrestre – ACE** (quanto menor, melhor): refere-se à facilidade de ligação do sítio potencial à rede de transporte que serve a região. A rede de transporte da região é representada pelas estradas municipais, estaduais e federais nas proximidades do sítio potencial. É dado pela menor distância (em km) do baricentro do sítio potencial à estrada (municipal, estadual ou federal) mais próxima que se conecte ao CGD. Nos casos de busca de sítio para mais de uma cidade e, portanto, mais de um CGD, deve-se adotar a maior das distâncias a cada CGD.

- **Disponibilidade de serviços públicos – DIP** (quanto menor, melhor): refere-se à disponibilidade atual de serviço (rede) de energia elétrica nas proximidades do sítio potencial. A rede considerada é a de média ou baixa tensão, excluída eventual rede de alta-tensão, se existir. É dada pela menor distância (em km) do baricentro do sítio potencial à rede elétrica de média ou de baixa tensão mais próxima. Nos casos de busca de sítio para mais de uma cidade e, portanto, mais de um CGD, deve-se adotar a maior das distâncias a cada CGD.

Os critérios classificatórios são apresentados de forma resumida no Quadro 6.

Quadro 6 – Critérios classificatórios do MESA.

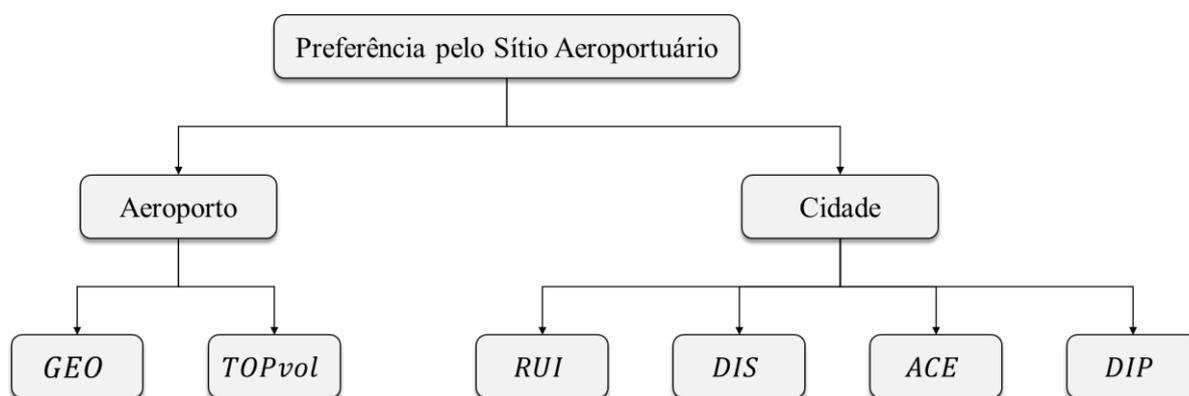
Critério (Acrônimo)	Métrica de análise sugerida para o MESA
<i>RUI</i>	Identificar o número de propriedades afetadas com a operação
<i>DIS</i>	Distância linear (km) até o centro gerador de demanda
<i>ACE</i>	Distância (km) até a rodovia mais próxima
<i>DIP</i>	Disponibilidade de serviços de utilidade pública
<i>GEO</i>	Análise de sondagem de solo DCP
<i>TOPvol</i>	Volume de terra (m ³) para corte e aterro

Fonte: Adaptado de (36).

Os pesos atribuídos a cada um dos critérios classificatórios do Quadro 6 foram estipulados por um grupo de especialistas representantes dos diferentes agentes públicos interessados no processo de seleção aeroportuária.

Definidos os critérios classificatórios, pôde-se elaborar a árvore de decisão que caracteriza a identificação da preferência do sítio aeroportuário, conforme exibido na Figura 9.

Figura 9 – Árvore de decisão.



Fonte: Adaptado de (36).

Além disso, as métricas adotadas pela metodologia foram aferidas diretamente no campo ou indiretamente pela leitura e interpretação de imagens de satélite, com níveis de precisão satisfatórios. Sendo assim, os atributos que caracterizam os critérios classificatórios foram medidos por uma escala natural ou por uma *proxy*, vide o Quadro 7.

Quadro 7 – Natureza dos critérios classificatórios do MESA.

Critério	Natureza	Mérito
<i>GEO</i>	Natural (CBR)	Quanto maior, melhor
<i>TOPvol</i>	Natural (m ³)	Quanto menor, melhor
<i>RUI</i>	<i>Proxy</i> (número)	Quanto menor, melhor
<i>DIS</i>	Natural (km)	Quanto menor, melhor
<i>ACE</i>	Natural (km)	Quanto menor, melhor
<i>DIP</i>	<i>Proxy</i> (km)	Quanto menor, melhor

Fonte: Adaptado de (36).

Finalmente, os métodos ELECTRE I e PROMETHEE II serão implementados com o auxílio do *software* RStudio, e um escopo dos códigos será exibido no apêndice. Os resultados do método AHP foram obtidos do relatório desenvolvido pelo ITA (36). Cabe destacar que as definições dos parâmetros intrínsecos a cada um dos métodos foram realizadas na seção 5. Além disso, os pesos dos critérios utilizados nos métodos ELECTRE I e PROMETHEE II foram obtidos pelo método AHP, de forma a existir um viés em relação a esses parâmetros.

5 Resultados

A partir dos critérios classificatórios definidos pelo MESA, mencionados na seção 4, uma equipe de profissionais do Instituto Tecnológico de Aeronáutica realizou trabalho de campo no sudoeste paranaense a fim de quantificar esses critérios. Os valores atribuídos aos critérios classificatórios para cada um dos sítios aeroportuários são apresentados na Tabela 2. A unidades dos critérios seguem o Quadro 7.

Tabela 2 – Medidas dos critérios.

Sítio	<i>GEO</i>	<i>TOPvol</i>	<i>RUI</i>	<i>DIS</i>	<i>ACE</i>	<i>DIP</i>
S-02	11,0	3.879.616	1	22,1	1,3	0,4
S-2A	11,0	6.387.976	1	23,1	1,0	0,9
S-2C	15,6	3.985.154	1	22,6	3,0	0,3
S-03	16,3	6.006.847	1	27,5	7,1	0,3
S-04	16,0	7.994.669	1	27,4	7,0	0,3

Fonte: Adaptado de (36).

Na sequência de cálculo as medidas dos critérios da Tabela 2 foram normalizadas conforme os méritos do Quadro 7. O resultado é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Medidas dos critérios normalizadas.

Sítio	<i>GEO</i>	<i>TOPvol</i>	<i>RUI</i>	<i>DIS</i>	<i>ACE</i>	<i>DIP</i>
S-02	0,16	0,27	0,20	0,22	0,32	0,18
S-2A	0,16	0,16	0,20	0,21	0,42	0,08
S-2C	0,22	0,26	0,20	0,22	0,14	0,24
S-03	0,23	0,17	0,20	0,18	0,06	0,24
S-04	0,23	0,13	0,20	0,18	0,06	0,24

Fonte: Adaptado de (36).

Além disso, o processo de julgamento dos critérios consistiu na participação de especialistas convidados oriundos de três grupos distintos: ITA (Instituto Tecnológico de

Aeronáutica), SAC (Secretaria de Aviação Civil) e SO (representantes das prefeituras do sudoeste paranaense). Todos os especialistas julgaram suas preferências conforme a árvore de decisão da Figura 9 e de acordo com a escala do Quadro 3.

Os resultados dos três métodos estudados foram obtidos segundo a teoria apresentada na seção 2.3 e são apresentados a seguir. Por fim, realizou-se uma análise de sensibilidade para avaliar a robustez dos processos.

5.1 AHP

As prioridades dos especialistas foram calculadas segundo o método AHP e são apresentadas nas Tabela 4 a Tabela 6. Vale ressaltar que o cálculo das razões de consistência não se faz necessário para os pares de critérios (*AER, CID*) e (*GEO, TOPvol*), visto que são nulas. Logo, apenas a razão de consistência *RC* dos critérios *RUI, DIS, ACE* e *DIP* foi verificada.

Tabela 4 – Prioridades do grupo ITA (todos os especialistas).

Especialista	<i>AER</i>	<i>CID</i>	<i>GEO</i>	<i>TOPvol</i>	<i>RUI</i>	<i>DIS</i>	<i>ACE</i>	<i>DIP</i>	<i>RC</i>
1	0,83	0,17	0,13	0,88	0,10	0,40	0,40	0,10	0,00
2	0,50	0,50	0,75	0,25	0,11	0,41	0,41	0,08	0,04
3	0,83	0,17	0,25	0,75	0,31	0,53	0,13	0,03	0,19
4	0,83	0,17	0,75	0,25	0,06	0,41	0,41	0,11	0,06
5	0,86	0,14	0,20	0,80	0,54	0,12	0,28	0,06	0,19
6	0,20	0,80	0,33	0,67	0,51	0,20	0,20	0,09	0,03
7	0,17	0,83	0,50	0,50	0,06	0,48	0,34	0,11	0,08
8	0,83	0,17	0,13	0,88	0,43	0,22	0,21	0,13	0,26
9	0,14	0,86	0,13	0,88	0,59	0,16	0,17	0,07	0,05

Fonte: Adaptado de (36).

Tabela 5 – Prioridades do grupo SAC (todos os especialistas).

Especialista	<i>AER</i>	<i>CID</i>	<i>GEO</i>	<i>TOPvol</i>	<i>RUI</i>	<i>DIS</i>	<i>ACE</i>	<i>DIP</i>	<i>RC</i>
1	0,67	0,33	0,20	0,80	0,53	0,08	0,17	0,22	0,02

Continua

Especialista	AER	CID	GEO	TOPvol	RUI	DIS	ACE	DIP	RC
2	0,50	0,50	0,50	0,50	0,17	0,48	0,31	0,04	0,52
3	0,50	0,50	0,33	0,67	0,12	0,24	0,36	0,29	0,27
4	0,25	0,75	0,75	0,25	0,57	0,07	0,19	0,17	0,04
5	0,25	0,75	0,67	0,33	0,49	0,14	0,17	0,20	0,07
6	0,25	0,75	0,50	0,50	0,12	0,21	0,60	0,07	0,12
7	0,88	0,12	0,13	0,88	0,05	0,56	0,27	0,12	0,29
8	0,33	0,67	0,33	0,67	0,23	0,30	0,36	0,11	0,02
9	0,67	0,33	0,33	0,67	0,07	0,38	0,41	0,14	0,03
10	0,75	0,25	0,67	0,33	0,55	0,21	0,14	0,09	0,02
11	0,33	0,67	0,17	0,83	0,11	0,25	0,25	0,39	0,06

Fonte: Adaptado de (36).

Tabela 6 – Prioridades do grupo SO (todos os especialistas).

Especialista	AER	CID	GEO	TOPvol	RUI	DIS	ACE	DIP	RC
1	0,90	0,10	0,10	0,90	0,06	0,06	0,57	0,31	0,05
2	0,90	0,10	0,10	0,90	0,06	0,07	0,61	0,26	0,08
3	0,90	0,10	0,17	0,83	0,06	0,13	0,32	0,49	0,18
4	0,90	0,10	0,10	0,90	0,31	0,08	0,32	0,29	0,26
5	0,90	0,10	0,10	0,90	0,06	0,07	0,56	0,30	0,06
6	0,33	0,67	0,33	0,67	0,36	0,08	0,38	0,18	0,08
7	0,88	0,12	0,17	0,83	0,08	0,07	0,59	0,25	0,18
8	0,90	0,10	0,89	0,11	0,04	0,08	0,60	0,28	0,17
9	0,67	0,33	0,75	0,25	0,27	0,08	0,49	0,17	0,12
10	0,88	0,12	0,11	0,89	0,10	0,07	0,56	0,28	0,18
11	0,90	0,10	0,10	0,90	0,06	0,07	0,61	0,26	0,08
12	0,89	0,11	0,20	0,80	0,06	0,14	0,37	0,42	0,13
13	0,90	0,10	0,89	0,11	0,04	0,10	0,61	0,25	0,15

Fonte: Adaptado de (36).

Assim, limitando a razão de consistência a 10 % e filtrando os resultados obtidos, pôde-se elaborar as Tabela 7 a Tabela 9, com os especialistas que mostraram-se consistentes.

Tabela 7 – Prioridades do grupo ITA (especialistas consistentes).

Especialista	AER	CID	GEO	TOPvol	RUI	DIS	ACE	DIP	RC
1	0,83	0,17	0,13	0,88	0,10	0,40	0,40	0,10	0,00
2	0,50	0,50	0,75	0,25	0,11	0,41	0,41	0,08	0,04
4	0,83	0,17	0,75	0,25	0,06	0,41	0,41	0,11	0,06
6	0,20	0,80	0,33	0,67	0,51	0,20	0,20	0,09	0,03
7	0,17	0,83	0,50	0,50	0,06	0,48	0,34	0,11	0,08
9	0,14	0,86	0,13	0,88	0,59	0,16	0,17	0,07	0,05

Fonte: Adaptado de (36).

Tabela 8 – Prioridades do grupo SAC (especialistas consistentes).

Especialista	AER	CID	GEO	TOPvol	RUI	DIS	ACE	DIP	RC
1	0,67	0,33	0,20	0,80	0,53	0,08	0,17	0,22	0,02
4	0,25	0,75	0,75	0,25	0,57	0,07	0,19	0,17	0,04
5	0,25	0,75	0,67	0,33	0,49	0,14	0,17	0,20	0,07
8	0,33	0,67	0,33	0,67	0,23	0,30	0,36	0,11	0,02
9	0,67	0,33	0,33	0,67	0,07	0,38	0,41	0,14	0,03
10	0,75	0,25	0,67	0,33	0,55	0,21	0,14	0,09	0,02
11	0,33	0,67	0,17	0,83	0,11	0,25	0,25	0,39	0,06

Fonte: Adaptado de (36).

Tabela 9 – Prioridades do grupo SO (especialistas consistentes).

Especialista	AER	CID	GEO	TOPvol	RUI	DIS	ACE	DIP	RC
1	0,90	0,10	0,10	0,90	0,06	0,06	0,57	0,31	0,05
2	0,90	0,10	0,10	0,90	0,06	0,07	0,61	0,26	0,08
5	0,90	0,10	0,10	0,90	0,06	0,07	0,56	0,30	0,06
6	0,33	0,67	0,33	0,67	0,36	0,08	0,38	0,18	0,08
11	0,90	0,10	0,10	0,90	0,06	0,07	0,61	0,26	0,08

Fonte: Adaptado de (36).

Em posse dos pesos dos critérios atribuídos pelos especialistas consistentes dos três grupos, calculou-se a Agregação Individual de Prioridades (AIP) através da média aritmética desses resultados e obteve-se os valores da Tabela 10.

Tabela 10 – AIP para o conjunto de especialistas consistentes.

<i>AER</i>	<i>CID</i>	<i>GEO</i>	<i>TOPvol</i>	<i>RUI</i>	<i>DIS</i>	<i>ACE</i>	<i>DIP</i>
0,55	0,45	0,36	0,64	0,25	0,21	0,35	0,18

Fonte: Adaptado de (36).

Por fim, o resultado final do ordenamento dos sítios aeroportuários foi obtido mediante a obtenção da prioridade global $W_g(A_n)$ de cada alternativa A_n , conforme a Equação 19.

$$W_g(A_n) = W_{AER} \cdot \sum_{i \in \{GEO, TOP\}} W_i \cdot W_i(A_n) + W_{CID} \cdot \sum_{i \in \{RUI, DIS, ACE, DIP\}} W_i \cdot W_i(A_n) \quad (20)$$

A hierarquização das alternativas, segundo ordem decrescente de prioridades globais, é apresentada na Tabela 11.

Tabela 11 – Resultados finais da ordenação AHP.

Sítio	Prioridade global
S-02	0,236
S-2C	0,222
S-2A	0,205
S-03	0,176
S-04	0,160

Fonte: Adaptado de (36).

5.2 ELECTRE I

Conforme descrito na seção 2.2, o método ELECTRE I utiliza pesos para os critérios. Assim, a partir dos valores da Tabela 10, calculou-se pesos globais, ponderados conforme a árvore de decisão da Figura 9. Por exemplo, $W_{GEO,g} = W_{AER} \cdot W_{GEO}$ e $W_{RUI,g} = W_{CID} \cdot W_{RUI}$.

Tabela 12 – Pesos dos critérios empregados no ELECTRE I.

GEO	TOPvol	RUI	DIS	ACE	DIP
0,20	0,35	0,12	0,10	0,16	0,08

Fonte: O autor.

A partir das Tabela 2 e Tabela 10 calculou-se os índices de concordância para cada par de sítios, conforme a Equação 8. Os resultados são exibidos nas Tabela 13 e Tabela 14.

Tabela 13 – Matriz de concordância.

	S-02	S-2A	S-2C	S-03	S-04
S-02	-	0,840	0,724	0,724	0,724
S-2A	0,471	-	0,275	0,372	0,724
S-2C	0,391	0,840	-	0,804	0,804
S-03	0,391	0,743	0,391	-	0,743
S-04	0,391	0,391	0,391	0,452	-

Fonte: O autor.

Em seguida, foram calculados os índices de discordância para cada par de alternativas de sítios, conforme a Equação 9. Os resultados são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Matiz de discordância.

	S-02	S-2A	S-2C	S-03	S-04
S-02	-	0,097	0,066	0,076	0,072
S-2A	0,106	-	0,163	0,163	0,163
S-2C	0,183	0,279	-	0,010	0,006
S-03	0,263	0,360	0,088	-	0,001
S-04	0,262	0,359	0,132	0,043	-

Fonte: O autor.

Então, adotando-se um limiar de concordância $v \geq 0,500$, conforme mencionado na seção 2.3.2, e um limiar de discordância $v \leq 0,100$, pode-se construir a matriz de veto, na

qual atribuiu-se o valor 1 aos pares que respeitaram os limiares estipulados, e o valor 0 aos pares que violaram pelo menos um liminar. O resultado é apresentado na Tabela 15.

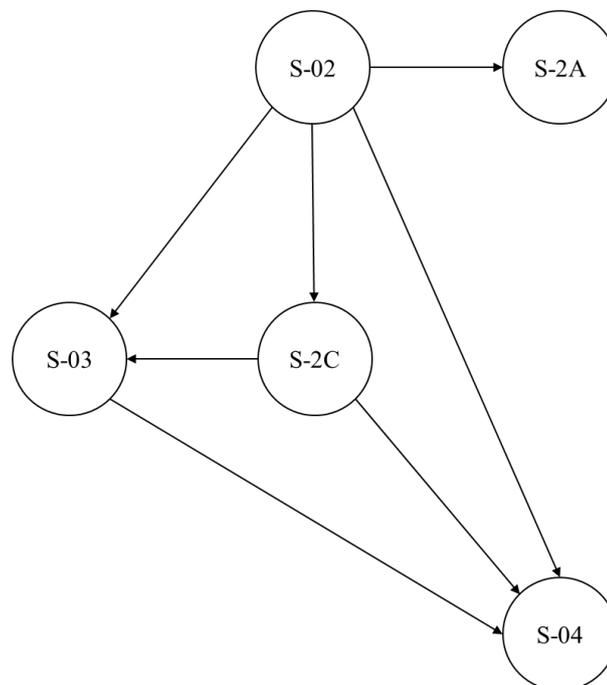
Tabela 15 – Matriz de veto.

	S-02	S-2A	S-2C	S-03	S-04
S-02	-	1	1	1	1
S-2A	0	-	0	0	0
S-2C	0	0	-	1	1
S-03	0	0	0	-	1
S-04	0	0	0	0	-

Fonte: O autor.

Dessa forma, grafos orientados que representam a estrutura de relações foram obtidos, conforme exibido na Figura 10.

Figura 10 – Estrutura de relações.



Fonte: O autor.

Por se tratar de um método de seleção, conforme descrito na seção 2.3.2, não é surpresa obter apenas um sítio como resposta. A partir da análise do grafo contido na Figura 10, podemos

concluir que o kernel é composto apenas pelo sítio S-02. Em suma, este sítio é o único que supera todos os outros e não é superado por nenhum. Além disso, o sítio S-2C aparece como segunda opção por superar os sítios S-2A, S-03 e S-04.

5.3 PROMETHEE II

A partir dos dados contidos nas Tabela 3 e Tabela 12, e adotando-se um limite de indiferença $q = 0,100$, o índice de preferência foi calculado para cada par de sítios conforme a Equação 13. Os resultados são apresentados nas Tabela 16 a Tabela 20.

Tabela 16 – Índices de preferência em relação ao sítio S-02.

Par de sítios	Índice de preferência
(S-02, S-2A)	0,432
(S-02, S-2C)	0,160
(S-02, S-03)	0,160
(S-02, S-04)	0,512

Fonte: O autor.

Tabela 17 – Índices de preferência em relação ao sítio S-2A.

Par de sítios	Índice de preferência
(S-2A, S-02)	0,000
(S-2A, S-2C)	0,160
(S-2A, S-03)	0,160
(S-2A, S-04)	0,160

Fonte: O autor.

Tabela 18 – Índices de preferência em relação ao sítio S-2C.

Par de sítios	Índice de preferência
(S-2C, S-02)	0,000
(S-2C, S-2A)	0,080
(S-2C, S-03)	0,000

Continua

Par de sítios	Índice de preferência
(S-2C, S-04)	0,352

Fonte: O autor.

Tabela 19 – Índices de preferência em relação ao sítio S-03.

Par de sítios	Índice de preferência
(S-03, S-02)	0,000
(S-03, S-2A)	0,080
(S-03, S-2C)	0,000
(S-03, S-04)	0,000

Fonte: O autor.

Tabela 20 – Índices de preferência em relação ao sítio S-04.

Par de sítios	Índice de preferência
(S-04, S-02)	0,000
(S-04, S-2A)	0,080
(S-04, S-2C)	0,000
(S-04, S-03)	0,000

Fonte: O autor.

Em posse dos índices de preferência, calculou-se os fluxos positivo e negativo descritos pelas Equação 14 e Equação 15, respectivamente. Os resultados são exibidos na Tabela 21.

Tabela 21 – Fluxos positivo e negativo para cada alternativa.

Sítio	Fluxo positivo	Fluxo negativo
S-02	0,316	0,000
S-2A	0,120	0,168
S-2C	0,108	0,080
S-03	0,020	0,080
S-04	0,020	0,256

Fonte: O autor.

Enfim, a partir da Equação 16 calculou-se o fluxo líquido para cada alternativa, apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 – Fluxo líquido para cada alternativa.

Sítio	Fluxo líquido
S-02	0,316
S-2A	-0,049
S-2C	0,028
S-03	-0,060
S-04	-0,236

Fonte: O autor.

Sendo assim, ao ordenar os sítios em ordem decrescente, obtém-se o resultado apresentado na Tabela 23.

Tabela 23 – Ordenamento das alternativas segundo o fluxo líquido.

Sítio	Fluxo líquido
S-02	0,314
S-2C	0,028
S-2A	-0,049
S-03	-0,060
S-04	-0,236

Fonte: O autor.

5.4 Análise de Sensibilidade

No processo de tomada de decisão com a avaliação multicritério, os resultados são influenciados pela variedade de incertezas causadas por seus componentes: critérios, pesos e parâmetros. Essas incertezas podem ser identificadas e avaliadas segundo uma análise de sensibilidade que, por sua vez, determina a robustez das estratégias adotadas no processo decisório. Nesse contexto, com o intuito de validar os resultados dos métodos estudados,

realizou-se uma breve análise de sensibilidade de cada um deles com o auxílio dos *softwares* RStudio e Microsoft Excel, com arquivos anexos a este trabalho.

5.4.1 AHP

A análise de sensibilidade foi realizada variando-se os pesos dos critérios visto que, conforme mencionada na seção 2.3.1, a literatura indica que a ordenação final das alternativas varia de acordo com os desvios da escala fundamental. Sendo assim, o primeiro passo consistiu em calcular o desvio padrão dos pesos de cada um dos critérios a partir dos dados das Tabela 7 a Tabela 9.

Tabela 24 – Desvio padrão dos pesos dos critérios.

<i>AER</i>	<i>CID</i>	<i>GEO</i>	<i>TOPvol</i>	<i>RUI</i>	<i>DIS</i>	<i>ACE</i>	<i>DIP</i>
0,29	0,29	0,26	0,26	0,22	0,15	0,16	0,09

Fonte: O autor.

Em posse dos desvios padrões, estimou-se o intervalo de confiança de cada um dos critérios, com a premissa de uma distribuição normal com variância desconhecida. Nesse caso, como o número de observações $n = 18$ é inferior a 30, utilizou-se a distribuição t de Student com $n - 1$ graus de liberdade. Fixou-se um nível de significância $\alpha = 5\%$ e, assim, determinaram-se os valores dos limites inferior e superior do intervalo de confiança conforme a Equação 21.

$$IC(\mu, 1 - \alpha) = (LI, LS) = \left(W_i^m - t_{\frac{\alpha}{2}} \cdot \frac{s_i}{\sqrt{n}}; W_i^m + t_{\frac{\alpha}{2}} \cdot \frac{s_i}{\sqrt{n}} \right) \quad (22)$$

As estimativas estatísticas calculadas são exibidas na Tabela 25.

Tabela 25 – Estimativas estatísticas.

Critério	Média	Desvio padrão	LI	LS
<i>AER</i>	0,55	0,29	0,40	0,69
<i>CID</i>	0,45	0,29	0,31	0,60

Continua

Critério	Média	Desvio padrão	LI	LS
<i>GEO</i>	0,36	0,26	0,23	0,48
<i>TOPvol</i>	0,64	0,26	0,52	0,77
<i>RUI</i>	0,25	0,22	0,14	0,36
<i>DIS</i>	0,21	0,15	0,14	0,29
<i>ACE</i>	0,35	0,16	0,27	0,43
<i>DIP</i>	0,18	0,09	0,13	0,22

Fonte: O autor.

Então, as simulações foram realizadas variando-se o peso de um critério por vez, de modo que o resíduo do critério (diferença entre o peso original e o limite empregado) foi distribuído uniformemente entre os demais critérios que pertenciam ao mesmo nível e ramo da árvore de decisão da Figura 9. Por exemplo, o resíduo da variação do critério *AER* foi alocado no critério *CID*, o resíduo da variação do critério *GEO* foi alocado no critério *TOPvol*, e o resíduo do critério *RUI* foi distribuído uniformemente entre os critérios *DIS*, *ACE* e *DIP*. Os pesos dos critérios em cada simulação são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 – Pesos dos critérios utilizados na análise de sensibilidade do método AHP.

Simulação	<i>AER</i>	<i>CID</i>	<i>GEO</i>	<i>TOPvol</i>	<i>RUI</i>	<i>DIS</i>	<i>ACE</i>	<i>DIP</i>
1	0,40	0,60	0,36	0,64	0,25	0,21	0,35	0,18
2	0,69	0,31	0,36	0,64	0,25	0,21	0,35	0,18
3	0,55	0,45	0,23	0,77	0,25	0,21	0,35	0,18
4	0,55	0,45	0,48	0,52	0,25	0,21	0,35	0,18
5	0,55	0,45	0,36	0,64	0,14	0,25	0,39	0,21
6	0,55	0,45	0,36	0,64	0,36	0,18	0,32	0,14
7	0,55	0,45	0,36	0,64	0,28	0,14	0,38	0,20
8	0,55	0,45	0,36	0,64	0,23	0,29	0,33	0,15
9	0,55	0,45	0,36	0,64	0,28	0,24	0,27	0,20
10	0,55	0,45	0,36	0,64	0,23	0,19	0,43	0,15
11	0,55	0,45	0,36	0,64	0,27	0,23	0,37	0,13
12	0,55	0,45	0,36	0,64	0,24	0,20	0,34	0,22

Fonte: O autor.

Finalmente, calculou-se a prioridade global de cada sítio aeroportuário pela Equação 23, em cada simulação realizada. Os resultados são exibidos na Tabela 27.

Tabela 27 – Prioridades globais dos sítios em cada simulação.

Simulação	S-02	S-2A	S-2C	S-03	S-04
1	0,238	0,220	0,213	0,170	0,159
2	0,234	0,191	0,230	0,182	0,162
3	0,244	0,206	0,225	0,172	0,153
4	0,228	0,205	0,219	0,180	0,167
5	0,238	0,207	0,222	0,174	0,158
6	0,234	0,204	0,222	0,178	0,162
7	0,237	0,206	0,221	0,176	0,160
8	0,236	0,205	0,223	0,176	0,161
9	0,232	0,196	0,225	0,182	0,166
10	0,241	0,215	0,219	0,171	0,155
11	0,238	0,209	0,221	0,174	0,158
12	0,235	0,201	0,223	0,178	0,162

Fonte: O autor.

A classificação dos sítios em ordem decrescente de prioridade é exibida na Tabela 28.

Tabela 28 – Classificação final dos sítios em cada simulação.

Simulação	1º	2º	3º	4º	5º
1	S-02	S-2A	S-2C	S-03	S-04
2	S-02	S-2C	S-2A	S-04	S-03
3	S-02	S-2C	S-2A	S-04	S-03
4	S-02	S-2C	S-2A	S-04	S-03
5	S-02	S-2C	S-2A	S-04	S-03
6	S-02	S-2C	S-2A	S-04	S-03
7	S-02	S-2C	S-2A	S-04	S-03
8	S-02	S-2C	S-2A	S-04	S-03
9	S-02	S-2C	S-2A	S-04	S-03

Continua

Simulação	1º	2º	3º	4º	5º
10	S-02	S-2C	S-2A	S-04	S-03
11	S-02	S-2C	S-2A	S-04	S-03
12	S-02	S-2C	S-2A	S-04	S-03

Fonte: O autor.

Pode-se concluir que em todos os cenários, exceto no primeiro, no qual atribuiu-se um peso menor ao critério *AER*, a ordem de prioridade global dos sítios aeroportuários é mantida. Há indícios de que, de fato, o sítio S-02 é aquele que melhor se adequa às preferências estipuladas pelos especialistas. Nesse sentido, o método AHP mostra-se robusto quando aplicado ao estudo de caso em questão.

5.4.2 ELECTRE I

A análise de sensibilidade foi realizada mantendo-se os limiares de concordância $s = 0,500$ e de discordância $v = 0,100$, e variando-se os pesos dos critérios de forma análoga à realizada na seção 5.4.1. Os pesos utilizados na primeira análise de sensibilidade são apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 – Pesos dos critérios da análise de sensibilidade método ELECTRE I.

Simulação	<i>GEO</i>	<i>TOPvol</i>	<i>RUI</i>	<i>DIS</i>	<i>ACE</i>	<i>DIP</i>
1	0,14	0,26	0,15	0,13	0,21	0,11
2	0,25	0,45	0,08	0,07	0,11	0,05
3	0,13	0,42	0,12	0,10	0,16	0,08
4	0,27	0,28	0,12	0,10	0,16	0,08
5	0,20	0,35	0,07	0,11	0,18	0,10
6	0,20	0,35	0,16	0,08	0,14	0,06
7	0,20	0,35	0,13	0,06	0,17	0,09
8	0,20	0,35	0,10	0,13	0,15	0,07
9	0,20	0,35	0,13	0,11	0,12	0,07
10	0,20	0,35	0,10	0,08	0,20	0,07

Continua

Simulação	GEO	TOPvol	RUI	DIS	ACE	DIP
11	0,20	0,35	0,12	0,10	0,17	0,06
12	0,20	0,35	0,11	0,09	0,15	0,10

Fonte: O autor.

A partir dos dados contidos na Tabela 29 realizou-se a primeira análise de sensibilidade, cujos resultados são expostos nas Tabela 30 e Tabela 31.

Tabela 30 – Matriz de veto da simulação 1.

	S-02	S-2A	S-2C	S-03	S-04
S-02	-	1	1	1	1
S-2A	0	-	0	0	0
S-2C	0	0	-	1	1
S-03	0	0	0	-	1
S-04	0	0	0	1	-

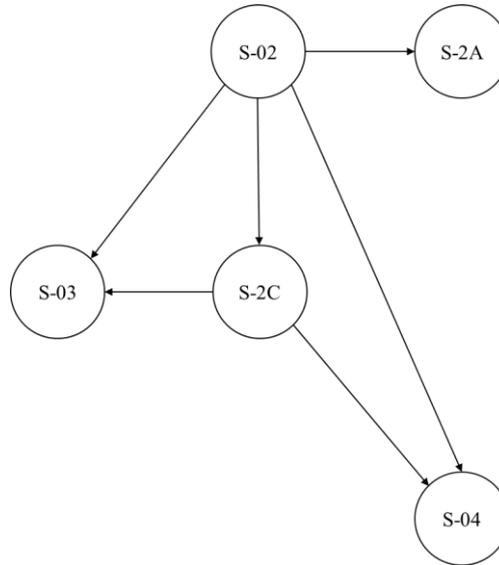
Fonte: O autor.

Tabela 31 – Matriz de veto das simulações 2 a 12.

	S-02	S-2A	S-2C	S-03	S-04
S-02	-	1	1	1	1
S-2A	0	-	0	0	0
S-2C	0	0	-	1	1
S-03	0	0	0	-	1
S-04	0	0	0	0	-

Fonte: O autor.

Assim, nota-se que o grafo das simulações 2 a 12 manteve-se igual ao apresentado na Figura 10 e o kernel novamente resumiu-se apenas ao sítio S-02. A estrutura das relações da simulação 1 sofreu alterações que podem ser observadas a partir da , no entanto o sítio S-02 manteve-se como único elemento do kernel.

Figura 11 – Estrutura de relações da simulação 1.

Fonte: O autor.

O método ELECTRE I mostrou-se, a princípio, robusto em relação à variação de pesos dos critérios, mantidos os limiares fixos. Tal como no método AHP, o resultado final foi impactado pela redução do peso do critério *AER* e consequente aumento do peso do critério *CID*.

Além disso, outras duas análises de sensibilidade foram realizadas variando-se os limiares de concordância e discordância separadamente, e mantendo-se os pesos dos critérios utilizados na seção 5.2. A partir dos pesos dos critérios da Tabela 12 e do limiar de discordância $v = 0,100$, variou-se o limiar de concordância s no intervalo $[0,550; 1,00]$ com passo de 0,050. As matrizes de veto das simulações são ilustradas nas Tabela 32 a Tabela 34.

Tabela 32 – Matriz de veto das simulações com $s \in \{0,550; 0,600; 0,650; 700\}$.

	S-02	S-2A	S-2C	S-03	S-04
S-02	-	1	1	1	1
S-2A	0	-	0	0	0
S-2C	0	0	-	1	1
S-03	0	0	0	-	1
S-04	0	0	0	0	-

Fonte: O autor.

Tabela 33 – Matriz de veto das simulações em que $s \in \{0,750; 0,800\}$.

	S-02	S-2A	S-2C	S-03	S-04
S-02	-	1	0	0	0
S-2A	0	-	0	0	0
S-2C	0	0	-	1	1
S-03	0	0	0	-	0
S-04	0	0	0	0	-

Fonte: O autor.

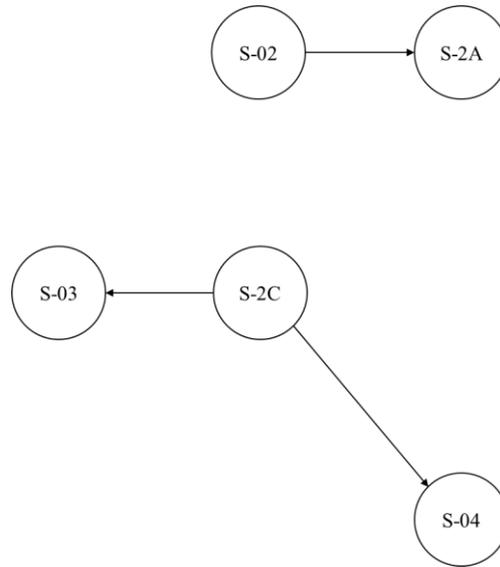
Tabela 34 – Matriz de veto das simulações em que $s \in \{0,850; 0,900; 0,950; 1,000\}$.

	S-02	S-2A	S-2C	S-03	S-04
S-02	-	0	0	0	0
S-2A	0	-	0	0	0
S-2C	0	0	-	0	0
S-03	0	0	0	-	0
S-04	0	0	0	0	-

Fonte: O autor.

Nas simulações em que $s \in \{0,550; 0,600; 0,650; 700\}$, a matriz de veto permaneceu igual ao resultado inicial da seção 5.2 em que adotou-se $s = 0,500$ e, portanto, o kernel também limitou-se ao sítio S-02. Nos casos em que $s \in \{0,750; 0,800\}$, a estrutura de relações é apresentada na Figura 12.

Figura 12 – Estrutura de relações nos casos em que $s \in \{0,750; 0,800\}$.



Fonte: O autor.

O kernel, portanto, é dado pelos sítios potenciais S-02 e S-2C, que também possuem uma relação de incomparabilidade. Assim, não é possível determinar qual dos dois sítios seria a melhor escolha.

Finalmente, quando $s \in \{0,850; 0,900; 0,950; 1,000\}$ não se pode concluir qual a melhor escolha visto que a matriz de veto é nula, denotando a indiferença no processo de escolha entre os sítios aeroportuários possíveis.

Em suma, quanto mais se aumenta o limiar de concordância, mais restringe-se as escolhas. Pequenos limiares não são capazes de distinguir a real superação de uma alternativa em relação à outra por serem menos rigorosos. No entanto, é difícil mensurar o limiar de forma que a escolha final seja de fato a mais adequada.

De forma análoga, variou-se o limiar de discordância v no intervalo $[0,150; 0,450]$ com passo de 0,050, mantendo-se os pesos dos critérios da Tabela 12 e o limiar de concordância $s = 0,500$. As matrizes de veto das simulações são ilustradas nas Tabela 35 a Tabela 38.

Tabela 35 – Matriz de veto das simulações em que $v = 0,150$.

	S-02	S-2A	S-2C	S-03	S-04
S-02	-	1	1	1	1
S-2A	0	-	0	0	0

Continua

	S-02	S-2A	S-2C	S-03	S-04
S-2C	0	0	-	1	1
S-03	0	0	0	-	1
S-04	0	0	0	0	-

Fonte: O autor.

Tabela 36 – Matriz de veto das simulações em que $v \in \{0, 200; 0, 250\}$.

	S-02	S-2A	S-2C	S-03	S-04
S-02	-	1	1	1	1
S-2A	0	-	0	0	1
S-2C	0	0	-	1	1
S-03	0	0	0	-	1
S-04	0	0	0	0	-

Fonte: O autor.

Tabela 37 – Matriz de veto das simulações em que $v \in \{0, 300; 0, 350\}$.

	S-02	S-2A	S-2C	S-03	S-04
S-02	-	1	1	1	1
S-2A	0	-	0	0	1
S-2C	0	1	-	1	1
S-03	0	0	0	-	1
S-04	0	0	0	0	-

Fonte: O autor.

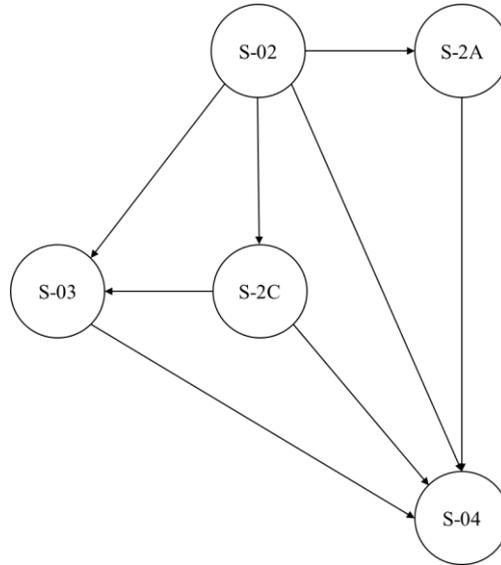
Tabela 38 – Matriz de veto das simulações em que $v \in \{0, 400; 0, 450\}$.

	S-02	S-2A	S-2C	S-03	S-04
S-02	-	1	1	1	1
S-2A	0	-	0	0	1
S-2C	0	1	-	1	1
S-03	0	1	0	-	1
S-04	0	0	0	0	-

Fonte: O autor.

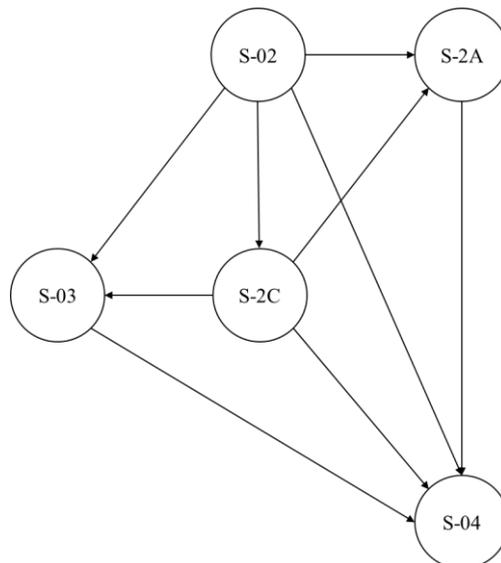
A simulação em que $v = 0,150$ retornou uma matriz de veto igual ao caso em que $v = 0,100$, de forma que o kernel limitou-se apenas ao sítio S-02. As Tabela 35 a Tabela 38 foram representadas em formato de grafo, ilustrados nas Figura 13 a , respectivamente.

Figura 13 – Estrutura de relações nos casos em que $v \in \{0,200; 0,250\}$.



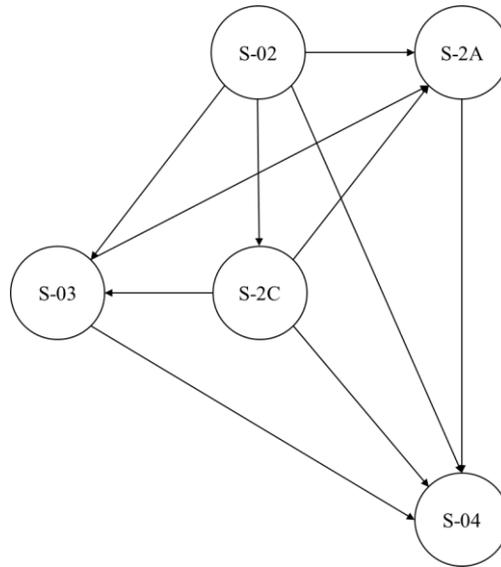
Fonte: O autor.

Figura 14 – Estrutura de relações nos casos em que $v \in \{0,300; 0,350\}$.



Fonte: O autor.

Figura 15 – Estrutura de relações nos casos em que $v \in \{0,400; 0,450\}$.



Fonte: O autor.

As estruturas de relações mostraram-se sensíveis à variação do limiar de discordância, de forma que conforme o limiar de discordância era incrementado, mais relações de superação surgiam. No entanto, em todos os casos o kernel não foi alterado, o que reforça o fato do sítio S-02 ser, a princípio, a melhor escolha. Nota-se também que o sítio S-2C, nos casos em que $v \in [0,300; 0,450]$, aparece como segunda opção por superar os sítios S-2A, S-03 e S-04.

5.4.3 PROMETHEE II

A análise de sensibilidade foi realizada mantendo-se o limite de indiferença $q = 0,100$ e variando-se os pesos dos critérios de forma análoga à realizada na seção 5.4.1. A partir dos pesos dos critérios exibidos na Tabela 29, obtiveram-se os fluxos líquidos de cada uma das simulações. Os resultados alcançados são apresentados na Tabela 39.

Tabela 39 – Fluxos líquidos dos sítios aeroportuários para cada simulação.

Simulação	S-02	S-2A	S-2C	S-03	S-04
1	0,314	-0,012	-0,015	-0,079	-0,208
2	0,318	-0,085	0,071	-0,040	-0,263

Continua

Simulação	S-02	S-2A	S-2C	S-03	S-04
3	0,351	-0,066	0,046	-0,060	-0,271
4	0,281	-0,031	0,011	-0,060	-0,201
5	0,332	-0,053	0,024	-0,064	-0,240
6	0,299	-0,044	0,032	-0,056	-0,232
7	0,327	-0,051	0,025	-0,063	-0,239
8	0,305	-0,046	0,031	-0,057	-0,233
9	0,292	-0,088	0,049	-0,039	-0,215
10	0,340	-0,009	0,007	-0,081	-0,257
11	0,316	-0,022	0,019	-0,069	-0,245
12	0,316	-0,075	0,037	-0,051	-0,227

Fonte: O autor.

Em seguida, ordenou-se os sítios em ordem decrescente de fluxo líquido, de forma que quanto maior o fluxo líquido, maior a preferência pelo sítio. A hierarquia é apresentada na Tabela 41.

Tabela 40 – Posição dos sítios aeroportuários para cada simulação quanto à preferência.

Simulação	1^a	2^a	3^a	4^a	5^a
1	S-02	S-2A	S-2C	S-03	S-04
2	S-02	S-2C	S-03	S-2A	S-04
3	S-02	S-2C	S-03	S-2A	S-04
4	S-02	S-2C	S-2A	S-03	S-04
5	S-02	S-2C	S-2A	S-03	S-04
6	S-02	S-2C	S-2A	S-03	S-04
7	S-02	S-2C	S-2A	S-03	S-04
8	S-02	S-2C	S-2A	S-03	S-04
9	S-02	S-2C	S-03	S-2A	S-04
10	S-02	S-2C	S-2A	S-03	S-04
11	S-02	S-2C	S-2A	S-03	S-04
12	S-02	S-2C	S-03	S-2A	S-04

Fonte: O autor.

A partir dos dados da Tabela 40, verifica-se que as simulações de 4 a 8, 10 e 11 resultaram em um ordenamento de sítios semelhante ao obtido na seção 5.3. Nas simulações 2, 3, 9 e 12 os sítios S-03 e S-2A trocaram de posição no ordenamento final, porém os sítios S-02 e S-2C se mantiveram nas primeiras colocações e o sítio S-04 permaneceu como última opção de escolha. Por sua vez, a simulação 1, na qual remanejou-se parte do peso do critério *AER* para o critério *CID*, apresentou o maior número de mudanças

Uma segunda análise de sensibilidade consistiu na variação do limite de indiferença q no intervalo $[0,050; 0,150]$, com passo de 0,025. Os fluxos líquidos para cada valor de q , exceto $q = 0,100$, apresentado na seção 5.3, são exibidos na Tabela 41 e as alternativas ordenadas na Tabela 42 (em casos de empate, ordenou-se alfabeticamente).

Tabela 41 – Fluxos líquidos para diferentes valores de limite de indiferença.

Sítio	$q = 0,050$	$q = 0,075$	$q = 0,125$	$q = 0,150$
S-02	0,157	0,315	0,208	0,120
S-2A	-0,243	-0,146	0,060	0,060
S-2C	-0,402	0,284	0,028	-0,060
S-03	-0,158	-0,178	-0,060	-0,060
S-04	-0,158	-0,276	-0,236	-0,060

Fonte: O autor.

Tabela 42 – Ordenação das alternativas para diferentes valores de limite de indiferença.

Posição	$q = 0,050$	$q = 0,075$	$q = 0,125$	$q = 0,150$
1°	S-02	S-02	S-02	S-02
2°	S-03	S-2C	S-2A	S-2A
3°	S-04	S-2A	S-2C	S-03
4°	S-2A	S-03	S-03	S-04
5°	S-2C	S-04	S-04	S-2C

Fonte: O autor.

De acordo com a Tabela 42, verifica-se que o resultado é bastante sensível a variações no limite de indiferença. Assim, a robustez do método é passível de questionamento devido a esse parâmetro.

5.5 Discussão de Resultados

O nível de conhecimento matemático exigido pelos métodos não se mostrou empecilho para o desenvolvimento do trabalho. No entanto, pode-se dizer que o método AHP é o de mais fácil compreensão, seguido pelo ELECTRE I e pelo PROMETHEE II, nesta ordem. Além disso, a implementação computacional consistiu, em sua maioria, na elaboração de *loops* e expressões condicionais, assuntos básicos de programação, e que poderiam ser efetuados em outras linguagens e *softwares* diferentes dos que foram utilizados neste trabalho.

Inicialmente, pode-se dizer que os três métodos convergiram para o mesmo resultado, com a preferência de implementação do sítio aeroportuário no sítio S-02, seguido pelo sítio S-2C. Ademais, os métodos AHP e PROMETHEE II também convergiram quanto à hierarquização dos demais sítios: S-2A, S-03 e S-04, nesta ordem. No entanto, vale destacar que os resultados possuem viés, visto que os pesos dos critérios utilizados nos métodos ELECTRE I e PROMETHEE II foram obtidos pelo método AHP.

Apesar disso, é importante ressaltar que a análise de sensibilidade dos métodos não alterou a prioridade de escolha pelo sítio S-02. Nesse caso, pode-se dizer que todos os métodos se mostraram robustos quanto à seleção do sítio potencial que mais se adequa aos critérios estipulados. No entanto, o ordenamento dos sítios foi afetado quando os parâmetros inerentes a cada um dos métodos foram variados.

6 Conclusão

Os objetivos intermediários deste trabalho agregaram por explorar o passo a passo de três modelos multicritérios capazes de auxiliar na tomada de decisão. Nesse contexto, a comparação dos métodos permitiu observar a complexidade envolvida na escolha de um sítio aeroportuário regional.

O método AHP, bem como o ELECTRE I, são dois métodos bastantes difundidos na literatura, ao contrário do PROMETHEE II, que possui características intermediárias entre ambos. Ademais, pode-se dizer que os resultados obtidos pelos três métodos foram satisfatórios, ainda que diante de um pequeno espaço amostral e do viés existente na opção pela escolha dos pesos dos critérios dos métodos ELECTRE I e PROMETHEE II, que foram obtidos pelo método AHP. Cabe destacar que não se pode dizer que há um único resultado correto.

Busca-se ordenar ou escolher os sítios conforme os métodos, afim de reduzir a subjetividade do processo de seleção. No entanto, a resposta final deve ser criticada pela experiência dos analistas envolvidos no processo.

De fato, o AHP mostrou-se vantajoso em relação aos demais pela robustez e facilidade de implementação. Da forma como os métodos foram explorados, ELECTRE I e PROMETHEE II exigiram implementação prévia do AHP, por terem utilizado os pesos deste método. Porém, confrontar os resultados de um método tradicional com outros pouco utilizados nesse tipo de escolha é válido para fins de discussão e confronto de respostas.

Por se tratar de um tema que envolve questões políticas e econômicas, diante de um cenário nacional de tentativa de retomada de crescimento, deve-se buscar ao máximo a otimização das escolhas quanto aos recursos exigidos e benefícios gerados.

7 Bibliografia

1. *Constituição do marco regulatório para o mercado brasileiro de aviação regional*. **Oliveira, Alessandro V M e SALGADO, Lucia Helena**. 2008, Abril de.
2. *LEI Nº 7.565, DE 19 DE DEZEMBRO DE 1986. de Aeronáutica, Código Brasileiro*. 32, 1986, Editora Saraiva (Série Legislação Brasileira) Código Brasileiro de Ar., Decreto Lei.
3. **Organization, International Civil Aviation**. *Airport Planning Manual Part 1: Master Planning*. s.l. : ICRO, 1977.
4. **Gomes, Luiz Flavio Autran Monteiro, González, Marcela Cecilia Araya e Carignano, Claudia**. *Tomada de decisões em cenários complexos: introdução aos métodos discretos do apoio multicritério à decisão*. s.l. : Thomson, 2004. 8522103542.
5. **Gomes, Luiz Flávio Autran Monteiro**. *Teoria da decisão*. s.l. : Thomson, 2007. 8522105294.
6. *Tomada de decisão em grupo na priorização de atividades de desenvolvimento de novos produtos em empresas médias de eletrônicos*. **Salgado, Eduardo Gomes, et al**. 2011, XLIII SBPO-simpósio brasileiro de pesquisa operacional, Ubatuba-SP.
7. *Airport site selection based on multicriteria analysis: the case study of the island of Samothraki*. **Ballis, Athanasios**. 3, s.l. : Springer, 2003, Operational Research, Vol. 3, p. 261. 1109-2858.
8. *A military airport location selection by AHP integrated PROMETHEE and VIKOR methods*. **Sennaroglu, Bahar e Celebi, Gulsay Varlik**. s.l. : Elsevier, 2018, Transportation Research Part D: Transport and Environment, Vol. 59, pp. 160-173. 1361-9209.
9. **Odoni, Amedeo e De Neufville, Richard**. *Airport systems: Planning, design, and management*. s.l. : McGraw-Hill Professional, 2003.
10. **DA INFRAESTRUTURA, Ministério**. *Aviação Regional. Ministério da Infraestrutura*. [Online] 2018. <http://infraestrutura.gov.br/aviacaoregional.html>.
11. **FEDERAL, Senado**. *Os destinos da aviação no Brasil. Revista Em Discussão!* [Online] 2016. www12.senado.leg.br/emdiscussao/edicoes/codigo-aeronautico/@@images/arquivo_pdf/.
12. *A multicriteria method for transportation investment planning*. **Giuliano, Genevieve**. 1, s.l. : Elsevier, 1985, Transportation Research Part A: General, Vol. 19, pp. 29-41. 0191-2607.
13. **Baker, Dennis, et al**. *Guidebook to decision-making methods*. s.l. : WSRC-IM-2002-00002, Department of Energy, USA, 2002.

14. **Bhushan, Navneet e Rai, Kanwal.** *Strategic decision making: applying the analytic hierarchy process.* s.l. : Springer Science & Business Media, 2007. 1852338644.
15. **Mateo, José Ramón San Cristóbal.** Multi-criteria analysis. *Multi criteria analysis in the renewable energy industry.* s.l. : Springer, 2012, pp. 7-10.
16. *A review of multi-criteria decision making methods for enhanced maintenance delivery.* **Sabaei, Davood, Erkoyuncu, John e Roy, Rajkumar.** s.l. : Elsevier, 2015, Procedia CIRP, Vol. 37, pp. 30-35. 2212-8271.
17. *From decision theory to decision aiding methodology.* **Tsoukiàs, Alexis.** 1, s.l. : Elsevier, 2008, European Journal of Operational Research, Vol. 187, pp. 138-161. 0377-2217.
18. *Classement et choix en présence de points de vue multiples.* **Roy, Bernard.** 8, s.l. : EDP Sciences, 1968, Revue française d'informatique et de recherche opérationnelle, Vol. 2, pp. 57-75. 0035-3035.
19. **Bouyssou, Denis, et al.** *Evaluation and decision models: a critical perspective.* s.l. : Springer Science & Business Media, 2000. Vol. 32. 0792372506.
20. **Roy, Bernard.** *Multicriteria methodology for decision aiding.* s.l. : Springer Science & Business Media, 2013. Vol. 12. 1475725000.
21. *Analysis of multicriteria decision aid in Europe.* **Vincke, Philippe.** 2, s.l. : Elsevier, 1986, European Journal of Operational Research, Vol. 25, pp. 160-168. 0377-2217.
22. **Keeney, Ralph L e Raiffa, Howard.** *Decisions with multiple objectives: preferences and value trade-offs.* s.l. : Cambridge university press, 1993. 0521438837.
23. **Yoon, K Paul e Hwang, Ching-Lai.** *Multiple attribute decision making: an introduction.* s.l. : Sage publications, 1995. Vol. 104. 1452213577.
24. *Multicriteria decision making: The analytic hierarchy process: Planning, priority setting.* **Saaty, Thomas L.** s.l. : McGraw-Hill, 1990, Resource Allocation, Vol. 2, pp. 1-20.
25. *The analytic hierarchy process (AHP).* **Saaty, Thomas L.** 11, 1980, The Journal of the Operational Research Society, Vol. 41, pp. 1073-1076.
26. *Multi-criteria analysis and budget reallocation in long-term research planning.* **Lootsma, F A, Mensch, T C A e Vos, F A.** 3, s.l. : Elsevier, 1990, European journal of operational research, Vol. 47, pp. 293-305. 0377-2217.
27. **Barda, O H.** *Recherche d'une méthode appropriée pour l'étude des problèmes de choix de sites pour l'implantation des centrales thermiques.* s.l. : Université de Paris Dauphine-Laboratoire d'analyse et modélisation de ..., 1989.
28. *Modelo de análise de crédito fundamentado no ELECTRE TRI.* **ACOLET, Tatiana.** 2008, Rio de Janeiro: Faculdades Ibmecc. Dissertação de Mestrado Profissionalizante apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Administração das Faculdades Ibmecc.

29. **Rogers, Martin Gerard, Bruen, Michael e Maystre, Lucien-Yves.** *Electre and decision support: methods and applications in engineering and infrastructure investment.* s.l. : Springer Science & Business Media, 2013. 1475750579.
30. **Vincke, Philippe.** *Multicriteria decision-aid.* s.l. : John Wiley & Sons, 1992. 0471931845.
31. **Figueira, José, Greco, Salvatore e Ehrgott, Matthias.** *Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys.* s.l. : Springer Science & Business Media, 2005. Vol. 78. 038723067X.
32. *Note—A Preference Ranking Organisation Method: (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making).* **Brans, Jean-Pierre e Vincke, Ph.** 6, s.l. : INFORMS, 1985, Management science, Vol. 31, pp. 647-656. 0025-1909.
33. *How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method.* **Brans, Jean-Pierre, Vincke, Ph e Mareschal, Bertrand.** 2, s.l. : Elsevier, 1986, European journal of operational research, Vol. 24, pp. 228-238. 0377-2217.
34. *Interactive outranking approaches for multicriteria decision-making problems with imprecise information.* **Özerol, G e Karasakal, Esrsra.** 9, s.l. : Taylor & Francis, 2008, Journal of the Operational Research Society, Vol. 59, pp. 1253-1268. 0160-5682.
35. Especificações Técnicas de Engenharia - ETE. **Banco do Brasil.** [Online] [Citado em: 20 de 06 de 2019.] <https://www.bb.com.br/docs/pub/siteEsp/dilog/dwn/DOC2ETE.pdf>.
36. **DE AERONÁUTICA, Instituto Tecnológico.** *Diagnósticos, estudos e pesquisas visando inovação e aperfeiçoamento do Sistema de Aviação Civil brasileiro: Metodologia de Escolha de Sítios Aeroportuários Regionais – MESA 2.0.* ITA. São José dos Campos : s.n., 2019.
37. *A characterization of concordance relations.* **Bouyssou, Denis e Pirlot, Marc.** 2, s.l. : Elsevier, 2005, European Journal of Operational Research, Vol. 167, pp. 427-443. 0377-2217.
38. **Roy, Bernard.** *The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods. Readings in multiple criteria decision aid.* s.l. : Springer, 1990, pp. 155-183.
39. —. *Méthodologie multicritère d'aide à la décision.* s.l. : Economica, 1985. 2717809015.
40. **Mareschal, Bertrand, Brans, Jean Pierre e Vincke, Philippe.** *PROMETHEE: A new family of outranking methods in multicriteria analysis.* s.l. : ULB--Universite Libre de Bruxelles, 1984.

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO			
1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO TC	2. DATA 20 de novembro de 2019	3. REGISTRO N° DCTA/ITA/TC-121/2019	4. N° DE PÁGINAS 74
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Análise de métodos multicritérios de apoio à decisão aplicados à seleção de sítios aeroportuários regionais.			
6. AUTOR(ES): Rafael Pereira Martins			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Seleção de sítios aeroportuários regionais, Métodos multicritérios de apoio à decisão, MCDA, AHP, ELECTRE, PROMETHEE.			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Teoria multicritério da decisão; Modelos de decisão; Aeroportos; Estudo de casos; Transportes.			
10. APRESENTAÇÃO: <input checked="" type="checkbox"/> Nacional <input type="checkbox"/> Internacional ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica. Orientador: Prof. Dr. Marcelo Xavier Guterres. Publicado em 2019.			
11. RESUMO: Uma das formas de buscar o desenvolvimento e integração do território brasileiro é a aviação regional, que exige a construção de novos aeroportos. Escolher um local para um novo aeroporto significa ponderar variáveis de diversas naturezas. Nesse contexto, a seleção de sítios aeroportuários regionais envolve a necessidade de se atender diversos critérios, que muitas das vezes não são intuitivamente comparáveis. Dessa forma, os métodos multicritérios constituem importante ferramenta de apoio no processo decisório. O presente trabalho comparou o resultado do método AHP, com os de outros dois métodos, ELECTRE e PROMETHEE, quando aplicados à Metodologia de Escolha de Sítios Aeroportuários (MESA) desenvolvida por profissionais do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). Os resultados foram obtidos a partir de um estudo de caso no Sudoeste Paranaense e mostraram-se satisfatórios diante do pequeno espaço amostral. Ainda, para validar as respostas obtidas, realizou uma análise de sensibilidade, a partir da variação de parâmetros inerentes aos métodos.			
12. GRAU DE SIGILO: <input checked="" type="checkbox"/> OSTENSIVO <input type="checkbox"/> RESERVADO <input type="checkbox"/> SECRETO			