

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Escola de Engenharia**  
**Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção**

Rafaela Heloisa Carvalho Machado

**MODELO E SOFTWARE DE DECISÃO MULTICRITÉRIO COM CRITÉRIOS  
HIERÁRQUICOS E DADOS INCERTOS APLICADO À AVALIAÇÃO DA  
SUSTENTABILIDADE NO CICLO DE VIDA**

Belo Horizonte  
2024

Rafaela Heloisa Carvalho Machado

**MODELO E SOFTWARE DE DECISÃO MULTICRITÉRIO COM CRITÉRIOS  
HIERÁRQUICOS E DADOS INCERTOS APLICADO À AVALIAÇÃO DA  
SUSTENTABILIDADE NO CICLO DE VIDA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Engenharia de Produção

Linha de pesquisa: Otimização e simulação de sistemas logísticos e de grande porte

Orientador: Prof. Samuel Vieira Conceição

Coorientadora: Prof. Renata Pelissari Infante

Belo Horizonte  
2024

M149m	<p>Machado, Rafaela Heloisa Carvalho.  Modelo e <i>software</i> de decisão multicritério com critérios hierárquicos e dados incertos aplicado à avaliação da sustentabilidade no ciclo de vida / Rafaela Heloisa Carvalho Machado. – 2024.  1 recurso online (113 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Samuel Vieira Conceição.  Coorientadora: Renata Pelissari Infante.</p> <p>Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Bibliografia: f. 105-113.</p> <p>1. Engenharia de produção – Teses. 2. Estatística – Análise – Teses. 3. Processo decisório – Teses. 4. Software – Desenvolvimento – Teses. 5. Sustentabilidade – Teses. I. Conceição, Samuel Vieira. II. Infante, Renata Pelissari. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.</p>
	CDU: 658.5(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

**Escola de Engenharia**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção**

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**MODELO E SOFTWARE DE DECISÃO MULTICRITÉRIO COM CRITÉRIOS  
HIERÁRQUICOS E DADOS INCERTOS APLICADO À AVALIAÇÃO DA  
SUSTENTABILIDADE NO CICLO DE VIDA**

**RAFAELA HELOISA CARVALHO MACHADO**

Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, como requisito para obtenção do grau de Doutora em ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, área de concentração PESQUISA OPERACIONAL E INTERVENÇÃO EM SISTEMAS SOCIOTÉCNICOS, linha de pesquisa Otimização e Simulação de Sistemas Logísticos e de Grande Porte.

Aprovada em 11 de outubro de 2024, pela banca constituída pelos membros:

**Prof(a). Samuel Vieira Conceição** - Orientador

Universidade Federal de Minas Gerais

**Prof(a). Renata Pelissari Infante**- Co-orientadora

Universidade Presbiteriana Mackenzie

**Prof(a). Carlos Roberto Venâncio de Carvalho**

Universidade Federal de Minas Gerais

**Prof(a). Ricardo Saraiva de Camargo**

Universidade Federal de Minas Gerais

**Prof(a). Raiane Ribeiro Machado Gomes**

Universidade Federal de Viçosa

Belo Horizonte, 11 de outubro de 2024.



Documento assinado eletronicamente por **Samuel Vieira Conceicao, Professor do Magistério Superior**, em 31/10/2024, às 13:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Saraiva de Camargo, Professor do Magistério Superior**, em 31/10/2024, às 22:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Raiane Ribeiro Machado Gomes, Usuário Externo**, em 02/11/2024, às 10:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Renata Pelissari Infante, Usuária Externa**, em 05/11/2024, às 14:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Roberto Venancio de Carvalho, Professor do Magistério Superior**, em 06/11/2024, às 15:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3631757** e o código CRC **4FF26A5B**.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ENGENHARIA - COLEGIADO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA PRODUÇÃO - SECRETARIA

## ATA DE DEFESA DE TESE

### RAFAELA HELOISA CARVALHO MACHADO

Realizou-se, no dia 11 de outubro de 2024, às 14:00 horas, online em <https://meet.google.com/xsa-wznf-ieu>, da Universidade Federal de Minas Gerais, a 74ª defesa de tese, intitulada *MODELO E SOFTWARE DE DECISÃO MULTICRITÉRIO COM CRITÉRIOS HIERÁRQUICOS E DADOS INCERTOS APLICADO À AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE NO CICLO DE VIDA*, apresentada por RAFAELA HELOISA CARVALHO MACHADO, número de registro 2020671810, graduada no curso de ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutor em ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Samuel Vieira Conceição - Orientador (Universidade Federal de Minas Gerais), Prof(a). Carlos Roberto Venâncio de Carvalho (UFMG), Prof(a). Ricardo Saraiva de Camargo (UFMG), Prof(a). Raiane Ribeiro Machado Gomes (Universidade Federal de Viçosa), Prof(a). Renata Pelissari (Universidade Presbiteriana Mackenzie) Co-Orientadora.

A Comissão considerou a tese:

Aprovada

Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 11 de outubro de 2024.

Assinatura dos membros da banca examinadora:

Prof(a). Samuel Vieira Conceição ( Doutor )

Prof(a). Carlos Roberto Venâncio de Carvalho ( Doutor )

Prof(a). Ricardo Saraiva de Camargo ( Doutor )

Prof(a). Raiane Ribeiro Machado Gomes ( Doutora )

Prof(a). Renata Pelissari Infante ( Doutora )



Documento assinado eletronicamente por **Samuel Vieira Conceicao, Professor do Magistério Superior**, em 31/10/2024, às 13:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Saraiva de Camargo, Professor do**



**Magistério Superior**, em 31/10/2024, às 22:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Raiane Ribeiro Machado Gomes, Usuário Externo**, em 02/11/2024, às 10:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Roberto Venancio de Carvalho, Professor do Magistério Superior**, em 03/11/2024, às 13:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Renata Pelissari Infante, Usuária Externa**, em 05/11/2024, às 14:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3631716** e o código CRC **8CB62824**.

---

À minha família.

# Resumo

A maioria dos métodos MCDA/M (*Multi-criteria Decision Aid* ou *Multiple Criteria Decision Making*) não considera critérios hierárquicos e exige a elicitação direta dos pesos dos critérios, o que introduz incerteza na tomada de decisão. Esses pontos têm sido amplamente discutidos na literatura, mas não devidamente abordados quando se trata do método VIKOR. Além disso, métodos MCDA/M que tratam destes desafios usualmente demandam conhecimentos matemáticos e de programação, muitas vezes incompatíveis com a realidade do usuário. Em decisões complexas como no LCSA (*Life Cycle Sustainable Assessment*), estas dificuldades se tornam ainda mais evidentes, pois o problema em si já apresenta desafios. Desta forma, esta tese propõe um novo método de decisão multicritério e um *software* baseados no método VIKOR que possibilitem a elicitação indireta e hierarquia de critérios aplicados a análise do LCSA. Uma variante do MCHP (*Multiple Criteria Hierarchy Process*) é utilizada para considerar critérios hierárquicos e o SMAA (*Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis*), para elicitação indireta dos pesos dos critérios. As condições de aceitação do VIKOR são adaptadas como novas medidas descritivas do SMAA. O modelo proposto, denominado VIKOR-HSMAA, fornece a base para o *software* VIKOR-HS aplicado em dois estudos de caso. O primeiro, analisa os dados de aplicação de um LCSA previamente abordado na literatura para avaliar quatro diferentes alternativas de produção animal no estado de Mato Grosso do Sul, Brasil. O sistema Rotação lavoura-pecuária forma a solução de compromisso para as avaliações de sustentabilidade, econômica e ambiental. O Sistema com pastagens fertilizadas e o Sistema com suplementação proteica formam a solução de compromisso social. O segundo estudo avalia a sustentabilidade dos estados brasileiros. Santa Catarina (SC) foi o estado mais sustentável e econômico. Roraima e Distrito Federal (DF) formam a solução de compromisso ambiental, e SC e DF a solução social. O VIKOR-HS demonstrou facilidade na replicação de diferentes cenários com variações nos pesos e ofereceu informações para uma análise detalhada em todos os níveis da hierarquia, contribuindo assim para uma tomada de decisão menos subjetiva.

**Palavras-chaves:** multicritério; modelos de decisão; software; sustentabilidade; mchp.

# Abstract

Most MCDA/M (Multi-criteria Decision Aid or Multiple Criteria Decision Making) methods do not consider the hierarchy of criteria present and the subjectivity of the direct elicitation of weights present in various decision-making problems. These points have been widely discussed in the literature, but not adequately addressed when it comes to the VIKOR method. Usually, models that address these challenges require mathematical and programming knowledge that is often incompatible with the user's reality. In complex decisions such as the LCSA (Life Cycle Sustainable Assessment), these difficulties become even more evident, as the problem itself already presents challenges. Therefore, this thesis proposes a multi-criteria decision method and software based on the VIKOR method that enables indirect elicitation and hierarchy of criteria applied to the LCSA analysis. A variant of MCHP (Multiple Criteria Hierarchy Process) is used to consider the hierarchy of criteria and SMAA (Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis) to elicit the weights. Furthermore, the acceptance conditions of VIKOR are adapted as new descriptive measures of the SMAA. The proposed model, called VIKOR-HSMAA, provides the basis for software VIKOR-HS applied in two case studies. The first analyzes data from the application of an LCSA, previously discussed in the literature, to evaluate four different animal production alternatives in the state of Mato Grosso do Sul, Brazil. The crop-livestock rotation system forms the compromise solution for sustainability, economic and environmental assessments. The System with fertilized pastures and the System with protein supplementation form the social commitment solution. The second study evaluates the sustainability of Brazilian states. Santa Catarina (SC) was the most sustainable and economical state. Roraima and Distrito Federal (DF) form the environmental compromise solution, and SC and DF the social solution. VIKOR-HS demonstrated ease in replicating different scenarios with variations in weights and offered information for a detailed analysis at all levels of the hierarchy, thus contributing to less subjective decision making.

**Keywords:** multicriteria; decision models; software, sustainability; mchp.

# Lista de Figuras

1.1	Etapas da metodologia de pesquisa . . . . .	21
2.1	Matriz de decisão de métodos multicritério . . . . .	25
2.2	Etapas de aplicação de modelos de MCDA/M. Adaptada de Pomerol e Barba-Romero (2000) . . . . .	25
2.3	Espaço de soluções de um problema de decisão com dois critérios . . . . .	27
2.4	Etapas LCSA. Fonte: ISO 14000 . . . . .	30
2.5	Interface do <i>software</i> PROMETHEE VISUAL . . . . .	35
2.6	Hierarquia de critérios no LCSA . . . . .	36
2.7	Gráficos de classificação de alternativas do software <i>Life Cycle Sustainability Dashboard</i> Fonte: Finkbeiner et al. (2010) . . . . .	38
2.8	Espaço viável de pesos Fonte: Tervonen e Lahdelma (2007) . . . . .	42
2.9	Espaço viável de pesos limitado por restrições ordinais Fonte: Tervonen e Lahdelma (2007) . . . . .	42
2.10	Espaço viável para pesos limitado por restrições intervalares Fonte: Tervonen e Lahdelma (2007) . . . . .	43
2.11	Procedimento de definição dos pesos aleatórios do SMAA . . . . .	44
2.12	Estrutura hierárquica de árvore de critérios simétrica . . . . .	46
2.13	Estrutura hierárquica de árvore de critérios assimétrica . . . . .	46
2.14	Árvore hierárquica de critérios . . . . .	49
2.15	Estrutura de comparação hierárquica para a eliciação de dois pesos. A primeira estrutura representa a eliciação original do MCHP Corrente et al. (2012) (peso-produto). A segunda estrutura representa a proposta de Pellissari et al. (2021) (peso-soma) . . . . .	49
3.1	Passos para a fase de exploração para a definição da solução de compromisso	55
3.2	Fases para aplicação do VIKOR-HSMAA . . . . .	58
3.3	Passos para a fase de exploração para a definição da solução de compromisso	62
3.4	Apoio a gestão fornecida pelo VIKOR-HSMAA . . . . .	62
4.1	Premissas para a utilização do <i>software</i> VIKOR-HS . . . . .	64

4.2	Simplificações do processo decisório do <i>software</i> VIKOR-HS em relação ao modelo VIKOR-HSMAA . . . . .	66
4.3	Fluxograma com atividades de utilização do <i>software</i> . . . . .	67
4.4	Configuração inicial da primeira página . . . . .	67
4.5	Configuração da página inicial para dados imprecisos . . . . .	68
4.6	Configuração da página inicial para os subcritérios do macro-critério ambiental	69
4.7	Configuração da página de subcritérios para dados qualitativos . . . . .	70
4.8	Exemplo de mensagem do validador de não preenchimento de nome de alternativas . . . . .	71
4.9	Configuração da página de resultados na seleção do tipo de resultado . . .	72
4.10	Gráfico para a medida descritiva <i>Rank Acceptability Index</i> . . . . .	72
4.11	Gráfico para a medida descritiva <i>Central Weight Vector</i> . . . . .	73
5.1	Etapas da aplicação do processo decisório do VIKOR-HS no estudo de caso	75
5.2	Definição dos pesos e resultados dos cenários do VIKOR-HS e da literatura	77
5.3	RAI para o 1° e 2° cenários para as dimensões de sustentabilidade . . . . .	83
5.4	CWV para as dimensões de sustentabilidade nos cenários com variabilidade (1° e 2°) nos subcritérios do VIKOR-HS . . . . .	83
5.5	RAI para o terceiro cenário (3°) determinístico para as dimensões de sustentabilidade . . . . .	84
6.1	Estrutura do estudo de caso dos estados utilizando o algoritmo do VIKOR-HS	90
6.2	RAI para a sustentabilidade no VIKOR-HS . . . . .	93
6.3	RAI para a sustentabilidade no cenário impreciso do VIKOR-HS . . . . .	98
6.4	RAI para a sustentabilidade no cenário determinístico do VIKOR-HS . . .	99

# Lista de abreviaturas

**AHP:** *Analytical Hierarchy Process*: Processo de hierarquia analítica

**ANP:** *Analytic Network Process*: Processo de Rede Analítica

**CA:** *Cluster Analysis*: Análise de Clusters

**COPRAS:** *Complex Proportional Assessment*: Avaliação Proporcional Complexa

**DEA:** *Data Envelopment Analysis*: Análise Envoltória de Dados

**ELECTRE:** *Elimination and Et Choice Translating Reality*: Eliminação e Escolha Traduzindo a Realidade

**LCA:** *Life Cycle Assessment*: Avaliação do Ciclo de Vida

**LCSA:** *Life cycle sustainable assessment*: Análise da Sustentabilidade no Ciclo de vida

**S-LCA:** *Social-Life Cycle Assessment* : Avaliação Social do Ciclo de Vida

**MCDA/M:** *Multi-criteria decision Aid ou Multiple Criteria Decision Making*: métodos de análise multicritério de apoio à decisão

**MAUT:** *Multi-Attribute Utility Method*: Método utilitário multiatributo

**MCHP:** *Multiple Criteria Hierarchy Process*: Processo de Hierarquia de Múltiplos Critérios

**PROMETHEE:** *Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations*: Método de Organização de Ranking de Preferências para Enriquecimento de Avaliações

**ROR:** *Robust Ordinal Regression*: Regressão Ordinal Robusta

**SAW:** *Simple Additive Weighting*: Ponderação Aditiva Simples

**SMAA:** *Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis*: Análise Estocástica de Aceitabilidade Multicritério

**TOPSIS:** *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*: Técnica de Ordem de Preferência por Semelhança com a Solução Ideal

**VIKOR:** *Multi-criteria Optimization and Compromise Solution*: Solução de Compromisso e Otimização Multicritério

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>15</b>
1.1	Contextualização e justificativa . . . . .	15
1.2	Contribuições científicas . . . . .	19
1.3	Objetivos . . . . .	20
1.3.1	Objetivo geral . . . . .	20
1.3.2	Objetivos específicos . . . . .	20
1.4	Metodologia de pesquisa . . . . .	21
<b>2</b>	<b>Exame da Literatura</b>	<b>23</b>
2.1	Métodos multicritério - MCDA/M . . . . .	23
2.1.1	Estrutura geral . . . . .	23
2.1.2	O método VIKOR . . . . .	26
2.2	Life Cycle Sustainability Assessment . . . . .	29
2.3	Lacunas da literatura . . . . .	32
2.3.1	Hierarquia dos critérios . . . . .	32
2.3.2	Elicitação dos pesos . . . . .	33
2.3.3	<i>Softwares</i> multicritério . . . . .	34
2.3.4	Desafios do LCSA . . . . .	35
2.3.5	Aplicações de LCSA e VIKOR . . . . .	37
2.4	SMAA . . . . .	39
2.4.1	Elicitação de pesos do SMAA . . . . .	41
2.4.2	Medidas descritivas do SMAA . . . . .	43
2.5	MCHP . . . . .	45
2.6	Discussão do método de elicitação do MCHP . . . . .	48
<b>3</b>	<b>O método VIKOR-HSMAA</b>	<b>54</b>
3.1	Premissas VIKOR-HSMAA . . . . .	54
3.2	Estrutura hierárquica . . . . .	55
3.3	Algoritmo . . . . .	57
3.4	Apoio a gestão . . . . .	62

<b>4</b>	<b>Desenvolvimento do <i>software</i></b>	<b>64</b>
4.1	Premissas VIKOR-HS . . . . .	64
4.2	Desenvolvimento e programação . . . . .	65
4.3	Algoritmo detalhado de utilização do <i>software</i> VIKOR-HS e interfaces do usuário . . . . .	65
<b>5</b>	<b>Estudo de caso em LCSA</b>	<b>74</b>
5.1	Apresentação do estudo de caso . . . . .	74
5.2	Aplicação do <i>software</i> VIKOR-HS . . . . .	74
5.3	Definição dos cenários e literatura . . . . .	77
5.4	Resultados e comparação para a sustentabilidade . . . . .	79
5.5	Resultados para os macro-critérios . . . . .	82
5.6	Apoio a gestão . . . . .	85
5.7	Comparação com a literatura e discussão . . . . .	86
<b>6</b>	<b>Estudo de caso em sustentabilidade</b>	<b>88</b>
6.1	Apresentação do estudo de caso . . . . .	88
6.2	Aplicação do VIKOR-HS . . . . .	89
6.3	Resultados . . . . .	92
6.4	Apoio a gestão e discussão . . . . .	100
<b>7</b>	<b>Conclusão e Trabalhos Futuros</b>	<b>102</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>105</b>

# Capítulo 1

## Introdução

Neste capítulo são apresentadas a contextualização do problema de pesquisa desta tese de doutorado, sua justificativa e as lacunas da literatura que esta tese visa preencher. São apresentados também os objetivos e a metodologia de pesquisa.

### 1.1 Contextualização e justificativa

Uma decisão, de forma geral, pode ser caracterizada pela avaliação de alternativas e a escolha da mais favorável (Pedrycz et al., 2011). Essas decisões podem envolver situações complexas, como a presença de muitas alternativas, avaliação de muitos critérios com prioridades ou pesos diferentes, presença de critérios qualitativos, erro na definição das prioridades e incerteza nos dados (Oliveira et al., 2023).

Em relação a organizações, a tomada de decisão usualmente se mostra complexa, podendo trazer grandes consequências gerenciais e financeiras quando ocorrem decisões equivocadas. Por isso, torna-se relevante o apoio técnico a decisão que pode ocorrer por meio de abordagens como otimização, Análise Envoltória de Dados (*Data Envelopment Analysis* – DEA), Análise de Clusters (*Cluster Analysis* - CA) e Métodos de análise multicritério de apoio à decisão (*Multi-criteria Decision Aid* ou *Multiple Criteria Decision Making* - MCDA/M). Os métodos de otimização são mais eficientes quando é possível definir uma função objetivo e há menos incertezas nos dados, pois a presença de incerteza pode tornar necessária a participação do decisor no processo. Além disso, as abordagens de otimização podem ser complicadas do ponto de vista matemático e requerem grande capacidade computacional (Pedrycz et al., 2011).

A CA agrupa os dados de acordo com suas semelhanças ou distâncias (dissimilaridades). Por meio desta ferramenta, as alternativas podem ser agrupadas, porém, não é possível realizar escolha ou classificação das alternativas (de Oliveira et al., 2023). Já o DEA, é uma técnica não paramétrica usada para determinar a eficiência das unida-

des de tomada de decisão. Apesar de proporcionar uma classificação das alternativas, dependendo do modelo DEA utilizado as alternativas são classificadas em eficientes e ineficientes, sem uma discriminação entre as alternativas eficientes. As técnicas para melhorar esta discriminação podem ser de difícil entendimento e replicação (Mousavi-Nasab e Sotoudeh-Anvari, 2017).

MCDA/M consiste em métodos que consideram problemas de decisão em que diversas alternativas são avaliadas em termos de múltiplos critérios. A análise busca escolher o melhor subconjunto de alternativas, ordená-las ou classificá-las em categorias de acordo com o objetivo do problema (Roy, 1996). Métodos como o DEA e outros métodos de otimização agregam informações ao processo decisório. Porém, dada a necessidade de participação do decisor as demais técnicas não substituem completamente os métodos MCDA/M (Pedrycz et al., 2011; Mousavi-Nasab e Sotoudeh-Anvari, 2017), tornando estes métodos usualmente mais apropriados para o suporte decisório.

De fato, os métodos MCDA/M possibilitam considerar prioridades e avaliações de alternativas com base no conhecimento e experiência de cada decisor (Pedrycz et al., 2011). Por exemplo, na escolha de um equipamento, as opções disponíveis de compra são as alternativas. Os fatores a serem avaliados como preço, eficiência, tamanho, garantia e manutenção são os critérios. Como alguns destes critérios podem ser mais importantes que outros, são atribuídos pesos de acordo com suas prioridades. As avaliações das alternativas em cada critério podem ser obtidas por meio de fontes confiáveis, como manuais de fabricantes ou medições ou, ainda, podem ser fornecidas por especialistas. Com os dados definidos, deve-se aplicar um método MCDA/M buscando agregar as informações dos diferentes critérios, obtendo assim um indicador que ajude na seleção final do equipamento.

Entre os métodos MCDA/M encontram-se os baseados em distância, que classificam as alternativas com base na distância de cada alternativa em relação as soluções ideais e as piores existentes (Opricovic e Tzeng, 2004). VIKOR (*Multi-criteria Optimization and Compromise Solution*) e TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*) são os métodos baseados em distância mais conhecidos. O método VIKOR fornece uma solução com foco na maximização de benefícios, que se baseia na menor distância da Solução Ideal Positiva (Opricovic, 1990, 1998). O TOPSIS considera uma solução com foco em maximizar benefícios e minimizar riscos simultaneamente, com base na menor distância da Solução Ideal Positiva e na maior distância da Solução Ideal Negativa (Hwang e Yoon, 1981).

Esta tese, tem como foco o método VIKOR, que pode ser considerado o método mais adequado para maximizar os benefícios quando os riscos associados são menos importantes (Biswas et al., 2022), sendo portanto considerado uma versão atualizada do TOPSIS (Kumar et al., 2017).

Existem alguns desafios e lacunas nos problemas de tomada de decisão que têm sido extensivamente discutidos na literatura, mas que não foram suficientemente abordados quando se trata do método VIKOR. Um desses desafios diz respeito a elicitação indireta dos pesos dos critérios para superar a dificuldade de definir valores exatos que representem a priorização dos critérios (Amor et al., 2015). Para lidar com a elicitação indireta de pesos de critérios, a Análise Estocástica de Aceitabilidade Multicritério (*Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis* - SMAA) se destaca como uma das metodologias MCDA/M mais aplicadas na literatura (Pelissari et al., 2019).

O SMAA (Lahdelma et al., 1998) baseia-se no conceito de explorar todo o conjunto de parâmetros de preferência para representar as possíveis escolhas do decisor por meio da simulação de Monte-Carlo. Os pesos dos critérios podem ser definidos por dados ordenados, intervalares ou estocásticos, podem estar incompletos ou até mesmo totalmente ausentes. Em seguida, são fornecidas medidas probabilísticas descritivas para apoiar o processo decisório (Pelissari et al., 2019). Vários métodos MCDA/M, incluindo o VIKOR, foram integrados ao SMAA para permitir a elicitação indireta dos pesos dos critérios (Aydogan e Ozmen, 2017).

O método VIKOR possui condições de aceitação que analisam a robustez do desempenho da alternativa frente as demais. Estas condições possibilitam a aplicação da principal vantagem de utilização do VIKOR como ferramenta de decisão, pois classifica alternativas com resultados próximos na mesma posição (Yue, 2024). Caso a alternativa tenha uma forte vantagem, a solução proposta é composta apenas por esta alternativa. Se pelo menos uma das condições não for satisfeita, a solução de compromisso proposta pelo VIKOR é composta por mais de uma alternativa, e não por uma alternativa como usualmente ocorre em outros métodos MCDA/M. O método VIKOR estocástico resultante da integração ao SMAA, proposto em Aydogan e Ozmen (2017), supera o problema de elicitação indireta de pesos de critérios, porém ignora estas condições de aceitação do VIKOR (Aydogan e Ozmen, 2017; Bączkiewicz e Wątróbski, 2022).

Outro desafio atualmente discutido na literatura diz respeito à adoção de uma estrutura hierárquica de critérios. Organizar critérios hierarquicamente é atraente para os decisores porque divide problemas complexos de tomada de decisão em subtarefas gerenciáveis (Corrente et al., 2017). Por exemplo, na área de desenvolvimento sustentável, as dimensões econômica, social e ambiental são os critérios normalmente considerados. Esses critérios são avaliados considerando indicadores de desempenho mais viáveis, os subcritérios, para evitar subjetividade. Portanto, problemas de tomada de decisão de sustentabilidade geralmente exigem que o problema de decisão seja modelado usando uma estrutura hierárquica de critérios (Gao et al., 2021).

A Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida (*Life Cycle Sustainable Assess-*

ment - LCSA), por exemplo, apresenta uma estrutura hierárquica que tem sido utilizada para analisar a sustentabilidade e suas dimensões na tomada de decisão de um produto, serviço ou processo durante seu ciclo de vida, desde a matéria prima até a gestão final de sua vida útil (van Kempen et al., 2016). Por meio desta ferramenta, podem ser comparados diferentes cenários, como por exemplo, a possibilidade de utilização de diferentes matérias primas em um processo produtivo, ou mesmo a comparação entre diferentes sistemas como fazendas ou empresas para a definição de boas práticas em sustentabilidade.

A avaliação do ciclo de vida acaba resultando em situações complexas de tomada de decisão devido ao uso de diferentes tipos de indicadores e unidades (Kalbar et al., 2017), indicadores conflitantes (Guinee et al., 2011) e diferentes categorias de avaliação (Ren e Toniolo, 2018). Por isso, torna-se necessária a utilização de ferramentas robustas que tratem tanto a incerteza dos dados, quanto a hierarquia dos critérios.

Em relação ao método VIKOR uma estrutura hierárquica foi proposta por Kim e Ahn (2020) usando a abordagem de Ahn et al. (2000) para lidar com hierarquia e informações incompletas. Este estudo calculou como programações lineares as pontuações agregadas de utilidade do grupo e pontuações de arrependimento individual para os pesos. Desta forma, são calculados os pontos extremos de cada peso e, com isso, os valores possíveis que cada resultado pode obter dentro deste espaço viável. No entanto, o método proposto não lida com dados completamente ausentes e também ignora as condições de aceitação do VIKOR.

Embora existam diferentes métodos para modelar problemas com uma estrutura hierárquica de critérios, duas formas principais se destacam no contexto do MCDA/M. Esses métodos são o Processo de Hierarquia Analítica (*Analytical Hierarchy Process - AHP*) (Saaty, 1977) e o Processo de Hierarquia de Múltiplos Critérios (*Multiple Criteria Hierarchy Process - MCHP*) (Corrente et al., 2012). A principal diferença entre eles diz respeito ao fato de o AHP fornecer recomendações apenas no nível mais alto da hierarquia de critérios, enquanto o MCHP apresenta recomendações em todos os níveis da hierarquia. O VIKOR já foi integrado ao AHP (Abdul et al., 2022), mas não ao MCHP. O MCHP foi integrado a diferentes métodos MCDA/M, como PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations*, em português Método de Organização de Classificação de Preferência para Enriquecimento de Avaliações) (Corrente et al., 2021), ELECTRE (*Elimination and Et Choice Translating Reality*, em português Eliminação e Escolha Traduzindo a Realidade) (Arandarenko et al., 2020), ELECTRE III (Corrente et al., 2017) e TOPSIS (Corrente e Tasiou, 2023).

O método MCHP original proposto por Corrente et al. (2012) requer a elicitação de pesos dos critérios apenas no nível elementar da hierarquia (último nível), e os pesos dos

critérios nos demais níveis são derivados destes. Em contraste, Pelissari et al. (2021) introduz uma variação do MCHP que exige que os pesos sejam definidos em todos os níveis da árvore de critérios, permitindo independência entre os pesos dos critérios nos diferentes níveis.

A replicação das ferramentas expostas até aqui relacionadas a soluções para os problemas de hierarquia de critérios e elicitação indireta nos pesos dos critérios usualmente demandam por conhecimentos matemáticos e de programação muitas vezes incompatíveis com os disponibilizados pelo decisor. Este fato, diminui a utilização e viabilidade de aplicação das metodologias propostas na literatura em problemas reais de tomada de decisão. Por isso, existem *softwares* que possibilitam a utilização de métodos MCDA/M como PROMETHEE e AHP, e até a utilização conjunta de dois métodos. Encontra-se disponível também uma ferramenta que possibilita a utilização do VIKOR com *Fuzzy*. Não há *software* ou página da web que possibilite a utilização de nenhum MCDA/M hierárquico, bem como com incerteza nos pesos utilizando o SMAA.

Considera-se nesta tese que o método VIKOR proporcione uma estrutura adequada para oferecer suporte aos desafios citados. O VIKOR pode ser aplicado para problemas de tomada de decisão complexos em que as preferências dos especialistas não estão claras no início da definição do problema (Hosseini Dolatabad et al., 2023). O método tem sido cada vez mais aplicado em áreas como sustentabilidade, cadeia de suprimentos e manufatura (Mardani et al., 2016; Gul et al., 2016). Com sua estrutura, o VIKOR fornece a solução de compromisso com uma “utilidade de grupo” máxima da “maioria” e um mínimo de “arrependimento individual” da alternativa “opponente”, envolvendo a preferência do decisor por pesos de critérios (Wei e Zhang, 2014).

## 1.2 Contribuições científicas

Planejamento multicritério tem se mostrado uma vertente emergente (Álvarez-Miranda et al., 2019) e o método VIKOR vem sendo cada vez mais aplicado como suporte a decisão (Yue, 2024). Todo o cenário apresentado mostra que os estudos relacionados ao VIKOR geralmente tratam separadamente da elicitação indireta e da hierarquia de critérios. Além disso, as estruturas do VIKOR disponíveis para lidar com estes dois desafios não consideram as condições de aceitação do método.

Desta forma, esta tese busca desenvolver uma metodologia para solucionar os seguintes desafios: (i) necessidade de modelos de MCDA/M para avaliação de critérios hierárquicos; (ii) possibilitar elicitação indireta dos pesos; (iii) disponibilização de um *software* de fácil utilização pelo usuário que forneça informações sobre ordenação (*rank*)

---

em todos os níveis da hierarquia de critérios; (iv) aplicação do método completo multicritério a um tipo de decisão complexa representado pelo LCSA.

Desta forma, este estudo contribui para a literatura existente das seguintes maneiras. Primeiramente, apresenta uma revisão de literatura referente aos temas e exploram-se as diferenças entre os métodos MCHP. Em seguida, propõe-se um modelo de integração do SMAA e MCHP ao VIKOR, apresentado em Machado et al. (2022), sugerindo um novo conjunto de medidas descritivas considerando as condições de aceitação da solução do VIKOR e permitindo a análise pelo decisor do desempenho da alternativa em cada critério. Em seguida, é apresentado um *software* de fácil utilização que viabiliza a aplicação do modelo multicritério proposto a usuários não especializados em programação. E, por fim, o *software* é aplicado em um estudo de caso do LCSA e outro relacionado a sustentabilidade.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo geral

Propor um método de decisão multicritério baseado no método VIKOR que permita a elicitação indireta dos pesos dos critérios e critérios organizados hierarquicamente, e propor um *software* para sua aplicação. Aplicar o método e o *software* propostos para a análise do LCSA.

### 1.3.2 Objetivos específicos

1. Propor medidas descritivas para a integração VIKOR e SMAA;
2. Elaborar um modelo matemático de integração entre os métodos VIKOR, SMAA e MCHP;
3. Elaborar um modelo computacional da integração entre os métodos VIKOR, SMAA e MCHP;
4. Desenvolver um *software* de fácil utilização para o modelo;
5. Aplicar e avaliar o uso do *software* proposto junto ao LCSA e na avaliação da sustentabilidade em estudos de caso.

## 1.4 Metodologia de pesquisa

A abordagem de pesquisa aplicada nesta tese pode ser definida como quali-quantitativa, pois aborda tanto a modelagem do método proposto, como a subjetividade da análise do ciclo de vida. O trabalho aplica ainda dois estudos de caso para a validação da metodologia proposta. As etapas técnicas do trabalho são apresentadas na Figura 1.1, dividindo o estudo em cinco etapas.

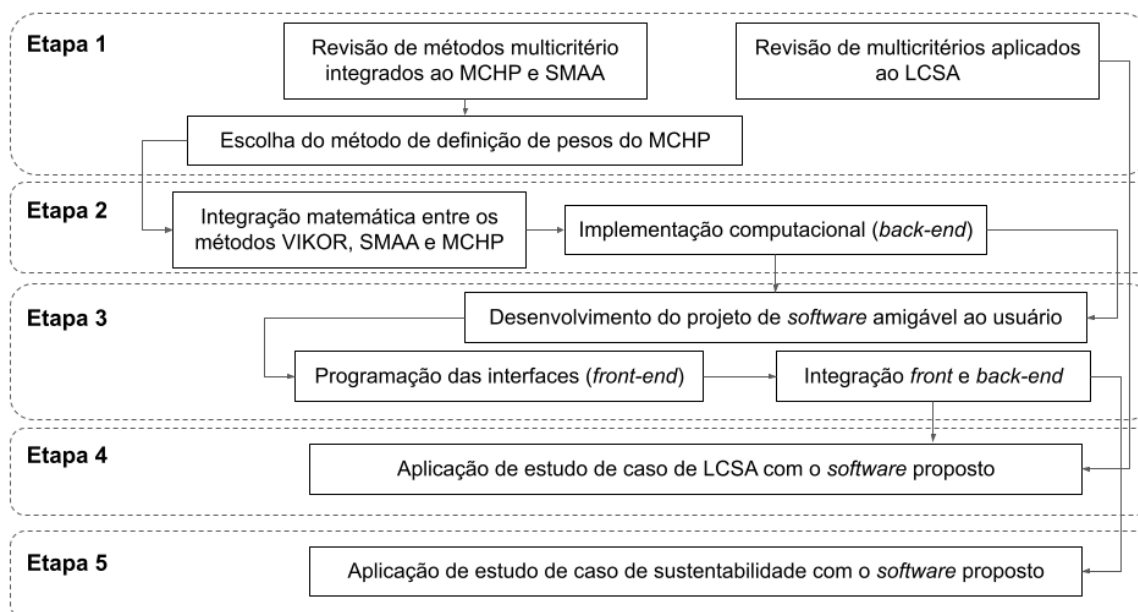


Figura 1.1: Etapas da metodologia de pesquisa

A primeira etapa do estudo consiste na revisão da literatura recente e relevante relacionada aos temas multicritério, MCHP, SMAA e LCSA. Com isso, busca-se identificar as práticas mais recomendadas e as lacunas de conhecimento. São analisadas as aplicações de LCSA, em conjunto ao MCDA/M, em especial ao VIKOR. Quanto aos métodos multicritério, serão analisados os métodos e as integrações com MCHP e SMAA para a definição matemática da integração proposta. Serão revisadas e discutidas as opções de elicitação indireta de pesos dos critérios em critérios hierárquicos para a escolha da abordagem.

Na segunda etapa, os métodos VIKOR, MCHP e SMAA serão integrados matematicamente com uma implementação computacional, criando o código do método denominado VIKOR-HSMAA em Python (*back-end*).

Na terceira etapa é desenvolvido um *software* denominado VIKOR-HS que seja de fácil utilização ao decisor. Primeiramente, será definido o projeto do *software* com suas simplificações e funcionalidades. Em seguida, serão programadas as interfaces do usuário para a navegação no sistema (*front-end*). Estas interfaces são então integra-

das ao modelo computacional (*back-end*), realizando as adaptações necessárias para a finalização do desenvolvimento do *software*.

Na quarta etapa os métodos LCSA e o *software* VIKOR-HS serão integrados. O *software* é aplicado a um estudo de caso de LCSA utilizando o VIKOR presente na literatura, com a comparação e discussão dos resultados obtidos entre a aplicação do VIKOR e o *software* VIKOR-HS proposto.

Na quinta etapa é aplicado um estudo de caso referente a avaliação da sustentabilidade dos estados brasileiros com a aplicação do *software* VIKOR-HS.

## Capítulo 2

# Exame da Literatura

Neste capítulo, é revisada a literatura sobre MCDA/M e LCSA. São apresentados os conceitos básicos de cada uma das áreas para possibilitar o entendimento das propostas desta tese. Na Seção 2.1 são apresentados os conceitos básicos de MCDA/M e o método VIKOR. O LCSA é introduzido na Seção 2.2. Na Seção 2.3 são discutidos os desafios dos métodos MCDA/M e de sua implementação em conjunto com o LCSA. Na Seção 2.4 é apresentado o método SMAA e na Seção 2.5 o método MCHP. Por fim, na Seção 2.6 são discutidas as características das duas formas de elicitação do MCHP para a definição da abordagem a ser utilizada neste tese.

### 2.1 Métodos multicritério - MCDA/M

Os métodos MCDA/M constituem um grupo de ferramentas e práticas que possibilitam a tomada de decisão de forma menos subjetiva. Estas ferramentas possuem elementos, tipos de informações e passo a passo de aplicação similares.

#### 2.1.1 Estrutura geral

Os modelos multicritério são baseados em seis elementos, conforme Pomerol e Barba-Romero (2000): atores, conjunto de alternativas, critérios, vetor de pesos dos critérios, valores de desempenho das alternativas e a matriz de decisão.

- **Atores:** Atores são os indivíduos, grupo de indivíduos ou entidades que desempenham algum papel no processo decisório. O decisor é o principal ator, definindo a decisão a ser tomada diante do problema e, assim, o responsável pelas consequências dessa decisão. O decisor pode ser representado por um único indivíduo ou um grupo de pessoas. Outro ator importante no processo decisório é o analista, que

---

fornece suporte metodológico ao decisor, sem influenciar na decisão (de Almeida, 2013).

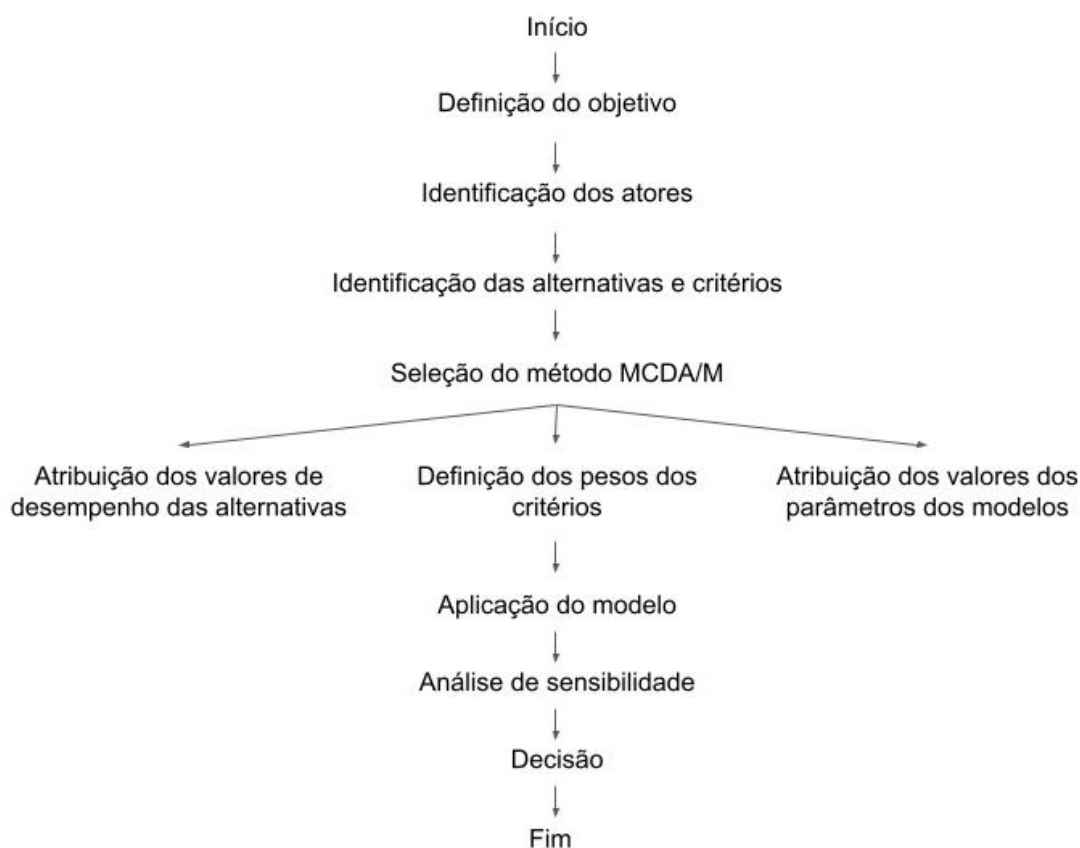
- **Conjunto de alternativas:** As alternativas representam as diferentes opções de ação disponíveis para o decisor. O conjunto de alternativas é considerado finito, variando de várias a centenas. As alternativas devem ser selecionadas, priorizadas e, eventualmente, classificadas (Triantaphyllou, 2000). As alternativas podem ser representadas pelo conjunto  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ .
- **Crítérios:** Formam o padrão de julgamento ou regras para testar a aceitabilidade. A literatura de tomada de decisão multicritério indica os critérios como objetivos e/ou atributos (Pedrycz et al., 2011). Os critérios são representados pelo conjunto  $G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$ .
- **Vetor de Pesos:** A maioria dos métodos MCDA/M exige que sejam atribuídos pesos aos critérios, também chamados de preferência ou prioridade. Esses pesos são normalizados para somar um (Triantaphyllou, 2000). Os vetores são definidos nesta tese por  $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ , sendo atribuído um peso  $w_j$  a cada critério  $g_j$ .
- **Valores de desempenho das alternativas:** Correspondem a avaliações de cada alternativa em cada um dos critérios definidos no problema. A avaliação de uma alternativa pode ser definida pelo decisor, obtido por dados históricos ou por medições (Pomerol e Barba-Romero, 2000). Nesta tese, a avaliação da alternativa  $a_i$  referente ao critério  $g_j$  é representada por  $g_j(a_i)$ .
- **Matriz de decisão:** Um problema MCDA/M pode ser expresso em um formato de matriz. Uma matriz de decisão é uma matriz (m x n), conforme Figura 2.1 (Pedrycz et al., 2011).

Os critérios podem ser de dois tipos: quantitativos ou qualitativos. Os critérios quantitativos são mensuráveis, enquanto os qualitativos representam características não mensuráveis. Comumente, os critérios qualitativos são representados por escalas numéricas para sua consideração nos métodos MCDA/M. As escalas podem ser por exemplo do tipo “Excelente”, “Muito bom” e “Bom”, podendo ser atribuídos valores a estas avaliações como 3, 2 e 1, respectivamente. Utilizando a escala Likert com “Discordo totalmente”, “Discordo”, “Neutro”, “Concordo”, “Concordo plenamente”, poderiam ser atribuídos valores 5, 4, 3, 2 e 1. Ou, no caso de critérios quantitativos, 1<sup>o</sup>, 2<sup>o</sup> e 3<sup>o</sup> lugar em ordem de importância, pode-se atribuir os valores 3, 2 e 1.

		Critérios				
		$g_1$	$g_2$	$g_3$	...	$g_n$
		$(w_1$	$w_2$	$w_3$	...	$w_n)$
Alternativas	$a_1$	$g_1(a_1)$	$g_2(a_1)$	$g_3(a_1)$	...	$g_n(a_1)$
	$a_2$	$g_1(a_2)$	$g_2(a_2)$	$g_3(a_2)$	...	$g_n(a_2)$
	$a_3$	$g_1(a_3)$	$g_2(a_3)$	$g_3(a_3)$	...	$g_n(a_3)$
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	$a_m$	$g_1(a_m)$	$g_2(a_m)$	$g_3(a_m)$	...	$g_n(a_m)$

**Figura 2.1:** Matriz de decisão de métodos multicritério

As etapas de aplicação dos métodos também são estruturadas de forma similar, possibilitando que os elementos da decisão sejam considerados no processo. A Figura 2.2 apresenta o passo a passo para a aplicação de um método MCDA/M.



**Figura 2.2:** Etapas de aplicação de modelos de MCDA/M. Adaptada de Pomerol e Barba-Romero (2000)

De forma geral, os métodos se iniciam pela definição do objetivo da decisão. Este objetivo auxilia na definição das demais etapas, incluindo a definição do método MCDA/M

a ser utilizado e dos critérios do problema. Em seguida, devem ser identificados os atores, as alternativas e os critérios.

Para a escolha do método MCDA/M deve ser considerado o objetivo do problema. O MCDM/A pode ser aplicado a diferentes problemas de decisão como escolha, classificação e ordenação. Os problemas de escolha, consistem em selecionar a melhor alternativa. As decisões de ordenação exigem como saída uma ordem das alternativas, da melhor para a pior. Os problemas de classificação atribuem cada alternativa a classes ordenadas predefinidas.

Selecionado o método de decisão, devem ser definidos os valores de desempenho das alternativas, os pesos dos critérios e, de acordo com o método selecionado, os valores dos parâmetros de decisão, que variam de um método para outro. Em seguida, deve-se aplicar o modelo e realizar uma análise de sensibilidade ou análise de robustez para ajuste dos parâmetros, se necessário. Por fim, ocorre a tomada de decisão em relação ao problema analisado.

Os métodos MCDM/A podem ser classificados em cinco categorias: métodos de pontuação, métodos baseados em distância, métodos de comparação pareada, método de superação e métodos baseados em utilidade (Navarro et al., 2020). Métodos de pontuação, como *Simple Additive Weighting* (SAW) e *Complex Proportional Assessment* (COPRAS), encontram a solução preferida usando a aplicação direta da aritmética básica. Métodos baseados em distância, como TOPSIS e VIKOR, foco desta tese, fornecem a melhor solução através da avaliação da distância tanto para a solução ótima quanto para a pior solução existente entre as opções.

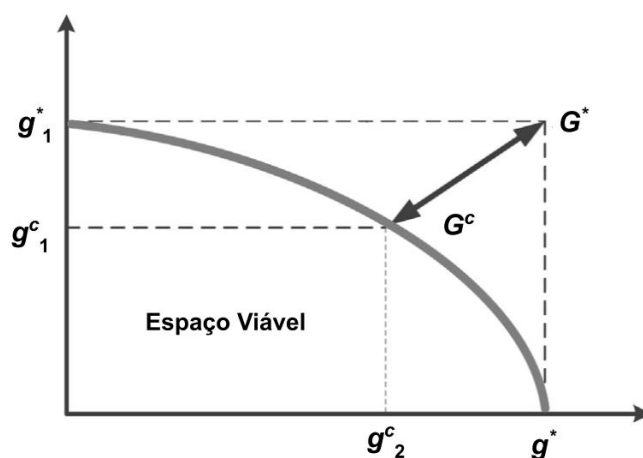
Os métodos de comparação pareada são o AHP e o *Analytic Network Process* (ANP). Esses métodos comparam cada par de alternativas para fornecer a pontuação final. Métodos de superação, como PROMETHEE e ELECTRE, estabelecem um grau de dominância entre as alternativas e consideram todos os graus para a ordenação final. Por fim, os métodos baseados em utilidade usam o grau de satisfação esperado por cada alternativa para formar as pontuações como no método *Multi-Attribute Utility method* (MAUT).

### 2.1.2 O método VIKOR

O método VIKOR é um MCDA/M de ordenação e seleção proposto por Serafim Opricovic (1990, 1998). O método busca resolver problemas de decisão com critérios não comensuráveis e conflitantes. O VIKOR assume uma ordenação (*rank*) onde o decisor pode definir uma solução de compromisso mais próxima do “ideal”, com uma ou mais alternativas, com base num acordo estabelecido por concessões mútuas feitas entre as alternativas (Opricovic e Tzeng, 2004; Vučijak et al., 2015).

O problema de decisão refere-se a um conjunto de alternativas  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$  avaliadas segundo um conjunto de critérios  $G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$ . Os pesos  $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$  são atribuídos a cada critério, e existe uma solução ideal hipotética que possui a melhor pontuação para todos os critérios. O objetivo, é chegar à solução “mais próxima” desta solução ideal. Esse processo é realizado considerando um acordo por concessões mútuas entre a melhor alternativa em cada critério.

Desta forma, considera-se uma solução ideal  $G^*$  com a melhor pontuação para todos os critérios. A solução de compromisso VIKOR  $G^c$ , é estabelecida para se chegar à solução “mais próxima” da ideal, conforme Figura 2.3.



**Figura 2.3:** Espaço de soluções de um problema de decisão com dois critérios

O algoritmo VIKOR tem os seguintes passos:

**Passo 1.** Para cada critério  $g_j$ , determine o menor e o maior valor apresentado entre as alternativas consideradas, conforme definido abaixo:

- Se o critério  $g_j$  representa um benefício (função a ser maximizada), então, para  $\forall i, i = 1, 2, \dots, m$

$$\begin{cases} g_j^* = \max_i g_j(a_i), \\ g_j^- = \min_i g_j(a_i). \end{cases}$$

- Se o critério  $g_j$  representa um custo (função a ser minimizada), então, para  $\forall i, i = 1, 2, \dots, m$

$$\begin{cases} g_j^* = \min_i g_j(a_i), \\ g_j^- = \max_i g_j(a_i). \end{cases}$$

**Passo 2.** Normalize  $g_j(a_i)$  e, para cada alternativa  $a_i$ , calcule os valores da soma dos valores normalizados multiplicados pelo peso de cada critério para todos os critérios, representados por  $S(a_i)$  (medida de utilidade), e o maior  $g_j$  normalizado multiplicado

pelo peso do critério obtido pela alternativa  $a_i$ , representada por  $R(a_i)$  (medida de arrependimento):

$$S(a_i) = \sum_{j=1}^n w_j \left( \frac{g_j^* - g_j(a_i)}{g_j^* - g_j^-} \right), \quad (2.1)$$

$$R(a_i) = \max_j w_j \times \left( \frac{g_j^* - g_j(a_i)}{g_j^* - g_j^-} \right). \quad (2.2)$$

Observa-se que  $(g_j^* - g_j(a_i))/(g_j^* - g_j^-)$  corresponde a 1 para a pior alternativa possível e 0 para o melhor valor possível, considerando cada critério.

**Passo 3.** calcule  $Q(a_i)$  equilibrando os valores das medidas de utilidade  $S(a_i)$  e de arrependimento  $R(a_i)$  de acordo com o “coeficiente de estratégia”  $v$ :

$$Q(a_i) = v \left( \frac{S(a_i) - S^*}{S^- - S^*} \right) + (1 - v) \left( \frac{R(a_i) - R^*}{R^- - R^*} \right) \quad (2.3)$$

onde  $S^* = \max_i S(a_i)$ ,  $S^- = \min_i S(a_i)$ ,  $R^* = \max_i R(a_i)$ ,  $R^- = \min_i R(a_i)$ . O “coeficiente de estratégia”  $v$  pertence ao intervalo  $[0,1]$ . Quando  $v > 0,5$ , os resultados dão foco em satisfazer a maioria dos critérios, enquanto quando  $v < 0,5$ , significa que a maior prioridade deve ser minimizar as diferenças individuais da solução ideal.

**Passo 4.** Classifique as alternativas ordenando S, R e Q em ordem crescente. Classifique a solução de acordo com a ordem Q ( $Q = \{Q(a_{(1)}), Q(a_{(2)}), \dots, Q(a_{(m)})\}$ ).

**Passo 5.** Se as duas condições a seguir forem satisfeitas, propor a solução de compromisso com a alternativa  $a_{(1)}$  que foi a primeira na ordenação de acordo com o valor de Q (minimização):

**Condição 1.** “Vantagem aceitável”:

$$Q(a_{(2)}) - Q(a_{(1)}) \geq 1/(m - 1) \quad (2.4)$$

em que  $a_{(2)}$  é a segunda alternativa na lista de ordenação definida pelo valor de Q. Se satisfeita, esta condição mostra que  $a_{(1)}$  apresenta uma sólida vantagem em relação a segunda alternativa da ordenação  $a_{(2)}$ .

**Condição 2.** “Estabilidade aceitável”:

$a_{(1)}$  deve ser a alternativa melhor posicionada nas ordenações de R e/ou S.

Se ambas as condições forem satisfeitas,  $a_{(1)}$  é a solução. Se apenas a Condição 2

não for satisfeita, a solução será  $a_{(1)}$  e  $a_{(2)}$ . Se a Condição 1 não for satisfeita, a solução compreende todas as alternativas  $a_{(1)}, a_{(2)}, \dots, a_{(m)}$  atendendo a  $Q(a_{(m)}) - Q(a_{(1)}) < 1/(m - 1)$ .

## 2.2 Life Cycle Sustainability Assessment

O LCSA busca aplicar o Pensamento do Ciclo de Vida (*Life Cycle Thinking*), também chamado de Perspectiva do Ciclo de Vida, às dimensões de sustentabilidade. Desta forma, é avaliada a sustentabilidade em diferentes cenários em todo o ciclo de vida de um produto, serviço ou processo, avaliando o impacto de possíveis alterações que possam aumentar a sustentabilidade, incorporando assim o desenvolvimento sustentável ao processo de tomada de decisão.

A análise leva em conta os impactos ambientais, sociais e econômicos ao longo de todo o ciclo de vida (desde a extração da matéria-prima até o processamento de materiais, fabricação, distribuição, uso, reparo, manutenção e descarte ou reciclagem).

Antes do surgimento do LCSA, a análise do ciclo de vida já era realizada em separado para as dimensões de sustentabilidade. Desta forma, as aplicações mais comuns da análise do ciclo de vida referem-se a avaliação de apenas uma dimensão de sustentabilidade, em especial, a dimensão ambiental. A análise ambiental é realizada pela Avaliação do Ciclo de Vida (*Life Cycle Assessment - LCA*) que representa a dimensão mais madura e que deu origem a diversas abordagens que se expandiram para as demais dimensões e, posteriormente, para o LCSA (Balasbaneh et al., 2018).

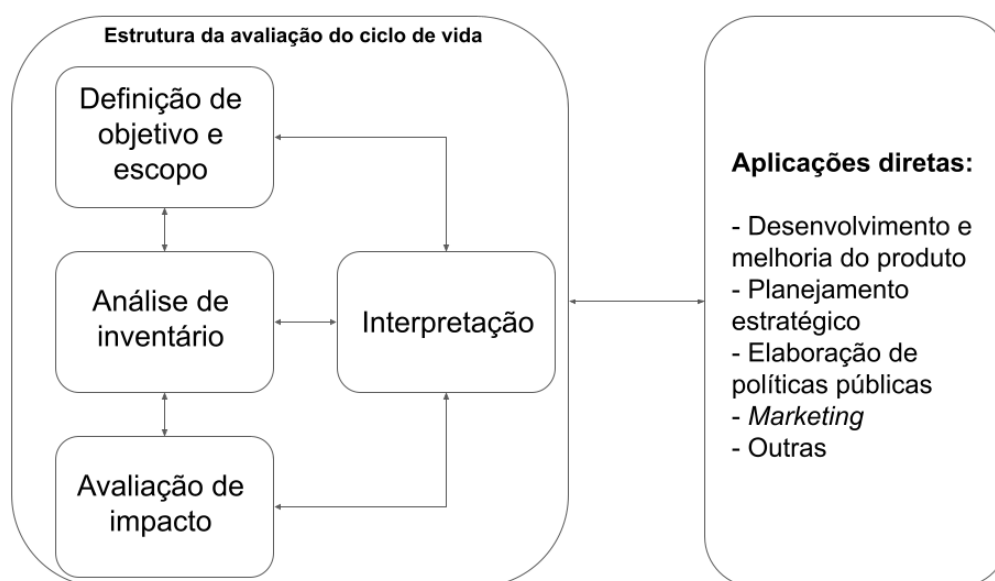
LCAs (ambientais) tem sido extensivamente estudados nas últimas décadas, evoluindo em práticas como medição e divulgação dos resultados. No entanto, também é importante analisar as demais áreas da sustentabilidade, pois a inclusão dos aspectos socio-econômicos permite analisar os *trade-offs* entre as opções decisórias para as partes interessadas (Moriizumi et al., 2010). A dimensão econômica, é avaliada pela Avaliação do Custo do Ciclo de Vida (*Life Cycle Cost - LCC*) e a social, pela Avaliação Social do Ciclo de Vida (*Social-Life Cycle Assessment - S-LCA*) (Ren et al., 2015; Balasbaneh et al., 2018).

A análise do ciclo de vida é usualmente baseada nas normas ISO (*International Standards Organization*) 14040 e 14044, que fornecem uma estrutura processual padronizada dos estudos de avaliação focados na área ambiental, com diretrizes que podem ser estendidas as dimensões social e econômica. Como todas as dimensões podem ter a ISO como base, Kloepffer (2008) propôs o LCSA com a integração dos conceitos de LCA, LCC e S-LCA, unindo as três dimensões de sustentabilidade:

$$\text{LCSA} = \text{LCA} + \text{LCC} + \text{S-LCA} \quad (2.5)$$

tornando assim possível a integração dos três aspectos na tomada de decisão no ciclo de vida.

De forma geral, as normas ISO 14000 apresentam uma estrutura metodológica dividida em quatro fases, apresentada na Figura 2.4. A fase de “Definição de objetivo e escopo” deve explicitar o objetivo, deixando clara a aplicação pretendida, a motivação do estudo e o público alvo.



**Figura 2.4:** Etapas LCSA. Fonte: ISO 14000

A delimitação da fronteira do sistema também é uma parte importante desta fase, que define o que será considerado ou não no estudo. Os limites do sistema devem estar de acordo com o objetivo definido. O escopo do ciclo de vida deve ser conduzido desde a aquisição das matérias-primas, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem até a disposição final. No entanto, na definição dos limites do sistema a ser analisado pode-se decidir se um processo será considerado ou não na análise. Caso o sistema envolva todas as etapas é classificado como “do berço ao túmulo” (ou “*cradle to grave*”). Caso algum processo seja excluído, são consideradas variantes deste sistema como “berço ao portão” (“*cradle to gate*”) e “berço ao portão da fazenda” (“*cradle to farm gate*”) focando na extração de recursos apenas, e “portão a portão” (“*gate to gate*”) com foco na cadeia de valor de suprimentos (Jiménez-González et al., 2000).

Na fase “Análise de inventário” devem ser definidas e agrupadas todas as emissões liberadas e os recursos extraídos do ambiente ao longo de todo o ciclo de vida do pro-

---

duto, serviço ou processo. As atividades desta fase podem ser divididas em três grupos: coleta de dados, procedimento de cálculo e alocação. Os dados podem ser coletados de diferentes fontes, classificadas como fontes primárias, como os dados próprios coletados em processos do sistema envolvido no escopo do estudo. Os outros dados podem ter fontes secundárias públicas ou adquiridas (por exemplo, base de dados), ou possuírem como origem outros estudos (Perdomo et al., 2021). Os dados secundários são amplamente utilizados nas análises do ciclo de vida, porque a coleta de dados é a fase que mais demanda tempo entre as etapas da análise.

A fase “Avaliação de impacto” consiste em traduzir os dados do inventário em impactos sustentáveis, o que possibilita compreender a magnitude e a significância dos impactos ao longo do ciclo de vida do produto. A avaliação de impacto pode ser dividida em cinco atividades, que são (1) seleção de categorias de impacto, indicador de categoria e modelos de caracterização, (2) classificação e atribuição de dados do inventário para categorias de impacto, (3) cálculo dos resultados do indicador de categoria, (4) normalização e ponderação dos resultados, e (5) o agrupamento das pontuações de impacto (Hauschild e Huijbregts, 2015).

Os métodos MCDA/M podem ser aplicados nas atividades de normalização e ponderação dos resultados e no agrupamento das pontuações de impacto. Estas etapas são consideradas opcionais segundo a ISO. Na normalização são considerados todos os indicadores, comparando os mesmos a um sistema de referência, facilitando a noção de magnitude entre as alternativas. O agrupamento possibilita a comparação entre categorias. Posteriormente, é realizada a atribuição de pesos entre as categorias/critérios e em seguida a agregação, que possibilita a análise entre os sistemas de forma objetiva. Por fim, o valor agrupado define a classificação das alternativas, proporcionando a comparação e a tomada de decisão (Hauschild et al., 2018).

A fase de “Interpretação” visa fornecer conclusões, explicar limitações e prover recomendações. Nesta fase, todas as informações devem ser identificadas, quantificadas, checadas e avaliadas, gerando conclusões e recomendações relacionadas as decisões do produto/serviço em análise. Os indicadores que mais contribuem para os resultados obtidos devem ser ressaltados. Devem ser avaliadas também a necessidade de reavaliação de etapas dos processos, realizar análises de sensibilidade e avaliar as limitações do estudo. Caso necessário, as etapas anteriores do estudo de ciclo de vida podem ser parcialmente refeitas para atender aos objetivos estabelecidos.

## 2.3 Lacunas da literatura

Esta sessão detalha os desafios relacionados as aplicações MCDA/M e VIKOR, e os desafios do LCSA como um problema complexo que pode ser analisado por meio das ferramentas MCDA/M.

### 2.3.1 Hierarquia dos critérios

Na literatura, destacam-se dois métodos MCDA/M que aceitam critérios hierarquicamente estruturados (Pelissari et al., 2021): AHP (Saaty, 1977) e MCHP (Corrente et al., 2012). O AHP exige a definição de preferências entre todos os níveis da hierarquia na forma de comparações exaustivas em pares e fornece recomendações somente no nível abrangente. Já o MCHP requer apenas uma informação de preferência parcial na forma de comparações pareadas de algumas alternativas em alguns níveis da hierarquia. Além disso, o MCHP fornece recomendações em todos os níveis de hierarquia.

O MCHP, detalhado adiante na Seção 2.5, é o método de hierarquia utilizado nesta tese. O MCHP apresenta uma estrutura com um critério raiz (ou do “topo”) representando o objetivo principal do estudo. Este critério descende em macro-critérios, que podem ser destrinchados em outros macro-critérios ou subcritérios. O último nível de cada ramo da árvore de critérios é definido como um critério elementar, representando o nível mais baixo da hierarquia.

A integração entre MCHP e métodos multicritério tem sido realizada na literatura para possibilitar a aplicação dos procedimentos de agregação de cada modelo multicritério de forma hierárquica. O MCHP foi integrado inicialmente a Regressão Ordinal Robusta (*Robust Ordinal Regression* -ROR) (Corrente et al., 2012) possibilitando conhecer as relações de preferência necessárias e possíveis com relação a todo o conjunto de critérios e possíveis subconjuntos de critérios em diferentes níveis de hierarquia. O MCHP foi integrado também a outros métodos como os métodos da família ELECTREE (Corrente et al., 2017; Arandarenko et al., 2020) e PROMETHEE (Corrente et al., 2021).

Recentemente, foi apresentada por Pelissari et al. (2021) uma alternativa a metodologia original de elicitação dos pesos do MCHP (Corrente et al., 2012). Porém, as diferenças entre as metodologias de Corrente et al. (2012) e Pelissari et al. (2021) em diferentes métodos de agregação não foi explorada. Na Seção 2.6 são discutidas as diferenças entre as abordagens do MCHP para a definição da forma de elicitação a ser aplicada nesta tese.

Em relação ao VIKOR, um método hierárquico foi proposto por Kim e Ahn (2020), explorando a incerteza de informações. Porém, as condições de aceitação do VIKOR

foram ignoradas no estudo.

### 2.3.2 Elicitação dos pesos

A elicitação dos pesos é aplicada para definir a relação de prioridade entre os critérios analisados. A metodologia e os valores definidos nos pesos dos critérios podem afetar de forma significativa os resultados obtidos (Mylyviita et al., 2014).

A maioria dos métodos MCDA/M requer que todos os pesos sejam diferentes de zero ( $w_j \neq 0, \forall j = 1, \dots, n$ ) e seu somatório igual a 1 ( $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ ). Exigindo também a elicitação direta dos pesos. Na elicitação direta, o decisor deve fornecer valores nítidos e determinísticos para os pesos. Por exemplo, no caso de uma decisão com três critérios ( $g_1, g_2$  e  $g_3$ ), o decisor poderia estabelecer os pesos 0.15, 0.45 e 0.40 para os critérios, respectivamente.

Quando aplicada a elicitação direta dos pesos, fatores como ideologias e pontos de vista afetam os valores de preferência (Ren e Toniolo, 2018). Além disso, a tarefa de definição direta dos pesos pode não ser natural ou fácil de ser executada tornando esta etapa a parte mais complexa do processo decisório (Azapagic et al., 2016). Por estes motivos, observa-se uma tendência de abandono da elicitação direta em favor da elicitação indireta (Angilella et al., 2018).

A elicitação indireta exige menos informações e esforço cognitivo do decisor (Lolli et al., 2019). Na elicitação indireta, os dados fornecidos podem ser subjetivos. Por exemplo, no caso de uma decisão com três critérios ( $g_1, g_2$  e  $g_3$ ), pode-se definir apenas a ordem de preferência como critério  $g_3$  sendo mais importante que critério  $g_1$  e critério  $g_1$  sendo prioritário a  $g_2$ , definindo assim uma informação ordinal em relação aos critérios. Outra informação subjetiva seria a intervalar, em que o decisor poderia definir que o critério  $g_1$  pode obter valores variando no intervalo  $[0.3, 0.4]$ , definindo os valores de  $w_1^{min}$  e  $w_1^{max}$ .

No caso de dados incompletos, o decisor pode conseguir definir informações apenas referentes a alguns critérios. Por exemplo, no caso de três critérios, em que o critério  $g_1$  é mais importante que  $g_2$ , sem definir nenhuma informação referente a  $g_3$ . Há ainda a situação em que o decisor não consegue ou não deseja estabelecer nenhuma informação em relação as preferências dos critérios, considerados dados completamente faltantes ou ausentes.

A literatura em relação a elicitação indireta cita prioritariamente três correntes de pesquisa (Vetschera, 2017; Lolli et al., 2019). A primeira corrente envolve a aplicação pioneira do *UTilité Additive* (UTA) (Jacquet-Lagrange e Siskos, 1982), na qual é adotada uma abordagem de programação linear que utiliza informações de preferência indireta fornecidas pelo decisor na forma de preferência holística e relações indiferentes entre

alternativas de referência. O método UTA considera as funções de valor marginal linear em cada critério.

A segunda corrente, considera aplicações que fornecem informações mais robustas ao processo decisório. Dentro dessa abordagem, destaca-se o método ROR, que leva em conta todos os conjuntos de parâmetros compatíveis com as informações de preferências. Como resultado, são fornecidas recomendações em termos das consequências ao se aplicar cada um desses conjuntos de parâmetros.

A terceira vertente é a mais aplicada na literatura (Vetschera, 2017). Sua estrutura considera todo o conjunto de pesos possíveis e compara os volumes de diferentes subconjuntos deste conjunto para derivar de forma probabilística declarações sobre a ordenação das alternativas, fornecendo índices que baseiam a decisão. Entre esses métodos, conhecidos como métodos baseados em volume, destaca-se o SMAA (Lahdelma et al., 1998). O método SMAA explora um grande número de parâmetros compatíveis com as informações de preferência fornecidas pelo decisor. O SMAA considera as distribuições de probabilidade no espaço de todos os pesos compatíveis e avaliações de alternativas quando o decisor é capaz de fornecer informações parciais ou incompletas (Lolli et al., 2019).

O método SMAA foi definido como procedimento de elicitação indireta dos pesos a ser utilizado nesta tese e será detalhado na Seção 2.4. O SMAA foi aplicado junto ao VIKOR (Aydogan e Ozmen, 2017), porém, ignorando as condições de aceitação do método VIKOR.

### 2.3.3 *Softwares multicritério*

A aplicação de modelos MCDA/M pode ser difícil para usuários não familiarizados com a área matemática ou de programação. Por isso, *softwares* “amigáveis” ao usuário e de fácil aplicação podem fornecer suporte a tomada de decisão, diminuindo o tempo e esforço necessários.

Existem *softwares* baseados em MCDA/M, com o usuário inserindo os valores de cada alternativa em determinado critério, preenchendo a matriz de decisão. Sistemas como o PROMETHEE GAIA (Brans e Mareschal, 1994; Brans e De Smet, 2016) possuem fácil utilização e análise dos resultados, colaborando assim para a propagação e utilização do MCDA/M. A Figura 2.5 mostra a interface deste *software*.

Em relação ao VIKOR, foi encontrado uma página da web (<https://onlineoutput.com/>) que possibilita a análise intuitiva e de fácil utilização comparado a modelagens em linguagem de programação. Uma das aplicações apresenta apenas o método VIKOR com elicitação direta dos pesos dos critérios. Outra aplicação possibilita a análise de pesos incertos utilizando a escala nebulosa (*fuzzy*), considerando uma curva de probabilidade

Visual PROMETHEE Academic - unnamed (saved)

File Edit Model Control PROMETHEE-GAIA GDSS GIS Custom Assistants Snapshots Options Help

	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<b>Bertrand</b>	Price	Power	Consumption	Habitability	Comfort
Unit	k€	kW	L/100km	5-point	5-point
Cluster/Group	●	◆	●	■	■
<b>Preferences</b>					
Min/Max	min	max	min	max	max
Weight	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Preference Fn.	V-shape	Linear	V-shape	Level	Level
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
- Q: Indifference	n/a	5	n/a	1,0	0,5
- P: Preference	€ 15,000	30	2,0	2,5	2,5
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
<b>Statistics</b>					
Minimum	€ 15,000	50	7,0	1,0	1,0
Maximum	€ 38,000	110	9,0	5,0	5,0
Average	€ 28,083	83	8,2	3,2	3,0
Standard Dev.	€ 7,407	18	0,7	1,3	1,3
<b>Evaluations</b>					
<input checked="" type="checkbox"/> Tourism B	€ 25,500	85	7,0	good	average
<input checked="" type="checkbox"/> Luxury 1	€ 38,000	90	8,5	good	very good
<input checked="" type="checkbox"/> Tourism A	€ 26,000	75	8,0	average	average
<input checked="" type="checkbox"/> Luxury 2	€ 35,000	85	9,0	very good	good

All Bertrand

Actions: 6 (6 active) Criteria: 5 (5 active) Scenarios: 1 (1 active) Locale: Belgium [€/.] Saved

Figura 2.5: Interface do *software* PROMETHEE VISUAL

triangular. Não são apresentadas estruturas hierárquicas e mesmo com a escala nebulosa, o sistema exige a definição de informações sobre os pesos dos critérios. Além disso, não há suporte de ferramentas gráficas no sistema.

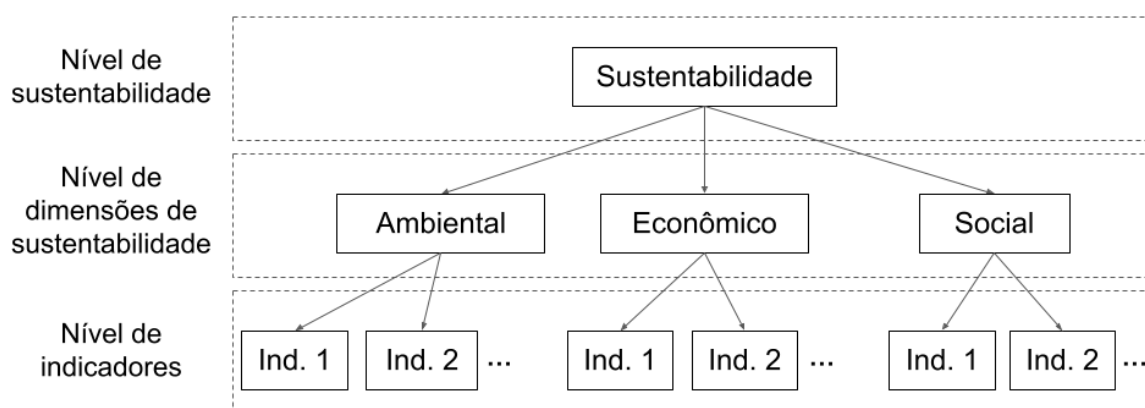
Existe um *software* proposto por Tervonen (2012) para a aplicação dos métodos SMAA-2, SMAA-O e SMAA-TRI. Esta proposta possui código aberto para que seja replicada em outros estudos e com outros métodos MCDA/M. Nesta tese, identificou-se uma extensão desta proposta em Durmaz e Temel Gencer (2020). Estas aplicações não possuem hierarquia e não foram aplicadas ao método VIKOR.

### 2.3.4 Desafios do LCSA

Os métodos multicritério são muito utilizados junto ao LCSA devido a sua eficiência em comparar alternativas e tirar conclusões (Bockstaller et al., 2008). O uso integrado das ferramentas de LCSA e MCDA/M tem crescido para tratar incertezas, padronizar os dados e proporcionar confiabilidade na comparação dos resultados (Martins et al.,

2018; França et al., 2021).

Os problemas de LCSA podem ser classificados de duas formas. A primeira, considera uma avaliação para cada uma das dimensões de sustentabilidade separadamente. A segunda, considera apenas uma única avaliação para a sustentabilidade (Zheng et al., 2019). Realizar as duas análises com a consideração tanto da sustentabilidade, quanto das dimensões de sustentabilidade torna possível uma avaliação completa do ciclo de vida, apresentando assim uma estrutura hierárquica de três níveis (sustentabilidade, dimensões de sustentabilidade e indicadores) conforme Figura 2.6.



**Figura 2.6:** Hierarquia de critérios no LCSA

Cada dimensão pode ter números diferentes de indicadores, variando a quantidade de indicadores entre as dimensões e entre estudos diferentes. Assim, cada estudo possui uma configuração de árvore de critérios específica, que pode influenciar nos métodos de hierarquização e elicitação aplicados.

Em relação a hierarquia no LCSA alguns estudos realizam a aplicação da agregação com algum procedimento de MCDA/M entre o nível de indicadores e as dimensões de sustentabilidade e, posteriormente, com os valores obtidos para as dimensões aplicam novamente a agregação com o mesmo método, aplicando assim o MCDA/M em toda a hierarquia (Atilgan e Azapagic, 2016; Aberilla et al., 2020). Porém, os procedimentos de hierarquização do MCDA/M não são explicitados ou explorados, sendo considerada apenas a aplicação do método duas vezes.

No LCSA, a definição dos pesos dos critérios se mostra um problema tanto a nível de indicadores, quanto entre as dimensões de sustentabilidade (Finkbeiner et al., 2010) e parte dos estudos não tornam explícitos os processos de elicitação (Soulé et al., 2021).

A maioria das aplicações utiliza a elicitação direta dos pesos dos critérios, considerando a definição de pesos por partes interessadas (Visentin et al., 2020), ou pesos iguais para todos os critérios (Chen e Holden, 2018). Há estudos ainda que utilizam o AHP (Ren et al., 2015) para a definição dos pesos.

A definição dos pesos do LCSA se mostra subjetiva e sujeita a incertezas como em outros problemas de tomada de decisão (Onat et al., 2016). Por isso, torna-se necessária a aplicação de métodos robustos e a discussão em relação aos procedimentos de elicitação no LCSA (Kalbar et al., 2017; Chen e Holden, 2018). O método SMAA de elicitação indireta de pesos tem sido aplicado junto ao LCA, mas não engloba as três dimensões de sustentabilidade (Prado-Lopez et al., 2014; Dias et al., 2016; De Luca et al., 2017).

Os resultados apresentados pelo LCSA podem ser difíceis de interpretar (Finkbeiner et al., 2010) devido ao volume de dados, complexidade das análises e necessidade de conhecimentos específicos na área. Por isso, *softwares* de agregação podem auxiliar o decisor na interpretação dos resultados. Além disso, o uso de gráficos em LCSA, possibilitado pelos *softwares*, facilita a visualização de *trade-offs* entre as áreas de sustentabilidade (França et al., 2021).

O *software* mais conhecido em LCSA é o *Life Cycle Sustainability Dashboard*, apresentado por Traverso et al. (2012). Neste sistema, os dados são inseridos e agregados tanto em nível das dimensões de sustentabilidade quanto em um índice final de sustentabilidade, apresentando gráficos para a classificação de cada alternativa, conforme Figura 2.7. Os gráficos sinalizam a classificação da alternativa com uma seta entre as cores vermelha, amarela e verde. Apesar da agregação de resultados e das ferramentas de visualização, o *Life Cycle Sustainability Dashboard* apresenta procedimentos simplificados que não são baseados em métodos multicritério e o peso dos critérios é definido por elicitação direta.

### 2.3.5 Aplicações de LCSA e VIKOR

Os métodos MCDA/M baseados em distância, como o VIKOR, têm sido cada vez mais aplicados junto ao LCSA (Navarro et al., 2020). Os estudos de Ren et al. (2015), Zheng et al. (2019), Aberilla et al. (2020), Florindo et al. (2020) e Yang e Guo (2021), detalhados a seguir, aplicam o método VIKOR para o LCSA.

Ren et al. (2015) aplica o VIKOR para avaliar a produção de bioetanol. Neste estudo, o AHP é aplicado para determinar os pesos dos critérios e o VIKOR é utilizado para a agregação e definição da ordenação. A lógica *fuzzy* também é utilizada para tratamento dos dados. É definida apenas uma classificação em relação a sustentabilidade, sem avaliar as dimensões em separado. São aplicadas análises de sensibilidade com pe-



**Figura 2.7:** Gráficos de classificação de alternativas do software *Life Cycle Sustainability Dashboard*  
 Fonte: Finkbeiner et al. (2010)

so diferentes. Além do cenário definido pelo AHP, é analisado um cenário com pesos iguais e outros alternando sempre com um critério dominante e os demais com pesos iguais, fazendo este formato para todos os critérios. Foram considerados 8 critérios no total.

Zheng et al. (2019) aplica o VIKOR junto ao AHP para a avaliação do ciclo de vida de alternativas de manutenção de pavimentos. O método AHP é aplicado para a definição dos pesos dos critérios, com a participação de especialistas. Já o VIKOR, é aplicado para a definição de um valor unificado para cada alternativa, utilizando os pesos definidos pelo AHP. Foram utilizados 9 indicadores sociais que foram unificados em um único valor por meio do AHP e somatório de valores. Posteriormente, foram utilizados na etapa de agregação do VIKOR 6 indicadores ambientais, 1 econômico e o indicador unificado social.

Aberilla et al. (2020), aplica o VIKOR para a análise do ciclo de vida de fornecimento de eletricidade e calor para aquecimento e água. Foram utilizados 34 indicadores entre as três dimensões de sustentabilidade, considerando pesos iguais e, posteriormente, pesos variáveis de acordo com cada área do indicador. O método VIKOR foi aplicado em duas etapas. A primeira etapa consiste na avaliação da classificação em

cada dimensão de sustentabilidade em separado, analisando os valores de cada alternativa em relação aos indicadores. Em uma segunda etapa, os valores obtidos na avaliação de cada dimensão foram utilizados para a avaliação da classificação sustentável final. Desta forma, foi aplicada a estrutura hierárquica, porém, sem um método estruturado.

O estudo de Florindo et al. (2020) foi selecionado como um dos estudos de caso para aplicação do *software* proposto nesta tese. Este estudo aplica o VIKOR integrado a ponderação probabilística dos pesos dos critérios para avaliar a sustentabilidade do ciclo de vida de quatro diferentes alternativas de produção animal na região sul do estado de Mato Grosso do Sul. Foram mensurados 14 indicadores e o VIKOR é utilizado para agregar os valores em um índice de sustentabilidade. O peso de cada categoria pode variar entre 1% e 50%, totalizando 1248 cenários. Mais detalhes referentes ao estudo serão apresentados na Seção 5.

Yang e Guo (2021) aplicam o VIKOR junto aos métodos AHP e CRITIC para analisar a eficiência do uso de água de uma mina de carvão com base no ciclo de vida. O modelo proposto considera a influência de cinco aspectos (incluindo recursos, economia, tecnologia, sociedade e meio ambiente) e 19 indicadores. O método da teoria dos jogos foi adotado para calcular os pesos dos 19 indicadores de acordo com o método AHP e o método CRITIC, aplicando o CW-VIKOR. Foi estabelecida apenas uma ordenação geral entre as alternativas, sem ordenação entre as dimensões de sustentabilidade. A análise do ciclo de vida compara a operação da mina em diferentes anos como as alternativas do multicritério.

Até onde a literatura disponível indica, não foram observadas aplicações com o VIKOR e LCSA utilizando o SMAA, MCHP ou algum *software*.

## 2.4 SMAA

O método SMAA foi desenvolvido para problemas de decisão de critérios múltiplos discretos quando os pesos dos critérios e o desempenho das alternativas não estão disponíveis ou não são explícitos. Muitas variantes do SMAA original foram desenvolvidas, formando uma família de métodos SMAA que podem lidar com pesos de critérios incompletos, ausentes e medidas alternativas. O SMAA exige sobre as variáveis apenas a definição de sua função de probabilidade.

O método SMAA pode variar aleatoriamente o peso e o desempenho das alternativas não definidas, respeitando as restrições estabelecidas pelo decisor. O algoritmo deve ser executado pelo menos 10,000 (dez mil) vezes para minimizar o erro e garantir uma validação estatística (Tervonen e Lahdelma, 2007). Através da simulação de Monte-Carlo, o SMAA determina todas as classificações possíveis para cada uma das al-

ternativas e quantifica os possíveis resultados em termos de probabilidades. Com estas informações, é fornecido um conjunto de diferentes índices probabilísticos ou medidas descritivas, dependendo do método SMAA utilizado e da configuração do problema. Essas medidas descritivas suportam o decisor com as chances de ocorrência de cada configuração da solução. As informações podem ser referentes à posição da alternativa, peso central, probabilidade de uma alternativa ser preferida a outra alternativa, entre outras. Outra vantagem do SMAA é a flexibilidade e estrutura extensível, contribuindo para a popularidade do método, uma vez que diferentes MCDA/M podem ser usados em combinação com ele. Por isso, optou-se por utilizar este método nesta tese.

Seja  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$  um conjunto de alternativas avaliadas de acordo com  $n$  critérios independentes  $G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$  e pesos  $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ . A estrutura de preferência do decisor pode ser representada por uma função de utilidade real  $u(a_i, \vec{w})$  representada por

$$u_i = u(a_i, \vec{w}) = \sum_{j=1}^n w_j g_j(a_i) \quad (2.6)$$

onde  $\vec{w}$  é um vetor de peso não negativo e normalizado definido no espaço de peso viável  $W$

$$W = \{\vec{w} \in \mathbb{R}^n : \vec{w} > 0 \text{ e } \sum_{j=1}^n w_j = 1\}. \quad (2.7)$$

Para o peso, o SMAA considera variáveis aleatórias com função densidade  $f_w(w)$  no conjunto de pesos factíveis  $W$ . Se o SMAA for utilizado para o desempenho das alternativas, os dados incertos ou imprecisos são representados por variáveis aleatórias, considerando as avaliações de  $g_j(a_i)$ .

Enquanto o SMAA original define a(s) alternativa(s) mais aceitável(is), uma extensão chamada SMAA-2 (Lahdelma e Salminen, 2001), fornece medidas descritivas com probabilidades de uma alternativa obter uma determinada classificação. Outra extensão do SMAA-2, definida como SMAA-0 (Lahdelma et al., 2003), considera problemas com critérios mistos ordinais e cardinais. Diversas variantes do SMAA abordam diferentes tipos de problemas e diferentes medidas descritivas. O SMAA-2 calcula três medidas descritivas diferentes: índice de aceitabilidade de classificação (em inglês *Rank acceptability index* - RAI), vetor central de pesos (em inglês *Central weight vector* - CWV) e fator de confiança (em inglês *Confidence factor* - CF).

O RAI fornece a probabilidade de uma alternativa atingir a posição  $k_{th}$  na orde-

nação ou *rank*. Esta medida varia entre 0 e 1, e quanto mais próximo de 1, maior a probabilidade de determinada alternativa atingir esta posição. O CWV é definido como o centro de gravidade esperado do  $w_j$  de todos os cenários em simulação em que a alternativa atingiu a primeira posição. O CWV possibilita que o decisor verifique qual configuração de pesos permite que aquela alternativa tenha maior probabilidade de ser a preferida. Com isso, o decisor pode definir depois da análise do CWV quais serão os pesos utilizados para a decisão do problema. O CF corresponde à probabilidade de uma alternativa ser a preferida com as preferências expressas pelo seu CWV, variando apenas o desempenho das alternativas. Esta medida é aplicada apenas quando o desempenho das alternativas também são incertos.

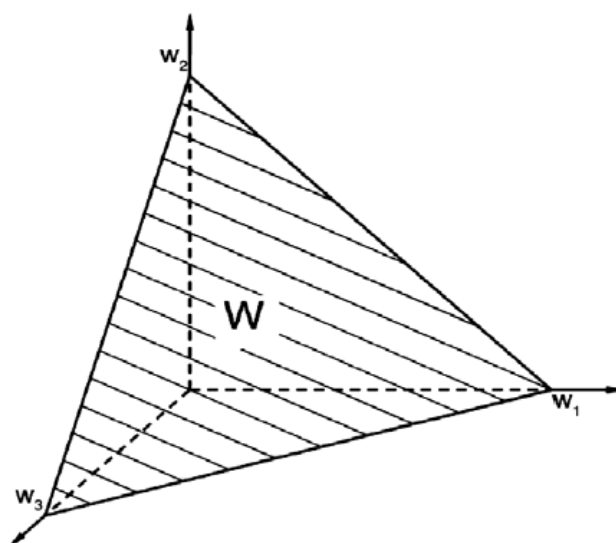
Existem variantes do SMAA integradas a métodos MCDA/M baseados em distância, permitindo que os métodos multicritério lidem com dados imprecisos e incertos. O SMAA VIKOR proposto por Aydogan e Ozmen (2017) considera dados incertos sobre preferência de critérios e desempenho das alternativas usando as medidas descritivas do SMAA-2. Considerando o método TOPSIS, existem variantes com as mesmas medidas descritivas do SMAA-2 (Okul et al., 2014), e outros estudos propondo novas medidas, como índice de risco de erros de tomada de decisão (Zhu et al., 2017), índices de aceitabilidade e associação de kernel (Govindan et al., 2019).

### 2.4.1 Elicitação de pesos do SMAA

O método SMAA é utilizado para a elicitação dos pesos dos critérios seguindo as regras definidas na aplicação dos métodos MCDA/M. De acordo com estas regras, todos os pesos devem ser diferentes de zero ( $w_j \neq 0, \forall j = 1, \dots, n$ ) e seu somatório igual a 1 ( $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ ). O espaço possível para a definição dos pesos em um problema de três critérios,  $w_1, w_2$  e  $w_3$ , seria representado pela Figura 2.8 com vértices em  $(1,0,0)$ ,  $(0,1,0)$  e  $(0,0,1)$ .

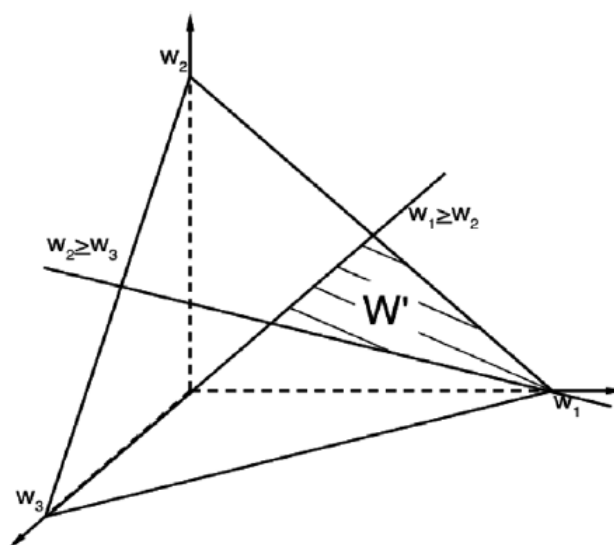
Considerando a presença de informações incertas sobre os pesos, o SMAA varia aleatoriamente os valores dentro do espaço de soluções possíveis. Estas informações podem ser ordinais, intervalares ou completamente ausentes. No caso de informações completamente ausentes, o método considera distribuições uniformes entre zero e um para variar os pesos considerando todo o espaço viável (Figura 2.8), sem a definição de restrições pelo decisor. Assim, o SMAA considera todos os pesos igualmente possíveis estatisticamente.

No caso de informações ordinais, tem-se como informação ordem ou ordens de prioridades entre os critérios, representada por restrições lineares. Por exemplo, para o caso dos três critérios considera-se a seguinte ordenação:  $w_1 \geq w_2$  e  $w_2 \geq w_3$ . Estas restrições limitam o espaço viável para a variação dos pesos conforme Figura 2.9. Desta



**Figura 2.8:** Espaço viável de pesos  
Fonte: Tervonen e Lahdelma (2007)

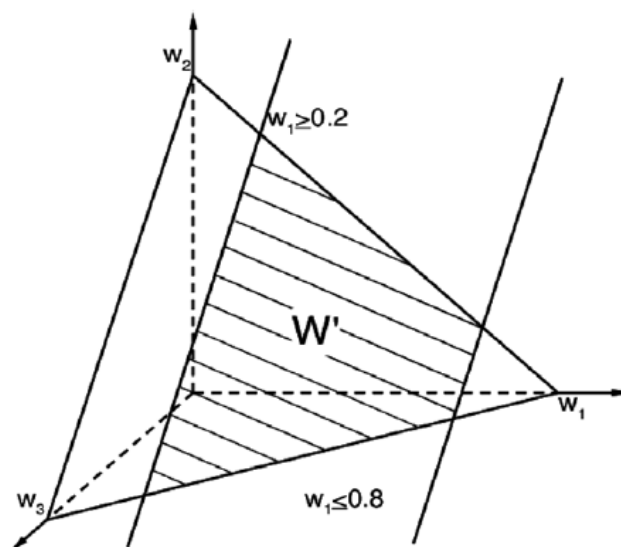
forma, o método SMAA varia aleatoriamente os valores dos três pesos dentro do espaço viável definido pelas restrições de ordenação de pesos imposta (Tervonen e Lahdelma, 2007).



**Figura 2.9:** Espaço viável de pesos limitado por restrições ordinais  
Fonte: Tervonen e Lahdelma (2007)

Por fim, no caso de informações intervalares os dados também são representados por restrições lineares. Considere o exemplo:  $0.2 \leq w_1 \leq 0.8$ . Desta forma, o decisor limita o espaço possível em relação a variável peso  $w_1$  (Figura 2.10) e o SMAA define variáveis aleatórias respeitando esta limitação.

Para a definição dos pesos o SMAA utiliza a simulação de Monte Carlo. Com



**Figura 2.10:** Espaço viável para pesos limitado por restrições intervalares  
 Fonte: Tervonen e Lahdelma (2007)

dados completamente ausentes os seguintes passos são seguidos conforme a proposta de Tervonen e Lahdelma (2007): gerar  $n - 1$  pesos aleatórios no intervalo  $[0, 1]$ , ordenar de forma crescente estes pesos  $(q_1, \dots, q_{n-1})$ , adicionar zero como o primeiro valor desta lista e um como o último valor desta lista. Os pesos são então definidos como a diferença entre dois valores consecutivos  $w_j = q_j - q_{j-1}$ .

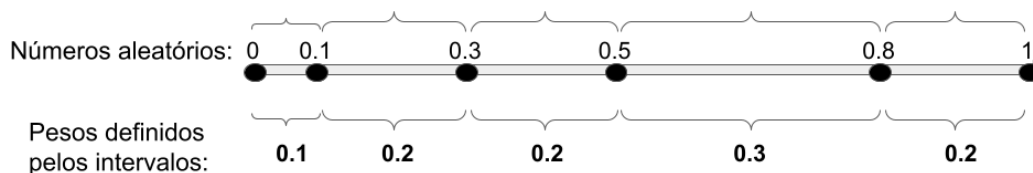
Por exemplo, em um problema de decisão com 5 ( $n = 5$ ) critérios. São gerados aleatoriamente em uma primeira iteração do SMAA quatro valores ( $n - 1$ ) entre zero e um: 0.8, 0.3, 0.5, 0.1. Os valores zero e um são então adicionados a esta lista já em ordem crescente. Tem-se então os valores representados na Figura 2.11. A diferença entre estes valores são os pesos desta iteração da simulação de Monte Carlo do SMAA, com soma igual a um e valores sempre diferentes de zero. No caso, o conjunto de pesos desta iteração será: 0.1, 0.2, 0.2, 0.3, 0.2.

Caso os dados sejam ordinais ou intervalares, o algoritmo do SMAA atribui os valores gerados aos pesos de acordo com as restrições definidas. Se estas não forem atendidas pelos valores gerados, outra iteração é realizada.

## 2.4.2 Medidas descritivas do SMAA

As medidas descritivas do SMAA podem variar de acordo com o problema e com a variante do método sendo aplicada. A simulação de Monte Carlo possibilita que sejam mensuradas as medidas descritivas com um esforço computacional relativamente baixo e com uma precisão aceitável (Tervonen e Lahdelma, 2007).

Para mensurar as medidas descritivas a cada iteração do modelo multicritério os



**Figura 2.11:** Procedimento de definição dos pesos aleatórios do SMAA

dados de entrada definidos como aleatórios usando o SMAA (desempenho da alternativas e/ou pesos dos critérios) são obtidos pelas distribuições de probabilidades correspondentes. Por exemplo, no caso de pesos completamente ausentes serão utilizadas distribuições uniformes para gerar valores a cada iteração. Posteriormente, uma ordenação ou classificação é definida entre as alternativas para aquela iteração utilizando o método MCDA/M com os valores gerados. Por fim, um contador armazena (ou conta) a posição em que cada alternativa ficou classificada, adicionando o valor 1 a aquela posição.

Por exemplo, um problema de ordenação com 5 alternativas  $a_1, a_2, a_3, a_4$  e  $a_5$  e o vetor de contadores da alternativa  $a_1$  representado por  $c_{a_1} = \{c_{a_1}^1, c_{a_1}^2, c_{a_1}^3, c_{a_1}^4, c_{a_1}^5\}$ . Em uma primeira iteração do modelo são gerados os dados do SMAA e a ordenação entre as alternativas apresenta por exemplo a ordem  $a_4, a_3, a_1, a_5$  e  $a_2$ . Desta forma, o contador irá armazenar o valor  $c_{a_1} = (0, 0, 1, 0, 0)$  para a alternativa  $a_1$ . Para a alternativa  $a_2$  seria armazenado o valor  $c_{a_2} = (0, 0, 0, 0, 1)$ . Para a alternativa  $a_3$  seria armazenado o valor  $c_{a_3} = (0, 1, 0, 0, 0)$ . Para a alternativa  $a_4$  seria armazenado o valor  $c_{a_4} = (1, 0, 0, 0, 0)$ . Para a alternativa  $a_5$  seria armazenado o valor  $c_{a_5} = (0, 0, 0, 1, 0)$ .

Em uma segunda iteração, considera-se como resultado a classificação  $a_4, a_2, a_3, a_5$  e  $a_1$ . Os contadores ficariam então:  $c_{a_1} = (0, 0, 1, 0, 1)$  para a alternativa  $a_1$ ,  $c_{a_2} = (0, 1, 0, 0, 1)$  para a alternativa  $a_2$ ,  $c_{a_3} = (0, 1, 1, 0, 0)$  para a alternativa  $a_3$ ,  $c_{a_4} = (2, 0, 0, 0, 0)$  para a alternativa  $a_4$ , e  $c_{a_5} = (0, 0, 0, 2, 0)$  para a alternativa  $a_5$ . Desta forma, as alternativas  $a_4$  e  $a_5$  permaneceram na mesma posição em relação a classificação do MCDA/M, somando dois pontos na mesma posição do vetor.

O RAI é definido pelo número de vezes em que a alternativa  $a_i$  ocupa a  $k_{th}$  posição na ordenação, dividido pelo número de iterações. Assim, após 10,000 iterações poderíamos apresentar o resultado  $c_{a_4} = (9570, 430, 0, 0, 0)$  com um RAI de 95.7% para a

alternativa  $a_4$ . O que significa que em 95.7% das iterações randômicas a alternativa  $a_4$  foi classificada na primeira posição, sendo esta, a alternativa com maior probabilidade de obter o primeiro lugar na ordenação do modelo multicritério.

Além do RAI, o SMAA-2 sugere as medidas CWV e o CF. O CWV pode ser calculado por um contador que armazena os pesos de todos os critérios para uma determinada alternativa  $a_i$  em todas as iterações em que esta obtiver a primeira posição na ordenação. O vetor central de pesos é então definido pelo somatório dos pesos de cada critério nas iterações em que a alternativa  $a_i$  ficou em primeiro, dividido pelo número de iterações em que esta foi classificada em primeiro lugar, definido por um outro contador.

Já o CF é analisado apenas quando a aleatoriedade é aplicada ao desempenho das alternativas e aos pesos. Desta forma, fixa-se o peso seguindo os valores definidos pelo CWV (que fizeram a alternativa  $a_i$  ficar em primeiro lugar) e alteram-se os valores de desempenho. Com isso, verifica-se a probabilidade desta alternativa obter a primeira posição com um procedimento de contagem similar ao do RAI.

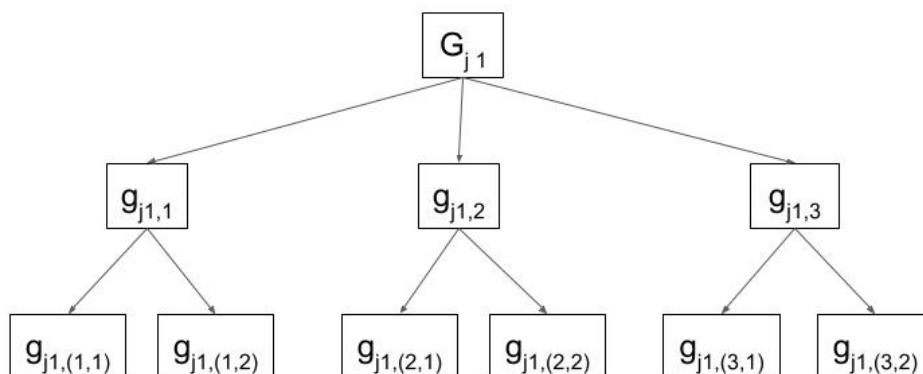
## 2.5 MCHP

O MCHP (Corrente et al., 2012) considera a estrutura de critérios hierárquicos em problemas de tomada de decisão. Com a estrutura MCHP, é possível considerar as relações de preferência em cada nó da árvore de critérios. No nível 1 superior encontram-se os critérios raiz dos quais descendem macro-critérios até o critério elementar no último nível, com subcritérios (Corrente et al., 2021). Essa estrutura pode facilitar a compreensão do problema e a coleta de dados, pois o nível elementar de hierarquia pode representar um indicador mais disponível e viável. Assim, cada critério raiz possui sua árvore de critérios seguindo o formato de dependência dos critérios relacionado ao problema em questão. A Figura 2.12 apresenta um exemplo de árvore de critérios simétrica para o critério raiz  $G_{j1}$ , em que cada ramo apresenta o mesmo número de subcritérios e mesmo número de níveis.

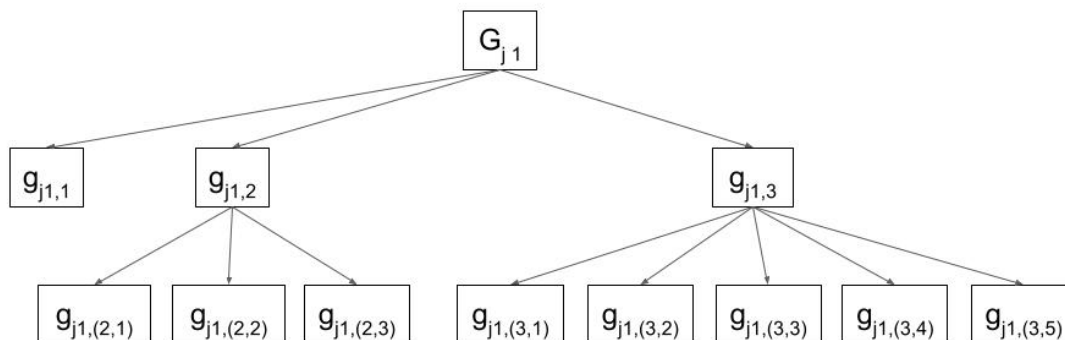
A Figura 2.13 apresenta uma estrutura assimétrica de árvore de critérios para o critério raiz  $G_{j1}$ . Os ramos apresentam número de níveis diferentes, de acordo com a necessidade de detalhamento em subcritérios e com número de critérios elementares diferentes nos ramos de mesmo nível.

No MCHP, a seguinte notação é usada:

- $\mathcal{G}$  é o conjunto de todos os critérios em todos os níveis;
- $\mathcal{W}$  é o conjunto de todos os pesos em todos os níveis;



**Figura 2.12:** Estrutura hierárquica de árvore de critérios simétrica



**Figura 2.13:** Estrutura hierárquica de árvore de critérios assimétrica

- $l$  é o número de níveis na hierarquia de critérios;
- $\mathcal{I}_g$  é o conjunto de todos os índices de todos os critérios na hierarquia;
- $f$  é o número de critérios do primeiro nível;

- $G_{\mathbf{r}}$ , com  $\mathbf{r} = (j_1, \dots, j_h) \in \mathcal{I}_{\mathcal{G}}$ , denota um subcritério do critério de primeiro nível  $G_j$  no nível  $h$ ; os critérios de primeiro nível são indicados por  $G_{j_1}, j_1 = 1, \dots, f$ ;
- $n(\mathbf{r})$  é o número de subcritérios de  $G_{\mathbf{r}}$  no nível subsequente, ou seja, os subcritérios diretos de  $G_{\mathbf{r}}$  são  $G_{(\mathbf{r},1)}, \dots, G_{(\mathbf{r},n(\mathbf{r}))}$ ;
- $g_{\mathbf{t}} : A \rightarrow \mathbb{R}$ , com  $\mathbf{t} = (j_1, \dots, j_l) \in \mathcal{I}_{\mathcal{G}}$ , denota um critério elementar do critério de primeiro nível  $G_{j_1}$ , ou seja, um critério de nível  $l$  da árvore hierárquica de  $G_{j_1}$ ;
- $EL$  é o conjunto de índices de todos os subcritérios elementares:

$$EL = \mathbf{t} = (j_1, \dots, j_l) \in \mathcal{I}_{\mathcal{G}} \text{ em que } \begin{cases} j_1 = 1, \dots, f \\ j_2 = 1, \dots, n(j_1) \\ \dots \\ j_l = 1, \dots, n(j_1, \dots, j_{l-1}); \end{cases} \quad (2.8)$$

- $G_E \subset \mathcal{G}$  is o conjunto de todos os critérios elementares em  $G$ , e  $E_G \subset \mathcal{I}_{\mathcal{G}}$  é o conjunto de índices dos critérios elementares;
- $E(G_{\mathbf{r}})$  é o conjunto de índices de subcritérios elementares descendentes de  $G_{\mathbf{r}}$ :

$$E(G_{\mathbf{r}}) = \{(\mathbf{r}, j_{h+1}, \dots, j_l)\} \in \mathcal{I}_{\mathcal{G}} \text{ em que } \begin{cases} j_{h+1} = 1, \dots, n(\mathbf{r}) \\ \dots \\ j_l = 1, \dots, n(\mathbf{r}, j_{h+1}, \dots, j_{l-1}). \end{cases} \quad (2.9)$$

Então,  $E(G_{\mathbf{r}}) \subset EL$ .

O método MCHP foi integrado a diversos métodos MCDA/M como PROMETHEE e ELECTREE (Corrente et al., 2013), ELECTREE-Tri (Corrente et al., 2016) e TOPSIS (Corrente e Tasiou, 2023). O MCHP foi também integrado a outras metodologias como Choquet Integral para considerar a interação entre critérios (Angilella et al., 2013), SMAA (Corrente et al., 2017; Angilella et al., 2018) e o SRF (Corrente et al., 2017; Abastante et al., 2020) para dados imprecisos. Enquanto estes estudos realizam a integração do método original do MCHP, outra versão do MCHP foi proposta por Pelissari et al. (2021). Desta forma, encontram-se disponíveis na literatura duas versões do método MCHP, com diferentes demandas de elicitação de pesos na hierarquia dos critérios.

## 2.6 Discussão do método de elicitação do MCHP

Esta seção tem como objetivo apresentar as duas abordagens MCHP, a original apresentada por Corrente et al. (2012) e a proposta de Pelissari et al. (2021), e discutir as diferenças entre elas visando contribuir com a literatura e justificar a seleção da abordagem utilizada no modelo deste trabalho. Inicialmente, apresenta-se suas diferenças teóricas. Posteriormente, são discutidas suas diferenças práticas e é realizado um experimento numérico considerando sua integração ao SMAA.

As duas abordagens do MCHP apresentam estruturas diferentes para elicitação do peso dos critérios. A primeira estrutura, originalmente definida com o MCHP (Corrente et al., 2012) e chamada aqui de abordagem peso-produto, exige a elicitação de pesos apenas no nível elementar, e os pesos dos critérios dos demais níveis são deduzidos usando as seguintes equações:

$$W = \begin{cases} \sum_{j_1=1}^f w_{j_1} = 1, \\ w_{\mathbf{r}} = \sum_{s=1}^{n(\mathbf{r})} w_{(r,s)}, \quad \forall s \in E(G_{\mathbf{r}}). \end{cases}$$

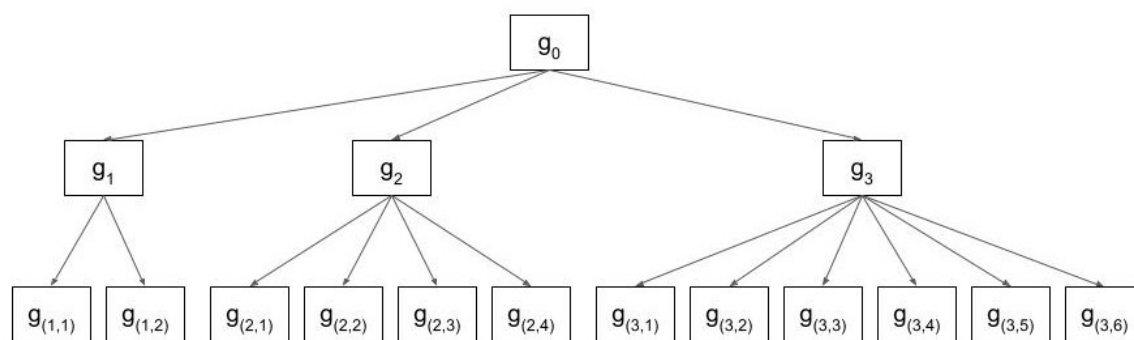
A abordagem alternativa de elicitação de peso para o MCHP proposta em Pelissari et al. (2021) é chamada aqui de abordagem peso-soma. Essa estrutura exige a elicitação de pesos em todos os níveis da árvore de critérios, sem dependência direta e necessária entre os níveis da hierarquia. O método peso-soma relaciona os critérios em diferentes níveis da seguinte forma:

$$W = \begin{cases} \sum_{j_1=1}^f w_{j_1} = 1, \\ \sum_{s=1}^{n(\mathbf{r})} w_{(r,s)} = 1, \quad \forall s \in E(G_{\mathbf{r}}). \end{cases}$$

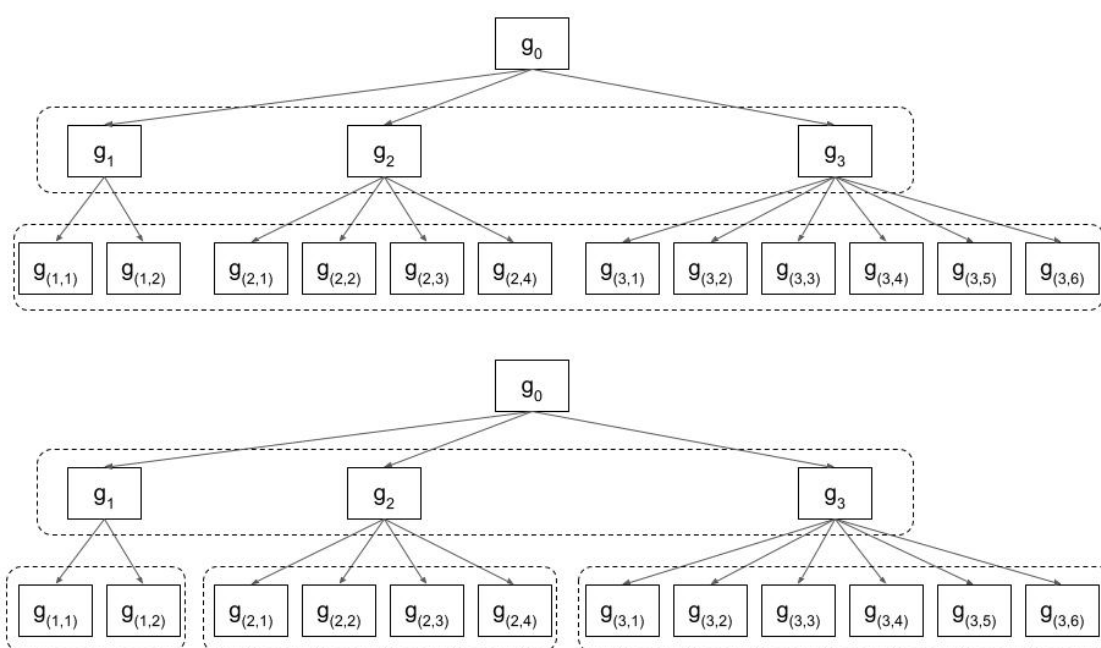
Para apresentar as diferenças em relação ao procedimento de agregação e geração de peso SMAA, considera-se uma árvore de critérios hierárquicos (Fig. 2.14) com três macro-critérios ( $g_1, g_2$  e  $g_3$ ), cada um com números diferentes de subcritérios descendentes.

A Figura 2.15 representa o procedimento de elicitação e agregação considerando a árvore de critérios da Figura 2.14 para os dois métodos comparados. Na Figura 2.15, destacam-se circulados em pontilhado os critérios que são comparados diretamente em cada método e cujos pesos somam um.

Conforme ilustrado na Figura 2.15, para todos os níveis, o método peso-produto



**Figura 2.14:** Árvore hierárquica de critérios



**Figura 2.15:** Estrutura de comparação hierárquica para a elicitação de dois pesos. A primeira estrutura representa a elicitação original do MCHP Corrente et al. (2012) (peso-produto). A segunda estrutura representa a proposta de Pelissari et al. (2021) (peso-soma)

compara todos os critérios no mesmo nível no mesmo procedimento de agregação. O método peso-produto também considera que a soma dos pesos de todos os critérios em cada nível somam um, independentemente do nível. Para o método de elicitação de peso-soma, apenas os critérios descendentes de um mesmo nó são comparados no procedimento de agregação, e a soma dos pesos desses critérios descendentes do mesmo nó é igual a um.

O método SMAA aplica um procedimento aleatório para cada grupo de critérios a serem agregados. Portanto, para a abordagem peso-produto, o SMAA gera os pesos para todos os critérios do nível elementar, e o nível superior considera seu peso como a soma dos subcritérios de cada macro-critério. Para o peso-soma, o SMAA segue a

lógica de agregação e, para cada grupo de subcritérios, gera um grupo aleatório de pesos.

Considerando essas três diferenças (elicitação de peso, agregação e procedimentos SMAA), os seguintes pontos sobre as abordagens MCHP podem ser destacados. A principal vantagem da aplicação do MCHP original está relacionada ao fato de exigir a elicitação de pesos apenas para os critérios elementares, o que reduz o esforço cognitivo solicitado ao decisor. Porém, na aplicação simultânea ao SMAA, o esforço cognitivo diminui e, portanto, as abordagens são compatíveis nesse sentido.

Por outro lado, a independência entre pesos de critérios em diferentes níveis no peso-soma pode ser vista como sua principal vantagem. Essa abordagem permite a possibilidade de diferentes decisores definirem pesos em diferentes níveis, de acordo com sua especialização. Por exemplo, a elicitação de nível elementar pode ser feita por um grupo técnico de colaboradores, e a elicitação de peso de macro-critérios pode ser feita por um grupo gerencial com visão mais estratégica.

Além de não comparar subcritérios descendentes de macro-critérios diferentes, como faz o peso-produto, a abordagem peso-soma permite definir relações entre todos os critérios, definidos como restrições matemáticas ordinais ou proporcionais. Por exemplo, usando a estrutura hierárquica apresentada anteriormente nesta seção (Fig. 2.14), para todos os métodos a restrição  $g_{(1,1)} > g_{(3,1)}$  entre os subcritérios ou  $g_{(1)} > g_{(2,2)}$  entre critérios de diferentes níveis podem ser aplicadas. Portanto, ambos os métodos permitem a proporcionalidade entre todos os níveis e todos os critérios.

Outra característica a ser analisada diz respeito ao suporte que cada método oferece para a decisão final. Na abordagem peso-soma, apenas os critérios descendentes do mesmo nó são comparados. Portanto, é possível definir uma ordenação (*rank*) para cada macro-critério. Por exemplo, considerando a sustentabilidade como critério raiz e as dimensões ambiental, social e econômica como macro-critérios, é possível definir quatro ordenações (sustentabilidade, econômico, ambiental e social), reduzindo o esforço de modelagem, definindo no mesmo modelo as ordenações (*rankings*) do critério raiz e dos macro-critérios.

Portanto, este método fornece uma ordenação principal e outras ordenações de macro-critérios com mais informações para o processo de tomada de decisão. Essa classificação não é possível quando se trata da aplicação da abordagem peso-produto, pois compara todos os critérios no mesmo nível. Dessa forma, as ordenações dos macro-critérios não são definidas no mesmo processo de modelagem, definindo-se apenas a ordenação do critério-raiz. Caso seja necessária uma classificação de macro-critérios para a tomada de decisão, outro modelo deve ser definido considerando os macro-critérios como critério-raiz neste outro modelo.

Seguindo a discussão da comparação entre as abordagens é apresentado a seguir um

experimento numérico que considera a estrutura hierárquica apresentada na Figura 2.14, considerando três macro-critérios ( $g_1, g_2$  e  $g_3$ ), cada um com respectivamente dois, quatro e seis subcritérios. O objetivo deste experimento é analisar a influência do procedimento de elicitação do MCHP na geração aleatória de pesos ao aplicar a metodologia SMAA. Para isso, são aplicados os procedimentos do SMAA para gerar os pesos seguindo a estrutura hierárquica (Fig. 2.14). Portanto, não foram estabelecidas alternativas ou procedimento de agregação para o experimento, pois a intenção é apenas analisar a geração de pesos aleatórios pelo SMAA.

A média dos pesos foi definida pela média de todos os pesos gerados pelas 10,000 iterações. Como resultados do experimento, comparam-se a média dos pesos gerados pelo SMAA apenas no nível de macro-critérios, pois para este nível ambos os métodos consideram a soma dos pesos dos macro-critérios como um. O peso médio dos subcritérios não é discutido, pois a estrutura para o nível elementar entre as abordagens apresenta diferentes configurações de comparação e apenas no nível macro a comparação envolve os mesmos critérios para os dois procedimentos de elicitação.

Para o experimento, considerou-se dois tipos de informações de peso imprecisas: dados completamente ausentes e dados ordinais. Esses tipos de informações de peso são aplicados para cada método MCHP, resultando em quatro experimentos: informações ausentes para o método peso-produto, informações ausentes para o método peso-soma, informações ordinais para o método peso-produto e informações ordinais para o método peso-soma.

Para dados ausentes, nenhum parâmetro de peso é definido para qualquer nível. Para os dados ordinais considera-se que  $w_1 > w_2 > w_3$ . Para este caso ordinal, duas estruturas de equações diferentes foram aplicadas para cada método de elicitação. Para a abordagem peso-produto, conforme apresentado anteriormente, a estrutura de peso é definida apenas no nível elementar. Portanto, a prioridade de nível macro ( $w_1 > w_2 > w_3$ ) deve ser representada no modelo SMAA como  $w_{(1,1)} + w_{(1,2)} > w_{(2,1)} + w_{(2,2)} + w_{(2,3)} + w_{(2,4)} > w_{(3,1)} + w_{(3,2)} + w_{(3,3)} + w_{(3,4)} + w_{(3,5)} + w_{(3,6)}$ . Para a abordagem peso-soma, a estrutura  $w_1 > w_2 > w_3$  pode ser aplicada diretamente e não há necessidade de restrições de nível elementar relativas aos subcritérios de diferentes macro-critérios, uma vez que não são comparados (conforme mostrado na Figura 2.15) e sua soma é igual a um ( $\sum w_{(r,s)} = 1$ ).

Ao realizar os experimentos, obteve-se os resultados apresentados na Tabela 2.1. A abordagem peso-produto, originalmente proposta com o MCHP, tende a fornecer valores de peso mais altos para o macro-critério com mais subcritérios para os casos de pesos ausentes e ordinais. Os valores do teste 1 apresentam menor peso médio para o macro-critério com menos subcritérios (para  $g_1$  a média de 0.162) e maior média para o macro-critério com mais subcritérios (para  $g_3$  a média de 0.508).

**Tabela 2.1:** Média dos pesos para o experimento realizado

Testes	Informação sobre o peso dos critérios	Abordagem de peso	$g_1$	$g_2$	$g_3$
Teste 1	Completamente ausentes	peso-produto	0.162	0.330	0.508
Teste 2		peso-soma	0.333	0.332	0.335
Teste 3	Dados ordinais	peso-produto	0.418	0.328	0.254
Teste 4		peso-soma	0.610	0.278	0.112

Ao contrário, a abordagem peso-soma considera possibilidades aleatoriamente iguais (já que o peso médio é em torno de 0.33) para todos os macro-critérios de dados ausentes (teste 2), pois os resultados são semelhantes para cada macro-critério, independentemente do número de subcritérios. Para os dados ordinais, as diferenças entre os pesos dos critérios são maiores quando se aplica a abordagem peso-soma (teste 4) se comparada à abordagem peso-produto (teste 3). Esse resultado pode ser atribuído à tendência da abordagem peso-produto em priorizar o macro-critério com mais subcritérios ( $g_3$ ), embora a restrição ordinal para o SMAA defina outra tendência de priorização.

Pode-se concluir com esses experimentos que a abordagem peso-produto não considera probabilidades iguais ao gerar os pesos para os macro-critérios, como proposto pelos métodos SMAA. Para casos como avaliação de sustentabilidade, a diferença no número de subcritérios para cada macro-critério pode trazer tendências indesejadas aos resultados.

Esta conclusão e os demais pontos referentes às diferenças entre as propostas de elicitação do MCHP estão resumidos na Tabela 2.2. Conforme apresentado pelo exemplo, apenas o peso-soma considera pesos igualmente possíveis para os critérios que estão sendo comparados.

**Tabela 2.2:** Sumário de diferenças entre as abordagens do MCHP

	Considera igualmente possível os pesos definidos para todos os critérios comparados no mesmo nível	Demanda elicitação em todos os níveis	Permite a criação de modelos sem informações sobre os pesos	Permite elicitações diferentes entre os níveis	Permite proporcionalidade entre níveis e entre todos os subcritérios	Permite a definição de uma ordenação para cada macro-critério	Compara todos subcritérios do nível elementar
Peso-produto		✓	✓		✓		✓
Peso-soma	✓		✓	✓	✓	✓	

Integrações do MCHP original a outros métodos, como o SRF (Corrente et al., 2017), possibilitam a superação de algumas das limitações do MCHP peso-produto, como a elicitação de diferentes decisores em diferentes níveis da hierarquia de critérios. Porém, aplicando o MCHP peso-soma, os mesmos benefícios podem ser atingidos, sem a necessidade de outro método, como o SRF.

Com base em toda a discussão realizada nesta seção e considerando as diferenças entre os dois métodos analisados, a proposta deste trabalho utiliza a abordagem de elicitação peso-soma (Pelissari et al., 2021). Pode-se notar que as diferenças entre as duas abordagens analisadas se estendem à aplicação conjunta do MCHP ao SMAA,

utilizado neste estudo. Se o MCHP for aplicado sem o SMAA, as abordagens apresentam características diferentes, com o método peso-soma exigindo significativamente mais esforço cognitivo em comparação ao método peso-produto.

## Capítulo 3

# O método VIKOR-HSMAA

Neste capítulo, é apresentado o método VIKOR-HSMAA proposto nesta tese. Este método permite que os critérios sejam organizados em uma estrutura hierárquica através da integração do VIKOR com a abordagem MCHP peso-soma. Assim, os critérios não estão todos alocados no mesmo nível e não há comparação direta entre todos os critérios.

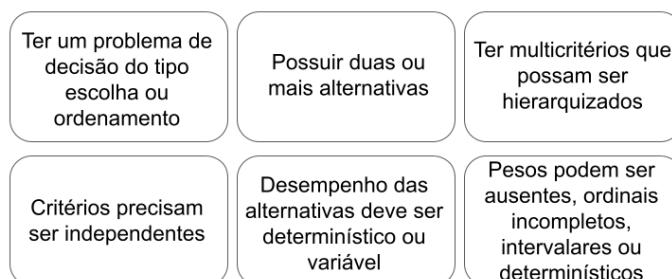
Ao longo do capítulo é apresentado o método VIKOR-HSMAA com as premissas para a aplicação do modelo multicritério proposto em um problema decisório. Posteriormente, a estrutura hierárquica é detalhada, apresentando suas formulações matemáticas e as medidas descritivas desenvolvidas neste trabalho. Por meio de um algoritmo, é apresentado o passo a passo para a aplicação do método. Por fim, apresenta-se o suporte fornecido pelo método como ferramenta de gestão.

### 3.1 Premissas VIKOR-HSMAA

A Figura 3.1 apresenta as premissas necessárias para a aplicação do VIKOR-HSMAA na tomada de decisão. Primeiramente, o problema decisório deve ser do tipo escolha ou ordenamento, excluindo os problemas de classificação.

O problema deve possuir em sua estrutura mais de duas alternativas a serem avaliadas e múltiplos critérios. Os critérios devem possuir estrutura hierarquizada, ou seja, podem ser agrupados em macro-critérios. Porém, nem todo macro-critério precisa ter subcritérios e a árvore de critérios pode ser assimétrica em sua estrutura. Como uma estrutura assimétrica considera-se uma árvore de critérios com macro-critérios com número diferente de subcritérios e/ou um macro-critério sem árvore descendente abaixo deste nó. Além disso, os critérios precisam ser independentes.

O desempenho das alternativas deve ter seus valores ou curvas de probabilidade definidos, podendo ser determinísticos ou variáveis. Os pesos dos critérios podem apre-



**Figura 3.1:** Passos para a fase de exploração para a definição da solução de compromisso

sentar diferentes formatos: pesos completamente ausentes, pesos ordinais, intervalares, determinísticos ou incompletos.

Parte destas premissas serão detalhadas adiante na descrição da hierarquia do método e do algoritmo de aplicação.

## 3.2 Estrutura hierárquica

O conjunto de critérios é representado por  $\mathcal{G}$  distribuídos em  $l$  diferentes níveis. No nível superior está o critério raiz, sendo este o objetivo abrangente do problema. Descendo na hierarquia, os macro-critérios são definidos e cada macro-critério pode ter sua própria árvore hierárquica. O VIKOR-HSMAA utiliza a elicitação peso-soma, portanto, exige que os pesos dos critérios sejam definidos em todos os níveis da hierarquia, permitindo estruturar problemas com uma árvore de critérios assimétrica.

Cada critério é descendente de apenas um critério no nível acima. O último nó de cada ramo contém um critério elementar. A avaliação de desempenho das alternativas é feita apenas em relação aos critérios elementares. No caso de uma árvore de critérios assimétrica, o número de nós de cada ramo pode ser diferente e, caso isso ocorra, o critério elementar que recebe a avaliação de desempenho das alternativas pode estar em níveis diferentes.

Os pesos de cada critério devem ser positivos e normalizados em cada nível da hierarquia. Assim, considerando que os critérios  $G_{(\mathbf{r},1)}, \dots, G_{(\mathbf{r},n(\mathbf{r}))}$  são diretamente descendente de  $G_{\mathbf{r}}$ ,  $w_{(\mathbf{r},s)} > 0, \forall s = 1, \dots, n(\mathbf{r})$ , e  $\sum_{s=1}^{n(\mathbf{r})} w_{(\mathbf{r},s)} = 1$ .

Inicialmente, os pesos dos critérios e o desempenho das alternativas são gerados através do SMAA para o último e elementar nível da hierarquia, de acordo com o tipo de informação definido. Os parâmetros do VIKOR  $R$ ,  $S$  e  $Q$  são calculados para o

nível elementar da hierarquia, considerando os pesos normalizados gerados através do SMAA.

Seguindo para o nível subsequente superior, com o respectivo macro-critério de um subconjunto de critérios elementares, o desempenho das alternativas são representados pelos valores  $Q$  resultantes da agregação do nível elementar. Os pesos do nível superior também são definidos pelos procedimentos do SMAA, fornecendo os valores dos pesos para a agregação do nível de macro-critérios. Matematicamente, considerando o critério  $G_{\mathbf{r}}$ , com  $\mathbf{r} = (j_1, \dots, j_h) \in \mathcal{I}_g$ , o desempenho da alternativa  $a_i$  é definida por  $g_{\mathbf{r}, \mathbf{r}_h}(a_i)$ , onde

$$g_{\mathbf{r}, \mathbf{r}_h}(a_i) = \begin{cases} g_{\mathbf{t}, \mathbf{r}_h}(a_i), & \text{if } n(\mathbf{r}) = 0, \\ \frac{n(\mathbf{r})}{\sum_{s=1}^{n(\mathbf{r})} w_{(\mathbf{r}, s)} Q_{(\mathbf{r}, s)}(a_i)}, & \text{if } n(\mathbf{r}) \neq 0. \end{cases} \quad (3.1)$$

Portanto, se  $n(r) \neq 0$  para  $G_r$ ,  $G_r$  deve ser considerado um critério de custo (função de minimização) no modelo, pois a matriz de desempenho das alternativas é formada pelo valor  $Q$  da matriz de seus subcritérios de nível elementar e, segundo o método VIKOR, o mínimo  $Q$  é referente à melhor alternativa. Já os subcritérios de nível elementar podem ter funções de minimização ou maximização.

A matriz de nível macro é então normalizada, calculando  $R_r(a_i)$ ,  $S_r(a_i)$  e  $Q_r(a_i)$  deste nível.

$$S_{\mathbf{r}}(a_i) = \sum_{s=1}^{n(\mathbf{r})} w_{(\mathbf{r}, s)} \left( \frac{Q_{(\mathbf{r}, s)}^* - Q_{(\mathbf{r}, s)}(a_i)}{Q_{(\mathbf{r}, s)}^* - Q_{(\mathbf{r}, s)}^-} \right), \quad (3.2)$$

$$R_{\mathbf{r}}(a_i) = \max_s \left( w_{(\mathbf{r}, s)} \frac{Q_{(\mathbf{r}, s)}^* - Q_{(\mathbf{r}, s)}(a_i)}{Q_{(\mathbf{r}, s)}^* - Q_{(\mathbf{r}, s)}^-} \right) \quad (3.3)$$

$$Q_{\mathbf{r}}(a_i) = v \left( \frac{S_{\mathbf{r}}(a_i) - S_{\mathbf{r}}^*}{S_{\mathbf{r}}^- - S_{\mathbf{r}}^*} \right) + (1 - v) \left( \frac{R_{\mathbf{r}}(a_i) - R_{\mathbf{r}}^*}{R_{\mathbf{r}}^- - R_{\mathbf{r}}^*} \right), \quad (3.4)$$

onde  $S_{\mathbf{r}}^* = \max S_{\mathbf{r}}(a_i)$ ,  $S_{\mathbf{r}}^- = \min S_{\mathbf{r}}(a_i)$ ,  $R_{\mathbf{r}}^* = \max R_{\mathbf{r}}(a_i)$ ,  $R_{\mathbf{r}}^- = \min R_{\mathbf{r}}(a_i)$  e  $v$  é o “coeficiente de estratégia” e pertence ao intervalo  $[0,1]$ . Após as iterações determinadas, as medidas descritivas do SMAA podem ser calculadas e analisadas para a tomada de decisão.

Com base nas condições de aceitação do VIKOR, duas medidas descritivas são propostas neste trabalho. As condições de aceitação estabelecem a diferença entre o valor final de agregação  $Q$  do VIKOR da alternativa com melhor desempenho para as demais. Quando uma alternativa é classificada em primeiro, a primeira medida descritiva proposta, denominada aqui Índice de Vantagem Aceitável (em inglês, *Acceptable Advantage Index* - AAI), calcula a proporção de vezes que a primeira condição de aceitação do VIKOR, representada pela equação (2.4), é atendida. A segunda medida descritiva, denominada Índice de Estabilidade (em inglês, *Stability Index* - SI), mede a proporção de vezes que a segunda condição de aceitação do VIKOR é atendida (maior valor de  $R$  e/ou  $S$  entre as alternativas naquela iteração).

Essas medidas descritivas fornecem informações sobre a robustez de uma alternativa a ser definida como a primeira da ordenação. Esses índices também permitem que a solução considere duas ou três alternativas, conforme proposto no método VIKOR, caso a estrutura do problema permita essa consideração.

Ambas as medidas descritivas podem ser calculadas para o critério raiz e macro-critérios, indicando se a alternativa apresentou uma vantagem sólida em relação à segunda e terceira melhor alternativa na agregação final e em cada ordenação do macro-critério. O VIKOR-HSMAA também utiliza as seguintes medidas descritivas já estabelecidas pela literatura para o SMAA e apresentadas na Seção 2.4: RAI, CWV e CF.

### 3.3 Algoritmo

O algoritmo apresentado na Figura 3.2 resume as etapas para a aplicação do método proposto VIKOR-HSMAA para a tomada de decisão. Suas cinco principais fases são: estruturação do problema, definição dos dados de entrada, simulação, medidas descritivas e exploração.

- **Fase 1 - Estruturação do problema:** Nesta fase, o problema de tomada de decisão é definido, e suas etapas são bastante semelhantes as geralmente adotadas em qualquer problema que utiliza um MCDA/M. As primeiras etapas requerem a definição do objetivo (etapa 1.1), identificação dos atores (etapa 1.2) e a lista de alternativas (etapa 1.3). O decisor deve definir a árvore de critérios, ou seja, o número de níveis, o número de critérios em cada nível e a hierarquia (etapa 1.4). Desta forma, a estrutura tem o critério raiz, macro-critérios e subcritérios até o nível elementar. Um critério em qualquer nível pode não ter um subcritério. O número de subcritérios de cada macro-critério não precisa ser o mesmo.

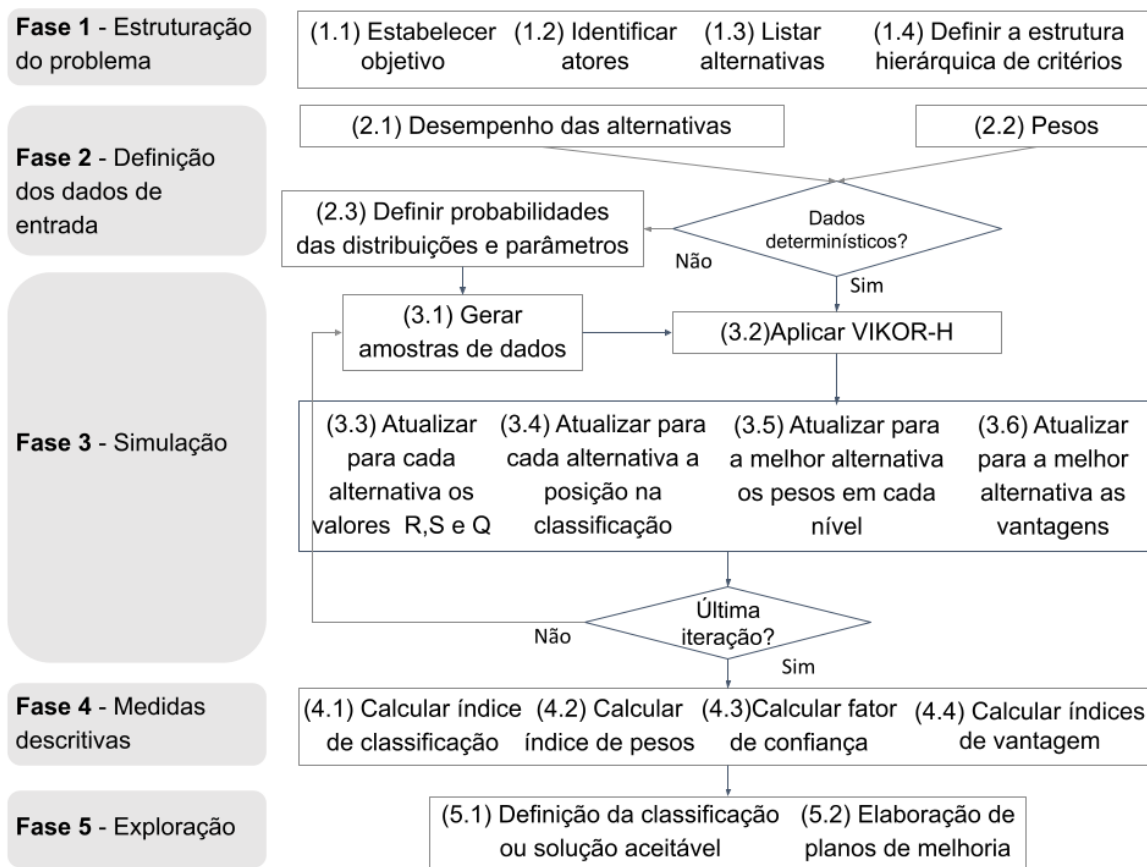


Figura 3.2: Fases para aplicação do VIKOR-HSMAA

- Fase 2 - Definição dos dados de entrada:** O decisor pode fornecer informações técnicas sobre o desempenho das alternativas em relação aos critérios de nível elementar (etapa 2.1). Quando o desempenho das alternativas é considerado variável aleatória, as distribuições probabilísticas devem ser definidas com seus parâmetros para permitir a geração de valores pelo SMAA (etapa 2.3). Os pesos dos critérios podem ser determinísticos, ordinais, intervalares, incompletos ou completamente ausentes (etapa 2.2). Se os pesos forem inteiramente determinísticos, os dados podem ser usados diretamente no procedimento de agregação (VIKOR-H). Para informações de preferência ordinal, intervalar ou incompleta em relação aos pesos, o decisor deve fornecer informações sobre a relação de peso em cada nível e, se necessário, entre pesos em diferentes níveis (etapa 2.3).
- Fase 3 - Simulação:** Esta fase inclui as etapas para gerar os dados aleatórios para o desempenho das alternativas e pesos dos critérios (etapa 3.1). Se o desempenho das alternativas for determinístico, os dados podem ser utilizados diretamente no procedimento de agregação, sem exigir a geração de valores aleatórios. Se o desempenho das alternativas for assumido como probabilístico, o SMAA gera valores respeitando a distribuição de probabilidade determinada.

Para a elicitação do peso dos critérios, o procedimento varia de acordo com o tipo de informação de preferência fornecida, seguindo o algoritmo apresentado por Tervonen e Lahdelma (2007) como segue:

- Para informações completamente ausentes, todos os pesos são igualmente possíveis e representados por uma distribuição de probabilidade uniforme no espaço de peso viável  $W$ . A geração dos dados considera  $n - 1$  números aleatórios independentes da distribuição uniforme no intervalo  $[0,1]$  e estes são ordenados em ordem crescente  $(q_1, \dots, q_{n-1})$ . Então 0 e 1 são inseridos como o primeiro ( $q_0$ ) e o último ( $q_n$ ) números, respectivamente. Os pesos são então obtidos como a diferença entre os números consecutivos, ou seja,  $w_j = q_j - q_{j-1}$  e endereçados para os critérios.
- Os pesos intervalares ou ordinais são definidos restringindo o espaço de pesos  $W$ , modificando o procedimento de geração de pesos nas informações faltantes para rejeitar pesos que não satisfaçam as restrições.
- As informações de preferência ordinal são expressas como restrições lineares para representar a preferência do decisor. Por exemplo,  $w_1 \geq w_2 \geq \dots \geq w_n$  considera que o critério  $g_1$  é o mais importante, o critério  $g_2$  é o segundo mais importante, e assim por diante. Também é possível considerar casos em que a importância de algum critério não é especificada ou em que a mesma importância ( $w_j = w_k$ ) é atribuída a dois ou mais critérios. A geração de pesos ordinais no processo de simulação segue a mesma lógica utilizada na ausência de informação de peso, exceto que, após serem gerados, os pesos são ordenados de acordo com a ordenação que foi estabelecida inicialmente.
- Para dados intervalares, o processo de geração de pesos é ligeiramente modificado. Os limites superior e inferior definidos para os pesos podem ser implementados pela técnica de rejeição. Após a geração de um vetor de pesos normalizados uniformemente distribuídos, os pesos são testados em seus limites. Se alguma das restrições não for satisfeita, todo o conjunto é rejeitado e a geração de pesos é repetida.
- Para dados incompletos como uma mistura de pesos determinísticos e aleatórios, o SMAA considera o valor "um" subtraído pela soma dos pesos determinísticos como o limite superior para o espaço viável para a distribuição uniforme. A geração de pesos aleatórios no processo de simulação segue a mesma lógica utilizada na informação de pesos faltantes. Por exemplo, se  $w_1 = 0.1$  e  $w_2 = 0.15$  forem definidos como determinísticos. O somatório representado por  $\sum_{r=1}^2 w_{(r)} = 0.25$ , limita o espaço viável como  $[0, 0.75]$  para a geração de pesos de critérios  $n - 3$ .

O modelo gera todos os dados probabilísticos e executa a agregação hierárquica (o VIKOR-H) considerando as informações (etapa 3.2). A cada iteração, o modelo calcula as classificações  $R$ ,  $S$  e  $Q$  (etapa 3.3). Após cada iteração, o primeiro contador contabiliza quantas vezes cada alternativa foi designada a cada posição (etapa 3.4). O modelo também armazena o vetor de peso de critérios que fez com que a alternativa priorizada nesta rodada seja classificada como primeira (etapa 3.5). O segundo contador atualiza para a alternativa classificada como primeira quantas vezes a diferença entre o valor de  $Q$  da primeira e segunda alternativas é maior que  $1/(m - 1)$ , como na equação (2.4). Se a diferença for maior que  $1/(m - 1)$ , o contador da primeira alternativa soma um. O terceiro contador considera se a primeira alternativa tem o melhor valor de  $R$  e/ou  $S$  para o critério raiz e os macro-critérios (etapa 3.6). Esse processo (da etapa 3.1 à etapa 3.6) pode ser repetido quantas vezes forem definidas as iterações. O número indicado de iterações é 10,000 (dez mil) (Tervonen e Lahdelma, 2007).

- **Fase 4 - Medidas descritivas:** Após a última iteração, e uma vez finalizado o processo de simulação, as medidas descritivas RAI, CWV, AAI, SI e CF são calculadas conforme descrito abaixo:

- O cálculo do RAI ( $y_i$ ) é o número de vezes que a alternativa  $a_i$  foi atribuída a posição  $k = 1, \dots, m$  (dado pelo primeiro contador), dividido pelo número de iterações.
- O CWV ( $w_i^r$ ) é calculado pelo peso médio das vezes que a alternativa  $a_i$  alcançou a primeira posição. O valor é definido pelo peso salvo a cada vez que a alternativa esteve na primeira posição, dividido pelo número de vezes que atingiu a primeira posição (também dado pelo primeiro contador).
- AAI ( $d_i$ ) é dado pelo segundo contador da alternativa  $a_i$  dividido pelo número de vezes que esta alternativa ficou em primeiro lugar (dado pelo primeiro contador).
- SI ( $s_i$ ) é dado pelo terceiro contador da alternativa  $a_i$  dividido pelo número de vezes que esta alternativa ficou em primeiro lugar (dado pelo primeiro contador).
- Quando o desempenho das alternativas é assumido como variável probabilística, o CWV é fixado como o peso de cada critério. O modelo deve rodar novamente variando apenas o desempenho das alternativas. O CF é calculado pelo número de vezes que a alternativa  $a_i$  foi atribuída àquela posição (primeiro contador da segunda rodada de iterações) dividido pelo número de iterações.

- **Fase 5 - Exploração:** Esta fase envolve a análise dos resultados para a tomada de decisão. As medidas descritivas fornecem informações factíveis para ajudar a definir a solução de compromisso, que pode incluir uma, duas ou três alternativas, conforme o método VIKOR original. A Figura 3.3 apresenta o processo de tomada de decisão com base na análise das medidas descritivas. Primeiramente, o decisor deve analisar o RAI e o CWV para selecionar a primeira alternativa para a solução. Se o RAI for igual a 0, a alternativa não será atribuída àquela posição; se for 1, a alternativa será atribuída àquela posição independente da combinação dos valores dos pesos. Quando as alternativas obtiverem probabilidades diferentes de zero para a primeira posição na ordenação, a solução deverá ser definida pelo decisor. Desta forma, o decisor deve selecionar uma alternativa com uma probabilidade coerente para classificar em primeiro lugar. Para selecionar esta alternativa, o decisor também deve avaliar se o CWV representa bem suas preferências. Se calculado, o CF também deve ser analisado. Se o CF for alto, significa que a probabilidade da alternativa ficar em primeiro lugar com as preferências expressas por seu CWV é alta. Portanto, é seguro escolher esta alternativa para a primeira posição. Após escolher a primeira alternativa, o decisor deve analisar o AAI para verificar se a solução deve incluir uma segunda alternativa. Se o AAI apresentar valor maior que 0.7 <sup>1</sup>, a solução não deve conter uma segunda alternativa. Caso AAI apresente valor inferior a 0.7, uma segunda alternativa deve ser considerada; a segunda alternativa será aquela com o maior RAI remanescente. Após a escolha da segunda alternativa classificada, o SI da primeira alternativa deve ser analisado para verificar se a solução deve contemplar uma terceira alternativa. Se o SI apresentar um valor superior a 0.9, a solução não deve incluir uma terceira alternativa. Se o SI apresentar um valor inferior a 0.9, uma terceira alternativa com o maior RAI remanescente deve ser incluída na solução de compromisso. Para planos de melhoria, todas as medidas descritivas podem fornecer informações relevantes. O AAI e o SI mostram se uma alternativa possui uma forte vantagem para a primeira posição e indica o macro-critério com vantagem fraca, especificando os subcritérios que devem ser priorizados nos planos de melhoria.

---

<sup>1</sup>O valor definido para avaliação das medidas descritivas AAI e SI, propostas neste trabalho, são tão subjetivos quanto as demais medidas descritivas do método SMAA e podem ser definidas e alteradas pelo decisor. Neste estudo, apresentamos os valores adotados como referência nos estudos de caso aplicados.

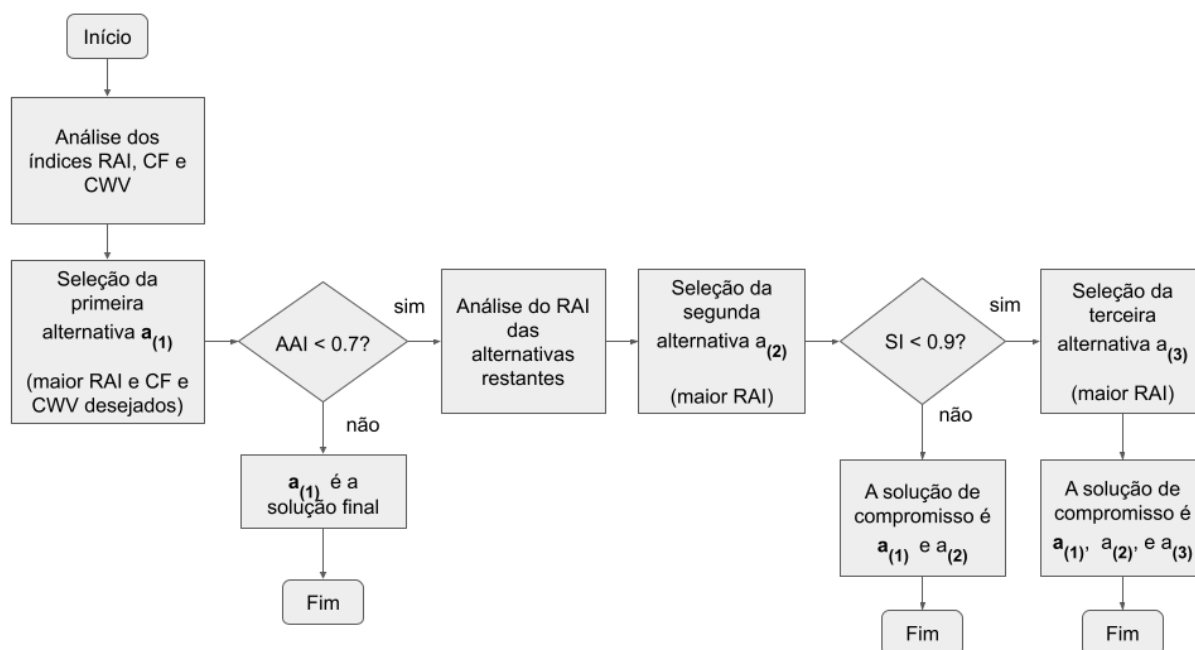


Figura 3.3: Passos para a fase de exploração para a definição da solução de compromisso

### 3.4 Apoio a gestão

Os dados e informações proporcionadas pelo modelo visam oferecer suporte a gestão na tomada de decisão. A Figura 3.4 apresenta um resumo do suporte do modelo a decisão. Destaca-se como suporte a escolha de uma ou mais alternativas, ou a definição de uma ordenação (*rank*), dependendo da configuração do problema.

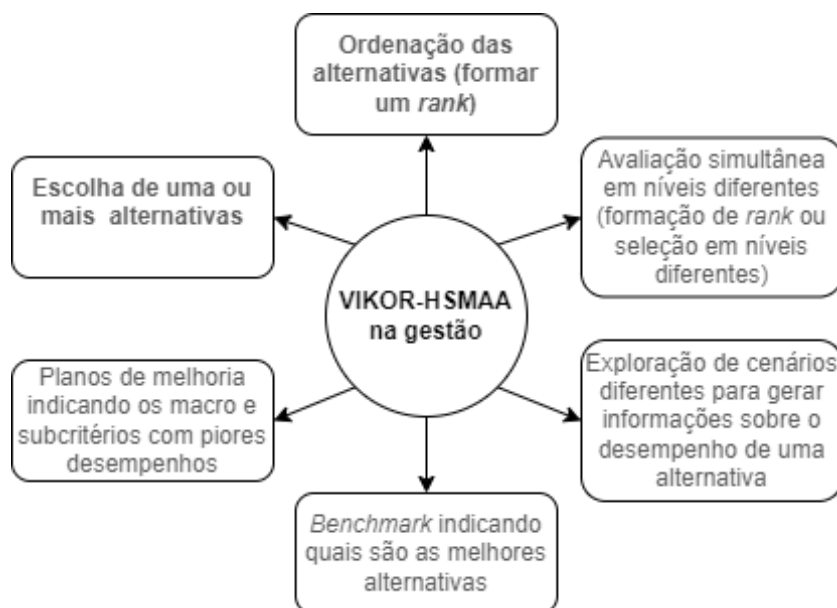


Figura 3.4: Apoio a gestão fornecida pelo VIKOR-HSMAA

A estrutura hierárquica também suporta o processo permitindo que sejam fornecidas

informações, escolha e ordenação em diferentes níveis da hierarquia, proporcionando que a decisão final do critério raiz seja dividida no desempenho em macro-critérios. Desta forma, o decisor consegue verificar em quais critérios a alternativa tem uma classificação ruim frente as demais e entender de forma mais detalhada a avaliação final dada a cada alternativa.

Alterando a configuração de pesos na exploração de diferentes cenários mostra como a alternativa é avaliada em diferentes configurações possíveis. Com isso, o decisor pode verificar quais cenários beneficiam ou prejudicam a escolha de determinada alternativa. Outro ponto em que o modelo pode oferecer suporte a decisão é a indicação de quais alternativas possuem melhor desempenho para que sirvam de modelo e troca de experiências com *benchmarking*.

Por fim, considerando todas as informações de avaliação em diferentes cenários podem ser formulados planos de melhoria. É possível indicar os macro-critérios e subcritérios em que a alternativa obteve pior resultado e que devem ser priorizados neste plano, além de indicar alternativas para *benchmarking* nestes pontos de melhoria.

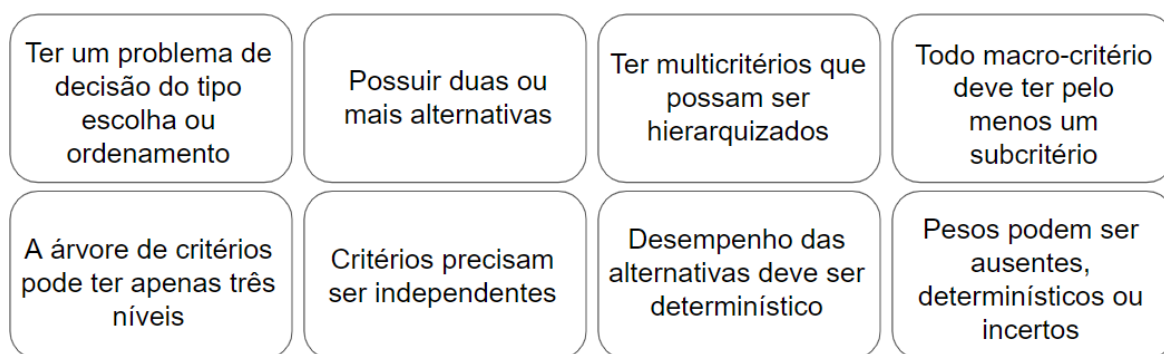
## Capítulo 4

# Desenvolvimento do *software*

Este capítulo traz a estrutura do *software* denominado VIKOR-HS, desenvolvido para proporcionar a aplicação do modelo VIKOR-HSMAA apresentado no Capítulo 3. São descritas aqui as premissas, o desenvolvimento e, por fim, o algoritmo de utilização e interfaces.

### 4.1 Premissas VIKOR-HS

Em relação as possibilidades do modelo VIKOR-HSMAA o *software* VIKOR-HS apresenta algumas restrições. Desta forma, as premissas de aplicação apresentam diferenças em relação as premissas do modelo VIKOR-HSMAA apresentadas anteriormente na Figura 3.1. A Figura 4.1 apresenta as informações e formato do problema decisório necessários para a adequada utilização do *software*.



**Figura 4.1:** Premissas para a utilização do *software* VIKOR-HS

É necessário que o problema de tomada de decisão necessite de uma escolha ou ordenamento. Além disso, como no modelo VIKOR-HSMAA é necessário que hajam mais de duas alternativas, múltiplos critérios e que estes possam ser hierarquizados, ou seja, agrupados em critérios num nível macro. Todo macro-critério deve possuir obrigatoriamente pelo menos um subcritério, diferentemente do modelo VIKOR-HSMAA que

permite que um macro-critério não tenha subcritérios. Desta forma a árvore de critérios possui apenas três níveis, sendo estes o nível do critério raiz (objetivo do problema), macro-critérios e subcritérios. Além disso, os critérios precisam ser independentes.

O desempenho das alternativas deve ser definido com dados determinísticos, podendo ser quantitativo ou qualitativo seguindo a escala *likert* definida. Por fim, para a definição dos pesos são apresentadas três possibilidades de dados. Pesos determinísticos, pesos incertos ou ordinais, e pesos completamente ausentes. Sem as demais configurações de pesos previstas no modelo.

## 4.2 Desenvolvimento e programação

O *software* utiliza o *framework* de código aberto Electron, que permite que o usuário do VIKOR-HS realize a instalação do *software* e o preenchimento dos formulários. O Electron permite ainda a utilização de componentes de *front-end* e *back-end*.

*Front-end* consiste na programação das interfaces gráficas do usuário, sendo estas as páginas que permitem a interação do usuário com o *software* para o preenchimento e visualização dos resultados do modelo. Estas interfaces do usuário foram programadas em um *framework* TypeScript de código aberto chamado Angular. Este *framework* é mantido pelo Google para a construção de páginas únicas.

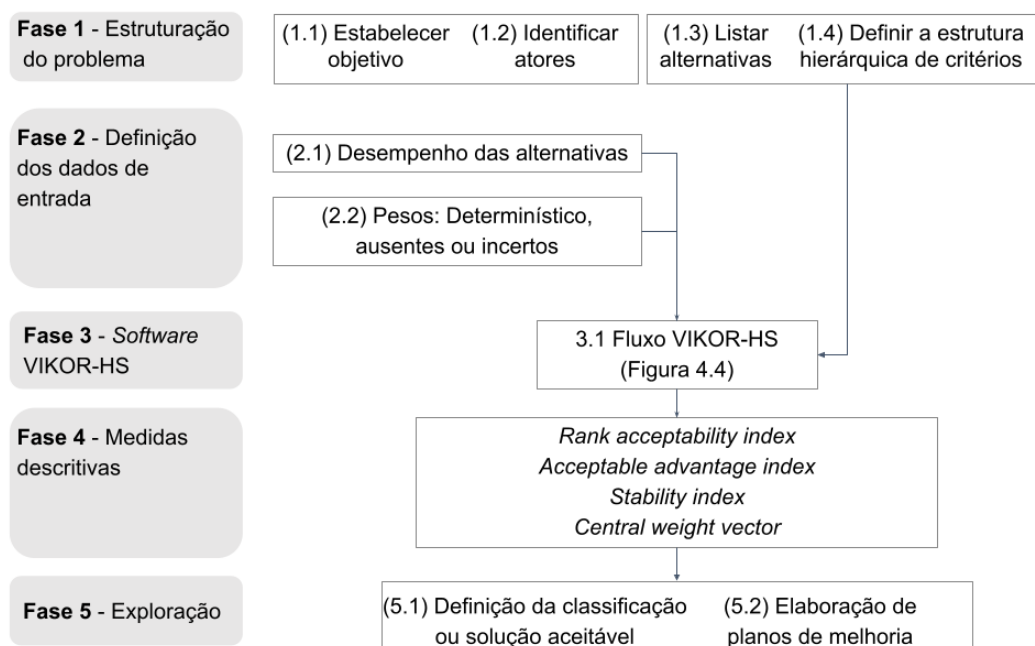
Já o *back-end*, consiste na programação do código responsável pela operação do sistema, realizando os cálculos do modelo multicritério proposto. O processamento do sistema *back-end* ocorre em linguagem Python.

A instalação do sistema para o usuário se dá pelo uso de um instalador que deve ser executado após o *download*.

## 4.3 Algoritmo detalhado de utilização do *software* VIKOR-HS e interfaces do usuário

O algoritmo do processo de tomada de decisão do *software* VIKOR-HS apresentado na Figura 4.2 possui algumas diferenças em relação ao algoritmo para o modelo matemático VIKOR-HSMAA, apresentado na Figura 3.2. As fases 1, 2, e 5 seguem basicamente a mesma estrutura do modelo.

A fase 1 de estruturação do problema permanece com as mesmas etapas. A fase 2 de definição dos dados de entrada não possui a etapa para a definição das probabilidades das distribuições porque o desempenho das alternativas precisa ser determinístico e as distribuições dos pesos são automatizadas no *software*, definindo apenas o tipo de peso a ser aplicado. A fase 3 correspondente a simulação do modelo matemático foi



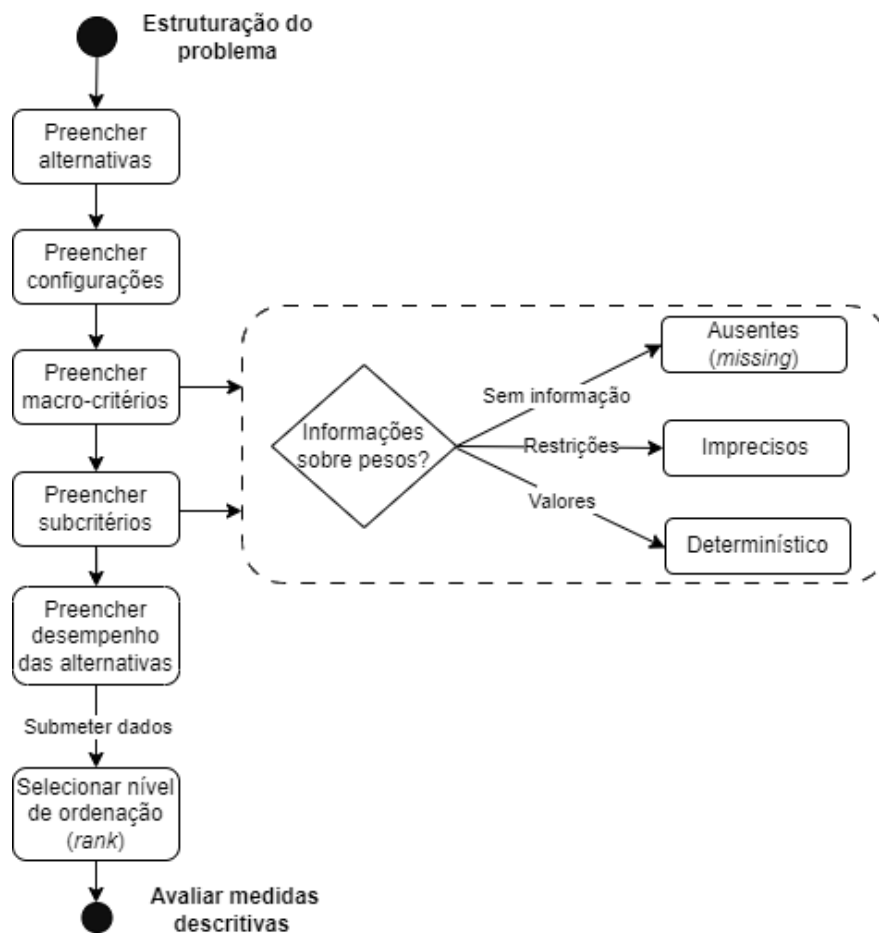
**Figura 4.2:** Simplificações do processo decisório do *software* VIKOR-HS em relação ao modelo VIKOR-HSMAA

substituída pela aplicação do *software*, detalhada adiante na Figura 4.3. Na fase 4, as medidas descritivas devem ser analisadas, sem a necessidade de serem coletadas pois este processo é automatizado pelo *software*. Na fase 5 de exploração devem ser seguidos os procedimentos para a definição da ordenação ou solução de compromisso e planos de melhoria, conforme descrito para o modelo VIKOR-HSMAA (Figura 3.3).

A seguir detalha-se o algoritmo de aplicação do VIKOR-HS apresentado na Figura 4.3. O *software* VIKOR-HS apresenta três interfaces para o usuário: página inicial de macro-critérios, páginas de subcritérios e página de resultados. Cada macro-critério possui uma página de subcritérios com a mesma configuração.

A interface de macro-critérios com sua configuração inicial é apresentada na Figura 4.4. Inicialmente, as informações referentes as fases de estruturação do problema e definição dos dados de entrada devem ser preenchidas no *software*. As alternativas devem ser inseridas tendo seus nomes escritos. As quantidades de alternativas, macro-critérios, subcritérios e restrições podem ser alteradas com botões “+” para adicionar e “-” para retirar.

Devem ser definidas as configurações iniciais do *software* com o número de iterações solicitadas, que é previamente definido em 10,000, podendo este valor ser alterado. O valor do “coeficiente de estratégia”  $v$  do VIKOR deve ser definido, podendo variar entre



**Figura 4.3:** Fluxograma com atividades de utilização do *software*

File Edit View Window

### Settings

Number of iterations *	V *	Weight fill type *
10000	0,5	Missing Data

### Alternatives

Alternative name *	
Alternative 1	
Alternative name *	
Alternative 2	

### Criteria

Symbol	Criteria name *	
w1	Environmental	
Symbol	Criteria name *	
w2	Social	
Symbol	Criteria name *	
w3	Economic	

SUBMIT

**Figura 4.4:** Configuração inicial da primeira página

0 e 1, sendo o valor usual de 0.5 já inicialmente estabelecido na interface.

Deve-se configurar os macro-critérios. Inicialmente, a tela apresenta três macro-critérios representados pelas três dimensões de sustentabilidade (em inglês: *Environmental*, *Social* e *Economic*). Porém, a quantidade e os nomes podem ser alterados. Cada macro-critério possui um símbolo para o peso, com a letra *w* e seu índice de acordo com a numeração de macro-critérios, sendo  $W_1$ ,  $W_2$  e  $W_3$  para os três critérios apresentados na configuração inicial.

Deve ser definido o peso dos critérios, selecionando entre as opções em inglês: *missing data*, *deterministic data* e *imprecise data*. A configuração inicial apresenta o peso *missing data*, em que não há necessidade de preencher nenhuma informação sobre os pesos dos critérios. Ao selecionar *deterministic data* aparece uma coluna a frente do nome do macro-critério para definir os valores determinísticos do peso. Caso seja selecionada a opção *imprecise data*, aparece abaixo uma nova configuração, conforme Figura 4.5. que possibilita a inserção de inequações (restrições).

The screenshot shows a web interface for configuring criteria and restrictions. It is divided into three main sections: Alternatives, Criteria, and Restrictions.

- Alternatives:** A table with two rows. Each row has a label 'Alternative name \*' and a text input field containing 'Alternative 1' and 'Alternative 2' respectively. There are minus signs to the left of each row.
- Criteria:** A table with three rows. Each row has a 'Symbol' column (w1, w2, w3) and a 'Criteria name \*' column (Environmental, Social, Economic). There are plus signs to the right of each row, and a pencil icon is visible next to each criteria name, indicating editability.
- Restrictions:** A section with a plus sign to the right. It contains two rows of restriction configuration. Each row has a 'Weight \*' dropdown (w1, w2, w3), a 'Restriction \*' dropdown (greater than, less than), and another 'Weight \*' dropdown (w2, w3). A dropdown menu is currently open for the first 'Weight \*' dropdown, showing the options w1, w2, and w3.

A blue 'SUBMIT' button is located at the bottom right of the interface.

**Figura 4.5:** Configuração da página inicial para dados imprecisos

Com esta configuração, o usuário pode inserir ou retirar as restrições definidas entre os macro-critérios. As restrições podem ser do tipo “maior que” e “menor que”, e ao clicar na opção “*Weight*” aparecem automaticamente os símbolos de cada macro-critério citados anteriormente, conforme Figura 4.5.

Ainda seguindo as etapas apresentadas na Figura 4.3, o usuário passa para o nível de subcritérios acessando a página de subcritérios referente a cada macro-critério pelo símbolo do lápis apresentado a frente de cada macro-critério. Esta ação dá acesso a

página de subcritérios com a configuração inicial apresentada na Figura 4.6 para o macro-critério ambiental como um exemplo.

Environmental Sub-criteria Weight hill type \*  
Missing Data

Symbol	Name	Function	Scale	Alternative 1	Alternative 2	
w11		Min	Numerical	0	0	+
w12		Min	Numerical	0	0	-
w13		Min	Numerical	0	0	-

**Figura 4.6:** Configuração da página inicial para os subcritérios do macro-critério ambiental

Inicialmente, aparece acima o nome do macro-critério (estabelecido na página inicial) referente a este conjunto de subcritérios. A quantidade e nomes dos subcritérios devem ser preenchidos. Deve-se definir a função do subcritério entre maximização e minimização, e a escala entre quantitativo e qualitativo.

A avaliação das alternativas deve ser feita de acordo com o tipo de dado. Caso seja quantitativo devem ser inseridos os valores referentes a cada alternativa. Caso seja selecionado qualitativo, a avaliação das alternativas pode ser feita entre N/A (*Not applicable* ou não aplicável), *Very bad* (muito ruim), *Bad* (ruim), *Avarege* (médio), *Good* (bom) e *Very Good* (muito bom), conforme Figura 4.7. Estes valores seguem no modelo matemático a escala *likert*, sendo N/A referente a zero, *Very bad* referente a nota 1, *Bad* referente a nota 2, *Avarege* referente a nota 3, *Good* referente a nota 4 e *Very Good* referente a nota 5. O sistema considera então estes valores numéricos para os cálculos do critério.

À esquerda do nome do subcritério é apresentado o símbolo do peso do subcritério, sendo o primeiro número referente a numeração do símbolo do peso do macro-critério referente a esta página de subcritérios. Por exemplo, para o macro-critério ambiental, que possui o símbolo de peso W1, os pesos dos subcritérios terão os símbolos W11, W12, W13, W14, e assim por diante. Para o macro-critério social com símbolo de peso W2, os pesos dos subcritérios terão numeração W21, W22, W23, W24 e assim por

Environmental Sub-criteria				Weight til type * Missing Data			
Symbol	Name	Function	Scale	Alternative 1	Alternative 2	Alternative 3	
w11	Subcriterion 1	Min	Numerical	0	0	0	+
w12	Subcriterion 2	Min	Qualitative	Very Bad	Average	N/A	-
w13	Subcriterion 3	Min	Numerical	0	0		-

**Figura 4.7:** Configuração da página de subcritérios para dados qualitativos

diante.

Em seguida, deve-se definir o tipo de peso a ser considerado, sendo esta configuração com o mesmo funcionamento da página inicial. Os dados podem ser salvos e após o preenchimento de todos os dados desta página de subcritérios deve-se retornar a página inicial de macro-critérios até preencher todas as páginas de subcritérios. Na página inicial, deve-se submeter os dados para acessar a página de resultados. Esta ação só é possível se todos os campos estiverem preenchidos, incluindo as páginas de subcritérios.

Para evitar que estes campos fiquem sem preenchimento ou ocorram erros foram programados validadores no *software*. Caso o usuário realize um preenchimento incorreto dos dados, seja pelo não preenchimento de um campo ou pela inserção de restrições inviáveis nos pesos, aparece uma mensagem em vermelho destacando o campo e o que deve ser corrigido. Um exemplo de validador seria o que impede o não preenchimento dos nomes das alternativas, aparecendo uma mensagem em vermelho solicitando a tarefa ao usuário, conforme Figura 4.8.

Foram definidos validadores para evitar as seguintes falhas de utilização do *software*:

- Todos os critérios (macro-critérios e subcritérios) e alternativas devem ter um nome definido;
- Todas as páginas de subcritérios precisam estar preenchidas;
- Os parâmetros iniciais precisam estar definidos (número de iterações e valor de  $v$ );
- A soma dos pesos determinísticos não ser diferente de 1;

Vikor  
File Edit View Window

## Settings

Number of iterations \*      V\*  
10000      0,5

---

## Alternatives

Alternative name \*      +  
Alternative 1      —

---

Alternative name \*      —  
Alternative 2      —

---

Alternative name \*      —  
Name is required

**Figura 4.8:** Exemplo de mensagem do validador de não preenchimento de nome de alternativas

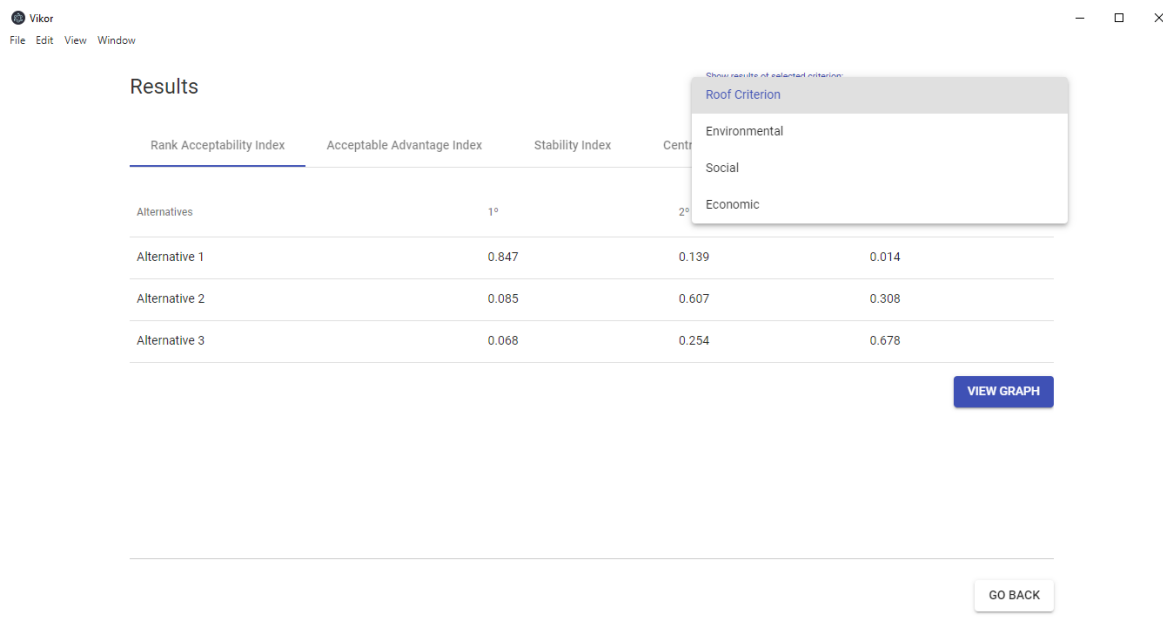
- Cada peso determinístico precisa ser numérico e obedecer a restrição  $0 \leq w_j \leq 1$ ;
- Para os pesos imprecisos as restrições definidas não podem ser contraditórias (por exemplo,  $w_1 > w_2$  e  $w_2 > w_1$ ).

Após o preenchimento correto de todos os campos segue-se para a página de resultados que possui a configuração da Figura 4.9. Nesta página, deve-se definir qual o critério sobre o qual os resultados serão analisados. Os resultados podem ser de nível geral para o critério raiz (*Roof criterion*), ou no nível macro, para cada macro-critério. Esta seleção deve ser feita conforme mostra a Figura 4.9 no topo direito da página.

Os nomes dos macro-critérios definidos na página inicial aparecem automaticamente como opções. Ao selecionar um tipo de resultado, os indicadores Índice de Aceitabilidade de Classificação (*Rank acceptability index*), Índice de Vantagem Aceitável (*Acceptable advantage index*), Índice de Estabilidade (*Stability index*) e Vetor Central de Pesos (*Central weight vector*) aparecem na tela para serem analisados e devem ser selecionados para serem visualizados em detalhes.

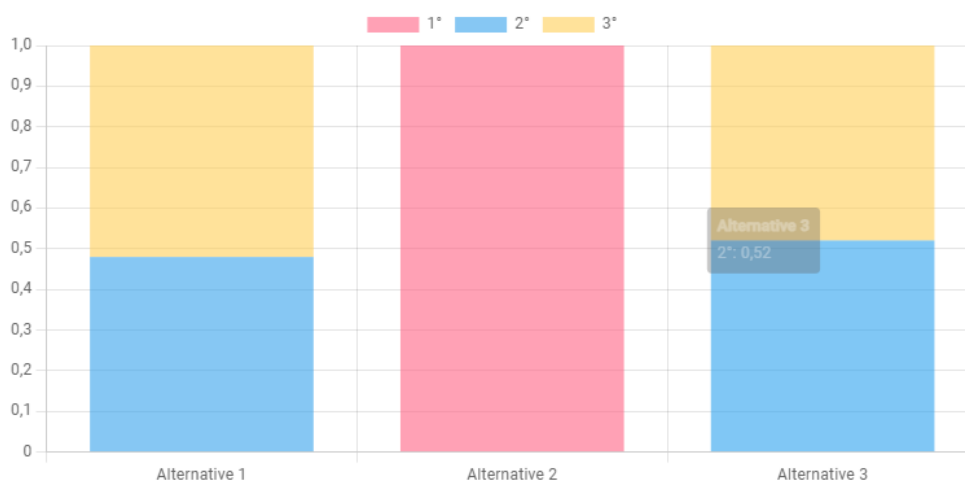
Ao analisar cada uma das medidas descritivas é possível visualizar o gráfico com os resultados de todas as alternativas. Para as medidas descritivas RAI, AAI e SI são apresentados gráficos de barras. A Figura 4.10 mostra o gráfico para o RAI.

Para o CWV é apresentado um gráfico em teia, conforme Figura 4.11.



**Figura 4.9:** Configuração da página de resultados na seleção do tipo de resultado

### Rank Acceptability Index - Roof

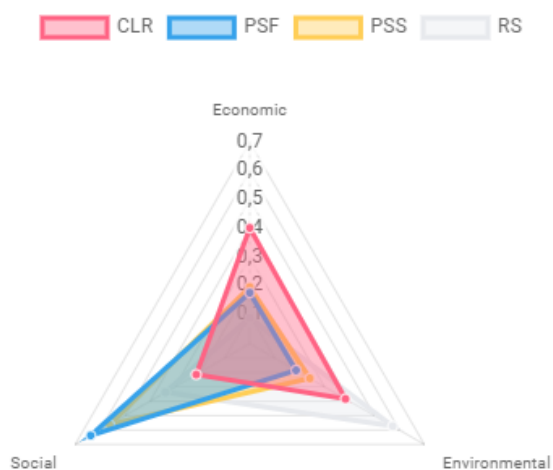


**Figura 4.10:** Gráfico para a medida descritiva *Rank Acceptability Index*

Com base nas medidas descritivas deve ser formada a solução de compromisso conforme Figura 3.3. Caso se deseje alterar a configuração do problema para uma nova análise deve-se retornar a página inicial e realizar as alterações necessárias.

Por fim, é possível exportar o problema em um arquivo compatível ao *software* para que a análise seja verificada novamente ou para que os parâmetros sejam alterados, poupando esforço do usuário em preencher os campos que permanecerem os mesmos. Desta forma, todas as configurações e informações permanecem salvas para análises futuras, podendo ser alteradas após a importação do arquivo no VIKOR-HS.

## Central Weight Vector - Roof



**Figura 4.11:** Gráfico para a medida descritiva *Central Weight Vector*

## Capítulo 5

# Estudo de caso em LCSA

Neste capítulo é apresentado o estudo de caso da literatura selecionado para a validação do VIKOR-HS, as etapas de aplicação do método proposto e seus resultados. Os resultados referentes a sustentabilidade são comparados entre o VIKOR-HS e a literatura. Os resultados para os macro-critérios são analisados apenas para o VIKOR-HS, visto que a literatura não realiza agregação de valores neste nível da hierarquia.

### 5.1 Apresentação do estudo de caso

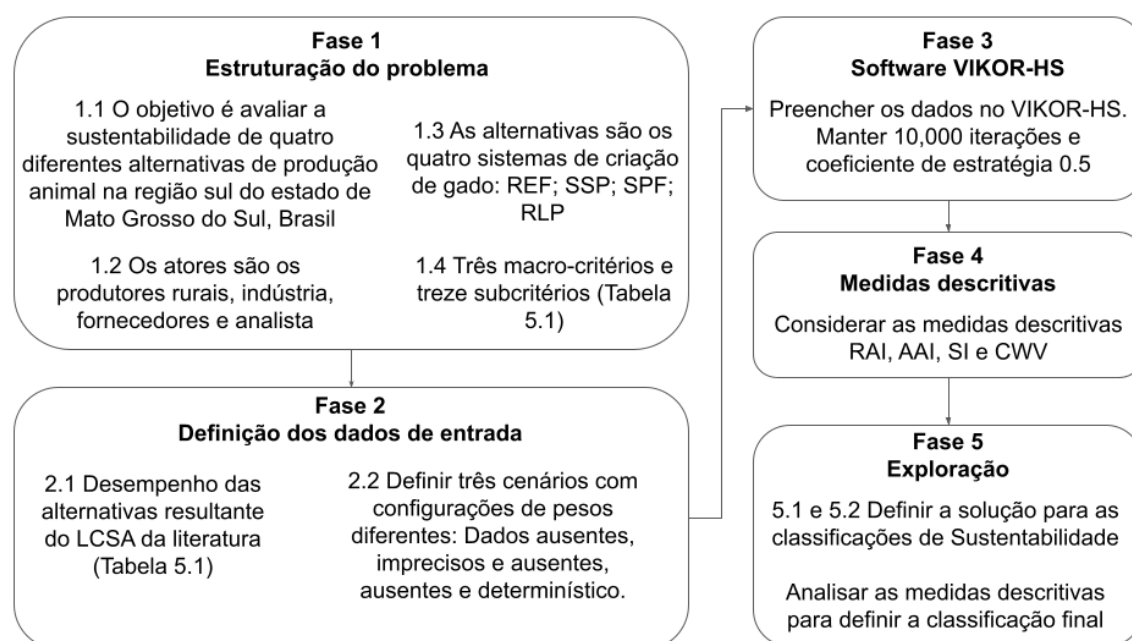
O estudo de caso de Florindo et al. (2020) foi selecionado devido a aplicação do VIKOR como método decisório, consideração das condições de aceitação, à estrutura hierárquica do problema e à análise de diferentes cenários para elicitação de pesos. Florindo et al. (2020) aplica o LCSA para comparar diferentes sistemas de produção animal, aplicando a ponderação probabilística para a determinação dos pesos em 1,248 cenários.

O estudo de Florindo et al. (2020) se destaca pela aplicação da análise das três dimensões de sustentabilidade na criação de gado, usualmente analisada apenas em uma das dimensões. Além disso, a aplicação do VIKOR e a avaliação de suas condições de aceitação aplicadas neste estudo fornecem parâmetros para a comparação e validação dos resultados do modelo e do *software* propostos nesta tese. Os dados referentes a aplicação do LCSA, com sua estrutura de alternativas, critérios e valores são apresentados a seguir.

### 5.2 Aplicação do *software* VIKOR-HS

A Figura 5.1 apresenta a estrutura do estudo de caso adaptado para as fases de aplicação do VIKOR-HS (Figura 4.2). Na fase de estruturação do problema (Fase 1) o

objetivo do problema (etapa 1.1) é avaliar a sustentabilidade de quatro diferentes alternativas de produção animal na região sul do estado do Mato Grosso do Sul, Brasil. Os atores envolvidos (etapa 1.2) foram considerados os produtores rurais, indústria e fornecedores, consultados na pesquisa para a definição dos critérios a serem analisados. Além destes, foi considerado o o analista (isto é, o usuário do VIKOR-HS). As alternativas (etapa 1.3) são os quatro sistemas de produção animal: Sistema referência (REF), Sistema com suplementação proteica (SSP), Sistema com pastagens fertilizadas (SPF) e Rotação lavoura-pecuária (RLP).



**Figura 5.1:** Etapas da aplicação do processo decisório do VIKOR-HS no estudo de caso

Os sistemas variam quanto a itens como esquema de alimentação do gado, idade de abate e planejamento de reprodução, conforme detalhado em Florindo et al. (2020). Todos os sistemas utilizam os capins *Brachiaria brizantha cv. Marandú*. como pastejo. No sistema REF, a alimentação é realizada exclusivamente por pastejo e fornecimento de suplementação mineral, com consumo de 0.02% de peso vivo. Os bois são abatidos aos 42 meses de idade.

No sistema SSP a alimentação é realizada por pastejo e fornecimento de suplementação mineral (agosto a abril) com consumo de 0.02% de peso vivo e suplementação proteica com 35% de proteína com consumo de 0.1% do peso vivo para o proteico durante a estação seca do ano (maio a julho). Os bois são abatidos aos 36 meses de idade.

No sistema SPF a alimentação é realizada por pastejo e fornecimento de suplementação mineral (agosto a abril), suplementação proteica com 35% de proteína durante a estação seca do ano (maio a julho), com consumo de 0.02% de peso vivo para o suple-

mento mineral e 0.1% do peso vivo para o proteico. Há correção do solo para plantio com fertilizantes e minerais. Os bois são abatidos aos 28 meses de idade.

O sistema RLP segue características adotadas por pecuaristas da região, com o arrendamento de uma parte da propriedade para plantio de grãos a outro produtor adequadamente capacitado em termos de conhecimento e maquinário. A área de pastagem foi dividida em 8 talhões, sendo metade destinados a pastagens e a outra metade destinados ao plantio de grãos. A cada 4 anos ocorre a rotação de culturas em todos os talhões da fazenda. Anualmente, um talhão que estava destinado a pastagem é definido como talhão de plantio de grãos, enquanto que um talhão utilizado para plantio de grão retorna para pastagem. A alimentação é realizada por pastejo e fornecimento de suplementação mineral (agosto a abril) com consumo de 0.02% de peso vivo e suplementação proteica com 35% de proteína durante a estação seca do ano (maio a julho), com consumo de 0.1% do peso vivo. Os bois são abatidos aos 28 meses.

Como critérios (etapa 1.4), foram considerados os utilizados por Florindo et al. (2020) apresentados na Tabela 5.1. Os macro-critérios são as três dimensões de sustentabilidade ambiental, social e econômica. A dimensão social possui cinco subcritérios, a dimensão econômica quatro subcritérios e a dimensão ambiental cinco subcritérios.

**Tabela 5.1:** Matriz de decisão do estudo de caso

Macro-critério	Subcritério	Função	REF	SSP	SPF	RLP
Ambiental	Toxicidade humana total	Min	0	0	0	0
	Mudanças climáticas - GWP 100a	Min	16.7148	15.1298	13.5674	12.7791
	Potencial de acidificação	Min	0.0032	0.005	0.0081	0.0028
	Potencial de eutrofização	Min	0.0018	0.0026	0.0041	0.0023
	Ocupação de terra - $m^2$	Min	86.1688	65.8673	31.2137	24.8295
Social	Geração de postos de trabalho	Max	6.25	6.9318	7.8409	6.0227
	Remuneração dos trabalhadores	Max	6.25	6.4773	8.0682	7.1591
	Qualificação da mão de obra	Max	6.25	6.9318	8.8636	7.3864
	Partes interessadas	Max	6.25	7.1591	9.4318	8.1136
	Complexidade do sistema	Min	6.25	6.7045	9.3182	9.2045
Econômico	Custo de produção	Min	2.0525	2.0636	2.3399	1.6446
	Lucro operacional	Max	2.3946	2.4371	2.1614	4.4722
	Retorno sobre o investimento	Max	0.0169	0.022	0.0371	0.0512
	Disponibilidade de linhas de crédito e taxas de juros subsidiadas	Max	6.25	6.875	7.5	9.0625

Nota: REF = Sistema referência

SSP = Sistema com suplementação proteica

SPF = Sistema com pastagens fertilizadas

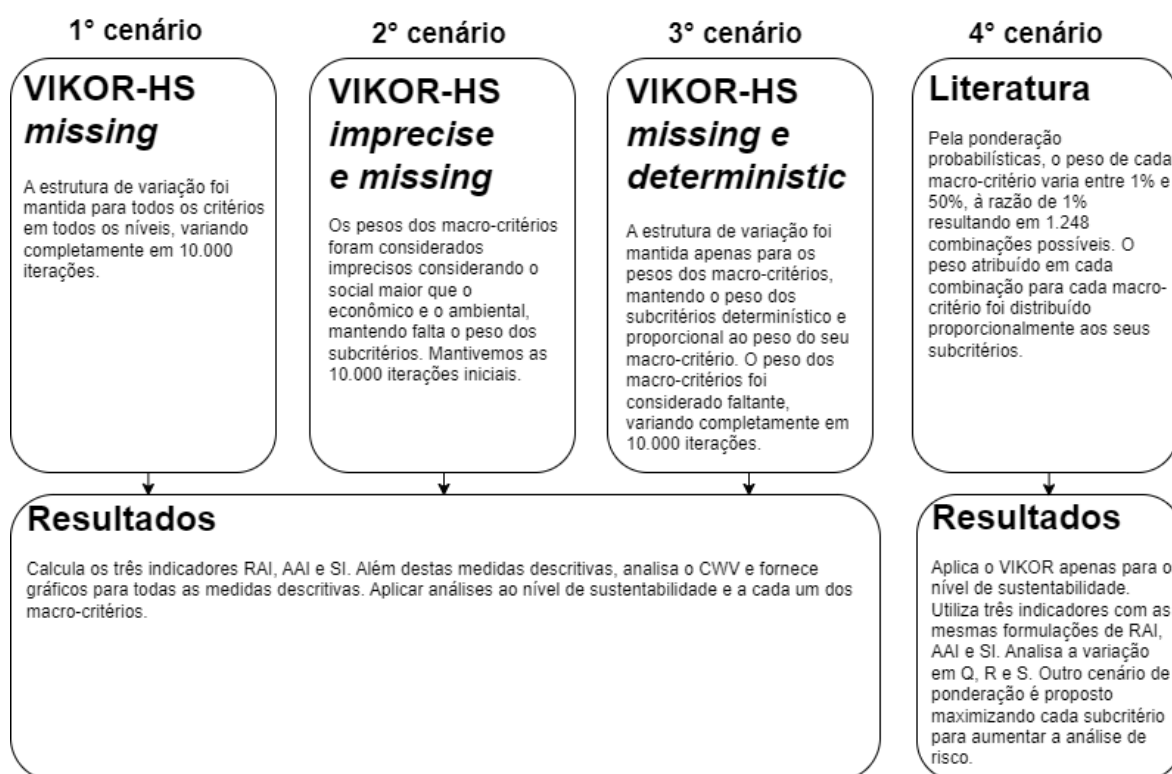
RLP = Rotação lavoura-pecuária.

Na fase de definição dos dados de entrada (Fase 2), são considerados o desempenho das alternativas (etapa 2.1) apresentados na Tabela 5.1. Foram realizadas análises em três cenários com configurações de pesos diferentes (etapa 2.2), detalhadas a seguir na Sub-sessão 5.3.

Na fase do *Software* VIKOR-HS (Fase 3) os dados da fase 2 foram preenchidos. Como configurações do *software* VIKOR-HS foram mantidas as 10,000 iterações e o “coeficiente de estratégia”  $v$  em 0.5. Foram analisados os três cenários realizando as alterações de informação de pesos. Todas as medidas descritivas (Fase 4) devem ser analisadas, de acordo com a configuração de pesos do cenário. Na fase de exploração (Fase 5) os resultados das medidas descritivas foram analisados para cada cenário tanto para a sustentabilidade (critério raiz) quanto para o ambiental, social e econômico (macro-critérios), definindo a solução de compromisso em cada caso. Os resultados dos cenários foram também comparados com a literatura para a validação do VIKOR-HS.

### 5.3 Definição dos cenários e literatura

A definição dos cenários visa analisar o problema, fornecer maiores informações para a tomada de decisão explorando as funcionalidades do *software* e proporcionar uma comparação válida com a literatura. Os cenários do VIKOR-HS foram definidos usando as três configurações de peso ausente, determinístico e impreciso (*missing*, *deterministic* e *imprecise*). A literatura referente ao problema (Florindo et al., 2020) foi considerada um quarto cenário (Figura 5.2).



**Figura 5.2:** Definição dos pesos e resultados dos cenários do VIKOR-HS e da literatura

O primeiro cenário definido para VIKOR-HS considera os pesos de todos os critérios

em ambos os níveis da hierarquia “ausentes”, sem quaisquer restrições de variação. No segundo cenário, são estabelecidas ordens de preferência entre os macro-critérios, definindo o macro-critério “social” como prioridade frente ao “econômico” e “ambiental”. Os pesos dos subcritérios foram mantidos “ausentes”, variando completamente sem restrições.

No terceiro cenário, manteve-se a estrutura de peso “ausente” apenas para os pesos dos macro-critérios, mantendo o peso dos subcritérios “determinísticos” e igualmente divididos entre os subcritérios de cada macro-critério. Este cenário pode ser considerado o mais semelhante à configuração da literatura.

No quarto cenário de Florindo et al. (2020) (literatura), os pesos foram elicitados utilizando a ponderação probabilística, definindo diferentes cenários para representar possíveis variações de pesos. Conforme estabelecido, o peso de cada macro-critério varia entre 1% e 50%, à razão de 1%, resultando em 1,248 combinações possíveis. O peso atribuído em cada combinação para cada macro-critério foi distribuído proporcionalmente aos seus subcritérios. Desta forma, o peso dos subcritérios é sempre proporcional ao peso de seu macro-critério, e igual para todos os subcritérios de um mesmo macro-critério.

Apesar da estrutura hierárquica de critérios apresentada pelo problema, Florindo et al. (2020) analisa apenas o nível de sustentabilidade, considerando todos os cenários com pesos diferentes. Algumas métricas são definidas para analisar os resultados e o risco de definir a ordenação das alternativas. A primeira métrica é a probabilidade de cada alternativa estar em cada posição da ordenação, representada pelo número de vezes que a alternativa esteve nesta posição, dividido pelo número de cenários. Esta medida possui a mesma estrutura do RAI proposto pelo método SMAA e utilizado pelo VIKOR-HS.

Outras métricas utilizadas são a proporção de vezes que a primeira condição de aceitação do VIKOR foi respeitada quando a alternativa foi classificada em primeiro lugar e a proporção de vezes que a segunda condição de aceitação do VIKOR foi respeitada quando a alternativa foi classificada em primeiro lugar. Ambas as métricas possuem a mesma estrutura das medidas descritivas AAI e SI propostas no método VIKOR-HSMAA e utilizadas no *software* VIKOR-HS. Portanto, a fim de comparação, considera-se nesta tese que as medidas descritivas RAI, AAI e SI foram utilizadas na literatura. Como resultados, Florindo et al. (2020) analisa a variação de  $Q$ ,  $R$  e  $S$  e as medidas descritivas anteriormente citadas. Com base nos valores, define-se uma ordenação de sustentabilidade. Outro cenário de peso é proposto maximizando cada subcritério para aumentar a análise de risco.

## 5.4 Resultados e comparação para a sustentabilidade

O indicador “Toxicidade humana total” foi retirado da análise porque os sistemas não apresentavam toxicidade, sendo zero os valores de desempenho de todas as alternativas. Inicialmente, são apresentados os resultados das medidas descritivas para a posterior definição da solução de compromisso em cada cenário. A Tabela 5.2 apresenta os resultados do RAI na análise de sustentabilidade dos quatro cenários em relação à probabilidade de cada alternativa ser classificada em cada uma das quatro posições da ordenação.

**Tabela 5.2:** Resultados da comparação da probabilidade de cada alternativa se classificar em cada posição para a ordenação de sustentabilidade

Cenário	RAI	Sistema analisado			
		REF	SSP	SPF	RLP
1°	$b_i^1$	0.007	0.107	0.194	0.692
	$b_i^2$	0.085	0.397	0.371	0.147
	$b_i^3$	0.226	0.495	0.176	0.102
	$b_i^4$	0.682	0	0.259	0.059
2°	$b_i^1$	0.005	0.250	0.508	0.237
	$b_i^2$	0.111	0.234	0.312	0.343
	$b_i^3$	0.086	0.516	0.141	0.257
	$b_i^4$	0.798	0	0.040	0.162
3°	$b_i^1$	0	0.348	0	0.652
	$b_i^2$	0	0.652	0.276	0.072
	$b_i^3$	0.091	0	0.633	0.276
	$b_i^4$	0.909	0	0.091	0
4°	$b_i^1$	0	0.260	0	0.740
	$b_i^2$	0	0.740	0	0.260
	$b_i^3$	0	0	1	0
	$b_i^4$	0	0	0	1

Nota: REF = Sistema referência

SSP = Sistema com suplementação proteica

SPF = Sistema com pastagens fertilizadas

RLP = Rotação lavoura-pecuária.

A Tabela 5.3 apresenta o CWV para os macro-critérios e subcritérios para os cenários do VIKOR-HS (primeiro, segundo e terceiro). O sistema REF não ficou em primeiro lugar no terceiro cenário e portanto não apresenta valores de CWV. Esta alternativa obteve um RAI baixo no primeiro ( $b_{(REF)}^1 = 0.007$ ) e no segundo cenários ( $b_{(REF)}^1 = 0.005$ ). Para simplificação, o CWV do sistema REF não foi apresentado porque considerou-se que a alternativa REF não tem probabilidade significativa de ficar em primeiro lugar. Além disso, como os valores dos subcritérios foram determinísti-

cos no terceiro cenário, detalhou-se apenas o CWV dos macro-critérios para fins de comparação.

**Tabela 5.3:** CWV para os sistemas SSP, SPF e RLP nos três cenários do VIKOR-HS

Cenário	Sistema analisado	Macro-critério			Subcritério
		Ambiental ( $w_{(i)}^{(1)}$ )	Econômico ( $w_{(i)}^{(2)}$ )	Social ( $w_{(i)}^{(3)}$ )	
1°	SSP	0.240	0.193	0.567	Variável
	SPF	0.201	0.172	0.627	
	RLP	0.388	0.396	0.217	
2°	SSP	0.200	0.193	0.608	Variável
	SPF	0.165	0.168	0.667	
	RLP	0.243	0.254	0.503	
3°	SSP	0.208	0.189	0.603	Igualmente dividido
	SPF	0	0	0	
	RLP	0.404	0.407	0.188	

Nota: REF = Sistema referência

SSP = Sistema com suplementação proteica

SPF = Sistema com pastagens fertilizadas

RLP = Rotação lavoura-pecuária.

A Tabela 5.4 apresenta as medidas descritivas AAI e SI para os sistemas SSP, SPF e RLP.

**Tabela 5.4:** Vantagens de cada alternativa representadas pelas medidas descritivas AAI e SI referentes as condições de aceitação do VIKOR

Cenário	Sistema analisado	AAI ( $d_i$ )	SI ( $s_i$ )
1°	SSP	0.299	0.977
	SPF	0.382	0.982
	RLP	0.772	1
2°	SSP	0.373	0.994
	SPF	0.405	0.984
	RLP	0.403	1
3°	SSP	0.109	1
	SPF	-	-
	RLP	0.909	1
4th	SSP	0	1
	SPF	-	-
	RLP	0.878	1

Nota: REF = Sistema referência

SSP = Sistema com suplementação proteica

SPF = Sistema com pastagens fertilizadas

RLP = Rotação lavoura-pecuária.

Seguindo a proposta apresentada na Figura 3.3, forma-se a solução de compromisso. Começando com o primeiro cenário com pesos “ausentes” em todos os níveis

da hierarquia de critérios, todas as alternativas foram classificadas em primeiro lugar ( $b_{(REF)}^1 = 0.007$ ,  $b_{(SSP)}^1 = 0.107$ ,  $b_{(SPF)}^1 = 0.194$ , e  $b_{(RLP)}^1 = 0.692$ ). No entanto, o CWV (Tabela 5.3) indica diferentes prioridades de macro-critérios. Por exemplo, no primeiro cenário, as alternativas SSP e SPF têm maior peso para o “social” ( $w_{(SSP)}^{(3)} = 0.567$ ,  $w_{(SPF)}^{(3)} = 0.627$ ), com a ordem de prioridade: social  $\succ$  ambiental  $\succ$  econômico. O RLP tem maior peso para o “econômico” ( $w_{(RLP)}^{(2)} = 0.396$ ) e “ambiental” ( $w_{(RLP)}^{(1)} = 0.388$ ) seguindo o ordem: econômico  $\succ$  ambiental  $\succ$  social. Se forem considerados os macro-critérios “econômico” ou “ambiental” como prioridade, a alternativa RLP será a primeira alternativa selecionada para a solução de compromisso. Se for considerada a prioridade “social”, o SSP deve ser analisado, apesar de ter o segundo maior RAI.

A alternativa SPF apresenta valores mais discrepantes entre os pesos dos macro-critérios, com prioridade em torno de 60% para o “social” ( $w_{(SPF)}^{(3)} = 0.627$ ). Por outro lado, RLP apresenta menor discrepância entre valores, sendo melhor distribuídos entre “econômico” e “ambiental”. Considera-se que neste problema pesos melhor distribuídos seriam mais desejáveis. Desta forma, o RLP seria a primeira alternativa na solução de compromisso.

Como os subcritérios foram considerados variáveis no primeiro e segundo cenários, seus valores do CWV também poderiam ser considerados, optando-se pela alternativa com RAI diferente de zero que oferece prioridade aos subcritérios considerados mais importantes pelo decisor. No entanto, esta análise não será realizada aqui.

Em seguida, deve-se avaliar o AAI da primeira alternativa da solução de compromisso RLP. Se este valor for considerado aceitável, o RLP seria a única alternativa a fazer parte da solução. Se o AAI do RLP não for aceitável, o SPF com segundo maior RAI também será considerado na solução de compromisso. Neste estudo, considerou-se o valor do AAI superior a 0.7 e SI superior a 0.9 como mínimo aceitável. Portanto, o AAI do sistema RLP superior a este valor ( $d_{(RLP)} = 0.772$ ) coloca esta alternativa como a única na solução de compromisso. Como não existe uma segunda alternativa na solução de compromisso, o valor do SI não deve ser analisado.

No segundo cenário, todas as alternativas obtiveram RAI diferente de zero ( $b_{(RS)}^1 = 0.005$ ,  $b_{(SSP)}^1 = 0.250$ ,  $b_{(SPF)}^1 = 0.508$  e  $b_{(RLP)}^1 = 0.237$ ). O SPF possui maior probabilidade de ficar em primeiro lugar. Analisando o CWV, verifica-se que todas as alternativas apresentaram prioridade para o aspecto “social” ( $w_{(SSP)}^{(3)} = 0.608$ ,  $w_{(SPF)}^{(3)} = 0.667$ ,  $w_{(RLP)}^{(3)} = 0.503$ ), conforme definido na configuração do cenário. Além disso, todas as alternativas apresentaram valores semelhantes para os macro-critérios “econômico” e “ambiental”, com a alternativa RLP dando maior prioridade a esses macro-critérios ( $w_{(RLP)}^{(1)} = 0.243$ ,  $w_{(RLP)}^{(2)} = 0.254$ ) e SPF menos ( $w_{(SPF)}^{(1)} = 0.165$ ,  $w_{(SPF)}^{(2)} = 0.168$ ).

Considera-se que as diferenças entre os valores do CWV entre as alternativas não foram significativas. Portanto, o SPF, com maior probabilidade de ficar em primeiro

lugar (maior RAI), foi incluído como a primeira alternativa na solução de compromisso. Seu AAI ( $d_{(SPF)} = 0.405$ ), menor que 0.7, mostra que uma segunda alternativa, com o segundo maior RAI, deve ser considerada na solução de compromisso. Neste caso, o SSP juntamente com o SPF, fariam parte da solução de compromisso. Ao incluir uma segunda alternativa, o SI deve ser analisado para avaliar a possibilidade de considerar uma terceira alternativa na solução. O SI da alternativa SPF ( $s_{(SPF)} = 0.984$ ), superior a 0.9, mostra que não seria necessário considerar uma terceira alternativa na solução de compromisso.

Para o terceiro cenário, apenas as alternativas SSP e RLP ficaram em primeiro lugar ( $b_{(SSP)}^1 = 0.348$ ,  $b_{(RLP)}^1 = 0.652$ ). Analisando o CWV do RLP como a alternativa com maior probabilidade de ficar em primeiro lugar, a prioridade é dada ao “econômico” ( $w_{(RLP)}^{(2)} = 0.407$ ), seguido pelo “ambiental” ( $w_{(RLP)}^{(1)} = 0.404$ ) e “social” ( $w_{(RLP)}^{(3)} = 0.188$ ). Como no primeiro cenário, os resultados relativos aos pesos do RLP representam mais equilíbrio entre os macro-critérios e, por isso, RLP é a primeira alternativa a fazer parte da solução. O AAI desta alternativa ( $d_{(RLP)} = 0.909$ ) superior a 0.7 coloca apenas o RLP como solução de compromisso. Desta forma, o indicador SI não será considerado na solução.

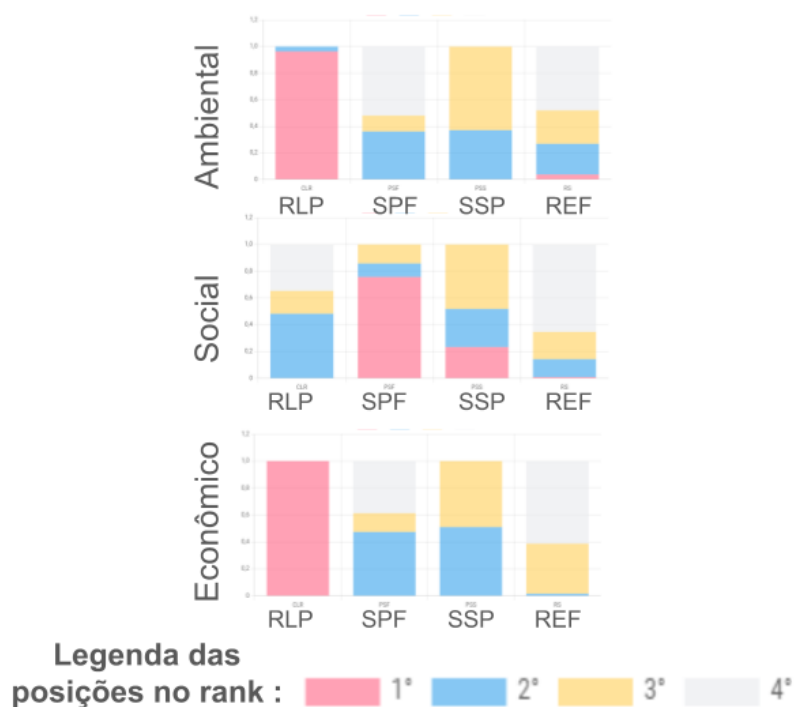
A literatura propõe o RLP como solução no quarto cenário. No entanto, pode-se analisar uma solução de compromisso com os respectivos indicadores e medidas descritivas do VIKOR-HS, porém, sem considerar o CWV, que não foi analisado no modelo proposto por Florindo et al. (2020). O RLP obteve maior RAI ( $b_{(RLP)}^1 = 0.740$ ) e, analisando seu AAI ( $d_{(RLP)} = 0.878$ ), RLP deve ser considerada a única alternativa na solução de compromisso, sem necessidade de avaliar o SI.

Analisando os resultados, o RLP esteve na solução de compromisso no primeiro, terceiro e quarto (literatura) cenários. Devido à hierarquia de critérios considerados no VIKOR-HS, é possível analisar classificações para todos os macro-critérios apresentada a seguir.

## 5.5 Resultados para os macro-critérios

Os pesos dos subcritérios foram definidos como “ausentes” para o primeiro e segundo cenários. Portanto, os resultados destes cenários apresentam a mesma variabilidade de classificação entre as iterações e os mesmos valores nas medidas descritivas. A Figura 5.3 apresenta os gráficos do VIKOR-HS com os valores de RAI para cada um dos macro-critérios nestes cenários.

Para o primeiro e segundo cenários na ordenação “ambiental” a alternativa RLP tem o maior RAI ( $b_{(RLP)}^1 = 0.961$ ). REF também tem RAI diferente de zero ( $b_{(RS)}^1 = 0.039$ ).



**Figura 5.3:** RAI para o 1° e 2° cenários para as dimensões de sustentabilidade

A Figura 5.4 apresenta os gráficos do CWV para estes cenários. Considera-se que o RLP apresenta valores de CWV visualmente mais equilibrados, sem priorizar de forma discrepante nenhum dos subcritérios. Dessa forma, o RLP será escolhido como a primeira alternativa a fazer parte da solução de compromisso. Seu AAI ( $d_{(RLP)} = 0.697$ ) pode ser considerado uma aproximação do valor definido como aceitável (0.7). Desta forma, não se deve incluir uma segunda alternativa na solução de compromisso, mantendo apenas o sistema RLP para a ordenação do “ambiental”.



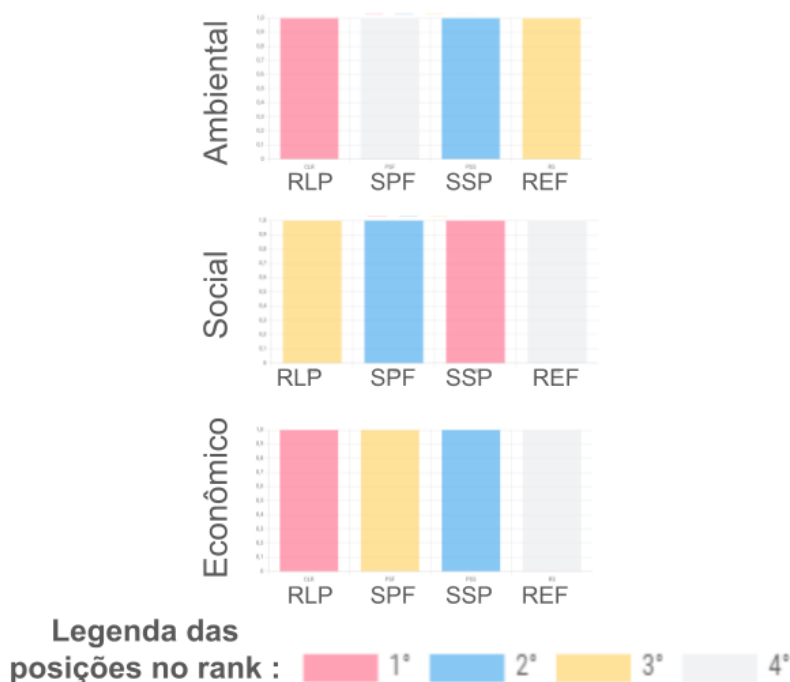
**Figura 5.4:** CWV para as dimensões de sustentabilidade nos cenários com variabilidade (1° e 2°) nos subcritérios do VIKOR-HS

Realizando a mesma análise para a ordenação “social”, tem-se RAI diferente de zero para SPF ( $b_{(SPF)}^1 = 0.767$ ), SSP ( $b_{(SSP)}^1 = 0.223$ ) e REF ( $b_{(REF)}^1 = 0.010$ ). Analisando

o CWV na Figura 5.4 percebe-se que o SPF tem uma distribuição visualmente mais equilibrada entre os subcritérios. Desta forma, o SPF foi selecionado como o primeiro sistema da solução de compromisso. Seu AAI ( $d_{(SPF)} = 0.881$ ) sugere que o SPF seja a única alternativa na solução de compromisso na ordenação “social”.

Para a ordenação “econômica” apenas o RLP possui RAI diferente de zero ( $b_{(RLP)}^1 = 1$ ). Isso significa que em todas as iterações, mesmo com variabilidade nos pesos dos subcritérios, esta alternativa ocupou a primeira posição. Desta forma, RLP é a única alternativa na solução de compromisso. Como nenhuma outra alternativa tem um RAI diferente de zero, os indicadores AAI e SI não devem ser analisados, pois nenhuma outra alternativa pode ser incluída na solução de compromisso.

Para o terceiro cenário não houve variação na probabilidade de cada alternativa obter determinada posição porque os pesos foram determinísticos. A Figura 5.5 apresenta o RAI para este cenário. Nesta avaliação são formadas ordenações para cada dimensão de sustentabilidade. Para a ordenação “ambiental” as alternativas foram classificadas na seguinte ordem do primeiro ao último sistema: RLP, RS, SPF e SSP. Para “social”, a ordenação da primeira para a quarta posição foi: SSP, SPF, RLP e RS. Para o macro-critério “econômico” a ordem foi: RLP, SSP, SPF e RS. Devido ao formato determinístico dos pesos, as demais medidas descritivas apresentam valores exatos, pois não há variabilidade nas classificações e, portanto, não contribuem para a tomada de decisão.



**Figura 5.5:** RAI para o terceiro cenário (3°) determinístico para as dimensões de sustentabilidade

## 5.6 Apoio a gestão

Com base em todas as informações proporcionadas, pode-se afirmar que o sistema de criação RLP tem robustez para ser selecionado o sistema de criação mais sustentável. O RLP possui vantagens por proporcionar maior capacidade de suporte animal por hectare sem a necessidade de utilização direta de fertilizantes. Além disso, sua estrutura permite a redução de custos de mecanização para plantio. No entanto, a eficiência operacional e econômica gera menos postos de trabalho e aumenta a complexidade do sistema.

O sistema RLP esteve em primeiro lugar na ordenação da maior parte dos cenários, demonstrando não só um bom desempenho mas também uma vantagem competitiva frente as demais alternativas, por ser nestes casos a única alternativa nas soluções de compromisso. No entanto, no cenário de priorização do macro-critério “social” e na ordenação deste macro-critério a alternativa não fez parte da solução de compromisso.

Para a definição de planos de melhoria das alternativas pode-se analisar a ordem de priorização dos pesos dada a cada critério. A estrutura do CWV atribui menores pesos aos critérios em que a alternativa apresenta pior desempenho, pois estes critérios tendem a diminuir as chances desta alternativa estar em primeiro na ordenação. Desta forma, a análise do CWV permite visualizar quais critérios devem ser priorizados em projetos de melhoria relacionados a alternativa.

Por exemplo, segundo a Tabela 5.3 RLP possui menor CWV para o macro-critério “social”. Analisando os valores da matriz de decisão da Tabela 5.1 é possível verificar que neste macro-critério a alternativa não possui boas avaliações, sendo desta forma coerente aos valores do CWV definidos. Assim, apesar de ser uma alternativa robusta, com valores elevados para as medidas descritivas do AAI e do SI, RLP deveria focar na dimensão “social” para melhorar o seu desempenho, pois se esta seja a prioridade na tomada de decisão, esta alternativa não será selecionada.

Ao analisar o desempenho das alternativas em cada macro-critério também é possível visualizar os subcritérios em que a alternativa poderia direcionar seus projetos de melhoria. Analisando o CWV para direcionar as melhorias em relação a ordenação “social” verifica-se pela Figura 5.4 que tanto a alternativa REF quanto SSP conferem maior prioridade ao subcritério “Complexidade do sistema”. Desta forma, qualquer um dos subcritérios “Qualificação da mão de obra”, “Geração de postos de trabalho” e “Partes interessadas” podem ser priorizados.

Nos casos em que a alternativa não foi posicionada em primeiro na ordenação em nenhuma iteração (RAI igual a zero), não é possível analisar seu CWV. Desta forma, outras análises referentes a comparação do desempenho da alternativa com as demais podem direcionar as melhorias. Por exemplo, analisando a dimensão “social” que deve

ser o foco da alternativa RLP. A Tabela 5.5 mostra os valores para esta alternativa em cada subcritério e em relação a alternativa que possui melhor desempenho.

**Tabela 5.5:** Valores de desempenho do sistema RLP e do melhor sistema em cada subcritério social

Subcritério social	Melhor alternativa	Avaliação da melhor alternativa	Avaliação do RLP	Proporção entre RLP e melhor alternativa
Geração de postos de trabalho	SPF	7.8409	6.0227	76.81%
Remuneração dos trabalhadores	SPF	8.0682	7.1591	88.73%
Qualificação da mão de obra	SPF	8.8636	7.3864	83.33%
Partes interessadas	SPF	9.4318	8.1136	86.02%
Complexidade do sistema	REF	6.25	9.2045	67.90%

Percebe-se que nos subcritérios “Remuneração dos trabalhadores” e “Partes interessadas” a alternativa RLP obteve melhor desempenho. Deve-se verificar a viabilidade de melhorias nestes critérios nos planos de desenvolvimento do sistema para aumentar seu desempenho “social”. Focando nos critérios em que a alternativa possui menos disparidade entre as demais aumenta suas chances de obter um melhor desempenho em avaliações futuras. O RLP tem menor proporção em relação a melhor alternativa nos subcritérios “Complexidade do sistema” e “Geração de postos de trabalho”. Estes podem ser os subcritérios de menor foco nos planos de melhoria.

Além de informações para o desenvolvimento de planos de melhoria, as ordenações e informações disponibilizadas podem auxiliar os gestores em problemas decisórios, como por exemplo, um produtor que esteja na dúvida de qual sistema adotar em sua criação de gado. Neste caso, a análise fornece uma base robusta para a escolha, mostrando o quanto a alternativa RLP é seguramente a melhor decisão em termos da sustentabilidade, economia e ambiental. Além disso, as análises mostram que, ao selecionar o sistema RLP os projetos de melhoria devem ser focados na área “social” para que o sistema se torne mais sustentável, focando mais especificamente nos subcritérios.

Outro cenário em que os dados fornecidos pelo VIKOR-HS neste estudo de caso poderiam auxiliar os gestores na tomada de decisão seria na definição dos critérios dos programas de incentivo à criação de gado que o estado do Mato Grosso do Sul possui. De acordo com o desempenho dos sistemas nas avaliações, os produtores que possuem o sistema RLP poderiam receber maiores incentivos como maiores verbas e melhores taxas para subsídios ou empréstimos. Desta forma, o governo consegue de forma eficiente aumentar a sustentabilidade do estado, incentivando que mais fazendas implementem meios de criação alinhados às práticas mais sustentáveis.

## 5.7 Comparação com a literatura e discussão

Em comparação com a literatura de Florindo et al. (2020) o VIKOR-HS apresenta adicionalmente a medida descritiva CWV. Apesar de possibilitar a formação da solução

---

de compromisso com os dados da literatura, a ausência do CWV confere menos confiabilidade na escolha da primeira alternativa. Além disso, o VIKOR-HS possibilitou uma quantidade superior de análises e iterações. Na literatura foram analisadas 1,248 iterações, enquanto no VIKOR-HS foram consideradas 10,000 iterações. O VIKOR-HS possibilita a análise de diferentes cenários alterando apenas alguns parâmetros do sistema. Desta forma, ele possibilita que de forma eficiente e com baixo custo computacional sejam fornecidas mais informações ao decisor. Com estes cenários, e tendo o modelo matemático VIKOR-HSMAA utilizado como base, o viés subjetivo inerente a tomada de decisão pode ser minimizado, conferindo maior segurança e assertividade na tomada de decisão.

Além de demandar menor esforço computacional para análises extensas de dados e cenários o VIKOR-HS apresentou outras vantagens. O detalhamento do desempenho das alternativas em cada macro-critério, junto a hierarquia fornecida pelo VIKOR-HS, permitiram direcionar os planos de melhoria dos sistemas. Assim, as informações fornecidas pelo *software* podem ser consideradas tanto no processo de definição da solução de compromisso quanto para melhorar a ordenação das alternativas em análises futuras.

Outra vantagem é a presença das medidas descritivas AAI e SI que podem ser utilizadas para a formação da solução de compromisso com mais de uma alternativa e para avaliar o risco em selecionar uma alternativa, mostrando sua vantagem sobre as demais.

Destaca-se também que a medida descritiva SI não foi considerada inferior ao desejado em nenhuma das análises. Este fato indica que esta medida descritiva pode ser significativa para o processo de tomada de decisão apenas se uma alternativa apresentar uma vantagem muito fraca ou se houverem muitas alternativas a serem comparadas, sendo necessários mais estudos para explorar estas possibilidades.

## Capítulo 6

# Estudo de caso em sustentabilidade

Este capítulo apresenta um estudo de caso da área de sustentabilidade para a aplicação do modelo proposto. São avaliadas no estudo de caso a sustentabilidade e suas dimensões econômica, social e ambiental dos 26 estados brasileiros e do Distrito Federal.

### 6.1 Apresentação do estudo de caso

A sustentabilidade tem surgido como tema central em diferentes campos de pesquisa (Paolotti et al., 2019). Importantes questões relacionadas a sustentabilidade referem-se a problemas como o aquecimento global e a pobreza, que têm sido constantemente discutidos pela mídia, governos e corporações. Estudos como o de Egilmez et al. (2015) usam indicadores públicos para comparar a sustentabilidade de cidades para fins de *benchmarking*, buscando fornecer comparações entre cidades e priorizar projetos e investimentos. Métodos de ordenação também são aplicados em Phillis et al. (2017) para avaliar cidades de acordo com características de sustentabilidade, com o objetivo de fornecer informações úteis para a tomada de decisão de políticos e outras partes interessadas na sustentabilidade urbana.

Outros estudos comparam regiões para subsidiar decisões sustentáveis em políticas públicas. O estudo de Boggia e Cortina (2010) classifica diferentes regiões da Itália para definir o apoio técnico e financeiro necessário em cada unidade visando aumentar a sustentabilidade do país. As regiões da Itália e da Espanha são comparadas em Paolotti et al. (2019), com o objetivo de fornecer informações para definir modelos de políticas e medidas específicas, observando a situação local das regiões e seus pontos fortes ou fracos em relação às diferentes dimensões da sustentabilidade.

Em um país grande como o Brasil, esses estudos são necessários para dar conta da complexa tarefa de subsidiar decisões de sustentabilidade em relação a projetos e recursos financeiros. Cada região do país tem necessidades diferentes em relação à saúde,

esgoto urbano, desemprego, acesso à água, coleta de lixo, educação, pobreza, entre outras. Portanto, é necessário analisar a sustentabilidade entre os estados, bem como cada dimensão da sustentabilidade, em qualquer decisão político-financeira governamental.

A aplicação do MCDA/M para avaliação de sustentabilidade de cidades, países e regiões tem sido aplicada nos últimos anos (Corrente et al., 2021), geralmente por meio de indicadores públicos e governamentais como subcritérios para mensurar as dimensões da sustentabilidade (de Cassia Feroni e Galvão, 2020). Para analisar a sustentabilidade entre os estados brasileiros, modelando a subjetividade na elicitação de peso e organizando os critérios hierarquicamente, aplica-se neste trabalho o método VIKOR-HSMAA por meio do *software* VIKOR-HS.

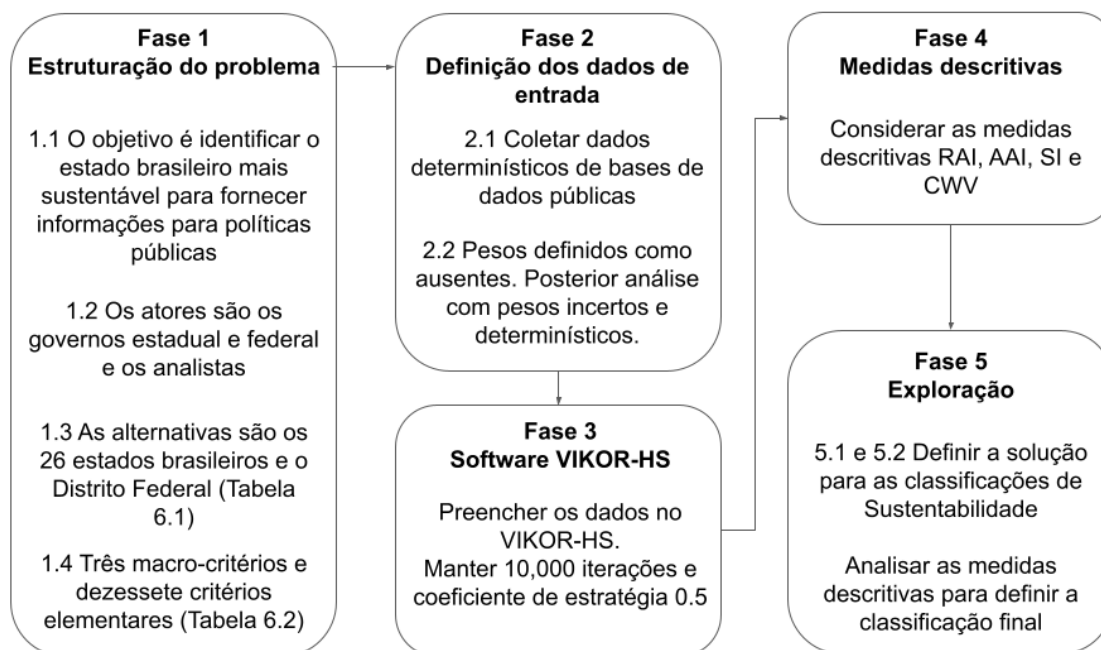
O método proposto, mostra-se adequado para este estudo de caso devido a três características importantes. Em primeiro lugar, a possibilidade de elicitação indireta dos pesos dos critérios minimiza a subjetividade na priorização de indicadores e dimensões, evitando viés no processo de tomada de decisão. Em segundo lugar, a aplicação do VIKOR-HS na avaliação da sustentabilidade dos estados possibilita a análise da sustentabilidade e suas dimensões, bem como a utilização de indicadores para avaliação dos estados em uma estrutura hierárquica. A terceira razão é que o VIKOR-HS fornece informações robustas sobre os estados com melhor desempenho em cada área, permitindo que a análise das melhores práticas seja disseminada e premiada. Além disso, as informações obtidas podem ser utilizadas para priorizar os estados com pior desempenho e orientar o direcionamento dos projetos a serem financiados com menos subjetividade.

A seguir, o estudo de caso é apresentado de acordo com as fases do VIKOR-HS ilustradas na Figura 4.2.

## 6.2 Aplicação do VIKOR-HS

A Figura 6.1 apresenta a modelagem do estudo de caso. Inicia-se a análise estruturando o problema de decisão (Fase 1). O objetivo do problema (etapa 1.1) é identificar os estados mais sustentáveis do Brasil a fim de fornecer informações para subsidiar o desenvolvimento de políticas públicas. Os atores envolvidos (etapa 1.2) são os governos estaduais, o governo federal e o analista (isto é, o modelador VIKOR-HS). A lista de alternativas (etapa 1.3) consiste em todas as 27 Unidades Federais do Brasil—os 26 estados brasileiros e o Distrito Federal—de cinco diferentes regiões, conforme apresentado na Tabela 6.1.

A estrutura hierárquica de critérios (etapa 1.4) é composta por três macro-critérios e dezessete critérios elementares (subcritérios), conforme apresentado na Tabela 6.2.



**Figura 6.1:** Estrutura do estudo de caso dos estados utilizando o algoritmo do VIKOR-HS

Os aspectos econômico, ambiental e social são definidos como macro-critérios, e a sustentabilidade como critério raiz. Os critérios elementares são definidos considerando indicadores públicos selecionados com base na literatura de estudos de caso semelhantes, conforme explicado a seguir.

O estudo conduzido por da Silva Rocha Paz et al. (2021) utiliza o TOPSIS para verificar o desempenho dos municípios brasileiros nas três dimensões da sustentabilidade para contribuir com a estratégia de investimento sustentável das organizações. Dezesesseis dos trinta e um indicadores selecionados a partir da revisão da literatura apresentada em da Silva Rocha Paz et al. (2021), são adotados neste estudo. A seleção foi realizada com o objetivo de reduzir a duplicidade de dados, como a análise múltipla de indicadores educacionais, que poderiam enviesar os resultados. Entre os indicadores selecionados está o índice de Gini, que é a principal medida de desigualdade de renda divulgada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). O Índice de Vulnerabilidade Social (SoVI) foi adicionado às análises econômicas por ser mais atual que o índice de Gini e considerar as dimensões de infraestrutura urbana, capital humano e renda e trabalho, refletindo de forma assertiva as disparidades do território brasileiro. O SoVI é amplamente utilizado para estudar as condições e características relacionadas à desigualdade social que torna uma comunidade mais vulnerável do que outras (Goto et al., 2022).

Para a definição dos dados de entrada (Fase 2) a definição do desempenho das alternativas (etapa 2.1) no nível elementar foi extraído do IBGE, do Instituto Nacional

**Tabela 6.1:** As alternativas da tomada de decisão: 27 Unidades Federativas do Brasil– os 26 estados brasileiros e o Distrito Federal– de cinco diferentes regiões

Estados	Regiões brasileiras
Acre (AC)	
Amapá (AP)	
Amazonas (AM)	
Pará (PA)	Norte
Rondônia (RO)	
Roraima (RR)	
Tocantins (TO)	
Alagoas (AL)	
Bahia (BA)	
Ceará (CE)	
Maranhão (MA)	
Paraíba (PB)	Nordeste
Pernambuco (PE)	
Piauí (PI)	
Rio Grande do Norte (RN)	
Sergipe (SE)	
Espírito Santo (ES)	
Minas Gerais (MG)	Sudeste
Rio de Janeiro (RJ)	
São Paulo (SP)	
Paraná (PR)	
Rio Grande do Sul (RS)	Sul
Santa Catarina (SC)	
Distrito Federal (DF)	
Goiás (GO)	Centro-oeste
Mato Grosso do Sul (MS)	
Mato Grosso (MT)	

de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira (INEP) e do Instituto de Pesquisa Econômica (IPEA). Os pesos dos critérios (etapa 2.2) foram considerados como dados “ausentes” na análise principal para evitar viés e fornecer uma solução mais confiável e robusta. Outras análises menos aprofundadas com pesos “incertos” e “determinísticos” serão realizadas.

Uma vez estruturado o problema de decisão e definidos os dados de entrada, o *software* VIKOR-HS pode ser utilizado (Fase 3) para avaliar a sustentabilidade dos estados brasileiros. Foram mantidas as configurações iniciais de 10,000 iterações e “coeficiente de estratégia” ( $v$ ) de 0.5. Os dados foram preenchidos no sistema e submetidos para a análise.

As medidas descritivas (Fase 4) são apresentadas pelo VIKOR-HS e no caso da análise com pesos ausentes todas as medidas devem ser consideradas para a tomada de decisão. A próxima fase (Fase 5) é a fase de Exploração na qual os resultados são apresentados e discutidos para tomada de decisões finais (etapa 5.1) e definição de

**Tabela 6.2:** Árvore de critérios para a avaliação da sustentabilidade dos estados

Critério raiz	Macro-critérios	Critérios elementares	Função
Sustentabilidade	Econômico	Pobreza extrema	Min
		Gini Index	Min
		Rendimento familiar mensal nominal per capita	Max
		Social Vulnerability Index (SoVI)	Min
	Ambiental	Acesso a água	Max
		Emissões de $CO_2$	Min
		Coleta de lixo	Max
		Esgoto urbano	Max
	Social	Acesso a electricidade	Max
		Taxa de mortalidade infantil	Min
		Taxa de analfabetismo	Min
		Acesso a internet	Max
		Expectativa de vida	Max
		Matrículas no Ensino Fundamental	Max
		Municipal Human Development Index (MHDI)	Max
		Taxa de desemprego	Min
Número de leitos hospitalares	Max		

planos de melhoria (etapa 5.2). A fase de exploração é apresentada na próxima seção.

### 6.3 Resultados

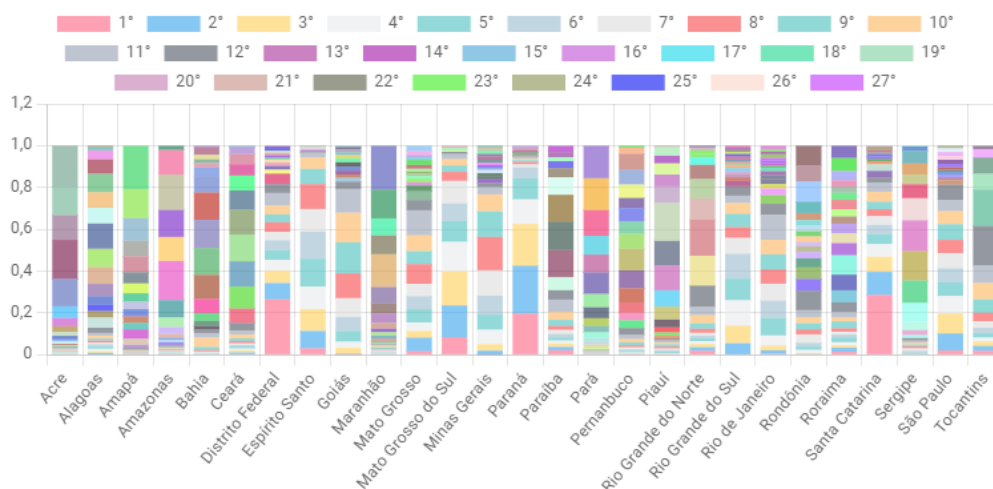
Considerando os resultados, o governo deve implementar ações de melhoria para aumentar o nível de sustentabilidade ou elevar a diferença do seu estado para os demais. O governo de cada estado pode observar as dimensões e indicadores com as piores avaliações para elaborar planos de melhorias. Os estados e o governo federal também podem analisar os estados com potencial para *benchmarking* em áreas em que a gestão estadual apresenta maiores dificuldades. Os resultados também podem subsidiar a complexa tarefa de gerenciar a distribuição de recursos para resolver problemas econômicos, ambientais e sociais, atendendo às necessidades específicas de cada região.

As classificações para econômico, ambiental, social e para o critério raiz sustentabilidade podem ser definidas de acordo com as informações das medidas descritivas. São apresentados pelo *software* gráficos para todas as medidas descritivas. A Figura 6.2 apresenta o gráfico para o RAI a nível da sustentabilidade.

O RAI ( $b_i^1$ ) detalhado para a primeira posição, AAI ( $d_i$ ) e SI ( $s_i$ ) para os níveis do critério raiz (sustentabilidade) e macro-critérios são apresentados na Tabela 6.3. Outra informação fornecida pelo VIKOR-HS é o CWV de macro e subcritérios, que são apresentados na Tabela 6.4 para a ordenação de sustentabilidade. Nas Tabelas 6.5, 6.6 e 6.7 apresentam-se o CWV referente as classificações dos macro-critérios.

Os CWV dos macro-critérios, quando analisados individualmente, não são os mes-

## Rank Acceptability Index - Roof



**Figura 6.2:** RAI para a sustentabilidade no VIKOR-HS

mos de quando todos os critérios são considerados em conjunto. Como a ordenação de sustentabilidade é baseada em três macro-critérios, nem todas as iterações em que uma alternativa ocupa o primeiro lugar em uma ordenação de macro-critério resultará na alternativa sendo a primeira na ordenação geral de sustentabilidade. O oposto também pode ser observado. Uma alternativa pode ficar em primeiro lugar em uma iteração na ordenação geral de sustentabilidade e pode não estar na ordenação de um macro-critério individual. Dessa forma, os pesos médios, representados pelo CWV que fazem uma determinada alternativa ser classificada em primeiro lugar na ordenação geral do critério raiz não é igual ao CWV para as ordenações dos macro-critérios. Em resumo, para analisar a ordenação da sustentabilidade, devem ser analisados os pesos apresentados na Tabela 6.4; para analisar as ordenações obtidas considerando cada macro-critério, os pesos nas Tabelas 6.5, 6.6 e 6.7 serão analisados.

Com base nos resultados, as seguintes observações podem ser feitas:

- Sustentabilidade: O principal objetivo é identificar os estados mais sustentáveis do Brasil (Tabela 6.3). Para isso, analisam-se os resultados no nível do critério raiz sustentabilidade, que fornece a ordenação de sustentabilidade dos estados brasileiros. Os estados de AP, PA, RO, BA, SE e GO não ficaram em primeiro lugar em nenhuma iteração (RAI iguais a zero); isso significa que esses estados não ocupam o primeiro lugar na ordenação dos estados mais sustentáveis, independentemente da combinação de pesos de critérios adotada. Os estados de SC, DF, PR, MS e ES são os cinco estados com maior probabilidade de ocupar o primeiro lugar. O RAI é particularmente maior para SC ( $b_{(SC)}^1 = 0.281$ ), DF ( $b_{(DF)}^1 = 0.270$ ) e PR ( $b_{(PR)}^1 = 0.201$ ). Considera-se o CWV desses estados para

**Tabela 6.3:** Resultados para o RAI ( $b_i^1$ ) para a primeira posição, AAI ( $d_i$ ) e SI ( $s_i$ ) para os níveis do critério raiz e dos macro-critérios

Estados	Ambiental			Social			Econômico			Sustentabilidade		
	$b_i^1$	$d_i$	$s_i$	$b_i^1$	$d_i$	$s_i$	$b_i^1$	$d_i$	$s_i$	$b_i^1$	$d_i$	$s_i$
AC	0	0	0	0.030	0.726	0.855	0	0	0	0.003	0.630	1
AP	0	0	0	0.001	0.231	0.615	0	0	0	0	0	1
AM	0.006	0	1	0	0	1	0	0	0	0.001	0.333	1
PA	0	0	0	0.001	0.200	0.800	0	0	0	0	0	1
RO	0	0	0	0.001	0	0.800	0	0	0	0	0	1
RR	0.521	0.630	0.990	0.003	0.387	0.806	0	0	0	0.015	0.389	0.973
TO	0	0	0	0.066	0.495	0.781	0	0	0	0.020	0.505	0.970
AL	0	0	1	0.008	0.024	0.651	0	0	0	0.002	0.087	0.957
BA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
CE	0	0	0	0.029	0.293	0.517	0	0	0	0.003	0.200	0.867
MA	0	0	0	0.027	0.704	0.798	0	0	0	0.001	0.455	1
PB	0	0	0	0.062	0.446	0.865	0	0	0	0.020	0.414	0.939
PE	0	0	0	0.013	0.448	0.992	0	0	0	0.001	0.800	1
PI	0	0	0	0.002	0.111	0.833	0	0	0	0	0	1
RN	0	0	0	0.050	0.570	0.782	0	0	0	0.017	0.402	0.948
SE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ES	0.008	0	0.922	0.056	0.129	0.265	0	0	0	0.029	0.174	0.962
MG	0	0	0	0.001	0	0.286	0	0	0	0.001	0	0.667
RJ	0	0	1	0.011	0.133	0.973	0	0	0	0.005	0.271	0.979
SP	0.176	0.351	0.999	0	0	1	0	0	0	0.019	0.111	0.979
PR	0.039	0	0.912	0.027	0.316	0.540	0	0	0	0.201	0.495	0.958
RS	0	0	0	0.001	0	0.833	0	0	0	0.003	0	1
SC	0	0	0	0.146	0.540	0.990	0.839	0.964	1	0.281	0.734	0.997
DF	0.210	0.422	0.985	0.312	0.645	0.975	0.162	0.868	0.959	0.270	0.714	0.994
GO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
MS	0.039	0	0.753	0.082	0.514	0.529	0	0	0	0.089	0.573	0.961
MT	0	0	0	0.073	0.423	0.753	0	0	0	0.019	0.419	0.984

tomar a decisão final sobre qual deles deve ser selecionado primeiro. Ao analisar a Tabela 6.4, verifica-se que para SC o macro-critério econômico recebe o maior valor de peso, seguido de social e ambiental. Portanto, dada esta ordem de importância entre os macro-critérios (econômico  $\succ$  social  $\succ$  ambiental), SC ficaria em primeiro lugar, o que significa que SC é o estado mais sustentável do Brasil. Por outro lado, se o critério ambiental for priorizado, seguido de social e econômico, então DF e PR são os estados mais sustentáveis. Para identificar qual desses dois estados é o mais sustentável, pode-se também analisar o CWV dos critérios do próximo nível (subcritérios dos macro-critérios). A título de exemplo, pode-se analisar a dimensão econômica, observando o CWV de seus subcritérios (também apresentados na Tabela 6.4). Se o critério “Renda Nominal per Capita” for priorizado ( $w_{(DF)}^{(1,3)} = 0.376$ ) entre os demais subcritérios do nível econômico, então DF ocupa o primeiro lugar. Por outro lado, se o critério “índice SoVI” for considerado o mais importante, então PR ocupa o primeiro lugar. Pode-se, por exemplo, considerar o RAI e o CWV do PR os mais coerentes com a tomada de

**Tabela 6.4:** CWV para os macro-critérios e subcritérios considerando a ordenação de Sustentabilidade

Estados	Macro-critério			Subcritérios Econômicos			
	Econômico	Ambiental	Social	Pobreza extrema	Gini Index	Rendimento familiar mensal per capita	SoVI
SC	0.519	0.207	0.274	0.223	0.307	0.190	0.280
DF	0.274	0.403	0.323	0.279	0.148	0.376	0.197
PR	0.293	0.407	0.301	0.257	0.274	0.184	0.285
MS	0.246	0.331	0.423	0.254	0.256	0.227	0.263
ES	0.186	0.400	0.414	0.276	0.264	0.164	0.295
Estado	Subcritérios Ambientais			Subcritérios Sociais			
	Acesso a água	Emissões de CO2	Coleta de lixo	Esgoto urbano	Acesso a eletricidade	Taxa de mortalidade infantil	Taxa de analfabetismo
SC	0.269	0.272	0.280	0.179	0.092	0.125	0.117
DF	0.242	0.293	0.201	0.264	0.091	0.114	0.107
PR	0.244	0.158	0.243	0.354	0.115	0.104	0.115
MS	0.244	0.234	0.292	0.231	0.092	0.090	0.109
ES	0.187	0.339	0.297	0.177	0.152	0.145	0.116
Estado	Subcritérios Sociais						
	Acesso a internet	Expectativa de vida	Matrículas no ensino fundamental	MHDI	Taxa de desemprego	Número de leitos hospitalares	
SC	0.116	0.098	0.132	0.113	0.089	0.118	
DF	0.133	0.100	0.090	0.119	0.135	0.111	
PR	0.105	0.079	0.128	0.112	0.126	0.114	
MS	0.089	0.238	0.116	0.097	0.079	0.090	
ES	0.090	0.080	0.080	0.090	0.149	0.099	

**Tabela 6.5:** CWV para os subcritérios do macro-critério Social

Estados	Acesso a eletricidade	Mortalidade infantil rate	Taxa de analfabetismo	Acesso a internet	Expectativa de vida	Matrículas no ensino fundamental	IDH	Taxa de desemprego	Número de leitos hospitalares
DF	0.065	0.114	0.106	0.169	0.076	0.063	0.133	0.160	0.114
SC	0.053	0.164	0.122	0.101	0.065	0.215	0.113	0.044	0.122
MS	0.055	0.109	0.143	0.100	0.208	0.128	0.101	0.074	0.080
MT	0.118	0.057	0.106	0.086	0.121	0.188	0.068	0.178	0.077
TO	0.122	0.066	0.071	0.096	0.207	0.121	0.131	0.066	0.119
PB	0.293	0.066	0.114	0.062	0.085	0.067	0.142	0.075	0.096
ES	0.134	0.183	0.135	0.078	0.054	0.085	0.094	0.141	0.096

**Tabela 6.6:** CWV para os subcritérios do macro-critério Econômico

Estado	Pobreza extrema	Gini Index	Rendimento familiar mensal nominal per capita	SoVI
SC	0.254	0.280	0.191	0.276
DF	0.246	0.084	0.547	0.123

**Tabela 6.7:** CWV para os sub-critérios do macro-critério Ambiental

Estado	Acesso a água	Emissões de CO2	Coleta de lixo	Esgoto urbano
RR	0.257	0.365	0.225	0.153
DF	0.243	0.187	0.107	0.464
SP	0.238	0.037	0.369	0.356
PR	0.336	0.088	0.367	0.210
MS	0.246	0.106	0.600	0.048
ES	0.057	0.203	0.679	0.061
AM	0.114	0.810	0.062	0.014

decisão. Para definir se um segundo estado deve ser considerado tão sustentável quanto o PR, verifica-se o AAI do PR:  $d_{(PR)} = 0.495$ . Este valor menor que 0.7 significa que um segundo estado deve ser considerado com PR na solução de compromisso. O estado de SC tem o maior RAI restante e também deve estar na solução de compromisso neste caso. O SI de PR, com valor em torno de 1 ( $s_{(PR)} = 0.958$ ), revela que a solução de compromisso não precisa considerar um terceiro estado como parte dos estados mais sustentáveis. Por outro lado, se forem considerados o RAI e o CWV de SC os mais adequados para este problema, SC é considerada a primeira alternativa. O AAI de SC ( $d_{(SC)} = 0.734$ ) com valor superior a 0.7, significa que SC deve ser considerado sem um segundo ou terceiro estado na solução de compromisso. Para esse problema, considerou-se SC isoladamente como o estado mais sustentável do Brasil e este estado pode ter suas práticas analisadas para serem implementadas em outros estados.

- **Nível Social:** Considerando os três aspectos da sustentabilidade, o social apresentou a menor discrepância entre os estados. Os estados DF, SC, MS e MT tiveram maior RAI e são mais propensos a alcançar a primeira posição ( $b_{(DF)}^1 = 0.312$ ,  $b_{(SC)}^1 = 0.146$ ,  $b_{(MS)}^1 = 0.082$ ,  $b_{(MT)}^1 = 0.073$ ). Os estados TO, PB e ES também têm probabilidades maiores que 5% de ocupar o primeiro lugar. Considerando o CWV da Tabela 6.5, se o subcritério “Expectativa de vida” for considerado prioritário, MS deve ser a primeira alternativa. O AAI ( $d_{(MS)} = 0.514$ ) mostra que uma segunda alternativa deve ser considerada na solução de compromisso, que neste caso é o DF, pois possui o maior RAI remanescente. O SI de MS ( $s_{(MS)} = 0.529$ ) com valor menor que 0.9 mostra que uma terceira alternativa também deve estar na solução. A alternativa com o maior RAI que ainda não está na solução é SC. Portanto, se MS for selecionado como o primeiro estado, a solução de compromisso será formada por MS, DF e SC. Por outro lado, se for assumido grau de importância semelhante entre os subcritérios da dimensão social em relação ao CWV, então o DF é a melhor alternativa. Considerando DF como o estado com peso mais razoável, seu AAI ( $d_{(DF)} = 0.645$ ) sugere considerar uma segunda alternativa na solução. O estado com o próximo RAI mais alto é SC, que deve estar na solução de compromisso. O SI do DF em torno de um ( $s_{(DF)} = 0.975$ ) mostra que não há necessidade de considerar uma terceira alternativa na solução. DF e SC são os estados da solução de compromisso nesta ordenação.
- **Nível Econômico:** Ao considerar apenas a dimensão econômica, com base nos resultados apresentados da Tabela 6.3, os estados DF e SC são os únicos com probabilidades diferentes de zero de ocupar o primeiro lugar ( $b_{(SC)}^1 = 0.839$ ,

$b_{(DF)}^1 = 0.162$ ). De acordo com o CWV na Tabela 6.6, se o “Índice de Gini” for considerado o subcritério prioritário, SC deve ficar em primeiro lugar. Se o “Rendimento familiar mensal nominal” for considerado prioritário, o DF ocupa o primeiro lugar. No entanto, para o DF o peso atribuído ao “Rendimento familiar mensal nominal” é muito maior ( $w_{(DF)}^{(1.4)} = 0.547$ ) que os pesos atribuídos aos demais critérios, representando mais de 50% da importância entre todos os critérios. SC apresenta pesos mais equilibrados. Para este estudo, definiu-se os pesos mais equilibrados como os mais adequados e, portanto, o estado de SC é selecionado como primeira alternativa. Considerando o AAI ( $d_{(SC)} = 0.964$ ), SC apresenta resultados estáveis e pode ser considerado isoladamente como a solução de compromisso na ordenação econômica. Os resultados do RAI mostram a disparidade econômica entre os estados devido à concentração de renda. O desempenho de SC na ordenação econômica também reforça o alto CWV na ordenação sustentabilidade para o macro-critério econômico, mostrando o destaque do estado de SC nesta dimensão.

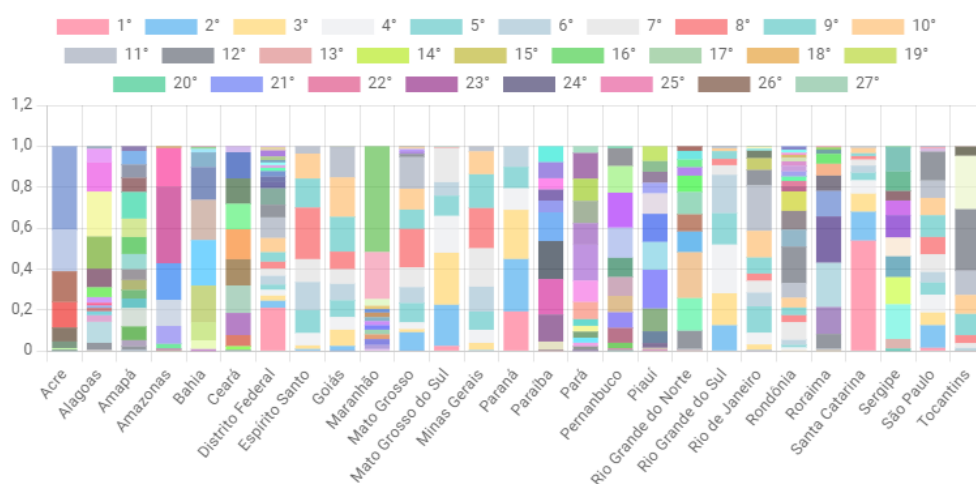
- Nível Ambiental: RR, DF, SP, PR, MS, ES e AM são os estados com probabilidades diferentes de zero de alcançar a primeira posição na ordenação ( $b_{(RR)}^1 = 0.521$ ,  $b_{(DF)}^1 = 0.210$ ,  $b_{(SP)}^1 = 0.176$ ,  $b_{(PR)}^1 = 0.039$ ,  $b_{(ES)}^1 = 0.008$ ,  $b_{(AM)}^1 = 0.006$ ) ao considerar apenas a dimensão ambiental. Analisando o CWV na Tabela 6.7, se o subcritério “Emissões de  $CO_2$ ” tiver maior prioridade, RR ou AM estariam em primeiro lugar. Mas no caso do AM, o peso dado às “Emissões de  $CO_2$ ” é muito maior ( $w_{(AM)}^{(2.2)} = 0.810$ ) do que os pesos dados aos outros critérios, representando cerca de 80% da importância entre todos os critérios. No caso do estado RR, o peso atribuído às “Emissões de  $CO_2$ ” ( $w_{(RR)}^{(2.2)} = 0.365$ ), apesar de também ser o maior peso, representa apenas 30% da importância entre todos os critérios, ou seja, no caso do RR, a importância é mais distribuída entre todos os critérios. Para este estudo, considerou-se RR como o estado com pesos mais aceitáveis e, considerando seu AAI ( $d_{(RR)} = 0.521$ ) e SI ( $s_{(RR)} = 0.990$ ), o estado de RR deve ser considerado com um segundo estado como solução de compromisso, devido ao valor de AAI. Além de RR, o segundo estado com melhor RAI é DF, portanto, RR e DF podem ser considerados como a solução de compromisso.

Os resultados mostram que, em primeiro lugar, a agregação final em relação ao critério raiz sustentabilidade, fornecida pelo método proposto, contribui para a análise geral das alternativas em uma única ordenação, o que permite a comparação geral dos estados para fins de *benchmarking*. Além disso, por meio da análise aqui realizada, pode-se perceber que diferentes estados se destacam como os mais sustentáveis dependendo da dimensão da sustentabilidade considerada (econômica, ambiental e so-

cial). Essa análise só é possível devido à abordagem MCHP selecionada que permite decompor a avaliação dos estados no critério raiz em avaliações de macro-critérios, possibilitando verificar quais apresentaram bom desempenho e quais precisavam ser melhorados. Pode-se observar que a aplicação do SMAA possibilita a decisão do peso após a análise dos resultados. As medidas descritivas forneceram informações sobre a prioridade de peso que pode colocar cada estado em primeiro lugar e informações para definir as alternativas para uma solução de compromisso adequada, fornecendo informações importantes para o processo de tomada de decisão.

Após realizar esta análise usando pesos de critérios ausentes, tem-se a possibilidade de realizar uma segunda análise assumindo informações de preferência ordinal com base nos resultados da primeira análise, o que aumentará a robustez dos resultados. Para fazer essa análise no estudo de caso, considerou-se a prioridade de peso observada para o estado de SC (que ocupa o primeiro lugar na ordenação sustentabilidade) como prioridade ordinal para os macro-critérios. Com essa configuração, o RAI para SC aumentou de 0.281 para 0.582. Para este cenário, o RAI do DF é 0.182 e PR 0.118. A Figura 6.3 apresenta o gráfico do RAI apresentado pelo VIKOR-HS. AAI para SC aumentou de 0.734 para 0.824 e SI de 0.997 para 1. Desta forma, observa-se que considerando uma preferência ordinal compatível com o estado de SC, as medidas descritivas deste estado melhoram significativamente, aumentando a robustez da escolha deste estado como primeiro colocado.

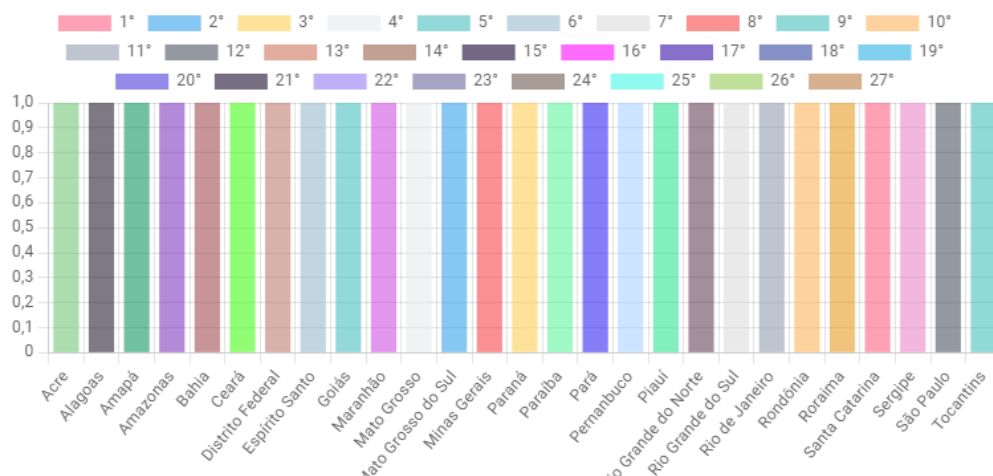
### Rank Acceptability Index - Roof



**Figura 6.3:** RAI para a sustentabilidade no cenário impreciso do VIKOR-HS

Outro cenário possível é considerar pesos determinísticos com os valores do CWV para o estado de SC. Aplicando o VIKOR-HS com esses pesos determinísticos, cada estado fica em uma posição na ordenação final, conforme apresentado na Tabela 6.8. A Figura 6.4 apresenta o gráfico gerado pelo VIKOR-HS para esta configuração.

## Rank Acceptability Index - Roof



**Figura 6.4:** RAI para a sustentabilidade no cenário determinístico do VIKOR-HS

**Tabela 6.8:** Ordenação final considerando o CWV do estado de SC como peso determinístico

Posição	Estado	Posição	Estado
1°	SC	15°	RN
2°	MS	16°	CE
3°	PR	17°	RR
4°	RS	18°	PA
5°	MT	19°	BA
6°	GO	20°	PI
7°	ES	21°	AL
8°	MG	22°	SE
9°	TO	23°	AP
10°	RJ	24°	AM
11°	SP	25°	PE
12°	RO	26°	MA
13°	DF	27°	AC
14°	PB		

Essa ordenação final mostra que os estados do Sul do país obtiveram a melhor posição, seguidos pelo Centro-oeste e Sudeste. Os estados do Nordeste e do Norte ficaram nas piores posições. Esse resultado mostra a grande variação nas dimensões da sustentabilidade entre as regiões do país. Ao priorizar a dimensão econômica, fica evidente na ordenação as deficiências das regiões Norte e Nordeste na área financeira, sendo a economia também importante para a dimensão social.

As boas práticas dos estados do Sul e Centro-Oeste podem ser compartilhadas para adaptação em outras regiões do país. Como o Brasil é um país grande (quarto maior do mundo em território), estados com características semelhantes, em termos de clima, vegetação e cultura, podem ser comparados para o intercâmbio de boas práticas de

gestão e aprimoramento da sustentabilidade. Por exemplo, alguns estados do norte como TO (nono) e RO (décimo segundo) obtiveram melhores posições do que outros estados do Norte na ordenação determinística da Tabela 6.8. As boas práticas de sustentabilidade aplicadas nesses estados podem servir de base para melhorias nos demais estados da região.

## 6.4 Apoio a gestão e discussão

As informações fornecidas pelo VIKOR-HS neste estudo de caso podem também ser utilizadas no suporte à tomada de decisão de gestores e governos. Um exemplo, seria o suporte a criação de um programa de incentivo ao aumento da sustentabilidade pelo governo federal. Neste caso, os critérios e a estrutura hierárquica do VIKOR-HS poderiam ser a base da avaliação dos estados. O governo poderia definir premiações aos estados que melhorem seu desempenho em avaliações periódicas. Ao fim da avaliação, além da premiação, poderiam ser destrinchados os macro-critérios e subcritérios que deveriam ser foco dos estados para a avaliação futura.

Analisar o objetivo alvo do critério raiz (sustentabilidade) com os macro-critérios possibilitou verificar as discrepâncias entre as dimensões de sustentabilidade que poderiam ficar ocultas caso a análise não considerasse esta hierarquia, analisando apenas a sustentabilidade. Verifica-se por exemplo que a maior parte dos estados não tem um bom desempenho no “econômico” e que este deve ser o foco de melhoria geral no caso da avaliação pelo governo federal. No caso de uma política de incentivo, deve-se focar nesta dimensão de sustentabilidade, oferecendo melhores retornos financeiros aos estados que melhorarem seu desempenho neste aspecto.

Outro exemplo de suporte a tomada de decisão fornecida pela aplicação seria no caso do investimento de um orçamento limitado pelo governo estadual para a melhoria da sustentabilidade no estado. Por exemplo, considerando que o estado do ES deseja realizar um investimento para aumentar sua sustentabilidade. Analisando seu desempenho em relação ao CWV da avaliação de sustentabilidade (Tabela 6.4), verifica-se que menor prioridade foi dada ao macro-critério “econômico”. Desta forma, este deve ser o macro-critério prioritário para os planos de melhoria.

Analizando o CWV do macro-critério “econômico” (Tabela 6.4) percebe-se que menor prioridade foi dada ao subcritério “Rendimento familiar per capita”. Desta forma, este deve ser o critério priorizado nos planos de melhoria, avaliando os projetos relacionados a este critério de maior retorno em vista aos valores investidos. No caso deste critério, pode-se verificar estados que possam servir de *benchmarking* para as melhorias, apresentando boas práticas de gestão. Em relação ao subcritério “Rendimento

familiar per capita” pode-se verificar pela Tabela 6.4 que o DF priorizou este subcritério, apresentando maior CWV. Esta priorização do CWV indica que DF obteve bom desempenho neste aspecto e pode servir de *benchmarking* com boas práticas na área para que o estado do ES possa melhorar seu desempenho.

Verifica-se neste estudo que o VIKOR-HS, com sua estrutura hierárquica e possibilidades de elicitação de critérios, facilitou a análise com um maior volume de alternativas, o que poderia naturalmente dificultar o processo decisório. Poder analisar diferentes cenários, ordenações em todos os níveis e a obtenção das medidas descritivas embasam o decisor para avaliar os diferentes aspectos da sustentabilidade. Com o VIKOR-HS, pôde-se avaliar diferentes cenários com relativamente pouco esforço do analista ou decisor.

A medida descritiva SI não foi válida na definição da maior parte das ordenações, indicando a necessidade de uma avaliação de seu valor de referência ou da sua real contribuição para a tomada de decisão. As demais medidas descritivas foram consideradas em todas as análises, contribuindo de forma significativa para a formação da solução de compromisso.

A estrutura do método proposto nesta tese, que considera uma, duas ou três alternativas na solução de compromisso foi válida neste estudo de caso, principalmente nas avaliações em que não há grande vantagem entre as alternativas. A estrutura formada pelas medidas descritivas proporciona ao decisor a avaliação da vantagem que a alternativa com maior probabilidade de ser a primeira na ordenação possui comparada a outras alternativas. Caso a alternativa não possua esta vantagem aceitável, fica claro para o decisor que mesmo que esta seja a primeira da ordenação, ou a alternativa escolhida, a robustez desta decisão é baixa e a alternativa possui vulnerabilidade em seu resultado caso os parâmetros de desempenho sejam alterados. Esta informação pode ser decisiva para o problema em análise e para os projetos de melhoria a serem implementados.

## Capítulo 7

# Conclusão e Trabalhos Futuros

Neste documento, é introduzido o método VIKOR-HSMAA e o *software* VIKOR-HS. O método VIKOR-HSMAA é uma integração entre as metodologias VIKOR, SMAA e uma variação do método original MCHP. O *software* VIKOR-HS é um sistema que baseia-se no modelo VIKOR-HSMAA com interfaces amigáveis e algumas limitações para simplificação de utilização ao usuário.

O método VIKOR-HSMAA contribui para a literatura com a definição de uma abordagem hierárquica e incerteza nas informações utilizando o método VIKOR. Além disso, foram propostas as medidas descritivas AAI e SI que possibilitam manter a proposta original do VIKOR com a avaliação da solução de compromisso com mais de uma alternativa. Além de manter a estrutura do VIKOR, as medidas propostas possibilitam a visualização da robustez da alternativa, mostrando o quanto de vantagem ela apresentou em relação as demais alternativas e o quão confiável seria a sua escolha. Desta forma, o método VIKOR-HSMAA ressalta os casos em que a diferença entre os resultados das alternativas não confere confiabilidade suficiente para o decisor. Além destas medidas descritivas, o método VIKOR-HSMAA utiliza o RAI, CF e CWV do SMAA, que permitem a análise detalhada do desempenho das alternativas para a formação da solução de compromisso e minimização do viés do processo decisório.

O *software* VIKOR-HS inova na disponibilização de um sistema de fácil utilização com hierarquia de critérios e incerteza nas informações referentes aos pesos dos critérios. O VIKOR-HS facilita a aplicação do modelo de tomada de decisão e permite realizar de forma prática diferentes cenários, alterando a configuração do problema e fornecendo mais informações ao decisor. O sistema possui flexibilidade para modelar problemas com diferentes formatos, como dados quantitativos e qualitativos. Com o VIKOR-HS é possível analisar os valores e gráficos das medidas descritivas RAI, AAI, SI e CWV, tanto para o nível máximo da hierarquia, como para os macro-critérios.

Junto ao LCSA, o *software* VIKOR-HS ofereceu suporte ao grande volume de dados,

elevado número de iterações e necessidade de análises, apresentando informações que contribuíram para a tomada de decisão. Em comparação com a literatura o VIKOR-HS apresentou vantagens em relação a quantidade de medidas descritivas fornecidas, avaliação em todos os níveis do LCSA com formação de ordenamento e solução de compromisso e maior facilidade de replicação de cenários e análises.

As propostas desta tese oferecem um robusto suporte a gestão nos processos decisórios de escolha ou ordenamento, minimizando a subjetividade inerente ao processo decisório e oferecendo facilidade de utilização das ferramentas. Além disso, o modelo VIKOR-HSMAA e o sistema VIKOR-HS oferecem avaliação sistêmica na hierarquia de critérios, fornecendo informações para escolha, ordenamento e definição de planos de melhoria em todos os níveis, exceto no último nível, elementar. Desta forma, as análises de melhoria e a visualização de boas práticas podem ser mais facilmente realizadas pelo decisor, ficando claro os critérios que devem ser alvo de melhorias e as alternativas que apresentam melhor desempenho nestes critérios, direcionando o *benchmark* entre as alternativas.

Outra vantagem da utilização do *software* VIKOR-HS é a quantidade de análises possíveis com o sistema. O gestor pode simular diferentes cenários de pesos dos critérios e analisar as medidas descritivas para a tomada de decisão. Destaca-se também que tanto o modelo quanto o *software* propostos nesta tese oferecem suporte a diversas áreas de negócios e setores como indústria alimentícia, consultorias, gestão de pessoas, avaliação de tecnologias, avaliação de nível de maturidade de sistemas, não se atendo apenas a área de sustentabilidade. Ambas estruturas apresentadas nesta tese oferecem este suporte ao processo de tomada de decisão em empresas de qualquer área ou porte, desde que as premissas de aplicação do modelo e *software* sejam devidamente atendidas.

Como estudos futuros sugere-se comparar os resultados do modelo proposto a outras metodologias de apoio a decisão. Por exemplo, o *network* DEA comparando a eficiência obtida pelos indicadores aos valores apresentados pelo VIKOR-HSMAA nos critérios. Analisando também as diferenças entre as restrições dos métodos quanto a número de critérios em cada nó da árvore, elaboração de metas e resultados. Pode-se também considerar como possibilidade de estudo a interação entre os critérios no modelo proposto VIKOR-HSMAA.

Outras possíveis vertentes seriam validar estatisticamente a parametrização dos valores estabelecidos tanto para a medida de descritiva SI quanto para AAI, buscando trazer maior confiabilidade as propostas desta tese. Também é válido explorar a medida descritiva SI em cenários diferentes para avaliar sua contribuição. Sugere-se investigar se fatores como número de alternativas ou formato de informações de pesos interferem em seus valores e na utilização da medida descritiva na tomada de decisão.

## Resultados da tese

Como resultados esta tese apresenta:

- Artigo com aplicação de modelo multicritério publicado na revista “*Thinking Skills and Creativity*”;
- Artigo com o modelo VIKOR-HSMAA em revisão na revista “*Applied Soft Computing*”;
- Resumo sobre o modelo VIKOR-HSMAA e o *software* VIKOR-HS publicado e apresentado na “*33rd European Conference on Operational Research*”2024 em Copenhagen;
- Pedido de registro do *software* VIKOR-HS junto a UFMG e a UFV (titulares do *software*);
- Artigo do *software* VIKOR-HS a ser submetido após publicação do modelo.

## Referências Bibliográficas

- Abastante, F.; Corrente, S.; Greco, S.; Lami, I. M. e Mecca, B. (2020). The introduction of the SRF-II method to compare hypothesis of adaptive reuse for an iconic historical building. *Operational Research*, 22(3):2397–2436.
- Abdul, D.; Wenqi, J. e Tanveer, A. (2022). Prioritization of renewable energy source for electricity generation through AHP-VIKOR integrated methodology. *Renewable Energy*, 184:1018–1032.
- Aberilla, J. M.; Gallego-Schmid, A.; Stamford, L. e Azapagic, A. (2020). An integrated sustainability assessment of synergistic supply of energy and water in remote communities. *Sustainable Production and Consumption*, 22:1–21.
- Ahn, B. S.; Park, K. S.; Han, C. H. e Kim, J. K. (2000). Multi-attribute decision aid under incomplete information and hierarchical structure. *European Journal of Operational Research*, 125(2):431–439.
- Álvarez-Miranda, E.; Garcia-Gonzalo, J.; Pais, C. e Weintraub, A. (2019). A multicriteria stochastic optimization framework for sustainable forest decision making under uncertainty. *Forest Policy and Economics*, 103:112–122.
- Amor, S. B.; Guitouni, A. e Martel, J.-M. (2015). A synthesis of information imperfection representations for decision aid. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 53(2):68–77.
- Angilella, S.; Catalfo, P.; Corrente, S.; Giarlotta, A.; Greco, S. e Rizzo, M. (2018). Robust sustainable development assessment with composite indices aggregating interacting dimensions: The hierarchical-SMAA-choquet integral approach. *Knowledge-Based Systems*, 158:136–153.
- Angilella, S.; Corrente, S.; Greco, S. e Słowiński, R. (2013). Multiple criteria hierarchy process for the choquet integral. In *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 475–489. Springer Berlin Heidelberg.

- Arandarenko, M.; Corrente, S.; Jandrić, M. e Stamenković, M. (2020). Multiple criteria decision aiding as a prediction tool for migration potential of regions. *European Journal of Operational Research*, 284(3):1154–1166.
- Atilgan, B. e Azapagic, A. (2016). An integrated life cycle sustainability assessment of electricity generation in turkey. *Energy Policy*, 93:168–186.
- Aydogan, E. K. e Ozmen, M. (2017). The stochastic vikor method and its use in reverse logistic option selection problem. *RAIRO - Operations Research*, 51(2):375–389.
- Azapagic, A.; Stamford, L.; Youds, L. e Barteczko-Hibbert, C. (2016). Towards sustainable production and consumption: A novel DEcision-support framework Integrating economic, environmental and social sustainability (DESIREs). *Computers &amp; Chemical Engineering*, 91:93–103.
- Bączkiewicz, A. e Wątróbski, J. (2022). Crispyn—a python library for determining criteria significance with objective weighting methods. *SoftwareX*, 19:101166.
- Balasbaneh, A. T.; Marsono, A. K. B. e Khaleghi, S. J. (2018). Sustainability choice of different hybrid timber structure for low medium cost single-story residential building: Environmental, economic and social assessment. *Journal of Building Engineering*, 20:235–247.
- Biswas, T. K.; Abbasi, A. e Chakraborty, R. K. (2022). A two-stage VIKOR assisted multi-operator differential evolution approach for influence maximization in social networks. *Expert Systems with Applications*, 192:116342.
- Bockstaller, C.; Guichard, L.; Makowski, D.; Aveline, A.; Girardin, P. e Plantureux, S. (2008). Agri-environmental indicators to assess cropping and farming systems. a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 28(1):139–149.
- Boggia, A. e Cortina, C. (2010). Measuring sustainable development using a multi-criteria model: A case study. *Journal of Environmental Management*, 91(11):2301–2306.
- Brans, J.-P. e De Smet, Y. (2016). Promethee methods. In *Multiple criteria decision analysis*, pp. 187–219. Springer.
- Brans, J.-P. e Mareschal, B. (1994). The promcalc & gaia decision support system for multicriteria decision aid. *Decision support systems*, 12(4-5):297–310.
- Chen, W. e Holden, N. M. (2018). Tiered life cycle sustainability assessment applied to a grazing dairy farm. *Journal of cleaner production*, 172:1169–1179.

- Corrente, S.; Figueira, J. R.; Greco, S. e Słowiński, R. (2017). A robust ranking method extending ELECTRE III to hierarchy of interacting criteria, imprecise weights and stochastic analysis. *Omega*, 73:1–17.
- Corrente, S.; Greco, S.; Kadziński, M. e Słowiński, R. (2013). Robust ordinal regression in preference learning and ranking. *Machine Learning*, 93(2-3):381–422.
- Corrente, S.; Greco, S.; Leonardi, F. e Słowiński, R. (2021). The hierarchical SMAA-PROMETHEE method applied to assess the sustainability of european cities. *Applied Intelligence*, 51(9):6430–6448.
- Corrente, S.; Greco, S. e Słowiński, R. (2012). Multiple criteria hierarchy process in robust ordinal regression. *Decision Support Systems*, 53(3):660–674.
- Corrente, S.; Greco, S. e Słowiński, R. (2016). Multiple criteria hierarchy process for ELECTRE tri methods. *European Journal of Operational Research*, 252(1):191–203.
- Corrente, S. e Tasiou, M. (2023). A robust TOPSIS method for decision making problems with hierarchical and non-monotonic criteria. *Expert Systems with Applications*, 214:119045.
- da Silva Rocha Paz, T.; Caiado, R. G. G.; Quelhas, O. L. G.; Gavião, L. O. e Lima, G. B. A. (2021). Assessment of sustainable development through a multi-criteria approach: Application in brazilian municipalities. *Journal of Environmental Management*, 282:111954.
- de Almeida, A. T. (2013). Processo de decisão nas organizações-construindo modelos de decisão multicritério. atlas.
- de Cassia Feroni, R. e Galvão, E. S. (2020). Sustainable development indicators assessment for the city of anchieta-ES brazil at different times of the local economy. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 27(6):524–533.
- De Luca, A. I.; Iofrida, N.; Leskinen, P.; Stillitano, T.; Falcone, G.; Strano, A. e Gulisano, G. (2017). Life cycle tools combined with multi-criteria and participatory methods for agricultural sustainability: Insights from a systematic and critical review. *Science of the Total Environment*, 595:352–370.
- de Oliveira, M. S.; Steffen, V.; de Francisco, A. C. e Trojan, F. (2023). Integrated data envelopment analysis, multi-criteria decision making, and cluster analysis methods: Trends and perspectives. *Decision Analytics Journal*, 8:100271.

- Dias, L. C.; Passeira, C.; Malça, J. e Freire, F. (2016). Integrating life-cycle assessment and multi-criteria decision analysis to compare alternative biodiesel chains. *Annals of Operations Research*, 312(2):1359–1374.
- Durmaz, K. e Temel Gencer, C. (2020). Jsmaa tabanlı yeni bir eklenti: Swara-jsmaa ve akrobasi uçağı seçimi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(3):1487–1498.
- Egilmez, G.; Gumus, S. e Kucukvar, M. (2015). Environmental sustainability benchmarking of the u.s. and canada metropolises: An expert judgment-based multi-criteria decision making approach. *Cities*, 42:31–41.
- Finkbeiner, M.; Schau, E. M.; Lehmann, A. e Traverso, M. (2010). Towards life cycle sustainability assessment. *Sustainability*, 2(10):3309–3322.
- Florindo, T. J.; de Medeiros Florindo, G. I. B.; Ruviaro, C. F. e Pinto, A. T. (2020). Multicriteria decision-making and probabilistic weighing applied to sustainable assessment of beef life cycle. *Journal of Cleaner Production*, 242:118362.
- França, W. T.; Barros, M. V.; Salvador, R.; de Francisco, A. C.; Moreira, M. T. e Piekarski, C. M. (2021). Integrating life cycle assessment and life cycle cost: A review of environmental-economic studies. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(2):244–274.
- Gao, X.; Cao, M.; Zhang, Y.; Liu, Y.; Tong, H. e Yao, Q. (2021). Towards sustainability: An assessment of an urbanisation bubble in china using a hierarchical - stochastic multicriteria acceptability analysis - choquet integral method. *Journal of Cleaner Production*, 279:123650.
- Goto, E. A.; Suarez, A. M. e Ye, H. (2022). Spatial analysis of social vulnerability in são paulo city, brazil. *Applied Geography*, 140:102653.
- Govindan, K.; Kadziński, M.; Ehling, R. e Miebs, G. (2019). Selection of a sustainable third-party reverse logistics provider based on the robustness analysis of an outranking graph kernel conducted with ELECTRE i and SMAA. *Omega*, 85:1–15.
- Guinee, J. B.; Heijungs, R.; Huppes, G.; Zamagni, A.; Masoni, P.; Buonamici, R.; Ekvall, T. e Rydberg, T. (2011). Life cycle assessment: past, present, and future.
- Gul, M.; Celik, E.; Aydin, N.; Taskin Gumus, A. e Guneri, A. F. (2016). A state of the art literature review of vikor and its fuzzy extensions on applications. *Applied Soft Computing*, 46:60–89.

- Hauschild, M. Z. e Huijbregts, M. A. (2015). Introducing life cycle impact assessment. In *Life cycle impact assessment*, pp. 1–16. Springer.
- Hauschild, M. Z.; Rosenbaum, R. K. e Olsen, S. I. (2018). *Life cycle assessment*. Springer.
- Hosseini Dolatabad, A.; Heidary Dahooie, J.; Antucheviciene, J.; Azari, M. e Razavi Hajiagha, S. H. (2023). Supplier selection in the industry 4.0 era by using a fuzzy cognitive map and hesitant fuzzy linguistic vikor methodology. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(18):52923–52942.
- Hwang, C. L. e Yoon, K. (1981). Multiple attribute decision making: Methods and applications.
- Jacquet-Lagrange, E. e Siskos, J. (1982). Assessing a set of additive utility functions for multicriteria decision-making, the uti method. *European journal of operational research*, 10(2):151–164.
- Jiménez-González, C.; Kim, S. e Overcash, M. R. (2000). Methodology for developing gate-to-gate life cycle inventory information. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 5(3):153–159.
- Kalbar, P. P.; Birkved, M.; Nygaard, S. E. e Hauschild, M. (2017). Weighting and aggregation in life cycle assessment: do present aggregated single scores provide correct decision support? *Journal of Industrial Ecology*, 21(6):1591–1600.
- Kim, J. H. e Ahn, B. S. (2020). The hierarchical VIKOR method with incomplete information: Supplier selection problem. *Sustainability*, 12(22):9602.
- Kloepffer, W. (2008). Life cycle sustainability assessment of products. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 13(2):89–95.
- Kumar, A.; Sah, B.; Singh, A. R.; Deng, Y.; He, X.; Kumar, P. e Bansal, R. (2017). A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69:596–609.
- Lahdelma, R.; Hokkanen, J. e Salminen, P. (1998). SMAA - stochastic multiobjective acceptability analysis. *European Journal of Operational Research*, 106(1):137–143.
- Lahdelma, R.; Miettinen, K. e Salminen, P. (2003). Ordinal criteria in stochastic multicriteria acceptability analysis (SMAA). *European Journal of Operational Research*, 147(1):117–127.

- Lahdelma, R. e Salminen, P. (2001). SMAA-2: Stochastic multicriteria acceptability analysis for group decision making. *Operations Research*, 49(3):444–454.
- Lolli, F.; Balugani, E.; Ishizaka, A.; Gamberini, R.; Butturi, M. A.; Marinello, S. e Rimini, B. (2019). On the elicitation of criteria weights in promethee-based ranking methods for a mobile application. *Expert Systems with Applications*, 120:217–227.
- Machado, R. H. C.; Conceição, S. V.; Pelissari, R.; Santos, A. A. e Ben-Amor, S. (2022). The hierarchical and stochastic VIKOR to deal with imprecise and missing information. *SSRN Electronic Journal*.
- Mardani, A.; Zavadskas, E.; Govindan, K.; Amat Senin, A. e Jusoh, A. (2016). Vikor technique: A systematic review of the state of the art literature on methodologies and applications. *Sustainability*, 8(1):37.
- Martins, A. A.; Simaria, M.; Barbosa, J.; Barbosa, R.; Silva, D. T.; Rocha, C. S.; Mata, T. M. e Caetano, N. S. (2018). Life cycle assessment tool of electricity generation in portugal. *Environment, Development and Sustainability*, 20(1):129–143.
- Moriizumi, Y.; Matsui, N. e Hondo, H. (2010). Simplified life cycle sustainability assessment of mangrove management: a case of plantation on wastelands in thailand. *Journal of Cleaner Production*, 18(16-17):1629–1638.
- Mousavi-Nasab, S. H. e Sotoudeh-Anvari, A. (2017). A comprehensive mcdm-based approach using topsis, copras and dea as an auxiliary tool for material selection problems. *Materials amp; Design*, 121:237–253.
- Myllyviita, T.; Leskinen, P. e Seppälä, J. (2014). Impact of normalisation, elicitation technique and background information on panel weighting results in life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(2):377–386.
- Navarro, I. J.; Penadés-Plà, V.; Martínez-Muñoz, D.; Rempling, R. e Yepes, V. (2020). LIFE CYCLE SUSTAINABILITY ASSESSMENT FOR MULTI-CRITERIA DECISION MAKING IN BRIDGE DESIGN: A REVIEW. *JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND MANAGEMENT*, 26(7):690–704.
- Okul, D.; Gencer, C. e Aydogan, E. K. (2014). A method based on SMAA-topsis for stochastic multi-criteria decision making and a real-world application. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 13(05):957–978.
- Oliveira, M. E. B. d.; Lima-Junior, F. R. e Galo, N. R. (2023). A comparison of hesitant fuzzy vikor methods for supplier selection. *Applied Soft Computing*, 149:110920.

- Onat, N. C.; Gumus, S.; Kucukvar, M. e Tatari, O. (2016). Application of the TOPSIS and intuitionistic fuzzy set approaches for ranking the life cycle sustainability performance of alternative vehicle technologies. *Sustainable Production and Consumption*, 6:12–25.
- Opricovic, S. (1990). Programski paket vikor za visekriterijumsko kompromisno rangiranje. *Proceedings of the XVII symposium on operational research SYM-OP-IS*.
- Opricovic, S. (1998). Multicriteria optimization of civil engineering systems. *Belgrade: Faculty of Civil Engineering*.
- Opricovic, S. e Tzeng, G.-H. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, 156(2):445–455.
- Paolotti, L.; Gomis, F. D. C.; Torres, A. A.; Massei, G. e Boggia, A. (2019). Territorial sustainability evaluation for policy management: The case study of italy and spain. *Environmental Science & Policy*, 92:207–219.
- Pedrycz, W.; Ekel, P. e Parreiras, R. (2011). *Fuzzy multicriteria decision-making: models, methods and applications*. John Wiley & Sons.
- Pelissari, R.; Abackerli, A. J.; Amor, S. B.; Oliveira, M. C. e Infante, K. M. (2021). Multiple criteria hierarchy process for sorting problems under uncertainty applied to the evaluation of the operational maturity of research institutions. *Omega*, 103:102381.
- Pelissari, R.; Oliveira, M. C.; Amor, S. B.; Kandakoglu, A. e Helleno, A. L. (2019). SMAA methods and their applications: a literature review and future research directions. *Annals of Operations Research*, 293(2):433–493.
- Perdomo, A.; Schwarzbauer, P.; Fürtner, D. e Hesser, F. (2021). Life cycle assessment of agricultural wood production—methodological options: a literature review. *BioEnergy Research*, 14(2):492–509.
- Phillis, Y. A.; Kouikoglou, V. S. e Verdugo, C. (2017). Urban sustainability assessment and ranking of cities. *Computers, Environment and Urban Systems*, 64:254–265.
- Pomerol, J.-C. e Barba-Romero, S. (2000). *Multicriterion decision in management: principles and practice*, volume 25. Springer Science & Business Media.
- Prado-Lopez, V.; Seager, T. P.; Chester, M.; Laurin, L.; Bernardo, M. e Tylock, S. (2014). Stochastic multi-attribute analysis (smaa) as an interpretation method for comparative life-cycle assessment (lca). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(2):405–416.

- Ren, J.; Manzardo, A.; Mazzi, A.; Zuliani, F. e Scipioni, A. (2015). Prioritization of bioethanol production pathways in china based on life cycle sustainability assessment and multicriteria decision-making. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(6):842–853.
- Ren, J. e Toniolo, S. (2018). Life cycle sustainability decision-support framework for ranking of hydrogen production pathways under uncertainties: An interval multicriteria decision making approach. *Journal of Cleaner Production*, 175:222–236.
- Roy, B. (1996). *Multicriteria methodology for decision aiding*, volume 12. Springer Science & Business Media.
- Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3):234–281.
- Soulé, E.; Michonneau, P.; Michel, N. e Bockstaller, C. (2021). Environmental sustainability assessment in agricultural systems: A conceptual and methodological review. *Journal of Cleaner Production*, 325:129291.
- Tervonen, T. (2012). Jsmaa: open source software for smaa computations. *International Journal of Systems Science*, 45(1):69–81.
- Tervonen, T. e Lahdelma, R. (2007). Implementing stochastic multicriteria acceptability analysis. *European Journal of Operational Research*, 178(2):500–513.
- Traverso, M.; Finkbeiner, M.; Jørgensen, A. e Schneider, L. (2012). Life cycle sustainability dashboard. *Journal of Industrial Ecology*, 16(5):680–688.
- Triantaphyllou, E. (2000). *Multi-criteria Decision Making Methods: A Comparative Study*. Springer US.
- van Kempen, E. A.; Spiliotopoulou, E.; Stojanovski, G. e de Leeuw, S. (2016). Using life cycle sustainability assessment to trade off sourcing strategies for humanitarian relief items. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(11):1718–1730.
- Vetschera, R. (2017). Deriving rankings from incomplete preference information: A comparison of different approaches. *European Journal of Operational Research*, 258(1):244–253.
- Visentin, C.; da Silva Trentin, A. W.; Braun, A. B. e Thomé, A. (2020). Life cycle sustainability assessment: A systematic literature review through the application perspective, indicators, and methodologies. *Journal of Cleaner Production*, 270:122509.

- Vučijak, B.; Pašić, M. e Zorlak, A. (2015). Use of multi-criteria decision aid methods for selection of the best alternative for the highway tunnel doors. *Procedia Engineering*, 100:656–665.
- Wei, G. e Zhang, N. (2014). A multiple criteria hesitant fuzzy decision making with shapley value-based vikor method. *Journal of Intelligent amp; Fuzzy Systems*, 26(2):1065–1075.
- Yang, J. e Guo, L. (2021). Dynamic evaluation of water utilization efficiency in large coal mining area based on life cycle sustainability assessment theory. *Geofluids*, 2021.
- Yue, C. (2024). A software trustworthiness evaluation methodology for cloud services with picture fuzzy information. *Applied Soft Computing*, 152:111205.
- Zheng, X.; Easa, S. M.; Yang, Z.; Ji, T. e Jiang, Z. (2019). Life-cycle sustainability assessment of pavement maintenance alternatives: Methodology and case study. *Journal of cleaner production*, 213:659–672.
- Zhu, F.; Zhong, P.-A.; Sun, Y. e Yeh, W. W.-G. (2017). Real-time optimal flood control decision making and risk propagation under multiple uncertainties. *Water Resources Research*, 53(12):10635–10654.