

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

THÁRCYLLA REBECCA NEGREIROS CLEMENTE

**ESTUDO DE PESOS SUBSTITUTOS PARA O MÉTODO
PROMETHEE II E APLICAÇÃO EM MODELO PARA
AVALIAÇÃO DE TECNOLOGIAS CRÍTICAS**

RECIFE
2015

THÁRCYLLA REBECCA NEGREIROS CLEMENTE

**ESTUDO DE PESOS SUBSTITUTOS PARA O MÉTODO
PROMETHEE II E APLICAÇÃO EM MODELO PARA
AVALIAÇÃO DE TECNOLOGIAS CRÍTICAS**

Tese de Doutorado apresentada à UFPE para a obtenção de grau de Doutor como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (Área de Concentração: Pesquisa Operacional).

Orientador: Adiel Teixeira de Almeida, PhD.

Coorientador: Adiel Teixeira de Almeida Filho, Doutor.

RECIFE
2015

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

C626e Clemente, Thárcylla Rebecca Negreiros.

Estudo de pesos substitutos para o método prometheeII e aplicação em modelo para avaliação de tecnologias críticas. / Thárcylla Rebecca Negreiros Clemente. - Recife: O Autor, 2015.

131folhas, Il., e Tabs.

Orientador: Prof. PhD Adiel Teixeira de Almeida.

Coorientador: Prof. Dr. Adiel Teixeira de Almeida Filho.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação Engenharia de Produção, 2015.

Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia de produção. 2. Decisão multicritério. 3. Informação parcial. 4. Pesos substitutos. 5. PROMETHEE-ROC. 6. Tecnologias críticas I. Almeida, Adiel Teixeira de (Orientador). II. Almeida Filho, Adiel Teixeira de. (Coorientador). III. Título.

UFPE

658.5CDD (22. ed.)

BCTG/2015-134



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA
DE TESE DO DOUTORADO DE

THÁRCYLLA REBECCA NEGREIROS CLEMENTE

***“ESTUDO DE PESOS SUBSTITUTOS PARA O MÉTODO
PROMETHEE II E APLICAÇÃO EM MODELO PARA
AVALIAÇÃO DE TECNOLOGIAS CRÍTICAS”***

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PESQUISA OPERACIONAL

A comissão examinadora, composta pelos professores abaixo, sob a presidência do primeiro, considera a candidata **THÁRCYLLA REBECCA NEGREIROS CLEMENTE, APROVADA.**

Recife, 09 de Abril de 2015.

Prof. ADIEL TEIXEIRA DE ALMEIDA FILHO, Doutor (UFPE)

Prof^ª. ANA PAULA CABRAL SEIXAS COSTA, Doutora (UFPE)

Prof^ª. DANIELLE COSTA MORAIS, Doutora (UFPE)

Prof. HELDER GOMES COSTA, Doutor (UFF)

Prof. ANDRÉ MARQUES CAVALCANTI, Doutor (UFPE)

*Dedico este trabalho aos meus pais, Redilamar e José Valciano,
e a minha avó, Severina Maria.
Meus exemplos de coragem, perseverança e dedicação.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, fonte de vida e serenidade, que tem me concedido oportunidades de aprendizado e vitórias, desde o início da minha trajetória profissional. A fé que alimento me faz acreditar em conquistas cada vez maiores.

Agradeço aos meus pais, Redilamar e José Valciano, pelo apoio e amor incondicionais. Vocês me ensinaram princípios de caráter valiosos e nunca duvidaram do meu potencial. Agradeço a minha avó, Severina Maria, por todos os ensinamentos, carinho e inspiração de vida.

Agradeço aos meus familiares, em especial a minha irmã, Thâmara, pelo apoio e compreensão, e a minha prima, Rhayanne, que compartilhou muitos dos momentos vividos nesta jornada. Obrigada pelo incentivo, paciência e confiança.

Agradeço aos amigos de ontem e de sempre, em especial a Paula, que tem dedicado esforços para me ajudar a superar muitas dificuldades. Obrigada pelos conselhos, pelas verdades, pela confiança, pelo incentivo, pela torcida e por sua amizade.

Agradeço ao Prof. Adiel Filho pela paciência, compreensão, investimento, conselhos, amizade e incentivos de sempre.

Agradeço ao Prof. Adiel Almeida pelo acolhimento, orientação, confiança e pelas oportunidades de desenvolver novos conhecimentos junto aos membros do CDSID.

Agradeço a todos os professores do PPGEP/UFPE, em especial a Prof^a. Ana Paula Cabral e a Prof^a. Danielle, pelo apoio e incentivos na realização deste trabalho e de todas as atividades que desempenhei ao longo desta jornada.

Agradeço a todos os colegas do PPGEP/UFPE e às amigas que conquistei. Torço pelo sucesso de vocês: Lucimário, Rodrigo, Anieli, Laryssa, Jadielson, Thiago, Ciro, Maria Creuza, Débora, Cristina, Mônica, Sinndy, Jônatas.

Agradeço às secretárias do PPGEP/CDSID, em nome de Juliane e Poliana, a atenção de vocês foi fundamental em todos os momentos. Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo incentivo e apoio financeiro, fundamentais para a manutenção de meus esforços acadêmicos.

Faço um agradecimento especial a *Cidadão*. Agradeço por compartilhar histórias emocionantes e indescritíveis, que me ajudaram a enfrentar muitos desafios e a aprender que as aventuras devem ser vividas. Desejo ter oportunidades para retribuir todo o incentivo, amizade, carinho e dedicação. Quero estar sempre perto você.

Por fim, muito obrigada a todos os meus amigos que de forma direta ou indireta estavam na expectativa da conclusão desta etapa da minha vida.

RESUMO

O presente trabalho tem como foco as situações em que há apenas informações incompletas, ou parciais, sobre a importância dos critérios envolvidos em um contexto de decisão. Para o tratamento destas informações, são apresentadas metodologias de representação de pesos capazes de transformar a informação parcial em valores cardinais para a modelagem do problema de decisão. Portanto, o estudo se propõe a avaliar o desempenho de metodologias selecionadas para indicar a melhor performance para a estrutura do método PROMETHEE II, um método multicritério que utiliza a racionalidade não compensatória para a avaliação das alternativas. Para o estudo, foram analisadas as contribuições dos EW (*Equal Weights*), RS (*Rank-Sum*), RR (*Reciprocal of the Rank*) e ROC (*Rank-Order Centroid*), sobre diferentes estruturas de decisão, para indicar a metodologia que melhor responda à estrutura do método multicritério selecionado. Para isto, foi realizado um experimento baseado em simulação comparativa capaz de identificar as contribuições das metodologias através de medidas de avaliação sobre a problemática de seleção de uma alternativa e sobre a problemática de ordenação do conjunto de alternativas. As medidas utilizadas apresentaram contribuições significativas e os resultados do experimento evidenciaram a eficiência do ROC para a representação de pesos substitutos, quando aplicado o método PROMETHEE II. No entanto, os resultados obtidos oferecem uma hierarquia quanto ao desempenho das metodologias estudadas: $ROC > RR > RS > EW$. Pela conformidade da representação dos pesos ROC na modelagem multicritério, foi considerada a oportunidade da apresentação do método PROMETHEE-ROC, eficiente para o tratamento de problemas de decisão complexos em que apenas a informação ordinal sobre os pesos é utilizada para indicar as preferências do decisor. Ainda, a aplicação do PROMETHEE-ROC foi utilizada para o tratamento do problema de avaliação de tecnologias críticas para a geração de energia elétrica. Os resultados da aplicação para este contexto sugerem vantagens para o planejamento e desenvolvimento de organizações em diversos setores produtivos. Ainda, o estudo promove a apresentação de uma ferramenta computacional de auxílio ao processo decisório com base no PROMETHEE-ROC, com especificações funcionais e de usabilidade para assegurar sua aplicação em diferentes contextos organizacionais.

Palavras Chave: Decisão multicritério. Informação parcial. Pesos substitutos. Simulação. PROMETHEE-ROC. Tecnologias críticas.

ABSTRACT

The present work focuses on the situations in which there is only incomplete, or partial, information about the importance of the criteria involved in a decision-making context. For the treatment of this information, are given weights representation of methodologies capable of transforming the partial information on cardinal values for modeling of the decision problem. However, the study aims to assess the performance of selected methodologies to indicate the best performance for the structure of the method PROMETHEE II, an outranking multi-criteria method that uses the non-compensatory rationality to the evaluation of alternatives. For the study, the contributions of EW (Equal Weights), RS (Rank-Sum), RR (Reciprocal of the Rank) and ROC (Rank-Order Centroid) were analyzed, on different decision structures, to indicate the methodology that better respond to the structure of multi-criteria method selected. For this, we conducted an experiment based on simulation comparative can identify the contributions of methodologies through evaluation measures on the problematic of selecting an alternative and on the problematic of ordination of the set of alternatives. The measures used were significant contributions and the results of the experiment showed the efficiency of the ROC to the surrogate weights representation, when using the PROMETHEE II method. However, the results obtained provide a hierarchy for performance methodologies studied: $ROC > RR > RS > EW$. For compliance of the representation of the ROC weights in multi-criteria modeling, was considered the opportunity of the presentation of the PROMETHEE-ROC, efficient method for the treatment of complex decision problems where only ordinal information on weights is used to indicate the preferences of the decision maker. Still, the application of PROMETHEE-ROC was used for the treatment of the problem of evaluation of critical technologies for energy generation. The results of applying for this context suggest advantages for the planning and development of organizations in various productive sectors. Still, the study promotes the presentation of an aid computational tool to assist the decision-making process based on the PROMETHEE-ROC, with functional and usability requirements to ensure its application in different organizational contexts.

Keywords: Multi-criteria decision. Partial information. Surrogate weights. Simulation. PROMETHEE-ROC. Critical technologies.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|-----|
| <i>Figura 3.1 – Estrutura lógica do processo de simulação</i> | 54 |
| <i>Figura 3.2 – Pesos aleatórios normalizados pelo Procedimento 3 (Almeida, 2013)</i> | 59 |
| <i>Figura 3.3 – Pesos aleatórios obtidos pelo procedimento de Rubinstein (1982)</i> | 60 |
| <i>Figura 3.4 – Proporção de casos com correlação confirmada para cada nível de significância</i> | 74 |
| <i>Figura 3.5 – Percentual sobre a alteração de posições para cada metodologia de peso substituto</i> | 83 |
| <i>Figura 4.1 – Estrutura lógica do PROMETHEE-ROC</i> | 87 |
| <i>Figura 4.2 – Modelagem de problemas com utilização do PROMETHEE-ROC</i> | 88 |
| <i>Figura 4.3 – Estruturas da Matriz de Consequência e dos Pesos dos Critérios</i> | 94 |
| <i>Figura 4.4 – Ordenação final das alternativas</i> | 96 |
| <i>Figura 4.5 – Descrição para a análise de sensibilidade sobre os pesos dos critérios</i> | 99 |
| <i>Figura 4.6 – Análise de Sensibilidade para a primeira posição</i> | 101 |
| <i>Figura 4.7 – Análise de Sensibilidade para a última posição</i> | 102 |
| <i>Figura 4.8 – Análise individual com destaque para o critério de maior peso</i> | 103 |
| <i>Figura 4.9 – Análise sobre os critérios de avaliação</i> | 104 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| <i>Tabela 2.1 – Critérios para o PROMETHEE</i> | 28 |
| <i>Tabela 2.2 – Pesos Iguais para n critérios</i> | 34 |
| <i>Tabela 2.3 – Pesos RS para n critérios</i> | 34 |
| <i>Tabela 2.4 – Pesos RR para n critérios</i> | 35 |
| <i>Tabela 2.5 – Pesos ROC para n critérios</i> | 36 |
| <i>Tabela 3.1 – Estrutura para Entrada de Dados</i> | 56 |
| <i>Tabela 3.2 – Taxa de Sucesso verificada para estruturas de decisão e pesos substitutos</i> | 70 |
| <i>Tabela 3.3 – Média do Valor de Perda verificada para estruturas de decisão e pesos substitutos</i> | 71 |
| <i>Tabela 3.4 – Proporção de casos com correlação confirmada para cada nível de significância</i> | 74 |
| <i>Tabela 3.5 – Média percentual de permanência das posições originais para estruturas com 5 alternativas</i> | 76 |
| <i>Tabela 3.6 – Média percentual de permanência das posições originais para estruturas com 10 alternativas</i> .. | 76 |
| <i>Tabela 3.7 – Média percentual de permanência das posições originais para estruturas com 15 alternativas</i> .. | 77 |
| <i>Tabela 3.8 – Média percentual de permanência das posições originais para estruturas com 20 alternativas</i> .. | 77 |
| <i>Tabela 3.9 – Média percentual de permanência das posições originais para estruturas com 25 alternativas</i> .. | 77 |
| <i>Tabela 3.10 – Média de permanência das alternativas na posição referente a ordenação original</i> | 78 |
| <i>Tabela 3.11 – Média de alteração de apenas uma posição na ordem por pesos substitutos</i> | 80 |
| <i>Tabela 3.12 – Média de alteração de duas posições na ordem por pesos substitutos</i> | 81 |
| <i>Tabela 3.13 – Média de alteração de mais de duas posições na ordem por pesos substitutos</i> | 82 |
| <i>Tabela 4.1 – Objetivos e Critérios de Avaliação</i> | 92 |
| <i>Tabela 4.2 – Conjunto de Tecnologias Críticas</i> | 93 |
| <i>Tabela 4.3 – Ordem e Pesos ROC para os Critérios</i> | 95 |
| <i>Tabela 4.4 – Fluxos Positivo, Negativo e Total obtidos para as Tecnologias Críticas</i> | 97 |
| <i>Tabela A.1 – Percentual de casos com correlação para $\alpha = 0,01$</i> | 119 |
| <i>Tabela A.2 – Percentual de casos com correlação para $\alpha = 0,05$</i> | 120 |
| <i>Tabela A.3 – Percentual de casos com correlação para $\alpha = 0,10$</i> | 121 |
| <i>Tabela A.4 – Percentual de casos com correlação para $\alpha = 0,15$</i> | 122 |
| <i>Tabela A.5 – Percentual de permanência entre posições para estruturas com cinco alternativas</i> | 123 |
| <i>Tabela A.6 – Percentual de permanência entre posições para estruturas com dez alternativas</i> | 124 |
| <i>Tabela A.7 – Percentual de permanência entre posições para estruturas com quinze alternativas – Parte A</i> . | 125 |
| <i>Tabela A.8 – Percentual de permanência entre posições para estruturas com quinze alternativas – Parte B</i> . | 126 |
| <i>Tabela A.9 – Percentual de permanência entre posições para estruturas com vinte alternativas – Parte A</i> | 127 |
| <i>Tabela A.10 – Percentual de permanência entre posições para estruturas com vinte alternativas – Parte B</i> .. | 128 |
| <i>Tabela A.11 – Percentual de permanência entre posições para estruturas com vinte alternativas – Parte C</i> .. | 129 |
| <i>Tabela A.12 – Percentual de permanência entre posições para estruturas com 25 alternativas – Parte A</i> | 129 |
| <i>Tabela A.13 – Percentual de permanência entre posições para estruturas com 25 alternativas – Parte B</i> | 130 |
| <i>Tabela A.14 – Percentual de permanência entre posições para estruturas com 25 alternativas – Parte C</i> | 131 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 12 |
| 1.1 | RELEVÂNCIA E CONTRIBUIÇÃO DO ESTUDO..... | 15 |
| 1.2 | OBJETIVOS DO TRABALHO | 16 |
| 1.2.1 | <i>Objetivo Geral.....</i> | <i>16</i> |
| 1.2.2 | <i>Objetivos Específicos.....</i> | <i>16</i> |
| 1.3 | ESTRUTURA DO TRABALHO | 17 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA..... | 18 |
| 2.1 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 18 |
| 2.1.1 | <i>Decisão Multicritério.....</i> | <i>18</i> |
| 2.1.1.1 | Alternativas de Decisão, Problemáticas de Decisão e Estruturas de Preferências | 20 |
| 2.1.1.2 | Objetivos e Critérios de Avaliação..... | 22 |
| 2.1.1.3 | Procedimentos de Normalização..... | 24 |
| 2.1.1.4 | Métodos de Apoio Multicritério à Decisão..... | 25 |
| 2.1.2 | <i>Métodos Multicritério de Sobreclassificação.....</i> | <i>26</i> |
| 2.1.2.1 | Método PROMETHEE II..... | 28 |
| 2.1.3 | <i>Utilização da Informação Parcial em Problemas de Decisão.....</i> | <i>31</i> |
| 2.1.3.1 | Abordagens para Pesos Substitutos..... | 33 |
| 2.1.4 | <i>Elicitação de Pesos em Problemas de Decisão Multicritério.....</i> | <i>36</i> |
| 2.1.5 | <i>O Problema de Priorização de Tecnologias Críticas para a Geração de Energia</i> | <i>38</i> |
| 2.2 | REVISÃO DA LITERATURA..... | 41 |
| 2.2.1 | <i>Comparação de Abordagens para Pesos Substitutos.....</i> | <i>41</i> |
| 2.2.2 | <i>Modelagem Multicritério de Decisão com Informação Parcial</i> | <i>43</i> |
| 2.2.3 | <i>Apoio a Decisão Multicritério para o Planejamento de Recursos Energéticos</i> | <i>46</i> |
| 2.3 | SÍNTESE DO ESTADO DA ARTE E POSICIONAMENTO DESTES TRABALHOS..... | 49 |
| 3 | ESTUDO SOBRE O DESEMPENHO DE PESOS SUBSTITUTOS PARA O MÉTODO PROMETHEE II..... | 53 |
| 3.1 | DESENHO DO EXPERIMENTO | 53 |
| 3.1.1 | <i>Estruturas do Modelo de Decisão e Problemáticas de Avaliação.....</i> | <i>55</i> |
| 3.1.2 | <i>Geração de Pesos Aleatórios e Pesos “Verdadeiros”</i> | <i>57</i> |
| 3.1.3 | <i>Geração de Matrizes de Avaliação Aleatórias.....</i> | <i>61</i> |
| 3.1.4 | <i>Avaliação das Alternativas e o Resultado de Referência</i> | <i>62</i> |
| 3.1.5 | <i>Obtenção de Vetores de Pesos Substitutos.....</i> | <i>63</i> |
| 3.1.6 | <i>Avaliação das Alternativas utilizando Pesos Substitutos</i> | <i>63</i> |
| 3.1.7 | <i>Processo de Comparação dos Resultados “Verdadeiros” e dos Pesos Substitutos.....</i> | <i>64</i> |
| 3.1.8 | <i>Sobre a Etapa de Repetição de Casos para a Simulação.....</i> | <i>65</i> |
| 3.1.9 | <i>Recomendação Final do Experimento</i> | <i>65</i> |

| | | |
|----------|--|------------|
| 3.2 | MEDIDAS DE AVALIAÇÃO PARA A SELEÇÃO DA MELHOR ALTERNATIVA | 66 |
| 3.2.1 | <i>Taxa de Sucesso</i> | 66 |
| 3.2.2 | <i>Média do Valor de Perda</i> | 66 |
| 3.3 | MEDIDAS DE AVALIAÇÃO PARA A ORDENAÇÃO DAS ALTERNATIVAS..... | 67 |
| 3.4 | RESULTADOS DO EXPERIMENTO SOBRE PESOS SUBSTITUTOS PARA O MÉTODO PROMETHEE II..... | 68 |
| 3.4.1 | <i>Para a Escolha da Melhor Alternativa de Decisão</i> | 69 |
| 3.4.2 | <i>Para a Ordenação de Alternativas</i> | 72 |
| 3.5 | DISCUSSÃO DE RESULTADOS | 84 |
| 4 | <i>MÉTODO PROMETHEE-ROC E UMA APLICAÇÃO SOBRE A AVALIAÇÃO DE TECNOLOGIAS CRÍTICAS</i> | 86 |
| 4.1 | APRESENTAÇÃO DO MÉTODO PROMETHEE-ROC | 86 |
| 4.2 | ESTRUTURA LÓGICA DO MÉTODO PROMETHEE-ROC..... | 87 |
| 4.3 | APLICAÇÃO DO MÉTODO PROMETHEE-ROC PARA AVALIAÇÃO DE TECNOLOGIAS CRÍTICAS | 90 |
| 4.3.1 | <i>Estruturar o conjunto de objetivos e critérios do problema de decisão</i> | 90 |
| 4.3.2 | <i>Estabelecer o conjunto de tecnologias críticas</i> | 92 |
| 4.3.3 | <i>Estruturar a ordem e computar os pesos dos critérios</i> | 93 |
| 4.3.4 | <i>Avaliar as tecnologias críticas e obter a primeira recomendação do método</i> | 95 |
| 4.3.5 | <i>Realizar análise de sensibilidade e recomendação final</i> | 98 |
| 4.4 | CONSIDERAÇÕES SOBRE A APLICAÇÃO DO PROMETHEE-ROC | 105 |
| 5 | <i>CONSIDERAÇÕES FINAIS</i> | 107 |
| 5.1 | CONCLUSÕES | 107 |
| 5.2 | LIMITAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS..... | 110 |
| | <i>REFERÊNCIAS</i> | 111 |
| | <i>APÊNDICE A – TABELAS DE RESULTADOS DO EXPERIMENTO SOBRE PESOS SUBSTITUTOS PARA A PROBLEMÁTICA DE ORDENAÇÃO</i> | 119 |

1 INTRODUÇÃO

No contexto organizacional, as atividades operacionais são conduzidas por planos e regras que constituem o processo de decisão, formulado para atender aos interesses estratégicos da organização e definir diretrizes ou ações mais adequadas ao contexto produtivo. Por uma perspectiva funcional, a tomada de decisão é a atividade mais importante para um gestor e consiste em uma situação que conduz à indicação do melhor curso de ação dentre as alternativas disponíveis, em favor da obtenção do melhor desempenho organizacional.

A depender do contexto estudado, o processo de decisão pode requisitar diversos aspectos racionais, gerenciais, políticos, cognitivos e intuitivos, de vários atores responsáveis por conduzir o processo de decisão. Estes atores podem ser decisor(es), analista(s), cliente(s) e especialista(s), que recorrem a ferramentas e métodos de apoio à decisão para definir os cursos de ações que melhor respondam às expectativas estratégicas da organização. Apesar do possível envolvimento de diversos atores, as consequências obtidas pela decisão tomada são de responsabilidade do decisor, ou do grupo de decisores, que determina o grau de influência dos fatores considerados na estruturação de um problema de decisão. O envolvimento de diversos fatores do ambiente contribui para a descrição do contexto de decisão e, à medida que o número de fatores cresce, é considerado o aumento da complexidade do contexto. Por esta perspectiva, a valorização de modelos de decisão é cada vez mais evidente para a estruturação dos problemas de decisão, pois os modelos oferecem suporte na descrição das preferências do decisor e na influência dos diversos fatores, considerando o perfil racional do decisor e os interesses de escolha sobre o contexto organizacional.

Considerando o conjunto de fatores influentes no processo decisório, é oportuna a estruturação de problemas de decisão multicritério. Um problema de decisão multicritério é caracterizado pela situação em que há pelo menos duas alternativas disponíveis para a escolha, e esta escolha considera múltiplos objetivos para representar os interesses de avaliação no processo de decisão. Em geral, a modelagem de problemas de decisão multicritério auxilia no tratamento de objetivos que, muitas vezes, são conflitantes entre si. Sendo assim, a definição dos parâmetros que definem o problema de decisão, sendo esses as alternativas e os critérios, e de seus valores representativos, é uma das principais etapas da estruturação de um modelo de decisão.

Em um problema de decisão multicritério, os objetivos de avaliação são definidos em função das consequências da escolha do curso de ação mais adequado ao contexto. Desta forma, os objetivos podem ser representados por atributos ou critérios mais específicos que assumem uma função de desempenho para avaliar as alternativas do problema. Para isto, os critérios definidos devem assumir propriedades que representem todos os objetivos do problema sem redundâncias, e seus valores representativos devem ser definidos com exatidão.

Em geral, quando o número de critérios envolvidos no problema de decisão é pequeno, o decisor é capaz de definir valores exatos para representar a importância ou o peso de cada critério. No entanto, esta tarefa pode se tornar difícil à medida que o número de critérios aumenta. Em situações como esta, o decisor pode não ser capaz, não sentir-se confortável ou não possuir conhecimentos suficientes para determinar os valores exatos para os pesos de cada elemento do conjunto de critérios. Para contornar este tipo de situação, é oportuna a aplicação de metodologias que ofereçam suporte na substituição de pesos.

Na literatura, é possível encontrar a contribuição de metodologias que utilizam pesos substitutos para representar a importância dos atributos na modelagem multicritério (DAWES & CORRIGAN, 1974; STILLWELL *et al.*, 1981; BARRON, 1992; WANG & ZIONTS, 2006). Este tipo de metodologia apresenta relevância quando o decisor apresenta motivos para não definir valores diretos para a representação dos critérios em um problema de decisão. No entanto, a aplicação de pesos substitutos exige que o decisor forneça algum tipo de informação, mesmo que mínima, sobre suas preferências. Para esta metodologia o decisor deve informar o mínimo de informações possíveis, parciais ou incompletas, sobre suas preferências em relação ao conjunto de critérios. Uma atribuição comumente utilizada para a utilização de pesos substitutos é a informação ordinal sobre os critérios.

O tratamento de informações parciais em problemas de decisão multicritério é um tema relevante e oferece oportunidade para o desenvolvimento de metodologias que agreguem valor ao processo de elicitação dos parâmetros envolvidos no problema. Desta forma, a utilização de informações ordinais e pesos substitutos minimiza o esforço do decisor em determinar valores exatos para os critérios de decisão na estruturação dos problemas, através de representações simples e consistentes. Esta característica apresenta vantagens no processo de inserção dos pesos substitutos aos métodos de apoio multicritério à decisão.

Dentre os métodos de apoio multicritério à decisão apresentados pela literatura, são destacados os métodos de sobreclassificação. Estes métodos são caracterizados pelo objetivo de avaliar a relação de prevalência ou superação entre as alternativas e, em geral, apresentam uma racionalidade não compensatória no processo de avaliação. Esta racionalidade avalia o

desempenho das alternativas em cada critério, considerando a função valor obtida pela interação dos parâmetros e assumindo como peso a representação do grau de importância de cada critério para o problema de decisão.

Dentre os métodos de sobreclassificação, destaca-se o método PROMETHEE II (*Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations II*) (BRANS & VINCKE, 1985). Este método é tipicamente caracterizado pela racionalidade não compensatória e utiliza da interação entre os parâmetros de sua estrutura para adquirir um fluxo líquido para cada alternativa e apresentar uma pré-ordem completa entre elas. Desta forma, as alternativas são organizadas em favor das preferências do decisor e podem ser ordenadas de forma coerente. As vantagens da utilização deste método concentram-se na oferta simplificada do resultado ordenado e na flexibilidade sobre o processo de elicitação dos pesos dos critérios, uma vez que não assume regras específicas para a determinação destes, permitindo a implementação de metodologias diversas, tais como a utilização de pesos substitutos.

Por estas perspectivas, o presente trabalho se propõe a apresentar e avaliar a adequação de metodologias para pesos substitutos com implementação do PROMETHEE II. Esta proposta tem o interesse de verificar a contribuição de pesos substitutos como representação da importância dos critérios no método de racionalidade não compensatória. Para isto, um experimento baseado na simulação de dados aleatórios foi executado para comparar o desempenho das metodologias e indicar a mais adequada ao uso do PROMETHEE II. Os resultados do experimento são apresentados por estruturas tabuladas e gráficas.

De posse desta indicação, o trabalho propõe a implementação de um sistema de apoio a decisão baseado no PROMETHEE II com a metodologia de peso substituto para avaliar o resultado de um problema no contexto real de priorização de tecnologias críticas para geração de energia na indústria brasileira. A seleção deste problema foi motivada pela influência econômica e de investimentos que o setor energético exerce sobre o mercado brasileiro. Desta forma, é possível avaliar o problema de priorização de tecnologias críticas sob a perspectiva multicritério, considerando o cenário com informações parciais e representação dos pesos. Em adição, são realizadas análises de sensibilidade para verificar a contribuição da metodologia proposta sobre o contexto real.

Com base na proposta inicial, é oportuno o enfoque sobre a relevância e contribuição do estudo proposto.

1.1 RELEVÂNCIA E CONTRIBUIÇÃO DO ESTUDO

No processo de modelagem de problemas de decisão multicritério, a principal atividade do decisor é determinar sua estrutura de preferências sobre os parâmetros que representam o problema. Esta atividade exige conhecimento e segurança por parte do decisor, no entanto, a incerteza sobre o processo de decisão é uma variável permanente e incentiva o decisor a trabalhar com informações parciais para avaliar os potenciais planos de ação para o contexto. Desta forma, em situações de incerteza as informações parciais podem contribuir para uma análise mais flexível sobre o contexto, considerando a possibilidade de experimentar cenários e indicar o mais adequado de acordo com as preferências expostas.

Um recurso amplamente utilizado para o tratamento de informações parciais em relação à representação dos critérios é o conjunto de abordagens para pesos substitutos (DAWES & CORRIGAN, 1974; STILLWELL *et al.*, 1981; BARRON, 1992; WANG & ZIONTS, 2006), em modelagem de problemas multicritério. Essas abordagens oferecem recursos matemáticos simples e resultados consistentes para a representação dos pesos dos critérios em problemas de decisão, e proporcionam uma abordagem de fácil compreensão e implementação.

A contribuição de informações parciais e dos pesos substitutos foi inicialmente comprovada por Barron (1992) na aplicação do modelo multicritério de agregação aditiva. Este tipo de modelo é útil no tratamento de problemática de escolha com racionalidade compensatória sobre a avaliação das alternativas. Considerando estas perspectivas, o presente estudo tem relevância em avaliar a eficiência de algumas metodologias para pesos substitutos na implementação de um método multicritério de apoio à decisão, baseado na racionalidade não compensatória e sobreclassificação na avaliação das alternativas. De acordo com pesquisas anteriores, este tipo de experimento não foi desenvolvido. No entanto, este experimento apresenta uma contribuição metodológica significativa para estudos na área.

Os experimentos realizados com a implementação dos pesos substitutos e métodos de decisão multicritério proporcionam embasamento, e oferecem resultados satisfatórios para a indicação de novas metodologias para o tratamento de problemas de decisão multicritério. Desta forma, a principal contribuição deste estudo é analisar o quão eficiente são as metodologias de pesos substitutos, considerando a abordagem do método PROMETHEE II.

Para evidenciar a relevância do experimento, é oportuna a aplicação da metodologia mais adequada de pesos substitutos para o PROMETHEE II sobre o contexto real de seleção de tecnologias críticas para a geração de energia elétrica.

Com a apresentação da relevância e contribuições do estudo, é considerada a apresentação dos objetivos geral e específicos do presente trabalho.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.2.1 *Objetivo Geral*

O presente trabalho tem como objetivo geral, identificar a abordagem mais adequada de pesos substitutos para a estrutura de tratamento de problemas multicritério utilizando o método PROMETHEE II, através de um experimento de simulação. Para validar o resultado obtido, é realizada uma aplicação da metodologia proposta pelo trabalho sobre o problema de priorização de tecnologias críticas para a geração de energia elétrica no território brasileiro.

1.2.2 *Objetivos Específicos*

Para o alcance do objetivo geral, os objetivos específicos são descritos conforme lista subsequente.

- Selecionar as abordagens para pesos substitutos de maior relevância para o tratamento de problemas de decisão multicritério;
- Apresentar a estrutura e as aplicações do método PROMETHEE II;
- Comparar o desempenho das abordagens para pesos substitutos na aplicação do método PROMETHEE II, através do procedimento de simulação;
- Indicar a abordagem mais adequada de pesos substitutos para a estrutura do PROMETHEE II;
- Formular uma proposta de aplicação do PROMETHEE II com pesos substitutos para o tratamento de um problema de avaliação de tecnologias críticas;
- Especificar uma estrutura lógica com base na metodologia proposta;
- Implementar uma ferramenta computacional de apoio ao processo de decisão com especificações baseadas na metodologia proposta;
- Avaliar os resultados obtidos pela aplicação da ferramenta computacional, desenvolvendo análises críticas sobre um contexto real.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho apresentado compreende uma estrutura construída para facilitar a compreensão dos conceitos tratados, bem como descrever como o objetivo geral e os específicos foram alcançados ao longo de seu desenvolvimento. Por tal, o presente trabalho foi organizado em sete capítulos, sendo estes descritos a seguir.

- No Capítulo 1 é apresentada a introdução sobre o tema e os conceitos que serão abordados em todo o trabalho;
- O Capítulo 2 aborda os conceitos teóricos que embasam a proposta do estudo;
- O Capítulo 3 é proposto o estudo de pesos substitutos; e considera a estrutura de experimento para avaliação do desempenho dos pesos substitutos;
- O Capítulo 4 apresenta o modelo de decisão aplicado ao contexto de avaliação de tecnologias críticas;
- No Capítulo 5 são expostas as considerações finais sobre a pesquisa, bem como algumas sugestões de trabalhos futuros.

Por fim, são listadas as referências utilizadas para a elaboração da pesquisa.

Em adição, é apresentado um Apêndice formado por tabelas que representam uma parte dos resultados obtidos pelo experimento.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA

A seguinte seção destina-se a construir argumentos teóricos sobre os principais conceitos abordados pelo presente trabalho. Para tal, esta seção é dividida em Fundamentação Teórica, Revisão da Literatura e, Síntese do Estado da Arte e Posicionamento do Trabalho.

2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica construída para este trabalho apresenta conceitos relevantes sobre Apoio Multicritério à Decisão, Método PROMETHEE II, Pesos Substitutos e Seleção de Tecnologias Críticas.

2.1.1 Decisão Multicritério

Em linhas gerais, as decisões são formuladas por processos que definem as diretrizes de uma operação. No início dos investimentos produtivos, os processos decisórios eram focados em um único objetivo ou consideravam condições para atender a uma única perspectiva, evidenciando a busca pela melhor solução. Entretanto, as limitações, o risco e a influência de vários fatores sobre o processo decisório conduzem os agentes de decisão a buscarem metodologias mais flexíveis e adequadas à descrição do contexto. Vincke (1992) discute sobre a dificuldade de tratar situações sob um único enfoque e incentiva a identificação dos diversos aspectos para descrever o cenário de decisão de forma mais adequada. Esta consideração evidencia o tratamento de decisões de forma racional, o que, muitas vezes, requer suporte analítico, utilizando as preferências do decisor, para o tratamento das limitações da racionalidade humana sobre a escolha dos melhores cursos de ações.

A consideração dos diversos fatores influentes no processo de decisão permite a descrição mais próxima da realidade para assegurar quais soluções mais adequadas sejam indicadas. Essa é uma das contribuições da modelagem de decisão multicritério, que oferece fundamentos e recursos auxiliares para o tratamento de problemas em que as alternativas devem ser avaliadas por diferentes critérios, muitas vezes, são conflitantes entre si e que apresentam naturezas e escalas de valores distintos (ROY 1996; ALMEIDA, 2013). Por esta perspectiva, no tratamento de problemas de decisão multicritério, a busca pela alternativa ótima não é a essência do processo de aplicação de um método, o que se propõe é a definição

da alternativa que melhor responda às expectativas e preferências do(s) decisor(es) (KEENEY & RAIFFA, 1976; ROY 1996; BELTON e STEWART, 2002; ALMEIDA, 2013).

A modelagem de decisão multicritério é útil quando o(s) decisor(es) encontra(m)-se numa situações em que deve(m) decidir por uma alternativa, dentro de um conjunto viável de possibilidades, considerando diversos objetivos e critérios influentes no contexto de avaliação. Estes critérios devem de definidos com base na capacidade de representar aspectos relevantes sobre as alternativas, apresentando suas escalas de desempenho. Desta forma, a este tipo de modelagem para problemas de decisão é aplicada em diversos contextos, tais como Gestão Ambiental e Hidrográfica (TROJAN & MORAIS, 2012; MORAIS *et al.*, 2014), Planejamento da Produção (ALMEIDA-FILHO *et al.*, 2007), Planejamento de Sistemas de Informação (ALMEIDA-FILHO & COSTA, 2010; GUSMÃO & COSTA, 2012), Logística e Transporte (ALENCAR & ALMEIDA, 2010), Gestão de Risco e Manutenção (CAVALCANTE *et al.*, 2010; GARCEZ & ALMEIDA, 2014), Gestão de Projetos (MIRANDA *et al.*, 2009), Gestão e Seleção de Portfólios (LOPES & ALMEIDA, 2013; ALMEIDA *et al.*, 2014; LOPES & ALMEIDA, 2015), dentre outros.

De acordo com Chen *et al.* (2009), o estudo de problemas de decisão multicritério tem em comum, a descrição do processo de modelagem, que pode ser descrito em três etapas: (i) identificação dos elementos que compõe o problema de decisão, (ii) elicitação das preferências do decisor e método de agregação de desempenho, e (iii) implementação do método para a escolha da alternativa mais adequada. Estas etapas são compreensíveis e permitem a explanação de suas características. Em especial, a identificação dos elementos de um problema de decisão multicritério e a elicitação das preferências do decisor podem se tornar tarefas difíceis, quando considerada a flexibilidade de inserir o número de alternativas e critérios que melhor represente o cenário de decisão (EDWARDS, 1977).

Em geral, um problema de decisão multicritério é modelado por um conjunto de alternativas que serão avaliadas por um conjunto de critérios através de níveis de desempenho estabelecidos pelo decisor para obter as consequências das preferências do decisor (BELTON & STEWART, 2002). Além desses elementos, devem ser definidos os pesos para cada critério, que representam a importância de cada um deles para o problema de decisão, e o método de agregação capaz de computar os valores e contribuições das avaliações obtidas e indicar o resultado mais adequado para o contexto de decisão (WINTERFELDT & EDWARDS, 1986).

As alternativas de decisão são definidas com o interesse de identificar cursos de ações que melhor satisfazem as operações do contexto analisado. Por esta perspectiva, deve ser considerada a problemática que será analisada no processo de decisão.

2.1.1.1 Alternativas de Decisão, Problemáticas de Decisão e Estruturas de Preferências

Um dos elementos de um problema de decisão é o conjunto de alternativas. As alternativas compreendem os elementos objetos de avaliação em um problema de decisão. Sobre este conjunto é esperado o processo de escolha da opção que melhor descreva os interesses do decisor. No entanto, este processo não é definido apenas sobre a descrição das alternativas disponíveis e das consequências da decisão, é preciso identificar qual problemática está sendo tratada. Roy (1996) define quatro tipos de problemáticas para os problemas de decisão multicritério. Estas são descritas a seguir.

- **Problemática de Descrição:** consiste em descrever as ações e suas consequências, em uma situação de decisão, de uma maneira formal e sistemática. Neste tipo de problemática, é entregue um procedimento cognitivo, ou uma descrição, para que o decisor compreenda melhor a situação de forma clara e objetiva.
- **Problemática de Escolha (ou de seleção):** consiste em escolher o subconjunto mais restrito de alternativas, com o objetivo de selecionar a “melhor” alternativa dentre estas. Este tipo de problemática entrega uma escolha ou um procedimento de escolha para o decisor.
- **Problemática de Classificação:** consiste em classificar as alternativas através de suas alocações em categorias pré-definidas. Esta problemática entrega um procedimento de alocação, definido pelas preferências do decisor.
- **Problemática de Ordenação:** consiste em classificar as alternativas com o objetivo de apresentar uma ordem de preferências entre elas. Esta problemática não apresenta classes previamente definidas, mas utiliza a significância da relação entre o desempenho das alternativas para alocá-las em uma ordenação.

Belton & Stewart (2002) apresentam duas problemáticas adicionais. São estas:

- **Problemática de Design:** consiste no processo de identificação de novas alternativas de decisão ou a criação de novas alternativas, possibilitando a elaboração de novos desenhos e estruturas relacionados ao problema de decisão.
- **Problemática de Portfólio:** consiste na escolha de um subconjunto de alternativas, considerando, além das características individuais das alternativas, as relações de interação entre as alternativas dentro do conjunto.

A formulação de um problema de decisão pode ser definida pela seleção de um ou mais tipos de problemáticas combinados. As problemáticas não são independentes entre si. Uma das indicações para esta consideração é que parece lógico que a ordenação das alternativas (Problemática de Ordenação) oferece subsídios para a seleção da melhor alternativa (Problemática de Escolha) (ROY, 1996).

Para que as alternativas sejam avaliadas pelos critérios, é preciso que sejam estabelecidas as relações de comparação entre estas, com o objetivo de fornecer resultados significativos para os tipos de problemáticas. Vincke (1992) apresenta a classificação das estruturas de preferência considerando as relações binárias entre as alternativas:

- **Ordem Completa:** Neste tipo de relação, as alternativas são comparadas par-a-par, de modo a estabelecer apenas as relações de preferência entre elas, ou seja, pretende-se definir a relação em que uma alternativa é melhor do que outra, não permitindo a igualdade entre elas. Este tipo de estrutura apresenta perda de informação significativa, uma vez que exige do decisor uma definição de superação entre as alternativas, que pode estar distante da realidade.
- **Pré-ordem Completa:** Neste tipo de relação, as alternativas são comparadas par-a-par com o objetivo de estabelecer a preferência de uma em relação à outra. No entanto, nesta relação, é possível definir a igualdade entre as alternativas, quando existirem. Esta característica agrega mais informação a este tipo de relação.
- **Semi-ordem Completa:** Este tipo de relação mantém as características da pré-ordem completa e acrescenta um limiar de indiferença no processo de comparação entre as alternativas. Desta forma, se a diferença entre duas alternativas em um critério for menor que este limiar, as alternativas são consideradas iguais.
- **Pseudo-ordem Completa:** Este tipo de relação apresenta a preferência fraca entre as alternativas, que ocorre quando o decisor não tem certeza que uma alternativa é

melhor que a outra, mas ele sabe que a segunda não pode ser melhor que a primeira. Ainda, é inserido o limiar de preferência, que define a preferência fraca quando a diferença entre duas alternativas é maior que o limiar de indiferença e menor que o limiar de preferência.

- Ordem intervalar Completa: Este tipo de relação é baseada na Semi-ordem e na Pseudo-ordem Completas e tem como principal característica a implementação de valores variáveis para os limiares de preferência e indiferença.

As estruturas de preferências completas exigem que o decisor defina a superação entre as alternativas, no entanto, é possível que o decisor não se sinta capaz ou confortável de definir esta relação. Para isto, é possível recorrer às estruturas parciais, considerando a relação de incomparabilidade entre as alternativas.

As apresentações das alternativas, problemáticas e estruturas de preferências são fundamentais para a construção do modelo e escolha do método de apoio à decisão. Em destaque, no presente trabalho, serão abordadas as problemáticas de escolha e de ordenação, em conjunto com uma estrutura de preferências que oferece uma pré-ordem completa sobre as alternativas. Esta seleção será discutida adiante.

Para compor a etapa de identificação dos elementos de um problema de decisão, devem ser consideradas as definições dos conjuntos de objetivos e critérios de avaliação, bem como a definição dos pesos de cada um deles. Estes pesos representam a importância relativa de cada objetivo e critério para o contexto de decisão considerado.

2.1.1.2 Objetivos e Critérios de Avaliação

Os conjuntos de objetivos e de critérios são componentes influentes no processo de decisão. Os elementos destes conjuntos são capazes de mensurar a importância de aspectos relevantes para o decisor, quando considerada a avaliação das alternativas, e promover a compreensão das interações entre as alternativas. Em geral, os critérios são representações de objetivos, e são formalizados por uma função $g_i(a)$, que representa as preferências de avaliação do decisor sobre os elementos do conjunto de alternativas. Por este aspecto, quando tratados os problemas multicritério, assume-se uma família de critérios, representada pelas funções de cada um.

A definição dos critérios deve representar todos os interesses do problema de decisão sem que haja redundância de parâmetros (ALMEIDA, 2013). Ou seja, os critérios devem ser

definidos levando-se em consideração as propriedades de exaustividade, coesão e não redundância (ROY, 1996). Por esta perspectiva, é preciso estabelecer objetivos relevantes, completos, mensuráveis, concisos e compreensíveis (KEENEY, 1992).

Os critérios de avaliação, definidos pelos objetivos de interesse do decisor, representam as medidas utilizadas para avaliar diferentes alternativas. Em primeira instância, no processo de resolução de um problema multicritério é preciso considerar a avaliação intracritério e a avaliação intercritério (ALMEIDA, 2013).

A avaliação intracritério corresponde à avaliação do desempenho de cada alternativa para cada critério, resultando numa função valor que representa o indicador de desempenho desta relação. Esta análise oferece a estrutura da matriz de consequências utilizada na modelagem multicritério como recurso capaz de descrever formalmente os dados de entrada para a maioria dos métodos de apoio à decisão multicritério. As funções de desempenho podem assumir diferentes distribuições, no entanto, é comum considerar a linearidade dos valores representativos.

Na avaliação intercritério, são assumidos os valores que representam o efetivo grau de importância de cada um dos critérios para o problema de decisão. Nesta avaliação, a combinação dos critérios é considerada para construir um método que agregue as informações e conduz a definição de funções valores que melhor representem as preferências do decisor. Em geral, esta avaliação é identificada pela formalização de “pesos” ou grau de importância dos critérios no problema de decisão, e é fundamental para indicar a linearidade dos critérios.

Com isso, é possível utilizar recursos de tabelas, capaz de descrever estas avaliações, considerando as possíveis escalas de níveis qualitativos e quantitativos para cada critério (KEENEY & RAIFFA, 1976; ALMEIDA, 2013).

Na modelagem de preferências, são considerados os tipos de escala que representam a contribuição dos critérios em um problema de decisão. Cada escala permite que as alternativas sejam avaliadas conforme o interesse do critério definido, desta forma, os critérios podem assumir escalas numérica (de razão, intervalar ou ordinal) ou verbal. Cada uma destas escalas admite um conjunto de operações viáveis para a comparação entre as alternativas e, ainda, é possível realizar transformações para que os valores definidos pela avaliação das alternativas sejam coerentes.

Em destaque, a escala ordinal é a que apresenta menor quantidade de informações, pois os valores assumidos por esta escala representam apenas a ordem de prioridade entre os critérios, não informando distância, cardinalidade e não permite operações básicas entre os elementos. Apesar de oferecer poucas informações, este tipo de escala pode ser considerado

quando o decisor não apresenta capacidade ou segurança para determinar maiores detalhes sobre suas preferências e opta por fornecer informações parciais ou incompletas. Desta forma, a escala ordinal pode auxiliar no tratamento de informações parciais e fornecer uma estrutura para a representação das preferências do decisor, como será discutido adiante.

A abordagem de agregação das informações sobre a avaliação das alternativas pode utilizar diferentes escalas para definir os valores de avaliação. No entanto, é importante que todos os valores sejam representados numa mesma escala quando o real estudo de agregação de desempenho seja aplicado. Desta forma, são apresentados os procedimentos de normalização, que executam a transformação de escalas e são capazes de apresentar os valores das avaliações sobre o intervalo (0,1), para quando os critérios forem lineares.

2.1.1.3 Procedimentos de Normalização

Os procedimentos de normalização são amplamente utilizados nos estudos sobre problemas de decisão multicritério por terem a contribuição de transformar as escalas de avaliação e permitirem que os valores sejam avaliados sobre um intervalo único, em geral, entre (0,1). Desta forma, o valor 0 indica a menor preferência e o valor 1, a maior preferência para cada critério no procedimento de avaliação das alternativas (ALMEIDA, 2013). No entanto, é possível assumir transformações com limites diferentes.

Os procedimentos de normalização apresentados por ALMEIDA (2013) são úteis e adequados para a situação em que os critérios assumem valores maiores que zero e a diretriz de maximização de suas contribuições. Assumindo-se $v'_j(a_i)$ como o valor normalizado e $v_j(a_i)$ como a função valor de cada critério j e cada alternativa i , são considerados três procedimentos de normalização:

- Procedimento 1: Os valores são mantidos sobre o intervalo $0 \leq v'_j(a_i) \leq 1$, em que o valor zero é apenas a representação da menor preferência e o valor obtido é um percentual da variação entre os valores máximo e mínimo, definidos na avaliação. Desta forma, tem-se que $v'_j(a_i) = [v_j(a_i) - \text{Min } v_j(a_i)] / [\text{Max } v_j(a_i) - \text{Min } v_j(a_i)]$.
- Procedimento 2: Os valores são obtidos no intervalo $0 < v'_j(a_i) \leq 1$, em que o valor obtido representa um percentual do valor máximo definido pela avaliação, indicando a distância das alternativas para a alternativa de maior valor. Desta forma, tem-se que $v'_j(a_i) = v_j(a_i) / [\text{Max } v_j(a_i)]$.

- Procedimento 3: Assume a divisão pela soma de todos os valores definidos pela avaliação das alternativas. Os valores são assumidos no intervalo $0 \leq v'_j(a_i) \leq 1$, em que são interpretados como percentuais da soma total. Desta forma, tem-se que $v'_j(a_i) = v_j(a_i) / [\sum_i v_j(a_i)]$.

O Procedimento 1 é útil na representação de várias escalas de avaliação, no entanto, não mantém a proporcionalidade entre os valores de representação. O Procedimento 3 é amplamente utilizado para a normalização de pesos em método multicritério, pois apresenta valores mais concentrados, que respeitam a restrição do somatório igual a um.

Os procedimentos apresentados são úteis para os diversos métodos de apoio multicritério à decisão, que tem como principal contribuição o suporte ao decisor no tratamento de problemas complexos através de recursos analíticos, que permitem a inserção de diversos fatores influentes no contexto de decisão. Os diversos métodos apresentados na literatura utilizam os conceitos abordados sobre a construção dos elementos do problema, tipo de problemática, estrutura de preferências, definição de critérios e procedimentos de normalização para a modelagem do problema. Ainda, podem assumir racionalidades que permitem compensar, ou não, o desempenho das alternativas, quando considerada a avaliação intracritério.

2.1.1.4 Métodos de Apoio Multicritério à Decisão

Para apoiar o processo de decisão multicritério existem métodos analíticos, tão importantes quanto a qualidade da informação entregue ao processo decisório (GOMES *et al.*, 2002). Estes métodos são capazes de estruturar os problemas de decisão e ajudar o decisor a identificar, comparar e avaliar o conjunto de alternativas disponível para encontrar uma solução ótima, ou uma solução satisfatória, considerando diversos critérios.

Revisões sobre alguns métodos utilizados podem ser encontradas em Keeney & Raiffa (1976), Zionts & Wallenius (1976), Saaty (1980), Roy (1996), Vincke (1992), Roy & Bouyssou (1993), Belton & Stewart (2002), Almeida (2013).

No entanto, é possível classificar os diversos métodos desenvolvidos para o tratamento de problemas de decisão multicritério em dois grandes grupos, reconhecidos pela Escola Americana e pela Escola Europeia, ou ainda, pela racionalidade compensatória ou não compensatória empregada sobre os critérios.

A principal característica da Escola Americana é a utilização de modelos aditivos com agregação das preferências do decisor na formulação de uma única forma funcional para indicar os interesses do problema. Estes métodos agregam os critérios em um único, através de uma função de síntese que atribui um valor a cada alternativa. O método de destaque nesta escola é a Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT), que formula a racionalidade compensatória na avaliação das alternativas (KEENEY & RAIFFA, 1976).

A racionalidade compensatória admite que o menor desempenho de uma alternativa em um critério pode ser compensado por um melhor desempenho desta alternativa em outro critério, considerando *trade-offs* entre os critérios (KEENEY, 1992; KEENEY, 2002). Este tipo de racionalidade é amplamente utilizado por método de agregação única de síntese.

Por outro lado, na Escola Europeia, a ênfase é dada aos métodos que exploram a racionalidade não compensatória para estabelecer as relações de sobreclassificação entre as alternativas, considerando os vários critérios. A racionalidade não compensatória assume que as preferências entre duas alternativas dependem apenas dos subconjuntos de critérios que as favorecem, ou seja, a preferência é assumida pela contribuição do critério e não pela diferença de avaliação em cada um (FISHBURN, 1976; ALMEIDA, 2013).

Dentre os métodos desenvolvidos pela Escola Europeia, destacam-se os métodos da família ELECTRE (*ELimination Et Choix Traduisant la RÉalité*) (ROY, 1996; VINCKE, 1992; BELTON & STEWART, 2002) e da família PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation*) (BRANS & VINCKE, 1985; BRANS & MARESCHAL, 2002). A contribuição estes últimos é reconhecida em diversos contextos (BEHZADIAN *et al.*, 2010).

Estes métodos, ainda, são classificados pela relação de sobreclassificação que representam sobre as preferências do decisor na avaliação das alternativas. Estas características impulsionam o presente trabalho a destacar o estudo sobre os métodos multicritério de sobreclassificação, com destaque para a família PROMETHEE.

2.1.2 Métodos Multicritério de Sobreclassificação

Os métodos multicritério de sobreclassificação são caracterizados pela metodologia que define a superação entre o desempenho das alternativas. Estes métodos utilizam a comparação par a par para estabelecer a relação de superação entre o desempenho das alternativas, assumindo a possibilidade de haver incomparabilidade na estrutura de preferências do decisor. Por esta característica, os métodos podem oferecer informações parciais como

recomendações, baseados na racionalidade não compensatória no processo de avaliação das alternativas, em que o desempenho de cada uma é avaliado conforme sua real atribuição em cada critério (ALMEIDA, 2013).

Outras características destes métodos é a identificação do peso. Neste método, o peso dos critérios representa o grau de importância dado a cada um deles. Dessa forma, os métodos de sobreclassificação não se preocupam com a transformação de escalas na avaliação intracritérios e assumem a racionalidade não compensatória na avaliação das alternativas.

Dentre os métodos de sobreclassificação, destaca-se a família de métodos PROMETHEE. Estes métodos apresentam dois módulos de operação: (i) construção das relações de sobreclassificação e (ii) exploração dessas relações para o apoio a decisão (BRANS & MARESCHAL, 2002). Dessa forma, o resultado das análises realizadas por estes métodos representam relações de valor, que podem ser interpretadas de forma gerencial.

A estrutura de avaliação dos métodos desta família é semelhante, coerente e permite a interação dos diversos componentes do problema de decisão. A aplicação dos métodos da família PROMETHEE é amplamente encontrada na literatura e sua contribuição é reconhecida em muitos contextos, tais como gestão de portfólios (VETSCHERA & ALMEIDA, 2012; ALMEIDA & VETSCHERA, 2012), gestão da manutenção em plantas produtivas (CAVALCANTE *et al.*, 2010), gestão da produção (RAO & PATEL, 2010) e gestão de redes hidrográficas (MORAIS & ALMEIDA, 2007; MAHER & MARESCHAL, 1995; FONTANA & MORAIS, 2013; SILVA *et al.*, 2010).

Behazadian *et al.* (2010) apresentam vários métodos da família PROMETHEE aplicados em diferentes contexto. A principal característica do PROMETHEE I e PROMETHEE II é que o primeiro oferece uma pré-ordem parcial e o segundo oferece uma pré-ordem completa, utilizando os pressupostos matemáticos do primeiro. O PROMETHEE III utiliza a ordenação por intervalos para organizar as alternativas e o PROMETHEE IV é destinado aos casos de soluções contínuas. O PROMETHEE V é aplicado para resolução de problemas de seleção de portfólio e o PROMETHEE VI utiliza a representação de preferências através de intervalos de valores para os pesos dos critérios. Além destes métodos, outras adaptações podem ser encontradas na literatura (MACHARIS *et al.*, 1998; FIGUEIRA *et al.*, 2004; HALOUANI *et al.*, 2009).

As contribuições de Vincke (1992) e Belton & Stewart (2002) permitem identificar que o PROMETHEE II é uma variação do PROMETHEE I, pois utiliza sua base conceitual e prática para, com base nas recomendações do segundo, oferecer uma pré-ordem completa sobre as alternativas. Este tipo de recomendação oferece vantagens para o tratamento das

problemáticas de escolha e de ordenação. Por tal, este estudo é concentrado na apresentação do método PROMETHEE II.

2.1.2.1 Método PROMETHEE II

A estrutura do PROMETHEE II se baseia nos dois módulos de operação, citados anteriormente. Em primeira instância, as características dos critérios são avaliadas para indicar o intervalo de diferenças entre o desempenho das alternativas para cada critério. Nesta fase, o decisor deve inserir informações sobre os critérios de avaliação, tais como os pesos e as funções de preferências. Com isso, é possível que, em situações de decisão, sejam inseridos os limiares de preferência e/ou de indiferença sobre o desempenho das alternativas, e a representação dos critérios passa a ser associada a um tipo de função para representa as preferências do decisor. São seis tipos de funções suportados pelo PROMETHEE e representadas por $P_i(a,b)$ na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Critérios para o PROMETHEE

| Critério | Diferença de desempenho entre alternativas | $P_i(a,b)$ |
|-----------------------|--|---|
| Usual | $g_i(a) - g_i(b) > 0$ | $P(a,b) = 1$ |
| | $g_i(a) - g_i(b) \leq 0$ | $P(a,b) = 0$ |
| Quase critério | $g_i(a) - g_i(b) > q$ | $P(a,b) = 1$ |
| | $g_i(a) - g_i(b) \leq q$ | $P(a,b) = 0$ |
| Limiar de preferência | $g_i(a) - g_i(b) > p$ | $P(a,b) = 1$ |
| | $g_i(a) - g_i(b) \leq p$ | $P(a,b) = [g_i(a) - g_i(b)]/p$ |
| | $g_i(a) - g_i(b) \leq 0$ | $P(a,b) = 0$ |
| Pseudo critério | $g_i(a) - g_i(b) > p$ | $P(a,b) = 1$ |
| | $q < g_i(a) - g_i(b) \leq p$ | $P(a,b) = 1/2$ |
| | $g_i(a) - g_i(b) \leq q$ | $P(a,b) = 0$ |
| Área de indiferença | $g_i(a) - g_i(b) > p$ | $P(a,b) = 1$ |
| | $q < g_i(a) - g_i(b) \leq p$ | $P(a,b) = [g_i(a) - g_i(b) - q] / (p - q)$ |
| | $g_i(a) - g_i(b) \leq q$ | $P(a,b) = 0$ |
| Critério gaussiano | $g_i(a) - g_i(b) > 0$ | <i>A preferência aumenta segundo uma distribuição normal.</i> |
| | $g_i(a) - g_i(b) \leq 0$ | $P(a,b) = 0$ |

Fonte: Adaptada de Almeida (2013) e Brans e Mareschal (2002)

A definição das funções para os critérios é dependente do interesse do decisor em oferecer mais informações sobre suas preferências. Com isso, é possível considerar os limiares de preferência e de indiferença, e um processo de elicitacão que conduza a definição de valores adequados (ALMEIDA, 2013).

A primeira fase da estrutura do PROMETHEE II apresenta as interações entre os parâmetros da estrutura de decisão para estabelecer as relações de sobreclassificação. Assim, considera-se o grau de sobreclassificação $\pi(a,b)$, calculado com base na comparação entre duas alternativas a e b , descrita por $P_i(a,b)$, relacionado a um critério particular e o intervalo de preferência entre $(0,1)$. Este índice é definido por Brans & Vincke (1985) e expresso pela Equação (2.1), onde $w_i \geq 0$, $i = 1, 2, \dots, n$, representa a importância relativa de cada critério (que, por vezes, é referenciado por “peso” dos critérios) e $\sum_{i=1}^n w_i = 1$.

$$\pi(a,b) = \sum_{i=1}^n P_i(a,b) \cdot w_i \quad (2.1)$$

Em segunda instância, são definidos os fluxos de sobreclassificação que indicam as relações positiva e negativa a partir do resultado da comparação par a par entre as alternativas. O fluxo positivo é expresso pela Equação (2.2), e indica a relação em que o desempenho de a supera o desempenho de b . Enquanto o fluxo negativo é expresso pela Equação (2.3), e indica a superação de b em relação à alternativa a . Nestas expressões, $(m-1)$ é o número de alternativas comparadas com uma alternativa de referência a . Os fluxos são calculados para cada uma das alternativas definidas pela estrutura de decisão (BRANS & MARESCHAL, 2002).

$$\phi^+(a) = \frac{1}{m-1} \sum_{b \in A} \pi(a,b) \quad (2.2)$$

$$\phi^-(a) = \frac{1}{m-1} \sum_{b \in A} \pi(b,a) \quad (2.3)$$

A utilização dos fluxos positivos e negativos apresentados pelas Equações (2.2) e (2.3) oferece resultados normalizados para o valor da análise, mantendo os valores dentro do intervalo $(0,1)$, independentemente do número de alternativas consideradas pela estrutura de decisão.

O PROMETHEE II oferece uma pré-ordem completa, através do cálculo do fluxo total líquido do desempenho de cada alternativa, obtido pela diferença entre os fluxos positivo e

negativo de cada alternativa (BRANS & MARESCHAL, 2002). O fluxo total líquido é expresso pela Equação (2.4), e apresenta valores dentro do intervalo (-1,1).

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a) \quad (2.4)$$

Com base neste indicador, o método é capaz de priorizar as alternativas com base na relação direta de que quanto maior o fluxo total líquido, mais adequada é a alternativa e mais alta será sua posição no ordenamento final. Desta forma, as alternativas são alocadas em ordem decrescente com base no fluxo líquido, considerando as relações de preferência e indiferença, indicadas pelas Equações (2.5) e (2.6). A relação de indiferença caracteriza a recomendação de pré-ordem completa estabelecida pelo método (ALMEIDA, 2013).

$$\text{Preferência: } aPb \text{ se } \phi(a) > \phi(b) \quad (2.5)$$

$$\text{Indiferença: } aIb \text{ se } \phi(a) = \phi(b) \quad (2.6)$$

Como já discutido, o PROMETHEE II é um método baseado na racionalidade não compensatória no processo de avaliação das alternativas, e utiliza parâmetros como os pesos dos critérios para representar as preferências do decisor e agregar as informações para definir o valor de desempenho numa estrutura de decisão. Os pesos, para este método, representam a importância relativa dos critérios ou a influência de cada critério para o problema de decisão.

O PROMETHEE II não oferece uma regra específica para a determinação dos pesos dos critérios, mas assume que o decisor é capaz de determinar valores apropriados para representar a importância dos critérios, pelo menos em situações em que o número de critérios não seja tão grande, ou em situações em que não há fatores que dificultem o processo de definição destes valores. Quando a complexidade do problema é maior e o número de critérios é extenso, o decisor pode apresentar insegurança, desconforto, pouco conhecimento ou optar por não definir valores exatos e, por isso, recorrer a métodos analíticos que auxiliam o processo de elicitação destes valores. Alguns desses processos são discutidos por Keeney & Raiffa (1976), Edwards (1977), Winterfeldt & Edwards (1986), Edwards & Barron (1994) e Wang & Zionts (2006).

O processo de definição dos pesos dos critérios é fundamental para a representação da estrutura de preferências do decisor e a obtenção de recomendações favoráveis aos seus interesses na modelagem de problemas de decisão multicritério. No entanto, a incerteza é

inerente ao processo de decisão e pode influenciar no conforto do decisor em relação a determinação de valores precisos para estes parâmetros. Nestas situações, é comum que o decisor ofereça apenas informações parciais sobre suas preferências e admita valores representativos para isto, tais como as indicações entregues pela escala ordinal sobre os critérios de avaliação.

A flexibilidade promovida pelos métodos PROMETHEE para a elicitación dos pesos dos critérios permite a utilização de técnicas que mantêm a coerência sobre as preferências do decisor. Assim, podem-se assumir recursos de tratamento de informações parciais para a representação dos pesos, com o objetivo de minimizar o esforço racional do decisor e oferecer definições consistentes sobre suas preferências. Por esta perspectiva, é oportuna a discussão de como a utilização de informações parciais pode ser inserida e tratada na modelagem de problemas de decisão.

2.1.3 Utilização da Informação Parcial em Problemas de Decisão

Em situações de decisão, muitas vezes a dificuldade encontrada pelos decisores em definir os valores precisos para os parâmetros é causada por fatores evidenciados no processo complexo de estruturação do problema (ROY & BOUYSSOU, 1989). Em especial, os critérios de avaliação são definidos por graus de importância (pesos) que representam os interesses do decisor e podem estar associados a requisitos técnicos de difícil mensuração. Além deste, outros fatores podem influenciar para que o decisor não sinta segurança, conforto ou desejo em determinar um valor exato para esses parâmetros. Alguns destes fatores são considerados por French (1995) e Zimmerman (2000), tais como:

- A necessidade de criar variáveis indiretas para a representação dos objetivos e critérios de avaliação;
- Alguns parâmetros podem estar associados a conhecimentos técnicos, que podem estar distantes do escopo de atuação do decisor e impedir que o mesmo defina valores exatos para esses;
- O decisor pode evidenciar a dificuldade de atribuir valores numéricos à suas preferências;
- O decisor pode assumir a incerteza de processos e desempenhos futuros, e sentir-se inseguro em definir um valor que possa interferir no conjunto de valores;

- Os parâmetros podem assumir pressupostos estocásticos e não serem considerados precisos para o contexto de decisão;
- As informações sobre os parâmetros podem ser apresentadas com pouca credibilidade, ser contraditória ou controversa.

Em outras situações, tais como a decisão em grupo, a possibilidade de haver divergências de opinião ou de preferência entre os membros envolvidos é significativa e pode acarretar diversas perdas para o contexto organizacional.

A definição dos pesos dos critérios é essencial para o processo de decisão, no entanto, esta não é uma tarefa simples. Para a representação dos pesos, as informações parciais sobre o contexto de incerteza podem ser utilizadas para representar a preferência do decisor. Por informação parcial ou imprecisa ou incompleta, é entendida uma combinação de valores não exatos para definir um parâmetro (PARK & KIM, 1997; FRENCH & RIOS, 1989; BANA e COSTA & VINCKE, 1995).

No processo de definição de pesos para os critérios, a informação parcial pode ser representada pela atribuição ordinal para os elementos do conjunto. Com isso, o esforço do decisor é restrito a definir a ordem de prioridade, ou nível de influência, que cada critério apresenta para o problema de decisão, e permitir que esta informação reflita suas preferências. Por esta perspectiva, a utilização da informação ordinal consiste em assumir esta informação como “verdadeira” e satisfatória para a representação das preferências do decisor.

No entanto, a informação ordinal sobre os critérios não apresenta coerência quando utilizada diretamente em um problema de decisão. Esta informação requer um tratamento para que valores cardinais sejam calculados e inseridos no modelo de decisão. Existem muitos métodos capazes de transformar a informação ordinal sobre os critérios em valores representativos como substitutos para os pesos em estruturas de decisão (BARRON & BARRETT, 1996; WANG & ZIONTS, 2006).

A abordagem de pesos substitutos é comumente discutida na literatura e apresenta contribuições significativas no tratamento de informações parciais. O trabalho apresentado destina-se a apresentar as contribuições de quatro regras comumente aplicadas para a representação de pesos substitutos em problemas de decisão multicritério.

2.1.3.1 Abordagens para Pesos Substitutos

Como já discutido, em modelos de decisão multicritério, um dos principais elementos para a representação de problemas de decisão é o conjunto dos critérios e a definição dos pesos destes elementos. Roy & Mousseau (1996) e Choo *et al.* (1999) sugerem que a palavra “peso” seja um termo genérico, sujeita a várias interpretações dependentes do contexto e do modelo de decisão. No entanto, o peso representa a medida equivalente à importância relativa de cada critério em um problema de decisão, quando o método PROMETHEE II é aplicado. Em outras palavras, a definição de um peso faz referência ao valor que representa o impacto de cada critério para o problema de decisão, de acordo com as preferências do decisor.

Numa estrutura de decisão multicritério, geralmente, o vetor de pesos é representado por uma escala constante em que todos os elementos respeitam as restrições de serem maiores ou iguais a zero e a soma de todos os valores é igual a um. Com isso, assumindo-se que $W = \{w_i, w_{i+1}, \dots, w_n\}$ é o conjunto de todos os pesos e $w_i \geq 0$ com $i = 1, 2, \dots, n$ sendo o número de critérios, tem-se que $\sum_{i=1}^n w_i = 1$.

A maioria das abordagens para pesos substitutos exige a informação ordinal sobre os critérios de avaliação. Dessa forma, pode-se expressar a informação ordinal como $w_1 \geq w_2 \geq \dots \geq w_n \geq 0$, em que w_1 é o critério de maior relevância e os elementos w_i podem ser definidos numa escala normalizada entre (0,1).

Existem várias abordagens para representar o valor dos pesos em problemas de decisão. A principal contribuição destas metodologias é assumir a informação ordinal, ou de prioridade, para calcular valores de referência para a modelagem do problema de decisão (WANG & ZIONTS, 2006).

A regra mais simples consiste em assumir que não há informação de prioridade entre os critérios e todos os elementos têm a mesma relevância para o problema de decisão (DAWES & CORRIGAN, 1974). Essa recomendação é manter os pesos iguais (do inglês, *equal weights* - EW), considerando a expressão definida pela Equação (2.7) sendo n o número total de critérios.

$$w_i(EW) = \frac{1}{n} \tag{2.7}$$

A Tabela 2.2 apresenta o resultado obtido pela Equação (2.7) para casos de $n = 8$ critérios.

Tabela 2.2 – Pesos Iguais para n critérios

| Posição | n = 2 | n = 3 | n = 4 | n = 5 | n = 6 | n = 7 | n = 8 |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 0,5 | 0,333 | 0,25 | 0,20 | 0,166 | 0,143 | 0,125 |
| 2 | 0,5 | 0,333 | 0,25 | 0,20 | 0,166 | 0,143 | 0,125 |
| 3 | | 0,333 | 0,25 | 0,20 | 0,166 | 0,143 | 0,125 |
| 4 | | | 0,25 | 0,20 | 0,166 | 0,143 | 0,125 |
| 5 | | | 0,25 | 0,20 | 0,166 | 0,143 | 0,125 |
| 6 | | | | | 0,166 | 0,143 | 0,125 |
| 7 | | | | | | 0,143 | 0,125 |
| 8 | | | | | | | 0,125 |

Uma segunda regra é conhecida por *Rank-Sum* (RS) que oferece pesos normalizados a partir da relação entre a posição do ordenamento do critério e a soma das posições (STILLWELL *et al.*, 1981). De acordo com o número de critérios, o intervalo dos pesos é normalizado pela escala que define o critério de maior importância com valor $n/(soma\ das\ posições)$ e o critério de menor importância com valor $1/(soma\ das\ posições)$. Esta regra é expressa pela Equação (2.8) sendo n o número total de critérios.

$$w_i(RS) = \frac{2(n + 1 - i)}{n(n + 1)} \tag{2.8}$$

A Tabela 2.3 apresenta o resultado obtido pela Equação (2.8) para casos de $n = 8$ critérios.

Tabela 2.3 – Pesos RS para n critérios

| Posição | n = 2 | n = 3 | n = 4 | n = 5 | n = 6 | n = 7 | n = 8 |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 0,6667 | 0,5000 | 0,4000 | 0,3333 | 0,2857 | 0,2500 | 0,2222 |
| 2 | 0,3333 | 0,3333 | 0,3000 | 0,2667 | 0,2381 | 0,2143 | 0,1944 |
| 3 | | 0,1667 | 0,2000 | 0,2000 | 0,1905 | 0,1786 | 0,1667 |
| 4 | | | 0,1000 | 0,1333 | 0,1429 | 0,1429 | 0,1389 |
| 5 | | | | 0,0667 | 0,0952 | 0,1071 | 0,1111 |
| 6 | | | | | 0,0476 | 0,0714 | 0,0833 |
| 7 | | | | | | 0,0357 | 0,0556 |
| 8 | | | | | | | 0,0278 |

Fonte: Adaptada de Roberts e Goodwin (2002)

Baseada na *Reciprocal of the Ranks* (RR) (STILLWELL *et al.*, 1981) é possível obter um conjunto de valores assumindo os valores a partir da relação da posição do critério no ordenamento, dividindo-se cada valor não normalizado pela soma desses termos, obtendo-se valores que respeitam a restrição da soma igual a um. Esta regra é expressa pela Equação

(2.9), em que $i = 1, 2, \dots, n$ é a posição do critério no ordenamento, e $j = 1, 2, \dots, n$ é o número de critérios.

$$w_i(RR) = \frac{1/i}{\sum_{j=1}^n 1/j} \quad (2.9)$$

A Tabela 2.4 apresenta o resultado obtido pela Equação (2.9) para casos de $n = 8$ critérios.

Tabela 2.4 – Pesos RR para n critérios

| Posição | $n = 2$ | $n = 3$ | $n = 4$ | $n = 5$ | $n = 6$ | $n = 7$ | $n = 8$ |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1 | 0,6667 | 0,5455 | 0,4800 | 0,4379 | 0,4082 | 0,3857 | 0,3679 |
| 2 | 0,3333 | 0,2727 | 0,2400 | 0,2190 | 0,2041 | 0,1928 | 0,1840 |
| 3 | | 0,1818 | 0,1600 | 0,1460 | 0,1361 | 0,1286 | 0,1226 |
| 4 | | | 0,1200 | 0,1095 | 0,1020 | 0,0964 | 0,0920 |
| 5 | | | | 0,0876 | 0,0816 | 0,0771 | 0,0736 |
| 6 | | | | | 0,0680 | 0,0643 | 0,0613 |
| 7 | | | | | | 0,0551 | 0,0525 |
| 8 | | | | | | | 0,0460 |

Fonte: Adaptada de Roberts e Goodwin (2002)

Para este trabalho, a última regra de pesos substitutos assumida é o *Rank-Order Centroid* (ROC) (BARRON, 1992). Esta regra utiliza os vértices de um simplex para definir o peso centroide para cada critério. O simplex é uma figura geométrica limitada por vértices de um conjunto convexo, útil para a representação de valores para a solução de problemas de programação linear (SPENDLEY *et al.*, 1962, DEMING, 1981). A partir da Equação (2.10) é possível atribuir os valores para cada posição dos critérios no ordenamento definido, em que n é o número de critérios, e $j = 1, 2, \dots, n$ é a posição dos critérios no ordenamento.

$$w_i(ROC) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{j} \quad (2.10)$$

A Tabela 2.5 apresenta o resultado obtido pela Equação (2.10) para casos de $n = 8$ critérios.

Tabela 2.5 – Pesos ROC para n critérios

| Posição | $n = 2$ | $n = 3$ | $n = 4$ | $n = 5$ | $n = 6$ | $n = 7$ | $n = 8$ |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1 | 0,7500 | 0,6111 | 0,5208 | 0,4567 | 0,4083 | 0,3704 | 0,3397 |
| 2 | 0,2500 | 0,2778 | 0,2708 | 0,2567 | 0,2417 | 0,2276 | 0,2147 |
| 3 | | 0,1111 | 0,1458 | 0,1567 | 0,1583 | 0,1561 | 0,1522 |
| 4 | | | 0,0625 | 0,0900 | 0,1028 | 0,1085 | 0,1106 |
| 5 | | | | 0,0400 | 0,0611 | 0,0728 | 0,0793 |
| 6 | | | | | 0,0278 | 0,0442 | 0,0543 |
| 7 | | | | | | 0,0204 | 0,0334 |
| 8 | | | | | | | 0,0204 |

Fonte: Adaptada de Roberts e Goodwin (2002)

As abordagens apresentadas para pesos substitutos oferecem estruturas simples, de fácil compreensão e aplicação. Existem outras abordagens que oferecem interações mais complexas para a oferta de valores representativos para os pesos dos critérios, em comparação com as abordagens “tradicionais” apresentadas anteriormente (BARRON & BARRET, 1996; ANH & PARK, 2008; SARABANDO & DIAS, 2009; KAO, 2010; AHN, 2011; DANIELSON *et al.*, 2014). No entanto, a eficiência do processo comparativo sobre o desempenho das abordagens EW, RS, RR e ROC é evidente e satisfatório para os cumprimentos dos objetivos do presente estudo.

O tratamento de informações ordinais sobre o conjunto de critérios na estrutura de decisão multicritério é estudado como recurso auxiliar para a indicação de pesos substitutos em situações que o decisor não apresenta confiança para determinar um valor exato para os pesos. Desta forma, o presente trabalho tem como fundamento avaliar a eficiência das regras tradicionais no método multicritério de sobreclassificação, quando evidenciadas as intenções de selecionar a primeira melhor alternativa, baseado na problemática de escolha, e de obter uma ordem de prioridade entre as alternativas, baseado na problemática de ordenação.

Desta forma, é oportuna a discussão sobre a utilização de pesos substitutos influencia nos problemas de decisão multicritério, enfatizando potenciais aplicações e tratamento de problemas gerenciais.

2.1.4 Elicitação de Pesos em Problemas de Decisão Multicritério

As dificuldades na resolução de problemas de decisão surgem quando são considerados vários critérios, ou seja, para que a escolha da melhor alternativa o decisor deve considerar vários critérios simultaneamente (SIMON, 1976; MARCH, 1994). Nestas situações, a limitação cognitiva humana é evidenciada e, para este tratamento, o analista de decisão utiliza

métodos de apoio à decisão para conjugar as preferências do decisor e indicar a solução mais adequada, considerando a complexidade do contexto.

Em geral, no contexto organizacional, as decisões são tomadas com base nos interesses estratégicos, considerando o melhor desempenho do processo sistêmico que envolve o planejamento e o processamento das operações (PORTER, 1980). Para manter a consistência das ações, o decisor deve estabelecer um raciocínio consistente sobre suas preferências, sobretudo sobre os objetivos e critérios de avaliação considerados pelo contexto de decisão.

Em especial, a elicitación de pesos para os critérios é um procedimento fundamental no processo de modelagem de problemas multicritério, pois permite a interação de parâmetros e a representação das preferências do decisor. Existem várias metodologias para a definição de pesos, que apresentam particularidades e diferentes diretrizes para a obtenção dos valores. Riabacke *et al.* (2012) apresentam uma revisão sobre as técnicas de elicitación dos pesos em problemas de decisão multicritério.

Vários estudos sobre os procedimentos de elicitación dos pesos preocupam-se em definir o comportamento do decisor diante das situações de incerteza, e estes podem apresentar conceitos de extração de informação sobre as preferências do decisor, fornecer representações estruturadas para a indicação destas preferências ou interpretar uma situação para obter as informações desejadas (RIABACKE *et al.*, 2012). Estes conceitos permitem a construção de fundamentos de aplicação prática para a determinação de valores sobre a importância dos critérios de avaliação em contextos de decisão organizacional.

A aplicação de procedimentos de elicitación é útil quando o decisor apresenta fatores que o impeçam de definir valores exatos para a importância dos critérios. Tais procedimentos possibilitam o tratamento de informações parciais sobre os parâmetros do problema, tais como a informação ordinal dos critérios pela priorização de suas contribuições (BELTON & STEWART, 2002; EDWARDS & BARRON, 1994; STILLWELL *et al.*, 1981; BARRON & BARRETT, 1996).

Esta recomendação é relevante para diversos contextos organizacionais em que o processo de decisão é requerido. Como exemplo, o presente trabalho destaca o problema de priorização de tecnologias críticas para a geração de energia no contexto brasileiro. Este problema consiste em definir e priorizar alternativas para a produção e distribuição de energia elétrica, considerando diversos critérios que atendam aos interesses de baixo impacto ambiental e maiores retornos sobre os investimentos, com o foco no atendimento da demanda.

A influência de fatores sociais, políticos, ambientais e governamentais faz com que os problemas envolvidos no contexto da indústria energética sejam identificados por níveis altos

de complexidade. Essa característica é evidenciada pelo requisito que determina que as empresas do setor devem atender à demanda de milhões de clientes, e devem manter a oferta do serviço em nível constante, sendo assegurada pela produção contínua. No entanto, as incertezas sobre o processo produtivo pode dificultar a estruturação dos problemas associados ao contexto. Por estas considerações, o suporte analítico traz benefícios para o tratamento dos problemas envolvidos na indústria energética.

O setor energético brasileiro é um dos setores da economia que apresenta grande impacto no desenvolvimento do país. Quando os diversos fatores são evidenciados, os problemas podem ser modelados por estruturas que incorporam estes fatores para descrever o cenário de decisão. Esta descrição é percebida no contexto de priorização de tecnologias críticas, que apresenta vários tipos de critérios de avaliação envolvidos, o que pode dificultar a tarefa de definir valores exatos relacionados à importância de cada um deles. Diante desta consideração, a contribuição de métodos de apoio à decisão multicritério com o tratamento de informações parciais é evidenciada para o problema de priorização de tecnologias críticas para a geração de energia elétrica.

2.1.5 O Problema de Priorização de Tecnologias Críticas para a Geração de Energia

O fornecimento de energia elétrica é um processo de alta relevância para o contexto produtivo, pois está diretamente relacionado ao desenvolvimento social e econômico de uma organização. No entanto, o suprimento de energia elétrica tem apresentado destaque como um dos principais problemas para a manutenção da produção mundial (SCHWARZ *et al.*, 2012). Este fato é evidenciado pelos impactos negativos que o processo de geração de energia causa, em especial, sobre o meio ambiente (CHU & MAJUMDAR, 2012).

Às questões ambientais, estão associados os impactos sociais e econômicos causados pela produção de poluição e desgastes ambientais, sobretudo, com a utilização de produtos derivados do petróleo. Devido a esta situação, é cada vez mais evidente a preocupação de desenvolver tecnologias alternativas e limpas, que produzam energia de forma contínua e que apresentem impactos negativos reduzidos, objetivando, também, o desenvolvimento sustentável (CORMIO *et al.*, 2003).

A oferta de tecnologias alternativas para a geração de energia é crescente e baseada nas demandas e requisitos de desenvolvimento social. De acordo com Veraszto *et al.* (2008) as tecnologias podem ser entendidas como o estudo de técnicas para o desenvolvimento de

ferramentas e procedimentos úteis para o processo produtivo, com valorização de valores e agregação cultural para uma sociedade. Sobre este conceito, quando inseridos os interesses estratégicos de uma organização (sendo uma empresa, uma comunidade ou um país), as tecnologias assumem características táticas e são reconhecidas por “tecnologias críticas”, capazes de promover, além da geração de energia elétrica, o crescimento produtivo e econômico em áreas específicas da produção, às quais se destinam (MELO *et al.*, 2003).

Para avaliar uma tecnologia como “crítica”, Bimber & Popper (1994) consideram três critérios: (i) a tecnologia deve apresentar relevância sobre as intervenções políticas no setor em que será aplicada; (ii) a tecnologia deve apresentar características que a distingue das demais, considerando-se a influência socioeconômica da mesma; (iii) a identificação da tecnologia deve ocorrer de forma clara e permitir que seja reproduzida por outras entidades.

Dentre as contribuições da obtenção de tecnologias críticas para diversos setores, inclusive para a geração de energia elétrica, estas reforçam a independência tecnológica, de segurança e de produção econômico-social no desenvolvimento de uma organização (WAGNER & POPPER, 2003). Sendo assim, o interesse em identificar as tecnologias críticas disponíveis para o investimento deve ser um processo prioritário para o planejamento de uma organização, visando benefícios estratégicos e poder econômico.

Cada tecnologia crítica apresenta um nível estratégico para o contexto em que será inserida. Por esta perspectiva, o processo conhecido como *Technology Readiness Assessment* (TRA) (Department of Defense - USA, 2009) oferece uma estrutura sistemática para medir o nível de maturidade das tecnologias e avaliar o grau de influência destas no desenvolvimento de outros processos dependentes, considerando os riscos e a manutenção do processo produtivo (SCHOT & RIP, 1997). Desta forma, a TRA considera conceitos, requisitos e capacidade tecnológicos para determinar o nível de maturidade das tecnologias. Mankins (2009) apresenta três principais aspectos incluídos na TRA:

- Os objetivos de desenvolvimento e aplicação das tecnologias devem ser claramente definidos, incluir suas contribuições, e serem compatíveis com o sistema operacional ao qual se destinam.
- Para avaliar o nível de maturidade das tecnologias, é apresentada uma medida específica e denominada *Technology Readiness Level* (TRL), que utiliza uma escala de nove pontos para comparar os desempenhos de maturidade das tecnologias, em

que o primeiro nível é o mais baixo e o nono é o nível mais alto, considerando as áreas específicas de aplicação (Department of Defense – USA, 2009).

- É importante identificar o grau de dificuldade e as possíveis limitações para o desenvolvimento das tecnologias, considerando as incertezas sobre o sucesso da implementação destas.

A escala utilizada pelo TRL é simples e sua aplicação é coerente com muitos campos, tais como a aeronáutica, astronáutica e recursos energéticos. Entretanto, a definição dos níveis de maturidade é um processo subjetivo que depende dos indicadores individuais dos profissionais especialistas e o embasamento prático-teórico que possuem, por tal, surgem oportunidades para o desenvolvimento de modelos de melhoria para a aplicação da TRL (WEI-GANG *et al.*, 2013).

No Brasil, o investimento em tecnologias críticas para a geração de energia elétrica é incentivado pelo aumento de demanda pelo consumo de energia e a busca por alternativas de produção com menores impactos ambientais. Dentre as fontes utilizadas para a geração de energia, o Brasil apresenta uma matriz composta por elementos diversos, tais como as fontes hidráulicas, gás natural, petróleo, carvão, nuclear, biomassa, eólica, solar, geotérmica, marítima e biogás (Empresa de Pesquisa Energética, 2015).

A partir destas fontes, é possível relacionar diversas tecnologias associadas à produção de energia elétrica. No entanto, diversos fatores políticos, sociais, econômicos e de desenvolvimento influenciam no processo de seleção e priorização destas tecnologias, sobretudo quando são evidenciadas questões estratégicas, tais como os limites de investimento no setor. Por tal, o problema de selecionar e priorizar as tecnologias críticas para a geração de energia elétrica é considerado complexo, exigindo níveis de modelagem mais robustos com integração de diversos elementos contextuais.

Esta consideração permite inserir fundamentos para a implementação da modelagem multicritério sobre o problema proposto. Por tal perspectiva, é possível considerar a lista de tecnologias críticas como alternativas de seleção e priorização, sujeitas à avaliação de critérios que abranjam objetivos estratégicos.

O nível de complexidade do problema de priorização de tecnologias críticas também é refletido no processo de elicitação das preferências do decisor. A quantidade de critérios influentes na avaliação deste problema pode exigir do decisor um alto esforço para a determinação de valores que representem a importância de cada um deles sobre o problema.

No entanto, é possível assumir informações parciais para representar valores aproximados referentes às preferências do decisor sob a ótica multicritério, adquirindo-se um recurso de relevância significativa para decisões mais coerentes.

A aplicação deste estudo utiliza o método PROMETHEE II, considerando informações parciais sobre as preferências do decisor, com o objetivo de priorizar as tecnologias críticas disponíveis para a geração de energia elétrica. Para justificar a proposta do estudo, é apresentada uma revisão da literatura considerando trabalhos relacionados aos conceitos abordados, tais como a utilização de informação parcial em métodos multicritério e as metodologias empregadas sobre o problema de seleção de tecnologias críticas.

2.2 REVISÃO DA LITERATURA

Com base nos conceitos abordados, uma revisão sobre os temas relacionados à proposta do estudo é oportuna. Nesta seção são apresentadas algumas implicações sobre a utilização de Pesos Substitutos em Métodos Multicritério, que oferece recursos para o tratamento de informações parciais em problemas de decisão, Modelagem multicritério com informações parciais, que oferecem subsídios para apoiar o processo de decisão à medida que a complexidade e a interação dos elementos do problema aumentam, e Apoio Multicritério para o Planejamento de Recursos Energéticos, que auxiliam na representação de um problema real, foco de aplicação do estudo proposto.

2.2.1 Comparação de Abordagens para Pesos Substitutos

A contribuição das abordagens para pesos substitutos é evidente para o auxílio do tratamento de informações parciais em problemas de decisão multicritério. Na literatura, é possível encontrar diferentes métodos capazes de fornecer tais informações, e a comparação entre estes é um recurso que capaz de evidenciar o desempenho das abordagens para os diferentes contextos de decisão.

Os estudos sobre a comparação do desempenho de pesos substitutos em problemas de decisão foram evidenciados por Barron & Barrett (1996), em que os autores comparam o desempenho do EW (*Equal Weights*), RS (*Rank-Sum*), RR (*Reciprocal of the Rank*) e do ROC (*Rank Order Centroid*) com a aplicação do modelo de agregação aditiva com o objetivo de selecionar a melhor alternativa, considerando diversos atributos. Na pesquisa relacionada, o ROC obteve melhor eficiência dentre o conjunto observado.

Do mesmo modo, Roberts & Goodwin (2002) consideram a informação ordinal e a abordagem de pesos substitutos para facilitar o procedimento de determinação de pesos em problemas de decisão multicritério. A aproximação dos pesos atribuídos pelo ROC é apropriada para o contexto em que os pesos nominais são restringidos a soma igual a 1 (um). No entanto, para os casos em que os pesos nominais são determinados sem quaisquer restrições iniciais, é implementado a Rank Order Distribution (ROD), que oferece melhores aproximações do que o ROC para pesos nominais irrestritos.

Ahn & Park (2008) estudam procedimentos para ordenar alternativas considerando múltiplos critérios, utilizando informações ordinais e a intensidade do domínio que é demonstrado por cada alternativa, para definir valores representativos para os pesos dos critérios. Os procedimentos demonstrados por este trabalho são simulados com a intenção de comparar seus desempenhos com procedimentos existentes. Os resultados mostram que a abordagem de pesos aproximados é mais precisa para identificar as melhores alternativas e a classificação geral dentre elas. Desta forma, os procedimentos oferecem vantagens no tratamento de inequações lineares para a descrição de informação imprecisa sobre os pesos.

Sarabando & Dias (2010) apresentam regras de decisão para a representação de pesos em problemas de decisão multicritério, considerando que não há informação ordinal sobre os pesos ou sobre os valores das alternativas, e elaboram testes que apresentam boas aproximações para a representação dos valores. Ainda, os autores oferecem orientações sobre a aplicação das regras assumindo o contexto de seleção de um subconjunto de melhores alternativas avaliadas com base no modelo aditivo da teoria da utilidade multiatributo.

Saeid *et al.* (2011) propõem o estudo de avaliação de aplicações voltadas a internet considerando informações ordinais e metodologias de pesos substitutos sobre os critérios de análise, para obter o ordenamento sobre as alternativas disponíveis. Para indicar a metodologia mais adequada de pesos substitutos para o problema de decisão, os autores realizaram um procedimento de simulação entre as diferentes regras EW, RR, RS e ROC. De acordo com as especificações da simulação, a regra mais adequada foi a RS.

O foco do trabalho de Yager & Alajlan (2014) é analisar o desempenho de metodologias que avaliam problemas de decisão multicritério quando utilizam uma medida *fuzzy* para capturar informações sobre as importâncias e as relações entre os critérios. Os autores discutem sobre três medidas aplicáveis ao modelo de agregação aditiva para problemas de decisão multicritério, considerando informações imprecisas referentes aos critérios de avaliação. Como resultado das análises, o tratamento da informação imprecisa não é dado por valores escalares, e sim por intervalos significativos.

Outras metodologias para definição de valores representativos para os pesos dos critérios podem ser adotadas quando o decisor evidencia fatores para não definir valores exatos para os parâmetros do modelo. Um recurso auxiliar para estas situações é o tratamento de informações parciais no processo de modelagem multicritério de decisão. Este recurso permite extrair do decisor apenas informações parciais sobre suas preferências, o que oferece vantagens no processo de elicitação de valores, tais como a importância relativa dos critérios de avaliação. Em adição, é possível encontrar muitas técnicas para o tratamento da informação parcial (MOSHKOVICH *et al.*, 2002; MACHARIS *et al.*, 2004). Por tal, é oportuna a apresentação de trabalhos que envolvam a utilização de informações parciais no contexto de decisão com múltiplos critérios.

2.2.2 Modelagem Multicritério de Decisão com Informação Parcial

Um conceito de alta relevância para o presente estudo faz referência a utilização de informações parciais na modelagem multicritério de decisão. O tratamento de informações parciais, incompletas ou imprecisas oferece vantagens em situações de incertezas, nas quais o decisor não é capaz de definir valores exatos sobre suas preferências, em um problema de decisão. Os fatores que incentivam a utilização de informações parciais são diversos e podem justificar a implementação de recursos auxiliares no processo de decisão.

O tratamento de informações parciais ou incompletas ou imprecisas é uma das principais preocupações apontadas em um processo de decisão. Por tal, vários autores apresentam diferentes metodologias que contribuem para a análise destas informações. Desta forma, é possível encontrar recursos computacionais com especificações de modelagem aditiva (DIAS & CLIMACO, 2000), aplicações de relações de dominância entre alternativas (DIAS & CLIMACO, 2000; AHN, 2003; AGUAYO *et al.*, 2014) e princípio da otimalidade para indicação de soluções adequadas (MATEOS *et al.*, 2003), julgamento de intervalos para informações parciais (MUSTAJOKI *et al.*, 2005), e métodos para a construção de informações parciais sobre o conjunto de parâmetros de um problema de decisão (LARICHEV, 2001; FERNANDEZ *et al.*, 2014).

Em destaque, alguns trabalhos abordam a modelagem multicritério de decisão com informações parciais para o tratamento de diferentes tipos de problemáticas. Barron (1992) explora a problemática de escolha, enquanto que, Carrizosa *et al.* (1995) abordam a problemática de classificação de um conjunto de alternativas com informação parcial sobre os pesos dos critérios. Os autores introduzem conceitos de fácil interpretação e implementação

para modelar a estrutura de preferências do decisor, e oferecem uma medida eficiente para o contexto de análise.

Considerando a modelagem dos problemas de decisão em grupo, Lahdelma & Salminen (2001) apresentam um método eficaz na avaliação de alternativas, que explora o espaço de pesos a fim de descrever as avaliações sobre as alternativas considerando valores obtidos por distribuições de probabilidade e fatores de confiança para representar a importância dos critérios. Com base no mesmo contexto de análise, Contreras *et al.* (2008) evidenciam a existência de informações imprecisas em problemas de decisão em grupo e propõem uma metodologia que transforma as informações dos decisores em informação ordinal sobre as alternativas e agregam suas preferências individuais numa estrutura capaz de ordenar as alternativas de decisão.

Considerando a incorporação de informações parciais na modelagem multicritério, Marmol *et al.* (2002) avaliam a qualidade das informações fornecidas e apresentam um número eficiente de alternativas de decisão, com base nas relações lineares aplicadas aos coeficientes de ponderação das preferências do decisor.

Lee *et al.* (2002) abordam o problema de inserção de informações parciais na representação de pesos e nas funções valor das alternativas. Neste contexto, os autores oferecem uma metodologia de tratamento de dados que minimizam a complexidade do processo através de objetivos e restrições da estrutura de programação linear para selecionar a alternativa mais adequada. Com objetivo semelhante, Mateos *et al.* (2007) propõem o tratamento de informações imprecisas pela transformação do problema na estrutura de programação linear em favor da apresentação de vantagens para método de classificação de alternativas de decisão.

Damart *et al.* (2007) abordam a metodologia de agregação/desagregação de preferências com base no método ELECTRE TRI, um método de sobreclassificação, e o suporte computacional para categorizar as ações de operação e planejamento de uma organização. Para isto, os autores sugerem uma metodologia de avaliação de exemplos para relacionar os parâmetros e obter um resultado satisfatório para os membros do grupo.

Ozerol & Karasakal (2008) discutem a subjetividade envolvida em problemas de decisão multicritério e consideram a racionalidade não compensatória sobre a avaliação das alternativas, que oferece uma avaliação mais realista dos parâmetros envolvidos. O trabalho apresentado pelos autores evidencia o sentimento de dúvida apresentado pelo decisor, que é evidenciado na situação em que não há informações exatas sobre os parâmetros e a alternativa escolhida é comparada com uma segunda alternativa, tendo a segunda pelo menos um melhor

desempenho em um critério do que a primeira. Para isso, os autores aplicam o contexto de decisão utilizando o método PROMETHEE II e realizam uma comparação com a *Regret Theory*, para afirmar a eficiência da utilização do método multicritério de sobreclassificação considerando informações imprecisas.

Para o tratamento de informações imprecisas em problemas de decisão multicritério, Lahdelma *et al.* (2003) apresentam um método que é aplicável aos problemas de decisão multicritério onde os critérios apresentam informação ordinal e os decisores preocupam-se com o mínimo de perda sobre a qualidade da informação no processo decisório.

Park (2004) explora o contexto de decisão multicritério em que informações sobre os pesos dos critérios e sobre os valores das alternativas são imprecisos. Este cenário apresenta um nível de complexidade alto e favorece a aplicação de modelos de programação matemática para a indicação da solução mais adequada. Diante desta situação, o autor recorre aos conceitos de dominância e potencial de otimalidade para avaliar a superação entre as alternativas de decisão.

Em adição, Jessop (2014) aborda o problema de elicitação de pesos quando as informações sobre a importância dos mesmos para o contexto de decisão não é exata. Por esta consideração, o autor apresenta um método que permite definir parâmetros estimados para os pesos a partir de uma distribuição de Dirichlet, e determina a influência desta pontuação sobre o desempenho das alternativas na avaliação do contexto.

Dentre as discussões referentes à utilização de informações parciais sobre os parâmetros de modelos de decisão multicritério, é possível obter contribuições significativas para a composição de metodologias que representem as preferências do(s) decisor(es) em problemas de decisão. A contribuição destas metodologias é significativa e apresenta vantagens na aplicação em diversos contextos organizacionais que evidenciam problemas de decisão com múltiplos critérios de avaliação, tais como o planejamento de recursos energéticos.

Os problemas que envolvem o planejamento de recursos energéticos exercem influência significativa para o desenvolvimento socioeconômico das organizações em todo o mundo. Dentre os problemas de maior incidência, é apresentado o processo de planejamento, seleção e avaliação dos investimentos em tecnologias para a geração de energia elétrica, sobretudo as alternativas para geração de energia renovável.

2.2.3 Apoio a Decisão Multicritério para o Planejamento de Recursos Energéticos

Os problemas que envolvem o planejamento de recursos energéticos são modelados sobre uma problemática complexa que envolve diversos aspectos contextuais de avaliação, dentre eles destacam-se os interesses ambientais, políticos, sociais e econômicos. Por esta consideração, a modelagem multicritério e metodologias de apoio à decisão são adequadas para o tratamento de problemas que envolvem recursos energéticos, e a apresentação de algumas delas é oportuna.

Com destaque para o gerenciamento de projetos no setor energético, Kavrakoglu (1983) apresenta uma metodologia de gerenciamento de projetos de investimento na indústria elétrica baseada em um modelo de programação linear dinâmica multiobjetivo para gerar alternativas de decisão para o aumento da capacidade de produção de energia, e a avaliação das alternativas sob os critérios de custo, impacto ambiental e risco.

Golabi *et al.* (1981) apresentam um procedimento de avaliação de múltiplos atributos para selecionar portfólios direcionados às aplicações de energia solar. O procedimento utilizado por este trabalho se concentra na utilização do modelo aditivo baseado na teoria da utilidade multiatributo, com restrições sobre recursos orçamentais e de planejamento. A metodologia apresentada é coerente e eficiente para a aplicação em diferentes cenários de planejamento para recursos energéticos.

Com auxílio do suporte computacional, Gandibleux (1999) utiliza especificações técnicas baseadas em um procedimento multicritério para selecionar alternativas para a produção de energia elétrica. Neste contexto, o trabalho é baseado na sistematização do problema, avaliando fatores envolvidos no processo industrial e mecanismos de produção.

Haralambopoulos & Polatidis (2003) consideram o problema de seleção de projetos para aquisição de tecnologias de energia renovável sob a abordagem de decisão em grupo. Para o tratamento deste problema, os autores consideraram a análise multicritério sobre os fatores influentes no contexto e estruturaram o problema com a determinação de limiares de preferência dos decisores com auxílio do método PROMETHEE, promovendo uma metodologia interativa e consensual sobre o problema analisado.

Considerando o processo de avaliação das tecnologias para a geração de energia elétrica, Georgopoulou *et al.* (1997) evidenciam o problema de seleção de alternativas de energia renováveis como um problema estratégico de âmbito mundial para o desenvolvimento econômico-social das organizações. Por esta perspectiva, os autores modelam o problema com recursos de análises multicritério e o analisam sobre o ELECTRE III, considerando um

conjunto de potencial significativo de fontes de energia renováveis. A principal contribuição dos autores é fornecer uma base coerente para a construção do planejamento de recursos energéticos para uma região.

Beccali *et al.* (1998) comparam o desempenho das metodologias baseadas na Lógica *Fuzzy* e no método multicritério ELECTRE para a definição de planejamento de recursos energéticos, considerando os diversos fatores influentes no processo estratégico de definição de alternativas de geração de energia renovável. A contribuição do estudo permite avaliar as vantagens e desvantagens das metodologias apresentadas para o contexto de decisão, considerando seu nível de complexidade e os agentes envolvidos no processo.

Goumas & Lygerou (2000) consideram o problema de classificação de alternativas para geração de energia, considerando um conjunto de fatores para a avaliação destas e dados difusos e não definidos sobre o contexto estudado. Para o tratamento dos dados, os autores aplicam a estrutura do método PROMETHEE para avaliar o cenário de energias alternativas, oferecendo uma abordagem mais realista, e produzindo resultados confiáveis e coerentes com o objetivo de investimento.

Afgan & Carvalho (2002) apresentam uma metodologia baseada na análise multicritério para a seleção de tecnologias novas e renováveis para a geração de energia, considerando o tratamento de informações incompletas sobre o contexto. Para esta contribuição, os autores evidenciam parâmetros e indicadores de desempenho para atender aos critérios relacionados à sustentabilidade do processo de geração de energia. Com uma proposta semelhante, Beccali *et al.* (2003) mostram uma aplicação da metodologia multicritério considerando aspectos estratégicos para a exploração de recursos energéticos e descrevem cenários estruturados por conjuntos de ações diferentes para a adequação dos resultados fornecidos.

Como principal contribuição, Polatidis *et al.* (2006) apresentam um estudo comparativo sobre os métodos multicritérios aplicados ao problema de planejamento e seleção de tecnologias para geração de energias renováveis. Desta forma, é possível comparar o desempenho de várias técnicas de métodos multicritério apropriadas ao problema de planejamento de recursos energéticos.

As contribuições de Loken (2007) permitem avaliar a influência dos métodos multicritério no suporte de problemas complexos, que envolvem diversos agentes e atributos de avaliação, e ainda, considera a abordagem da combinação de métodos para a busca pela solução mais adequada ao contexto de produção de energia elétrica.

Evidenciando a importância da aquisição de alternativas para geração de energias renováveis para o desenvolvimento econômico de todos os países, Kahraman *et al.* (2009)

destacam a relevância sobre a seleção da melhor alternativa de investimentos neste setor. No entanto, este é um problema de decisão caracterizado por sua complexidade e exige maiores esforços na elicitação dos parâmetros que representam os elementos do contexto. A contribuição deste estudo se concentra em apresentar uma metodologia sobre um conjunto de números *fuzzy*, com tratamento de incertezas, e a avaliação das tecnologias com base no método AHP, para a seleção da alternativa mais adequada para um determinado contexto.

Considerando as incertezas contextuais, Kahraman & Kaya (2010) tratam o problema de seleção de políticas energéticas com o uso de abordagens multicritério e *fuzzy*. As abordagens utilizadas permitem a avaliação especialista sobre as políticas de energia disponíveis. De forma semelhante, Kaya & Kahraman (2011) apresentam uma proposta para selecionar a melhor tecnologia de geração de energia, utilizando a Teoria dos Conjuntos *Fuzzy* para tratar informações subjetivas, incompletas e/ou imprecisas no processo de planejamento energético, considerando atributos técnicos, econômicos, ambientais e sociais. Neste trabalho, é aplicada uma metodologia com base no TOPSIS, em que os pesos dos critérios de avaliação são determinados por matrizes de comparação de pares.

Uma metodologia amplamente utilizada para avaliar a maturidade das tecnologias de produção e desenvolvimento é o TRL (*Technology Readiness Levels*). A TRL é utilizada na apresentação da TRA (*Technology Readiness Assessment*). Este método exige conhecimentos especialistas, objetividade e grandes esforços para definir os parâmetros de avaliação dos requisitos expostos pela abordagem. Por esta perspectiva, diversos estudos são apresentados com a proposta de fornecer recursos de apoio ao tratamento e identificação dos atributos envolvidos em problemas de aperfeiçoamento estratégico e de seleção de tecnologias (AZIZIAN *et al.*, 2009; CHOI, 2010; CHEN *et al.*, 2013).

As apresentações do TRL e do TRA são feitas por Mankins (2009), que descreve uma retrospectiva da evolução dos termos e contribuições estas metodologias. A referência a estas metodologias é oportuna para a exploração dos conceitos e procedimentos que envolvem a indicação de tecnologias críticas, em particular, para o setor de energia elétrica.

Diante da revisão sobre as aplicações de pesos substitutos em problemas de decisão, o tratamento de informação parcial em contextos de decisão multicritério e metodologias de apoio ao processo de planejamento de recursos energéticos são fundamentais realizar uma análise sobre a atual situação das bibliografias e apresentar o posicionamento do presente trabalho.

2.3 SÍNTESE DO ESTADO DA ARTE E POSICIONAMENTO DESTE TRABALHO

A revisão da literatura apresentada na Seção 2.2 oferece um alicerce sobre o potencial de desenvolvimento dos conceitos e técnicas abordados pelo presente estudo. Por tal, esta seção tem como foco na síntese do estado da arte e a delimitação do posicionamento do presente trabalho, diante dos trabalhos desenvolvidos na área de interesse.

Em diversos contextos organizacionais, as decisões são vivenciadas para manter o curso das atividades e definir as diretrizes para as ações operacionais. Estas características fazem com que a decisão seja a atividade mais importante para um gestor, que assume o papel de agente decisor diante de uma situação de escolha. Em situações com esta, são definidas as interações e regras de avaliação, que permitem classificar o processo de decisão quando consideram os diferentes aspectos envolvidos no contexto.

Os processos de decisão podem ser classificados pelo envolvimento de um ou mais critérios de avaliação. Quando apenas um critério é considerado, a decisão se torna simples e relativamente fácil de ser gerenciada pelo decisor. Contudo, com a inserção de vários objetivos e critérios de avaliação, o processo de decisão pode apresentar um nível de complexidade que ultrapasse a capacidade racional, em termos de conhecimentos específicos, e gerenciais do decisor. Para estas situações, é preciso recorrer às ferramentas de apoio ao processo de decisão, em particular, aos métodos de apoio a decisão multicritério.

A eficiência dos métodos de apoio à decisão multicritério é reconhecida em diferentes contextos, e permitem a aplicação de recursos matemáticos para a avaliação das alternativas através da interação entre os componentes do problema, como mostrado na Seção 2.1.1. Em adição, a contribuição destes métodos consiste no suporte para problemas que envolvem um número elevado de critérios e alternativas, uma vez que os métodos permitem que as preferências do decisor sejam elicitadas e incorporadas ao processo de análise. Desta forma, os métodos de decisão com suporte multicritério apresentam vantagens para o contexto gerencial, e podem ser utilizados como recurso para obtenção de informações nos níveis gerencial e estratégico da organização.

Para que a aplicação dos métodos multicritério seja eficiente, é preciso que o valor dos parâmetros, tais como valores referentes à avaliação das alternativas e a importância dos critérios para o problema, sejam definidos com exatidão pelo decisor. Essa etapa permite que os interesses do decisor sejam modelados por estruturas capazes de descrever suas preferências. Em adição, a definição exata dos parâmetros assegura que as recomendações entregues pelos métodos de apoio a decisão multicritério sejam efetivos para o contexto

selecionado. Esta etapa é, em geral, constituída diretamente pelo decisor ou promovida por processos de elicitación com suporte analítico.

A definição dos valores para os parâmetros de um problema multicritério pode ser considerada um processo simples, em especial, quando o número de critérios é relativamente pequeno e o decisor afirma o controle sobre a situação, e é capaz de definir os valores exatos, por exemplo, sobre a importância de cada um deles. No entanto, esta atividade pode ser complexa, sobretudo quando o número de critérios é elevado.

O elevado número de critérios pode influenciar no controle ou no âmbito de conhecimento do decisor e incentivá-lo a não definir valores exatos sobre a importância ou peso de cada um deles, com argumentos de que não é capaz ou não se sente confortável ou não possui conhecimentos ou apenas não deseja defini-los. Esta situação é comumente vivenciada e, muitas vezes, interfere no processo de modelagem dos problemas de decisão. Apesar disto, uma alternativa para estas situações é utilizar técnicas especializadas para extrair informações parciais do decisor sobre suas preferências em relação à contribuição ou importância dos parâmetros para o problema. A adequação desta abordagem para os problemas de decisão multicritério são discutidos na Seção 2.2.2.

No processo de elicitación dos pesos, o decisor é questionado sobre o grau de influência de cada um dos critérios para o problema e, a depender da quantidade de critérios e fatores atuantes, o processo pode exigir esforços cognitivos maiores para determinar um valor exato para cada um deles. Como alternativa, a utilização de informações parciais é capaz de minimizar os esforços do decisor e contribuir para a composição do problema.

A forma mais comum para a representação das informações parciais é assumir a informação ordinal sobre os critérios. A escala ordinal não oferece detalhes sobre a interação dos critérios no contexto de decisão, mas esta é capaz de definir a prioridade dada pelo decisor para os critérios de avaliação, como apresentado nas Seções 2.1.1.2 e 2.1.3. Com esse tipo de informação, as preferências podem ser representadas através de recursos de aproximação de valores ou pesos substitutos, como discutido nas Seções 2.1.3 e 2.1.3.1.

Dentre as metodologias para pesos substitutos, o presente trabalho enfatiza os procedimentos apresentados na Seção 2.1.3.1. Estas metodologias utilizam a informação ordinal sobre os critérios para calcular valores cardinais, capazes de representar a importância dos critérios. A principal contribuição das metodologias de pesos substitutos para problemas de decisão multicritério é a minimização do esforço racional dos decisores sobre os critérios, pois requerem apenas a indicação da ordem de prioridade sobre eles.

A eficiência das metodologias para pesos substitutos é comprovada por trabalhos apresentados na Seção 2.2.1, que buscam fundamentos para indicar a metodologia mais adequada para problemas multicritério baseados em modelos de agregação aditiva. Os trabalhos consistem em comparar o desempenho das metodologias para pesos substitutos e utilizar indicadores de desempenho para evidenciar a metodologia mais adequada.

Diferentes metodologias com estruturas matemáticas robustas são apresentadas como alternativas para a geração de pesos substitutos, no entanto, as metodologias abordadas pelo presente trabalho concentram-se na EW (*Equal Weights*), RS (*Rank-Sum*), RR (*Reciprocal of the Rank*) e ROC (*Rank Order Centroid*). A seleção destas metodologias foi motivada pela conformação, eficiência e efetividade destas, para problemas de decisão multicritério. Estas características são consideradas nas Seções 2.2.1 e 2.2.2. Desta forma, o estudo sobre as metodologias EW, RS, RR e ROC é suficiente para atender ao objetivo de comparar o desempenho delas em métodos de decisão multicritério de sobreclassificação.

A proposta de comparação das metodologias para pesos substitutos é embasada pelos estudos que realizam este procedimento sobre modelos de agregação aditiva, que abordam a racionalidade compensatória entre as alternativas no procedimento de avaliação, como destacado pela Seção 2.2.1. No entanto, a relevância do presente trabalho é comparar o desempenho das metodologias para pesos substitutos quando aplicado um método de decisão multicritério de sobreclassificação, com racionalidade não compensatória. Para isto, foi selecionado o método PROMETHEE II, cujos benefícios e adequações para este estudo são apresentados nas Seções 2.1.2 e 2.1.2.1.

A ênfase sobre a comparação de desempenho de metodologias para pesos substitutos em métodos multicritério com racionalidade não compensatória não foi encontrada na literatura. Por tal, é oportuno o desenvolvimento do estudo sobre esta perspectiva e a indicação da metodologia mais adequada para este contexto, considerando o método PROMETHEE II, como abordado por Almeida *et al.* (2014).

Para compor o estudo sobre os pesos substitutos é significativo o desenvolvimento de simulações Monte Carlo estruturadas e com foco no processo comparativo entre as metodologias selecionadas. Como dados de entrada para as simulações, foram modeladas estruturas de decisão com informação ordinal sobre os critérios para considerar referências eficientes e rápidas sobre as preferências do decisor.

Além da indicação da metodologia para pesos substitutos mais adequados ao PROMETHEE II, uma discussão sobre a geração do peso de referência para o processo de comparação é válida e significativa para a justificativa das especificações utilizadas no estudo.

Além disso, com as atribuições do método PROMETHEE II, o estudo propõe a avaliação das problemáticas de escolha e de ordenação sobre as alternativas. Estas considerações, em conjunto, não foram evidenciadas por estudos anteriores.

A abordagem de pesos substitutos apresentam vantagens na modelagem de problemas de decisão complexos. Este benefício foi discutido anteriormente. Por tal, a indicação da regra mais adequada permite o desenvolvimento de uma nova metodologia, e interage com os recursos no PROMETHEE e pesos substitutos. Com isso, é oportuno o desenvolvimento de um suporte computacional e especificações para um sistema de apoio a decisão, como apresentado por Morais *et al.* (2015).

Dentre as especificações do sistema de apoio a decisão, os objetivos de priorizar as alternativas de decisão e de permitir que o decisor avalie o desempenho das alternativas são destacados, considerando possíveis ajustes quanto à importância relativa dos critérios, uma vez que são utilizadas as representações indicadas pela metodologia de pesos substitutos. Desta forma, a ferramenta computacional desenvolvida por este estudo, se torna um recurso de vantagem competitiva para o tratamento de problemas complexos.

Organizações, em todo o mundo, lidam com problemas nos diferentes níveis de planejamento da produção, e a complexidade dos problemas é frequentemente observada pela interação dos aspectos que compõe o contexto. Desta forma, o apoio de ferramentas que possibilitem o tratamento destes problemas é oportuno e asseguram os interesses estratégicos das organizações como, por exemplo, no processo de planejamento de recursos energéticos, que envolve investimento e produção de energia.

A contextualização do problema de planejamento de recursos energéticos é apresentada pela Seção 2.1.1.1, em que a adequação do problema ao emprego de métodos multicritério é considerada. Desta forma, a especificação deste problema é útil para a aplicação da nova metodologia desenvolvida pelas indicações do presente trabalho.

Com isso, a relevância do estudo é composta pela apresentação de uma nova metodologia multicritério com inserção de informações parciais, que compõe as especificações de um sistema de apoio a decisão capaz de oferecer suporte gerencial para decisões de diferentes níveis de complexidade e de âmbito estratégico, evidenciados por Almeida *et al.* (2014) e Morais *et al.* (2015).

Com o objetivo de expor as recomendações do presente trabalho, em primeira instância, será realizada a apresentação do estudo de avaliação considerando pesos substitutos para o método PROMETHEE II.

3 ESTUDO SOBRE O DESEMPENHO DE PESOS SUBSTITUTOS PARA O MÉTODO PROMETHEE II

A proposta deste trabalho inclui a apresentação da estrutura lógica do processo de simulação referente ao estudo sobre o desempenho de pesos substitutos para o método PROMETHEE II. Nesta seção, são abordados os elementos para a construção do desenho do experimento, bem como os requisitos de especificação dos procedimentos utilizados e os resultados obtidos pelo experimento.

3.1 DESENHO DO EXPERIMENTO

Para executar o estudo sobre o desempenho de pesos substitutos, foi modelado um experimento baseado em etapas de simulação. Em linhas gerais, o experimento consiste em gerar estruturas de dados aleatórios, para a matriz de consequência e vetor de pesos, e aplicá-las ao método multicritério para obter, em primeira instância, resultados de referência que serão comparados aos resultados da aplicação do método com estruturas de dados que utilizam pesos substitutos. Os resultados de referência assumem valores aleatórios reconhecidos como “verdadeiros”, que serão o alicerce para as comparações. O experimento simula várias estruturas de dados aleatórios e o desempenho das metodologias de pesos substitutos é computado por medidas capazes de avaliar a qualidade da informação oferecida por cada metodologia de representação de valores, considerando a igualdade de resultados obtida no processo de comparação dos resultados. Ou seja, é possível verificar a concordância entre os resultados de referência e os resultados de representação de pesos, e indicar a metodologia mais adequada de pesos substitutos para o método PROMETHEE II, considerando a proporção de resultados favoráveis para a seleção da alternativa com melhor fluxo, alocada em primeira posição no ordenamento final, e na ordenação das alternativas, considerando a priorização obtida pela avaliação das mesmas.

As medidas de desempenho utilizadas para verificar o desempenho das metodologias de pesos substitutos para a seleção da melhor alternativa e para a ordenação das alternativas são definidas para identificar a proporção de casos em que os resultados simulados são compatíveis com a referência assumida. Desta forma, quanto melhor a conformidade (semelhança, para a seleção de uma alternativa, ou correlação, para a análise das ordenações)

dos resultados obtidos por cada uma das metodologias de pesos substitutos, mais adequada esta será para o estudo considerado.

Os processos de geração de números aleatórios e simulações da aplicação do método multicritério são suportados por recurso computacional, que permite a execução dos procedimentos especificados por milhares de vezes, assegurando a aquisição de informações estatisticamente significativas para a indicação da metodologia mais adequada de pesos substitutos para o método PROMETHEE II. Este suporte permite que as etapas sejam concluídas conforme as especificações descritas para cada uma delas, que são apresentadas nas seções seguintes.

Como representação gráfica referente ao desenho do experimento, a Figura 3.1 ilustra as interações vivenciadas entre as etapas do processo de simulação, desenvolvidas para o alcance dos interesses do presente trabalho.

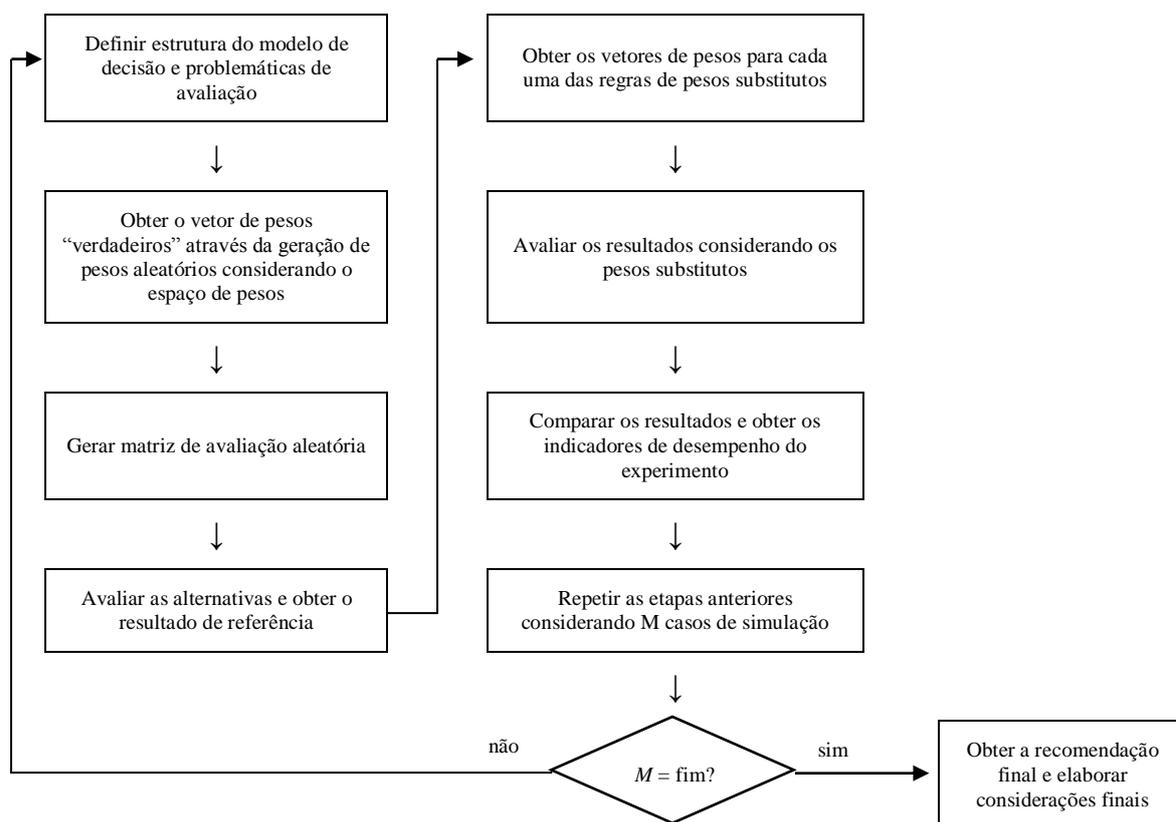


Figura 3.1 – Estrutura lógica do processo de simulação

A partir da Figura 3.1 é apresentado o processo de simulação é executado. Em primeira instância, são definidas estruturas do modelo de decisão e as problemáticas de avaliação. Em seguida, é obtido o vetor de pesos considerados “verdadeiros”, que servirão de referência para

a comparação dos resultados. Os pesos “verdadeiros” são gerados aleatoriamente assumindo a Simulação Monte Carlo com utilização da distribuição uniforme e um procedimento de normalização (RUBINSTEIN, 1982) que fornece valores compreendidos no intervalo (0,1). A próxima etapa é constituída da geração da matriz de avaliação aleatória, formulada como entrada de dados para o processo. Em seguida, as alternativas indicadas pela estrutura do modelo de decisão são avaliadas considerando os pesos “verdadeiros” e obtém-se o resultado de referência. A etapa seguinte consiste em obter os conjuntos de pesos substitutos para cada metodologia. Com isso, as alternativas são avaliadas com a utilização de cada conjunto de pesos substitutos. Em seguida, os resultados são comparados e as medidas de desempenho são computadas. Para a escolha de uma alternativa, são consideradas a Taxa de Sucesso e a Média do Valor de Perda, e para a análise das ordenações são realizados testes estatísticos e verificações de adequação para confirmar a correlação dos resultados. Estas medidas serão apresentadas em seções seguintes. O mesmo procedimento é repetido M vezes para assegurar a recomendação do experimento em níveis estatisticamente significativos. E, por fim, é obtido o registro dos resultados para realização da análise.

As particularidades de cada etapa do experimento constituem os requisitos funcionais do sistema de simulação, e são apresentadas pelas seções seguintes.

3.1.1 Estruturas do Modelo de Decisão e Problemáticas de Avaliação

As estruturas do modelo de decisão consistem no padrão de entrada de dados para a execução do método multicritério. Uma estrutura de decisão contém dados sobre as alternativas de decisão e sobre os critérios de avaliação, bem como a matriz de avaliação correspondente ao problema a ser analisado. Para o experimento, são considerados valores aleatórios para todos os parâmetros de entrada e diferentes estruturas de dados, para avaliar a conformidade dos resultados para diferentes interações entre os números de alternativas e critérios. Esta especificação garante que quaisquer intervalos de valores podem ser assumidos em um problema de decisão. A Tabela 3.1 ilustra a estrutura de entrada de dados com valores aleatórios, que pode ser variada pelos números de critérios e alternativas.

Com base na Tabela 3.1, dentre os dados sobre os critérios de avaliação, devem ser definidos a direção de análise, a ordem de prioridade, os tipos de funções e os limiares de preferência e/ou indiferença, se existirem para cada critério do problema. Estes dados compõem o conjunto de informações parciais inseridas no problema, em que é destacada a escala ordinal sobre os critérios. A ordem de prioridade sobre os critérios deve ser definida

pelo usuário/decisor/analista, em que todos os critérios são ordenados pela regra decrescente e consecutivamente, e os tipos de funções dos critérios correspondem àqueles definidos pelo método PROMETHEE II. Para este estudo, todos os critérios foram considerados como Critério Usual, em que não há parâmetro a ser definido sobre os limiares de indiferença e preferência, conforme apresentado na Seção 2.1.2.1.

Tabela 3.1 – Estrutura para Entrada de Dados

| Nome dos Critérios: | “Crit 1” | “Crit 2” | “Crit 3” | “Crit 4” | “Crit 5” |
|-----------------------|----------------------|----------|----------|----------|----------|
| Direção: Max ou Min | Max | Min | Max | Min | Max |
| Ordem: | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| Tipo de Função: | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Preferência: | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Indiferença: | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Nome das Alternativas | Matriz de Avaliação: | | | | |
| “Alternativa 1” | 0,3639 | 0,2373 | 0,8650 | 0,8650 | 0,8650 |
| “Alternativa 2” | 0,3222 | 0,2768 | 0,8150 | 0,8150 | 0,8150 |
| “Alternativa 3” | 0,2598 | 0,8143 | 0,9220 | 0,9220 | 0,9220 |
| “Alternativa 4” | 0,5247 | 0,7948 | 0,1369 | 0,1369 | 0,1369 |
| “Alternativa 5” | 0,3806 | 0,9960 | 0,5970 | 0,5970 | 0,5970 |
| “Alternativa 6” | 0,3806 | 0,9960 | 0,5970 | 0,5970 | 0,5970 |

Com base na estrutura de dados de entrada e no processo de simulação é possível analisar diferentes estruturas de decisão. Desta forma, são considerados cinco diferentes números de critérios e outros cinco diferentes números de alternativas para a construção de diferentes estruturas e matrizes de decisão. Para o estudo proposto, as matrizes são construídas por 3, 6, 9, 12 ou 15 critérios, em que cada matriz pode apresentar 5, 10, 15, 20 ou 25 alternativas. Dessa forma, o estudo compreende 25 cenários equivalentes às estruturas de entrada de dados. Esta proposta é semelhante à apresentada por Barron & Barrett (1996).

O método PROMETHEE II produz uma relação de sobreclassificação entre as alternativas, permitindo que estas sejam ordenadas em função de seu desempenho dentro do conjunto disponível. Dessa forma, as alternativas são apresentadas em uma pré-ordem completa, como referenciada pela Seção 2.1.1.1, o que favorece a descrição dos tipos de problemáticas de selecionar a melhor alternativa e de obter a ordem de prioridade sobre os elementos do conjunto de alternativas.

Em primeira instância, a análise comparativa se concentra na alternativa indicada pelo maior valor de avaliação que corresponde à alternativa alocada na primeira posição dos resultados obtidos. Com isso, é avaliada a proporção de casos em que as alternativas alocadas

na primeira posição são semelhantes nos resultados calculados com a utilização de pesos substitutos e com pesos “verdadeiros”.

Em segunda instância, a proposta é concentrada na verificação das mudanças ocorridas na ordenação dos resultados e, através de recursos estatísticos, analisar o quão relevante é o impacto dessas mudanças para a conformidade dos resultados esperados. Maiores detalhes sobre as medidas de desempenho utilizadas para a verificação da conformidade dos resultados são descritos em seções posteriores.

A etapa seguinte do processo de simulação consiste em determinar pesos “verdadeiros” para o cálculo dos resultados de referência. Nesta etapa, a informação sobre a prioridade dos critérios é utilizada para manter as preferências do usuário/decisor/analista sobre a avaliação das alternativas.

3.1.2 Geração de Pesos Aleatórios e Pesos “Verdadeiros”

Em um problema de decisão, o processo de definição dos pesos dos critérios exige o entendimento sobre a metodologia e o problema para que valores coerentes sejam determinados com precisão. No entanto, em muitas situações, a determinação de valores exatos pode não ser uma tarefa fácil para o decisor, pois pode exigir um esforço cognitivo maior, em especial, quando o número de critérios é relativamente grande ou ultrapassa os limites da percepção do decisor. Apesar da complexidade apresentada para o número de critérios, o analista pode recorrer a várias metodologias para definição de pesos, como discutido por Wang & Zionts (2006).

Dentre as várias metodologias, quando o decisor assume que quaisquer valores podem ser assumidos para o vetor de pesos, o recurso de geração de pesos aleatórios é útil, pois garante que os critérios sejam representados por quaisquer valores, com igual probabilidade de ocorrência, a partir do espaço de pesos (BUTLER *et al.*, 1997; JIMENEZ *et al.*, 2003). Esta metodologia é utilizada para a construção do vetor de pesos “verdadeiros”, que concentra os valores no intervalo (0,1). Este vetor é assumido como valores de referência para a execução das comparações no processo de simulação.

Desta forma, a geração de pesos aleatórios assume que os pontos estão distribuídos uniformemente sobre o espaço de pesos em que $\sum_i w_i = 1, w_i \geq 0$, e que cada ponto é associado a um valor w no conjunto viável. A representação do espaço de pesos é relacionada a um simplex, definido como $S^m = \{(x_1, x_2, \dots, x_n) | x_i \geq 0, \sum_{i=1}^n x_i = 1\}$, com dimensão $m=n-1$. Assim, se $n=1$, o espaço de pesos é definido pelo ponto ($x=1$). Para $n=2$, o espaço de

pesos é definido pelo segmento de reta limitado pelos pontos (1,0) e (0,1). Enquanto que, para $n=3$, o espaço de pesos é definido por um triângulo com vértices (1,0,0), (0,1,0) e (0,0,1) (SPENDLEY *et al.*, 1962; DANTZIG, 1963; MURTY, 1983).

Esta abordagem não exige que sejam definidas informações *a priori* para a determinação dos valores dos pesos, tais como as preferências do decisor, pois assume que qualquer valor dentro do espaço de pesos pode ser indicado e terá relevância para o problema (BUTLER *et al.*, 1997; JIMENEZ *et al.*, 2003). A partir desta perspectiva, é possível construir vetores de referência para o processo comparativo proposto por este trabalho, utilizando diversas estruturas de decisão.

Wang & Zionts (2006) apresentam alguns procedimentos para a geração de pesos aleatórios e simulam estruturas de decisão para avaliar a eficiência destes. Com base nas considerações dos autores, para o presente trabalho, houve a preocupação de selecionar um procedimento que melhor responda a proposta de geração de pesos de referência para o processo de comparação das metodologias.

Em primeira instância, foi implementado o procedimento apresentado por Steuer (1986), que não apresenta um grau de dificuldade alto. Este procedimento assume valores aleatórios v_i , em que $i=1,2,\dots,n$, e n o número total de critérios, uniformemente distribuídos como variáveis de um conjunto viável, e utiliza os valores normalizados como pesos para o problema de decisão. Assim, o processo de normalização é descrito como $w_i = v_i / \sum_{j=1}^n v_j$, em que o peso é obtido no intervalo $0 \leq w_i \leq 1$ a partir da divisão entre o valor aleatório e a soma de todos os valores assumidos. Este procedimento é identificado pelo Procedimento 3, na Seção 2.1.1.3, em que a interpretação do valor de w_i pode ser entendida como um percentual do total $\sum_{j=1}^n v_j$.

Este procedimento é bastante simples, mas os w_i obtidos perdem a propriedade de serem uniformemente distribuídos quando realizado o procedimento de normalização. Isto é demonstrado por Steuer (1986), que argumenta que os valores ponderados são concentrados próximos aos seus valores médios e por isso, a característica da distribuição uniforme aleatória é perdida. Este argumento evidencia a tendência não satisfatória que este procedimento pode apresentar na geração de pesos “verdadeiros”. No entanto, procedimentos semelhantes a este são bastante utilizados em modelos de decisão multicritério (EDWARDS & BARRON, 1994; SAATY, 1998).

A Figura 3.2 representa o comportamento dos valores aleatórios quando assumido o Procedimento 3 (descrito pela Seção 2.1.1.3). Para a demonstração gráfica foi assumido um

vetor de oito números aleatórios decrescentemente ordenados, representados pela série destacada pela cor marrom, e a representação destes valores normalizados pelo Procedimento 3 (Seção 2.1.1.3), série na cor azul. As ilustrações dos valores sobre os gráficos de linha e de radar foram escolhidas para facilitar a visualização da influência deste procedimento.

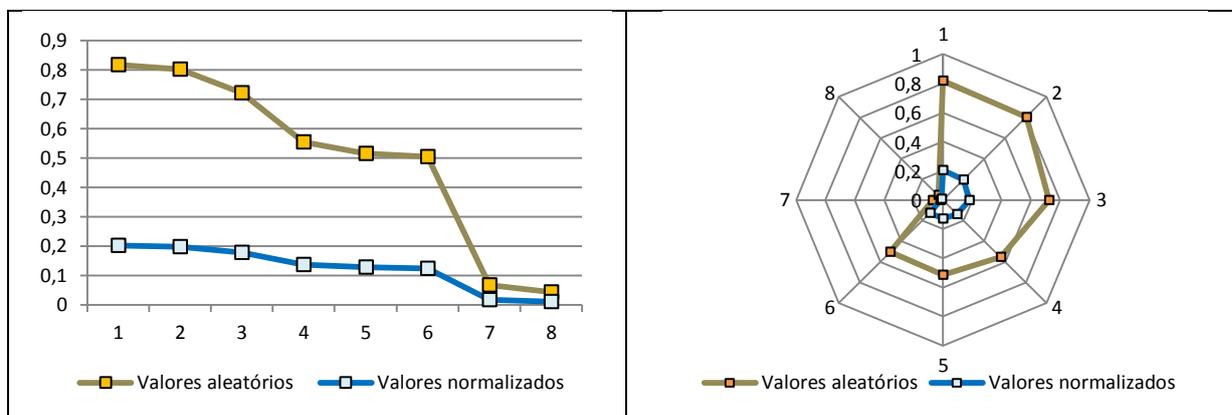


Figura 3.2 – Pesos aleatórios normalizados pelo Procedimento 3 (Almeida, 2013)

A partir da Figura 3.2 é possível verificar a concentração sobre a média que os valores apresentam quando o Procedimento 3 (Seção 2.1.1.3) é utilizado para a geração de pesos aleatórios. Pelas contribuições não satisfatórias apontadas pela demonstração de Steuer (1986), verificou-se a motivação de indicar e utilizar um procedimento robusto e confiante quanto à manutenção das propriedades de geração de pesos aleatórios para o experimento proposto.

Por esta perspectiva, Rubinstein (1982) propôs um método para geração de valores aleatórios que é bastante apropriado para a construção de vetores de pesos. Este procedimento foi aplicado por Butler *et al.* (1997) em problemas de análise de decisão e seus resultados foram significativos.

O procedimento proposto por Rubinstein (1982) consiste na etapa de selecionar $n-1$ valores aleatórios e independentes representados por v_1, v_2, \dots, v_n , sendo n o número total de critérios para o presente estudo, a partir da distribuição uniforme limitada pelo intervalo $(0,1)$. Em seguida, esses valores são ordenados pela regra decrescente, em que $1 \geq v_{n-1} \geq \dots \geq v_2 \geq v_1 > 0$, e calculada a diferença entre o primeiro maior valor e o segundo subsequente. Esta diferença é assumida como o valor de referência ou o elemento do vetor de pesos “verdadeiros”. Para o presente trabalho, esses valores de referência serão os pesos dos critérios, que são ordenados novamente pela regra decrescente.

Com o objetivo de exemplificar o procedimento, uma explicação sobre os cálculos é válida. Assim, são gerados $n-1$ número aleatórios, estes são ordenados decrescentemente, e os pesos efetivos são calculados pelas diferenças entre os valores ordenados, incluindo-se os limites 0 (zero) e 1 (um). Dessa forma, segue-se a sequência descrita pelas Equações (3.1-3).

$$w_n = 1 - v_{n-1} \tag{3.1}$$

$$w_{n-1} = v_{n-1} - v_{n-2} \tag{3.2}$$

...

$$w_1 = v_1 - 0 \tag{3.3}$$

Este procedimento garante que $\sum_i w_i = 1, w_i \geq 0$. Em adição, o procedimento assegura que os valores obtidos (w_1, w_2, \dots, w_n) continuam sendo uniformemente distribuídos sobre o espaço de pesos. A demonstração deste argumento utiliza recursos matemáticos robustos para afirmar a conformidade dos dados e é apresentado por Devroye (1986). Assumindo a mesma ilustração do procedimento anterior, a Figura 3.3 representa o comportamento dos valores aleatórios quando assumido o procedimento proposto por Rubinstein (1982).

Para a demonstração gráfica foi considerado um vetor de oito números aleatórios decrescentemente ordenados, representados pela série destacada pela cor marrom, e a representação destes valores pelas instruções de Rubinstein (1982), série na cor azul. As ilustrações dos valores sobre os gráficos de linha e de radar foram escolhidas para facilitar a visualização da influência deste procedimento.

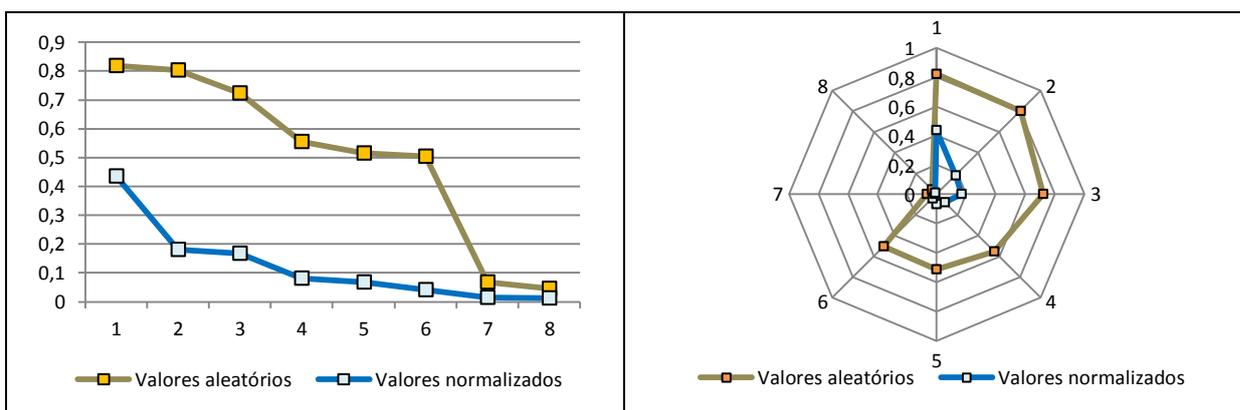


Figura 3.3 – Pesos aleatórios obtidos pelo procedimento de Rubinstein (1982)

Em comparação com a Figura 3.2, os valores representados pelo procedimento de Rubinstein (1982) assumem a amplitude entre os valores aleatórios para indicar a relação entre os valores. Dentre as vantagens das metodologias, foi recomendada a escolha sobre elas.

Para a escolha do procedimento de geração de pesos aleatórios foram realizados vários testes de simulação e comparação de desempenho. O objetivo desses testes foi selecionar o procedimento mais adequado, mantendo o perfil completamente aleatório para assegurar que os resultados da simulação não apresentem qualquer viés. Desta forma, para a representação de pesos de referência, reconhecidos como pesos “verdadeiros”, foi utilizado o procedimento descrito por Rubinstein (1982).

Para o estudo proposto, uma vez obtidos os pesos, estes são novamente ordenados pela regra decrescente e utilizados como referência para a comparação. Dessa forma, os pesos são alocados de acordo com a ordem de prioridade definida para os elementos do conjunto de critérios. Quanto mais alta a posição de um critério na ordem de prioridade, maior será seu peso dentro da estrutura de decisão. Dessa forma, o vetor de pesos “verdadeiros” é construído e servirá de referência para a comparação de desempenho assumida.

3.1.3 Geração de Matrizes de Avaliação Aleatórias

A estrutura de decisão para a proposta do estudo segue as instruções da Tabela 3.1. Para cada estrutura de decisão, é requisitada a matriz de avaliação $n \times m$, em que n é o número de critérios e m é o número de alternativas. A proposta do estudo é avaliar várias estruturas de matrizes e considerar que os valores de avaliação podem assumir quaisquer valores aleatórios. Dessa forma, a abordagem utilizada para a indicação dos dados de entrada para as matrizes de avaliação é a Simulação Monte Carlo, que utiliza a geração de dados aleatórios, efetuada com base em uma distribuição de probabilidade que represente os valores prováveis para cada dado de entrada.

Com este objetivo, foram selecionadas duas distribuições de probabilidade: a distribuição triangular e a distribuição uniforme. A implementação dessas distribuições é favorável pela simplicidade e pela contribuição que oferecem na determinação dos valores para as matrizes de avaliação. A distribuição triangular é descrita pela Equação (3.4) que representa sua função de densidade de probabilidade, em que x é uma variável aleatória, a , b e c são pontos de referência para o valor de x , calculado dentro do intervalo $[a, c]$, em que $a=0$ e $c=1$ (CASELLA & BERGER, 2010).

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2(x-a)}{(b-a)(c-a)}, & a \leq x \leq b \\ \frac{2(c-x)}{(c-b)(c-a)}, & b < x \leq c \end{cases} \quad (3.4)$$

A distribuição uniforme contínua assume que os elementos são uniformemente distribuídos sobre o intervalo $[a, b]$, em que $a=0$ e $b=1$, e sua função de densidade de probabilidade é expressa pela Equação (3.5) (CASELLA & BERGER, 2010).

$$f(x|a, b) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & \text{se } x \in [a, b] \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.5)$$

O processo de construção das matrizes aleatórias consiste na aplicação da Simulação Monte Carlo com o objetivo de obter valores aleatórios para cada função de avaliação entre alternativas e critérios. Este processo consiste em considerar números aleatórios sobre a distribuição de probabilidade, triangular ou uniforme, e, em seguida, as avaliações das alternativas são normalizadas para manter a semelhança de escala entre os diversos critérios. A normalização das avaliações não exerce maiores influências na aplicação do método PROMETHEE II, uma vez que este método considera o tratamento de diferentes escalas de valores nas suas especificações. No entanto, para assegurar a maior coerência sobre os dados lineares, a normalização foi realizada.

O procedimento de normalização utilizado para as matrizes de consequência consiste em obter valores a partir da equação $v'_j(a_i) = [v_j(a_i) - \text{Min } v_j(a_i)] / [\text{Max } v_j(a_i) - \text{Min } v_j(a_i)]$, em que $v'_j(a_i)$ é o valor para a avaliação da alternativa i no critério j , e encontra-se no intervalo $0 \leq v'_j(a_i) \leq 1$. Neste tipo de procedimento, o valor 0 (zero) indica apenas o valor mínimo para os conjuntos de avaliação, e é adequado para a indicação das avaliações entre alternativas e critérios. Este procedimento é descrito na Seção 2.1.1.3 e nomeado como Procedimento 1.

3.1.4 Avaliação das Alternativas e o Resultado de Referência

De posse dos dados de entrada, o processo de simulação segue com a avaliação das alternativas entre os critérios, com o objetivo de assumir o resultado de referência para as comparações especificadas. Para isto, são executadas as interações do método multicritério

utilizando a matriz de consequências gerada aleatoriamente e vetor de pesos “verdadeiros” como dados de entrada para a aplicação do método PROMETHEE II.

Os resultados obtidos por essa etapa são considerados como referência para o processo de comparação entre os resultados considerando pesos substitutos, e apresentam os argumentos para a avaliação das problemáticas de selecionar a melhor alternativa e de ordenamento das alternativas.

Esta etapa é repetida para cada evento da simulação, desta forma, tem-se um resultado de referência para cada estrutura de decisão e cada conjunto de vetor de pesos “verdadeiros”, considerando as distribuições de probabilidade distintas.

3.1.5 Obtenção de Vetores de Pesos Substitutos

Como discutido em seções anteriores, existem várias metodologias direcionadas para a geração de pesos substitutos em problemas de decisão. Contudo, para o presente trabalho foi suficiente selecionar as regras *Equal Weights* (EW), *Rank-Sum* (RS), *Reciprocal of the Rank* (RR) e *Rank-Order Centroid* (ROC), pois apresentam influência significativa na literatura para o contexto de análise da decisão.

Para esta etapa, a informação ordinal e o número de critérios da estrutura de decisão são fundamentais e possibilitam a aplicação de instruções matemáticas para a obtenção dos pesos substitutos. Conforme as regras EW, RR, RS e ROC, apresentadas na Seção 2.1.3.1, as informações ordinais são utilizadas para a composição de valores cardinais referentes à importância dos critérios em um problema de decisão. Este requisito permite que a eficácia de cada uma das EW, RR, RS e ROC sejam alcançadas de maneira satisfatória.

De posse dos vetores de pesos substitutos, o processo de simulação segue a avaliação da matriz de consequências gerada aleatoriamente com a utilização de cada vetor de pesos substitutos, obtido por esta etapa.

3.1.6 Avaliação das Alternativas utilizando Pesos Substitutos

Nesta etapa, a matriz de consequências gerada aleatoriamente é avaliada pelo método PROMETHEE II com a utilização de cada vetor de pesos substitutos (EW, RS, RR e ROC). A partir desta etapa, são obtidos os resultados de avaliação para o processo de comparação relacionando o desempenho das regras selecionadas no contexto de decisão multicritério.

A partir do conjunto de resultados “verdadeiros” e dos fornecidos pelos pesos substitutos, é possível elaborar a análise sobre o desempenho das regras de decisão para a seleção da melhor alternativa e para a ordenação das alternativas, considerando o método PROMETHEE II.

3.1.7 Processo de Comparação dos Resultados “Verdadeiros” e dos Pesos Substitutos

Na etapa de comparação dos resultados obtidos pelos pesos “verdadeiros” e dos obtidos pelos pesos substitutos, a proposta é compará-los aos pares, tomando a correspondência do resultado por pesos “verdadeiros” sempre como referência. Dessa forma, os resultados obtidos por cada regra de pesos substitutos são comparados ao resultado “verdadeiro”, cada vez que o evento for simulado, levando-se em consideração a ótica de cada tipo de problemática analisada, seja para a escolha de uma alternativa ou a ordenação dos elementos.

O processo de comparação é baseado na estrutura lógica de decisão que verifica a condição de igualdade entre os resultados. Com isso, as medidas de desempenho utilizadas pelo estudo são eficientes para indicar a adequação entre regras de decisão.

Para a seleção de uma melhor alternativa, são analisadas as equivalências entre as alternativas alocadas na primeira posição da ordenação final oferecida pelo PROMETHEE II. Por esta perspectiva, a cada evento simulado, a análise comparativa se concentra na alternativa indicada pelo maior valor de avaliação que corresponde à alternativa alocada na primeira posição dos resultados obtidos. Com isso, a proposta se concentra na avaliação da proporção de casos em que as alternativas alocadas na primeira posição são semelhantes nos resultados calculados com a utilização de pesos substitutos em relação aos resultados com pesos “verdadeiros”.

Em segunda instância, é proposta a avaliação da problemática de ordenação. Para este tipo de problemática, o objetivo é verificar as mudanças ocorridas na ordenação dos resultados e, através de recursos estatísticos e análise dos níveis de correlação das ordenações obtidas, avaliar o quão relevante é o impacto dessas mudanças para a conformidade dos resultados esperados.

Nesta etapa, as medidas de desempenho são computadas para oferecer os argumentos para a recomendação final proposta pelo processo de simulação. Em seções seguintes, as medidas de desempenho utilizadas neste estudo para cada uma das problemáticas trabalhadas são apresentadas com maiores detalhes.

3.1.8 Sobre a Etapa de Repetição de Casos para a Simulação

O processo de simulação proposto pelo presente estudo foi especificado com base nas instruções de desenvolvimento de recursos computacionais. Com o auxílio da ferramenta computacional, as etapas apresentadas pelo processo de simulação podem ser repetidas milhares de vezes. Desta forma, é possível executar um número de eventos significativamente elevado para garantir a relevância das conclusões do estudo.

O argumento para esta etapa é definido em primeira instância e corresponde ao número de vezes que os resultados das comparações serão computados para cada tipo de estrutura de decisão, cada matriz de consequência simulada e cada tipo de problemática analisado. Para este estudo, foi considerada a simulação de 1.000.000 de eventos, construídos pela aleatoriedade das distribuições triangular e uniforme. Com isso, cada evento simulado oferece resultados que compreendem uma parcela relevante para a avaliação geral sobre o desempenho dos pesos substitutos na aplicação do PROMETHEE II.

O número de eventos ilustrado apresenta relevância em termos estatísticos e exige esforços suportados pela ferramenta computacional desenvolvida para esta avaliação. A apresentação desta ferramenta está sendo elaborada em termos conceituais, quando ilustradas as etapas do processo de simulação consideradas pela proposta do estudo, que tem o objetivo de indicar a regra mais adequada para pesos substitutos, dentre as analisadas.

3.1.9 Recomendação Final do Experimento

Após a aplicação de todos os casos, as medidas de desempenho são computadas para oferecer argumentos capazes de indicar o nível de adequação das metodologias para pesos substitutos, quando utilizadas as interações do método PROMETHEE II.

A ferramenta computacional, desenvolvida para o suporte ao processo de simulação, oferece saídas de dados através da construção de tabelas e recursos gráficos. Dessa forma, é possível adquirir instruções e documentos que asseguram a indicação do processamento de dados quando envolvidos os interesses da recomendação final do experimento.

As medidas de desempenho utilizadas neste processo de simulação respondem satisfatoriamente aos pressupostos do estudo sobre a escolha de uma alternativa e sobre a ordenação das alternativas.

3.2 MEDIDAS DE AVALIAÇÃO PARA A SELEÇÃO DA MELHOR ALTERNATIVA

Para determinar o desempenho da simulação com base na escolha de uma melhor alternativa, a comparação dos resultados limita-se a análise sobre as alternativas alocadas em primeira posição dos resultados obtidos pelos pesos substitutos em comparação com o resultado “verdadeiro”. Para verificar a eficácia dos resultados por esta ótica, foram utilizadas duas medidas: a taxa de sucesso e a média do valor de perda.

3.2.1 Taxa de Sucesso

Para a seleção da melhor alternativa, a primeira medida utilizada para verificar o desempenho dos pesos substitutos em comparação aos pesos “verdadeiros” é a Taxa de Sucesso. Essa medida é eficiente para indicar a proporção de casos em que a semelhança entre os resultados é verificada. Assim, na aplicação do método multicritério, seleciona-se a alternativa alocada na primeira posição utilizando o vetor de pesos “verdadeiros” e compara-o a alternativa alocada na primeira posição de cada resultado utilizando os EW, RS, RR e ROC.

Ou seja, a condição para que a taxa de sucesso seja computada é que as alternativas alocadas em primeira posição a partir dos resultados utilizando cada um dos pesos substitutos sejam iguais ao resultado obtido pelo peso “verdadeiro”. Dessa forma, a Taxa de Sucesso computa a proporção de casos em que esta ocorrência é verdadeira para cada um dos EW, RS, RR e ROC. Sendo assim, este indicador verifica que quanto maior a proporção de resultados obtidos pelos EW, RS, RR e ROC em conformidade com os resultados obtidos pelos pesos “verdadeiros”, mais adequada será a metodologia para dos pesos substitutos com a aplicação do método PROMETHEE II.

3.2.2 Média do Valor de Perda

A segunda medida utilizada para verificar o desempenho das regras EW, RS, RR e ROC, no contexto de seleção da melhor alternativa, é o cálculo da Média do Valor de Perda.

Para obter o resultado final, o método PROMETHEE II calcula o fluxo total entre as alternativas e as aloca em ordem de prioridade dependendo do desempenho que apresentam no processo de avaliação, como descrito na Seção 2.1.2.1. Esta informação é fundamental para o cálculo da Média do Valor de Perda.

Este indicador é calculado pela diferença absoluta entre o fluxo total da primeira alternativa com peso “verdadeiro” e o fluxo total das primeiras alternativas de cada resultado obtido pelos EW, RS, RR e ROC. Esta diferença é computada para cada relação de peso substituto e, por fim, a média desses valores é indicada como referência para cada uma das regras utilizadas.

Esta medida é interessante para verificar a distância entre os resultados obtidos pela utilização dos pesos substitutos em comparação com os resultados com pesos “verdadeiros”. Dessa forma, o indicador para a Média do Valor de Perda verifica que quanto menor for o valor médio, mais adequada será a metodologia com a aplicação do peso substituto para o método PROMETHEE II.

As medidas utilizadas para verificar o desempenho do contexto de seleção da melhor alternativa atendem satisfatoriamente a proposta do estudo. Em adição, o estudo propõe a análise dos resultados referentes à ordenação dos elementos do conjunto de alternativas.

3.3 MEDIDAS DE AVALIAÇÃO PARA A ORDENAÇÃO DAS ALTERNATIVAS

Para determinar o desempenho da simulação com base na problemática de ordenação, a comparação dos resultados analisa a correlação existente entre a ordenação completa obtida pela utilização dos pesos substitutos em comparação com o resultado com pesos “verdadeiros”. Para verificar o desempenho dos resultados por este aspecto, procurou-se utilizar um teste estatístico que identifique a correlação existente entre as ordenações e indique a significância deste teste, considerando diferentes perspectivas de análise.

Dessa forma, para cada uma das aplicações utilizando os EW, RS, RR e ROC, foi avaliada a proporção de casos em que a ordem é alterada em relação às aplicações utilizando pesos “verdadeiros”. Para isso, foi realizado um teste estatístico baseado no coeficiente de correlação de Kendall (SIEGEL, 1975) para avaliar se as mudanças ocorridas entre as posições das alternativas são estatisticamente significativas. Esta mesma avaliação foi realizada satisfatoriamente para problemas de decisão multicritério e descrita por Daher & Almeida (2012).

O coeficiente de correlação de Kendall verifica se a ocorrência de mudanças no ordenamento dos resultados obtidos pelos pesos substitutos é estatisticamente significativa quando comparados aos resultados obtidos pelos pesos “verdadeiros”. Dessa forma, é possível realizar o teste que verifica a correlação dos dados por níveis de significância (α). Para este

estudo, foram considerados os níveis de $\alpha=0,01$, $\alpha=0,05$, $\alpha=0,10$ e $\alpha=0,15$, parâmetros para os testes de hipóteses realizados.

A seleção dos níveis de significância foi realizada para verificar qual nível seria mais adequado para indicar resultados satisfatórios para o estudo proposto. Dentre os casos analisados, o nível de $\alpha=0,05$ oferece resultados de relevância. No entanto, a comparação dos testes realizados para os demais níveis é oportuna e oferece alicerce para estudos comportamentais sobre os dados em pesquisas futuras.

Para cada caso simulado, ainda é relevante estudar o número de vezes em que cada alternativa se manteve na mesma posição. A metodologia consiste em verificar para uma determinada estrutura de decisão, quantas vezes a posição das alternativas ordenadas pela utilização dos pesos substitutos foi a mesma indicada com a utilização de pesos “verdadeiros”. Por esta perspectiva, quanto maior o percentual médio de casos em conformidade, mais adequada será a metodologia para pesos substitutos.

Por outro lado, pode-se verificar o percentual de vezes em que cada alternativa não permaneceu em sua posição original. Para este trabalho foi suficiente analisar se cada alternativa alterou uma, duas ou mais de duas posições no ordenamento, considerando posições superiores ou inferiores a partir do ordenamento original. Por esta perspectiva, quanto menor o percentual médio de casos em que as alternativas se alteram, mais adequada será a metodologia para pesos substitutos.

Analisar os problemas de seleção da melhor alternativa e de ordenação das alternativas é coerente com a utilização do método PROMETHEE II que oferece uma pré-ordem completa como resultado da sua aplicação. Os resultados da simulação, que utiliza as medidas de desempenho para indicar a metodologia mais adequada, são ilustrados em tabelas e gráficos de fácil interpretação. Para tal, é fundamental a demonstração das interações e dos resultados obtidos pelo experimento.

3.4 RESULTADOS DO EXPERIMENTO SOBRE PESOS SUBSTITUTOS PARA O MÉTODO PROMETHEE II

O experimento apresentado se propõe a verificar o desempenho dos EW, RS, RR e ROC como opções de representação para os pesos de critérios em problemas de decisão multicritério utilizando o PROMETHEE II.

Para a apresentação dos resultados do experimento, foram consideradas as decisões sobre a escolha da melhor alternativa dentro de um conjunto viável e a de ordenamento dessas alternativas. Para cada uma das decisões foram identificadas as medidas de desempenho assumidas para a avaliação da qualidade da informação recomendada.

Foram avaliadas 25 estruturas de decisão simuladas pelas instruções de Monte Carlo com base na distribuição triangular e na distribuição uniforme. Para este experimento, considerou-se 1.000.000 eventos. Esta base de dados permite analisar a contribuição das regras utilizando pesos substitutos e indicar àquela que melhor se adéqua para cada tipo de problemática. Os resultados obtidos são apresentados nas seções seguintes.

3.4.1 Para a Escolha da Melhor Alternativa de Decisão

A primeira medida utilizada para avaliar a problemática de escolha é a Taxa de Sucesso, que computa o percentual de vezes em que as alternativas alocadas em primeira posição pelos EW, RS, RR e ROC são iguais às indicadas pelo resultado “verdadeiro”. Foram verificadas 25 estruturas de decisão, simuladas pela distribuição triangular e pela distribuição uniforme. As estruturas de decisão se diferenciam quanto ao número de critérios e ao número de alternativas. A Tabela 3.2 apresenta os resultados obtidos pela simulação, sendo n o número de critérios, e m o número de alternativas para a estrutura de decisão. Com isso, a leitura da Tabela 3.2 sugere que na primeira linha, tem-se a estrutura com $n=3$ critérios e $m=5$ alternativas, e para esta estrutura, utilizando-se a distribuição triangular para a geração de números aleatórios para a matriz de avaliação, tem-se que dos casos analisados, em percentual, $EW=63,65$, $RS=81,56$, $RR=83,64$ e $ROC=84,57$. Para a mesma estrutura de decisão, utilizando a distribuição uniforme sobre os dados tem-se que, em percentual de casos em conformidade: $EW=63,77$, $RS=80,90$, $RR=82,79$ e $ROC=83,62$. Esta leitura pode ser feita para as demais linhas da tabela.

Em termos gerais, o desempenho de cada uma das regras assumidas pelo experimento pode ser resumido pelas últimas linhas da Tabela 3.2, em que são encontrados os valores mínimos, médios e máximos dos percentuais encontrados dos eventos simulados para a aplicação do método utilizando cada um dos pesos substitutos e por distribuição de probabilidade empregada.

Para a esta medida, quanto maior a proporção média do número de casos indicados, mais adequado será a regra que utiliza o peso substituto para o cenário considerado. Baseado

nesta consideração, em todos os casos simulados, a Taxa de Sucesso indica que o melhor desempenho é encontrado com a utilização do ROC, destacado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Taxa de Sucesso verificada para estruturas de decisão e pesos substitutos

| | | Distribuição Triangular | | | | Distribuição Uniforme | | | |
|----------|----------|-------------------------|-------|-------|--------------|-----------------------|-------|-------|--------------|
| <i>n</i> | <i>m</i> | EW | RS | RR | ROC | EW | RS | RR | ROC |
| 03 | 05 | 63,65 | 81,56 | 83,64 | 84,57 | 63,77 | 80,90 | 82,79 | 83,62 |
| 03 | 10 | 53,20 | 75,42 | 76,88 | 79,02 | 57,80 | 76,59 | 77,69 | 79,49 |
| 03 | 15 | 49,65 | 73,61 | 73,90 | 77,13 | 55,07 | 74,66 | 75,13 | 77,62 |
| 03 | 20 | 50,81 | 69,50 | 69,93 | 72,66 | 53,85 | 73,69 | 73,78 | 76,59 |
| 03 | 25 | 56,75 | 79,19 | 79,20 | 81,99 | 52,66 | 72,60 | 72,94 | 75,93 |
| 06 | 05 | 54,02 | 76,00 | 79,84 | 81,80 | 58,97 | 79,72 | 83,34 | 85,12 |
| 06 | 10 | 51,67 | 76,06 | 78,83 | 81,48 | 51,19 | 75,76 | 78,89 | 81,55 |
| 06 | 15 | 56,68 | 74,45 | 77,43 | 80,55 | 47,36 | 73,87 | 76,86 | 79,80 |
| 06 | 20 | 44,54 | 73,62 | 76,89 | 80,16 | 45,08 | 72,47 | 75,30 | 78,76 |
| 06 | 25 | 45,53 | 74,02 | 75,78 | 79,02 | 43,65 | 71,79 | 74,30 | 77,98 |
| 09 | 05 | 52,96 | 77,09 | 80,37 | 84,78 | 57,57 | 79,24 | 82,38 | 86,24 |
| 09 | 10 | 50,39 | 75,62 | 79,24 | 83,01 | 48,82 | 74,98 | 78,44 | 82,91 |
| 09 | 15 | 47,27 | 72,58 | 74,76 | 80,09 | 44,72 | 73,03 | 76,81 | 81,52 |
| 09 | 20 | 39,18 | 72,04 | 76,26 | 80,57 | 42,19 | 71,42 | 75,39 | 80,47 |
| 09 | 25 | 37,61 | 68,81 | 74,82 | 79,46 | 40,82 | 70,63 | 74,59 | 79,50 |
| 12 | 05 | 53,60 | 76,32 | 78,48 | 84,99 | 56,89 | 78,40 | 80,92 | 86,89 |
| 12 | 10 | 40,98 | 70,40 | 76,47 | 82,72 | 47,34 | 73,61 | 77,24 | 83,64 |
| 12 | 15 | 44,77 | 70,66 | 72,25 | 81,38 | 43,40 | 71,68 | 75,51 | 82,40 |
| 12 | 20 | 42,03 | 72,11 | 75,50 | 81,97 | 40,78 | 70,25 | 74,40 | 81,44 |
| 12 | 25 | 30,51 | 59,56 | 70,18 | 76,62 | 39,03 | 69,28 | 73,45 | 80,54 |
| 15 | 05 | 56,84 | 75,45 | 74,53 | 85,68 | 56,12 | 77,93 | 79,60 | 87,55 |
| 15 | 10 | 44,95 | 70,42 | 72,47 | 82,09 | 46,62 | 73,04 | 75,69 | 84,40 |
| 15 | 15 | 40,41 | 68,52 | 68,92 | 80,85 | 42,25 | 70,55 | 73,93 | 82,99 |
| 15 | 20 | 29,00 | 66,08 | 70,55 | 80,58 | 39,88 | 69,34 | 72,68 | 82,20 |
| 15 | 25 | 40,34 | 68,29 | 69,64 | 80,61 | 38,06 | 68,26 | 71,69 | 81,52 |
| Mínimo | | 29,00 | 59,56 | 68,92 | 72,66 | 38,06 | 68,26 | 71,69 | 75,93 |
| Média | | 47,09 | 72,70 | 75,47 | 80,95 | 48,56 | 73,75 | 76,55 | 81,63 |
| Máximo | | 63,65 | 81,56 | 83,64 | 85,68 | 63,77 | 80,90 | 83,34 | 87,55 |

Considerando-se o valor da média dos resultados apresentados para os elementos simulados pela distribuição triangular, pode-se observar que o valor de $ROC = 80,95 > RR = 75,47 > RS = 72,70 > EW = 47,09$. Da mesma forma, para os elementos simulados pela distribuição uniforme o $ROC = 81,63 > RR = 76,55 > RS = 73,75 > EW = 48,56$. Essas relações oferecem a hierarquia recomendada, destacando o ROC como mais adequado pela proporção de casos verificados.

Em adição, para analisar o processo de escolha da melhor alternativa, é calculada a Média do Valor de Perda que verifica a diferença absoluta entre o fluxo total do resultado “verdadeiro” e o fluxo total obtido pelos EW, RS, RR e ROC. Por esta medida é possível indicar quais resultados mais se aproximaram dos resultados “verdadeiros” no processo de comparação dos “acertos” na alocação das alternativas em primeira posição. A Tabela 3.3

apresenta os resultados obtidos pela simulação para cada estrutura de decisão representada por n critérios, e m alternativas. A leitura da Tabela 3.3 é semelhante à da tabela anterior, em que, na primeira linha tem-se a estrutura com $n=3$ critérios e $m=5$ critérios, e para os dados gerados sobre a distribuição triangular, a média do valor de perda para $EW=0,164$, $RS=104$, $RR=0,105$ e $ROC=0,091$. E para os dados gerados sobre a distribuição uniforme, a média do valor de perda para $EW=0,157$, $RS=103$, $RR=103$ e $ROC=0,089$.

Tabela 3.3 – Média do Valor de Perda verificada para estruturas de decisão e pesos substitutos

| | | Distribuição Triangular | | | | Distribuição Uniforme | | | |
|--------|-----|-------------------------|---------|---------|----------------|-----------------------|---------|---------|----------------|
| n | m | EW | RS | RR | ROC | EW | RS | RR | ROC |
| 03 | 05 | 0,164 | 0,104 | 0,105 | 0,091 | 0,157 | 0,103 | 0,103 | 0,089 |
| 03 | 10 | 0,098 | 0,075 | 0,079 | 0,067 | 0,119 | 0,079 | 0,081 | 0,069 |
| 03 | 15 | 0,139 | 0,089 | 0,092 | 0,074 | 0,101 | 0,069 | 0,071 | 0,060 |
| 03 | 20 | 0,079 | 0,058 | 0,061 | 0,054 | 0,091 | 0,063 | 0,065 | 0,055 |
| 03 | 25 | 0,124 | 0,068 | 0,072 | 0,056 | 0,083 | 0,059 | 0,060 | 0,052 |
| 06 | 05 | 0,153 | 0,094 | 0,082 | 0,074 | 0,162 | 0,092 | 0,080 | 0,070 |
| 06 | 10 | 0,154 | 0,084 | 0,072 | 0,062 | 0,142 | 0,081 | 0,070 | 0,060 |
| 06 | 15 | 0,102 | 0,058 | 0,056 | 0,047 | 0,133 | 0,076 | 0,066 | 0,056 |
| 06 | 20 | 0,159 | 0,080 | 0,068 | 0,056 | 0,127 | 0,073 | 0,063 | 0,054 |
| 06 | 25 | 0,155 | 0,074 | 0,065 | 0,052 | 0,123 | 0,071 | 0,062 | 0,051 |
| 09 | 05 | 0,156 | 0,088 | 0,069 | 0,059 | 0,148 | 0,084 | 0,067 | 0,057 |
| 09 | 10 | 0,128 | 0,068 | 0,052 | 0,045 | 0,136 | 0,077 | 0,058 | 0,050 |
| 09 | 15 | 0,104 | 0,068 | 0,054 | 0,046 | 0,130 | 0,074 | 0,055 | 0,047 |
| 09 | 20 | 0,124 | 0,077 | 0,055 | 0,049 | 0,128 | 0,072 | 0,053 | 0,046 |
| 09 | 25 | 0,127 | 0,078 | 0,055 | 0,049 | 0,125 | 0,070 | 0,052 | 0,045 |
| 12 | 05 | 0,124 | 0,071 | 0,060 | 0,046 | 0,135 | 0,077 | 0,062 | 0,048 |
| 12 | 10 | 0,128 | 0,077 | 0,054 | 0,044 | 0,125 | 0,071 | 0,053 | 0,043 |
| 12 | 15 | 0,117 | 0,059 | 0,050 | 0,037 | 0,123 | 0,070 | 0,051 | 0,041 |
| 12 | 20 | 0,113 | 0,063 | 0,045 | 0,038 | 0,122 | 0,069 | 0,049 | 0,040 |
| 12 | 25 | 0,088 | 0,061 | 0,049 | 0,042 | 0,121 | 0,069 | 0,048 | 0,039 |
| 15 | 05 | 0,127 | 0,071 | 0,065 | 0,043 | 0,124 | 0,073 | 0,062 | 0,041 |
| 15 | 10 | 0,106 | 0,066 | 0,058 | 0,038 | 0,117 | 0,068 | 0,053 | 0,037 |
| 15 | 15 | 0,112 | 0,071 | 0,056 | 0,038 | 0,116 | 0,066 | 0,050 | 0,036 |
| 15 | 20 | 0,115 | 0,077 | 0,050 | 0,039 | 0,114 | 0,066 | 0,049 | 0,035 |
| 15 | 25 | 0,102 | 0,059 | 0,044 | 0,032 | 0,115 | 0,066 | 0,047 | 0,035 |
| Mínimo | | 0,079 | 0,058 | 0,044 | 0,032 | 0,083 | 0,059 | 0,047 | 0,035 |
| Média | | 0,12392 | 0,07352 | 0,06272 | 0,05112 | 0,12468 | 0,07352 | 0,06120 | 0,05024 |
| Máximo | | 0,164 | 0,104 | 0,105 | 0,091 | 0,162 | 0,103 | 0,103 | 0,089 |

O desempenho de cada uma das regras assumidas pelos pesos substitutos pode ser resumido pelas últimas linhas da Tabela 3.3, em que são encontrados os valores mínimos, médios e máximos dos percentuais encontrados dos eventos simulados para a aplicação do método utilizando cada um dos pesos substitutos, e os tipos de distribuição de probabilidade para a geração da matriz de consequências aleatória.

Para todos os casos simulados, a hierarquia recomendada é confirmada pelos resultados destacados na Tabela 3.3. Para esta medida, quanto menor for essa diferença média, mais

adequada será a regra de decisão para o cenário considerado. Para os elementos simulados pela distribuição triangular, pode-se observar que o valor da média de $ROC = 0,05112 < RR = 0,06272 < RS = 0,07352 < EW = 0,12392$ e para elementos simulados pela distribuição uniforme, $ROC = 0,05024 < RR = 0,07352 < RS = 0,07352 < EW = 0,12468$. Estas relações confirmam a adequação do ROC para a escolha da melhor alternativa de decisão utilizando-se o método PROMETHEE II e informação parcial sobre os critérios.

A metodologia ROC é bastante reconhecida na literatura e apresenta uma estrutura matemática consistente para a representação de pesos em problemas de decisão multicritério. O processo de simulação propõe a verificação do desempenho das metodologias para pesos substitutos para o tratamento da problemática de ordenação.

3.4.2 Para a Ordenação de Alternativas

Para a problemática de ordenação, o processo de simulação foi implementado para verificar a coerência e a aproximação das ordenações obtidas pelos EW, RS, RR e ROC em comparação com a ordenação “verdadeira”.

Os resultados das análises para a problemática de ordenação são baseados no percentual de vezes em que ocorreram alterações na ordem estabelecida entre as alternativas. Com isso, é possível verificar o impacto dessas alterações e se elas são estatisticamente significativas. Para esta verificação, foi utilizado o coeficiente de correlação de Kendall. Este coeficiente permite realizar testes de hipóteses e verificar, sobre níveis de significância, se a correspondência dos resultados ocorre e é verdadeira. Para este trabalho, foram considerados os níveis de significância $\alpha=0,01$, $\alpha=0,05$, $\alpha=0,10$ e $\alpha=0,15$.

Os resultados obtidos na análise de cada nível de significância são apresentados em tabelas apresentadas pelo Apêndice A.

A Tabela A.1 apresenta o percentual obtido para os casos em que a correlação dos resultados entre a aplicação dos pesos substitutos em relação a aplicação dos pesos “verdadeiros” foi verificada para $\alpha=0,01$, considerando-se estruturas de decisão com n critérios e m alternativas simuladas pela distribuição triangular e pela distribuição uniforme.

A partir da Tabela A.1, é possível verificar que as estruturas de decisão com 5 alternativas não apresentam percentual de correlação para o nível de significância 0,01. Ao passo que, com o aumento do número de alternativas na estrutura de decisão, o percentual de correlação é identificado. Ainda, é possível verificar que quanto menor o número de critérios, maior é o percentual de correlação existente.

O desempenho de cada uma das regras assumidas pelos pesos substitutos pode ser resumido pelos valores mínimos, médios e máximos dos percentuais encontrados para cada conjunto de estruturas de decisão, agrupados pelo número de alternativas. Em consulta a Tabela A.1, para a estrutura com $n=3$ critérios e $m=10$ alternativas, 62,31% dos resultados apresentam correlação para $\alpha=0,01$, quando utilizado o EW e dados gerados a partir da distribuição triangular. Para o mesmo cenário, utilizando o RS foram identificados 94,03% dos casos, para o RR foram identificados 97,27% e para o ROC, 97,92% dos casos. Esta leitura pode ser feita para as demais correspondências.

As conclusões sobre este nível de significância são evidenciadas pelo intervalo de confiança maior (99%), dado o resultado do teste com hipótese nula rejeitada de que não há correlação entre os resultados. No entanto, outros níveis de significância foram testados para a análise do comportamento dos dados.

A Tabela A.2, descrita pelo Apêndice A, apresenta o percentual obtido para os casos em que a correlação dos resultados entre a aplicação dos pesos substitutos em relação a aplicação dos pesos “verdadeiros” foi verificada para $\alpha=0,05$, considerando-se estruturas de decisão com n critérios e m alternativas simuladas pela distribuição triangular e pela distribuição uniforme. A partir destes resultados, é possível verificar que com o aumento do número de alternativas na estrutura de decisão, o percentual de correlação aumenta. Da mesma forma que quanto menor o número de critérios, maior o percentual de correlação existente.

A Tabela A.3 apresenta o percentual obtido para os casos em que a correlação dos resultados entre a aplicação dos pesos substitutos em relação à aplicação dos pesos “verdadeiros” foi verificada para $\alpha=0,10$, considerando-se estruturas de decisão com n critérios e m alternativas simuladas pela distribuição triangular e pela distribuição uniforme. Com base nestes resultados, é possível verificar que quanto maior o nível de significância, maior o percentual de correlações existentes entre os resultados simulados.

A Tabela A.4 apresenta o percentual obtido para os casos em que a correlação dos resultados entre a aplicação dos pesos substitutos em relação à aplicação dos pesos “verdadeiros” foi verificada para $\alpha=0,15$, considerando-se estruturas de decisão com n critérios e m alternativas simuladas pela distribuição triangular e pela distribuição uniforme.

Os testes realizados para verificar a correlação das ordenações considerando níveis de significância, podem ser considerados em termos percentuais, em que os casos de ocorrência positiva são verificados, para cada nível de significância e cada tipo de distribuição de probabilidade para a geração dos dados das matrizes de consequência. Desta forma, a

proporção média para cada evento considerado é computada e os valores são resumidos pela Tabela 3.4 e visualizados pela Figura 3.4.

Tabela 3.4 – Proporção de casos com correlação confirmada para cada nível de significância

| α | Distribuição Triangular | | | | Distribuição Uniforme | | | |
|----------|-------------------------|------|------|------|-----------------------|------|------|------|
| | EW | RS | RR | ROC | EW | RS | RR | ROC |
| 0,01 | 57,9 | 76,9 | 78,4 | 79,5 | 57,4 | 76,9 | 78,5 | 79,4 |
| 0,05 | 71,8 | 85,9 | 87,1 | 89,3 | 71,6 | 86,5 | 87,9 | 90,0 |
| 0,10 | 80,7 | 93,3 | 94,5 | 96,4 | 80,9 | 94,1 | 95,4 | 96,9 |
| 0,15 | 87,2 | 97,0 | 97,9 | 98,9 | 87,6 | 97,5 | 98,3 | 99,1 |

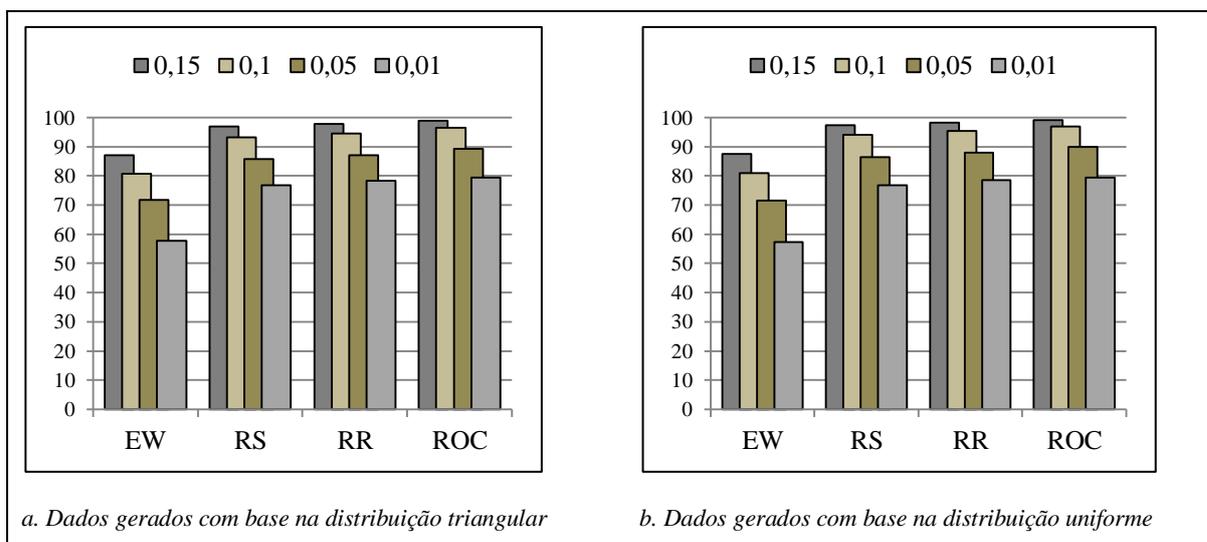


Figura 3.4 – Proporção de casos com correlação confirmada para cada nível de significância

A Tabela 3.4 apresenta os percentuais computados referentes à análise da correlação existente para os casos simulados, considerando os níveis de significância. Com base nesta tabela, é possível verificar que, para os dados gerados a partir da distribuição de probabilidade triangular e $\alpha=0,01$, utilizando o EW, 57,9% dos casos apresentaram correlação positiva. Para o mesmo cenário, com a utilização do RS foram verificados 76,9% dos casos, com a utilização do RR foram identificados 78,4% e para o ROC, 79,5%. A mesma leitura pode ser feita sobre os dados gerados pela distribuição uniforme, em que, para o nível $\alpha=0,01$, utilizando o EW, 57,4% dos casos apresentaram correlação positiva, para o RS foram 76,9%, para o RR foram 78,5% e para o ROC 79,4%. A mesma leitura pode ser realizada para os demais níveis de significância.

A Figura 3.4 representa graficamente os valores apresentados pela Tabela 3.4. A partir da Figura 3.4 é possível verificar a proporção média dos casos e indicar que não há diferença relevante entre as médias dos dados simulados pela distribuição triangular e pela distribuição

uniforme. Os valores obtidos são muito próximos, levando a consideração que não há influência significativa quanto à escolha dentre as distribuições de probabilidade para a geração dos valores aleatórios para as matrizes de consequências.

Na análise sobre a correlação das ordenações, quanto maior o número de casos com correlação confirmada, mais adequada é a regra que utiliza o peso substituto. Considerando esta análise, é importante destacar que a proporção de casos com resposta positiva aumenta conforme o aumento do nível de significância. Desta forma, é possível indicar o ROC como a metodologia mais adequada, pois este apresenta maiores proporções de casos em todos os testes realizados sobre os níveis de significância. Em adição, é possível considerar a hierarquia de desempenho entre as metodologias, que sugere: ROC, RR, RS e EW.

Uma segunda análise elaborada sobre a problemática de ordenação corresponde a verificação da proporção de casos em que cada alternativa permanece em sua posição “original” do ranking, quando analisados os resultados simulados por pesos substitutos. O procedimento consiste em agrupar as estruturas de decisão por número de alternativas 5, 10, 15, 20 e 25, assumindo-se a distribuição triangular e a distribuição uniforme para a geração dos dados aleatórios para as matrizes de avaliação em cada caso e, em seguida, computar os dados em que cada alternativa simulada pelos pesos substitutos se manteve na mesma posição em comparação com a ordenação “verdadeiros”.

Os resultados obtidos na análise sobre a alteração das posições entre as alternativas quando considerada a ordenação final de cada evento simulado são apresentados em tabelas apresentadas pelo Apêndice A.

A Tabela A.5 apresenta os valores obtidos para o conjunto de estruturas com 5 alternativas e variações dos números de critérios. Para a composição da tabela, as posições das alternativas foram ordenadas e para cada evento simulado pelos pesos substitutos. Com isto, foram calculados os percentuais que indicam a permanência de cada alternativa em sua posição original, considerando n o número de critérios.

Na terceira coluna da Tabela A.5 estão os dados calculados para as estruturas com 5 alternativas e 3 critérios, simuladas pela distribuição triangular, com a utilização do EW. Nesta coluna, para as cinco primeiras linhas estão os percentuais de permanência para cada posição, considerando as ordenações obtidas. Dessa forma, comparando os resultados da primeira posição, 63,65% dos casos apresentaram a mesma posição em relação ao resultado “verdadeiro”. Da mesma forma, para a segunda posição foram computados 39,03%. Para a terceira posição, 34,65%. Para a quarta posição, 38,37%. E, finalmente, para a quinta posição, 58,98%. Esta leitura pode ser feita para todas as ocorrências apresentadas pela tabela.

Em adição, é possível obter o percentual médio de permanência entre as posições das estruturas de decisão com cinco alternativas para cada aplicação dos pesos substitutos. Para isto, é calculada a média dentre os valores de permanência das posições. Estes valores são indicados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Média percentual de permanência das posições originais para estruturas com 5 alternativas

| n | Distribuição Triangular | | | | Distribuição Uniforme | | | |
|----|-------------------------|-------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|-------|
| | EW | RS | RR | ROC | EW | RS | RR | ROC |
| 03 | 46,94 | 66,28 | 69,48 | 70,81 | 49,81 | 69,57 | 72,35 | 73,49 |
| 06 | 39,73 | 65,03 | 70,03 | 72,35 | 45,05 | 67,99 | 72,33 | 74,88 |
| 09 | 42,25 | 66,22 | 68,48 | 75,16 | 43,63 | 67,00 | 70,88 | 76,24 |
| 12 | 42,09 | 64,01 | 66,09 | 74,94 | 42,91 | 65,98 | 69,07 | 77,47 |
| 15 | 42,45 | 61,97 | 62,55 | 75,99 | 42,93 | 65,37 | 66,95 | 78,40 |

Com a informação média sobre o percentual de permanência das alternativas, quando considerados os casos simulados, é possível verificar o nível de consistência das metodologias para pesos substitutos. Com isto, análises semelhantes são feitas sobre as estruturas de decisão com diferentes números de alternativas.

A Tabela A.6 apresenta os percentuais de permanência entre as posições das alternativas para estruturas de decisão com 10 alternativas, em que a mesma leitura da tabela anterior pode ser elaborada, considerando n critérios. Em adição, A Tabela 3.6 apresenta o percentual médio de permanência entre as posições das estruturas de decisão para dez alternativas.

Tabela 3.6 – Média percentual de permanência das posições originais para estruturas com 10 alternativas

| n | Distribuição Triangular | | | | Distribuição Uniforme | | | |
|----|-------------------------|-------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|-------|
| | EW | RS | RR | ROC | EW | RS | RR | ROC |
| 03 | 32,74 | 54,94 | 56,61 | 58,89 | 31,43 | 52,13 | 53,75 | 56,14 |
| 06 | 27,80 | 51,15 | 55,47 | 59,38 | 26,55 | 49,88 | 53,63 | 57,34 |
| 09 | 27,80 | 50,26 | 53,54 | 60,14 | 25,37 | 48,34 | 52,29 | 58,95 |
| 12 | 22,88 | 43,62 | 49,29 | 58,80 | 24,59 | 46,81 | 50,17 | 60,40 |
| 15 | 23,06 | 42,83 | 44,41 | 57,61 | 24,10 | 45,92 | 47,87 | 61,82 |

As Tabelas A.7 e A.8 apresentam os percentuais de permanência entre as posições das alternativas para estruturas de decisão com 15 alternativas, em que a mesma leitura das tabelas anteriores pode ser elaborada, considerando n critérios. Em adição, A Tabela 3.7 apresenta o percentual médio de permanência entre as posições das estruturas de decisão para quinze alternativas.

Tabela 3.7 – Média percentual de permanência das posições originais para estruturas com 15 alternativas

| n | Distribuição Triangular | | | | Distribuição Uniforme | | | |
|----|-------------------------|-------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|-------|
| | EW | RS | RR | ROC | EW | RS | RR | ROC |
| 03 | 22,44 | 42,72 | 43,84 | 46,93 | 23,26 | 41,95 | 42,98 | 45,60 |
| 06 | 20,51 | 40,42 | 42,74 | 47,15 | 18,97 | 39,48 | 42,24 | 46,24 |
| 09 | 18,85 | 37,93 | 39,63 | 46,74 | 17,90 | 37,82 | 41,27 | 47,92 |
| 12 | 16,87 | 34,97 | 37,01 | 47,92 | 17,41 | 36,41 | 39,40 | 49,28 |
| 15 | 16,23 | 36,97 | 39,57 | 53,09 | 17,05 | 35,31 | 37,32 | 50,72 |

As Tabelas A.9, A.10 e A.11 apresentam os percentuais de permanência entre as posições das alternativas para estruturas de decisão com 20 alternativas, em que a mesma leitura das tabelas anteriores pode ser elaborada, considerando n critérios. Em adição, A Tabela 3.8 apresenta o percentual médio de permanência entre as posições das estruturas de decisão para vinte alternativas.

Tabela 3.8 – Média percentual de permanência das posições originais para estruturas com 20 alternativas

| n | Distribuição Triangular | | | | Distribuição Uniforme | | | |
|----|-------------------------|-------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|-------|
| | EW | RS | RR | ROC | EW | RS | RR | ROC |
| 03 | 15,87 | 31,96 | 32,61 | 35,38 | 18,66 | 35,21 | 35,79 | 38,52 |
| 06 | 16,64 | 35,31 | 37,83 | 41,95 | 14,92 | 32,78 | 34,87 | 38,79 |
| 09 | 13,13 | 30,32 | 33,47 | 39,55 | 13,95 | 31,13 | 33,96 | 40,23 |
| 12 | 13,63 | 31,38 | 34,22 | 43,06 | 13,51 | 29,78 | 32,40 | 41,50 |
| 15 | 12,00 | 29,11 | 31,23 | 43,93 | 13,27 | 28,79 | 30,44 | 42,82 |

As Tabelas A.12, A.13 e A.14 apresentam os percentuais de permanência entre as posições das alternativas para estruturas de decisão com 25 alternativas, em que a mesma leitura das tabelas anteriores pode ser elaborada, considerando n critérios. Em adição, A Tabela 3.9 apresenta o percentual médio de permanência entre as posições das estruturas de decisão para vinte e cinco alternativas.

Tabela 3.9 – Média percentual de permanência das posições originais para estruturas com 25 alternativas

| n | Distribuição Triangular | | | | Distribuição Uniforme | | | |
|----|-------------------------|-------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|-------|
| | EW | RS | RR | ROC | EW | RS | RR | ROC |
| 03 | 15,76 | 31,72 | 32,03 | 35,00 | 15,72 | 30,25 | 30,72 | 33,32 |
| 06 | 13,47 | 28,35 | 29,78 | 33,11 | 12,29 | 27,93 | 29,62 | 33,33 |
| 09 | 11,35 | 26,06 | 28,47 | 33,97 | 11,46 | 26,53 | 28,89 | 34,57 |
| 12 | 10,23 | 22,56 | 26,60 | 33,62 | 11,07 | 25,27 | 27,44 | 35,87 |
| 15 | 11,05 | 24,48 | 25,00 | 36,03 | 10,84 | 24,36 | 25,92 | 37,00 |

As análises realizadas pela perspectiva de permanência das alternativas em suas posições “originais” oferecem subsídios para afirmar que não há diferença significativa entre os dados simulados pela distribuição triangular e os dados simulados pela distribuição

uniforme, para todas as aplicações com pesos substitutos e para as diferentes estruturas de decisão. Para esta medida, quanto maior o número de casos acumulados, mais adequada será a regra de decisão, pois esta consideração indica uma maior aproximação entre a regra de peso substituto e o resultado “verdadeiro”.

Considerando os dados sobre as médias percentuais de permanência das alternativas em suas posições originais é possível perceber que a utilização dos pesos ROC apresenta melhores indicações de conformidade, uma vez que suas médias são maiores em todos os cenários analisados. Em adição, sobre a permanência das alternativas, é possível verificar a proporção média sob a ótica das estruturas de decisão. Com este objetivo, a Tabela 3.10 representa os valores calculados para esta consideração, em que n é o número de critérios.

A partir da Tabela 3.10 é possível verificar que à medida que a quantidade de alternativas aumenta, o percentual de permanência médio das alternativas diminui. O mesmo acontece quando o número de critérios aumenta. Esta relação pode ser explicada pelo aumento da complexidade de interações quando o número de elementos é maior em problemas de decisão. Dessa forma, a construção das estruturas de decisão pode influenciar neste tipo de análise.

Tabela 3.10 – Média de permanência das alternativas na posição referente a ordenação original

| n | Distribuição Triangular | | | | | Distribuição Uniforme | | | | |
|-----|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 05 | 10 | 15 | 20 | 25 | 05 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| 03 | 63,38 | 50,80 | 38,98 | 28,96 | 28,63 | 66,31 | 48,36 | 38,45 | 32,04 | 27,50 |
| 06 | 61,78 | 48,45 | 37,70 | 32,93 | 26,18 | 65,06 | 46,85 | 36,73 | 30,34 | 25,79 |
| 09 | 63,03 | 47,93 | 35,79 | 29,12 | 24,96 | 64,44 | 46,24 | 36,23 | 29,82 | 25,36 |
| 12 | 61,78 | 43,65 | 34,19 | 30,57 | 23,25 | 63,86 | 45,49 | 35,62 | 29,30 | 24,91 |
| 15 | 60,74 | 41,98 | 36,47 | 29,07 | 24,14 | 63,28 | 44,93 | 35,10 | 28,83 | 24,53 |

Com base na Tabela 3.10, a regra geral consiste em afirmar que quanto menor o número de critérios, maior é a proporção em que as alternativas se mantêm nas posições originais. Enquanto que, quanto menor o número de alternativas, maior é o percentual considerado. Apenas para o caso em que os dados são simulados sobre a distribuição triangular com estrutura de decisão com 20 alternativas, a proporção média para 6 critérios é superior a de 12, 9, 15 e 3, respectivamente. Algumas pequenas diferenças na hierarquia de médias podem ser observadas sobre os dados simulados pela distribuição triangular para estruturas de 5, 15 e 20 alternativas. Para os dados simulados pela distribuição uniforme, é válida a regra geral sobre a indicação das médias em relação a equivalência das ordenações obtidas.

Avaliando-se a média de permanência das alternativas em relação à ordem “original”, a metodologia para pesos substitutos que apresentou melhores resultados foi a ROC, cujas médias foram superiores as da RR, RS e EW, respectivamente.

O estudo permite a elaboração de mais indicadores sobre a análise de correlação entre as ordenações das alternativas. Dessa forma, é possível considerar a média de casos em que as alternativas apresentam mudanças de posições no resultado final das ordenações. Para verificar a mudança de ordem, foi computado o percentual de vezes em que cada alternativa alterou uma, duas ou mais posições, considerando pontos superiores ou inferiores, em relação a ordenação “original”. Para esta medida, foram computados os valores médios de mudança para cada cenário simulado.

Assim, a Tabela 3.11 apresenta o percentual médio em que as alternativas alteraram apenas uma posição em relação à ordenação original, considerando os casos simulados para cada metodologia de pesos substitutos e estruturas de decisão. Na Tabela 3.11, as estruturas de decisão são definidas por n critérios e m alternativas.

Para este indicador, admitindo-se que há ocorrência de mudanças, a análise sobre o desempenho das metodologias considera que quanto maior o percentual de mudanças para uma posição, superior ou inferior em relação à posição original, mais adequada será a abordagem para a problemática de ordenação. Esta consideração é válida quando o interesse das análises é que as ordenações com utilização dos pesos substitutos se mantenham o mais próximo das ordenações com utilização dos pesos “verdadeiros”. Com isso, a avaliação de mudança de apenas uma posição entre as alternativas é satisfatória para a indicação desta aproximação. No entanto, as análises sobre outros níveis de mudanças podem agregar o conhecimento sobre o cenário do experimento.

Tabela 3.11 – Média de alteração de apenas uma posição na ordem por pesos substitutos

| | | Distribuição Triangular | | | | Distribuição Uniforme | | | |
|----------|----------|-------------------------|-------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|-------|
| <i>n</i> | <i>m</i> | EW | RS | RR | ROC | EW | RS | RR | ROC |
| 03 | 05 | 34,63 | 27,87 | 26,28 | 25,44 | 34,52 | 25,88 | 24,39 | 23,53 |
| 06 | 05 | 37,03 | 27,44 | 25,32 | 23,66 | 36,28 | 25,68 | 23,65 | 21,83 |
| 09 | 05 | 37,33 | 26,70 | 26,01 | 21,51 | 36,75 | 26,39 | 24,44 | 20,76 |
| 12 | 05 | 37,21 | 28,12 | 27,22 | 21,63 | 36,94 | 27,12 | 25,45 | 19,80 |
| 15 | 05 | 36,81 | 29,23 | 29,16 | 20,87 | 37,24 | 27,54 | 26,78 | 19,11 |
| 03 | 10 | 32,96 | 30,99 | 31,28 | 30,36 | 31,26 | 31,62 | 32,00 | 31,13 |
| 06 | 10 | 31,89 | 32,09 | 31,92 | 30,10 | 30,95 | 31,51 | 31,78 | 30,32 |
| 09 | 10 | 32,06 | 31,40 | 31,50 | 29,19 | 30,40 | 31,80 | 31,90 | 29,71 |
| 12 | 10 | 29,19 | 32,49 | 32,53 | 29,98 | 30,25 | 32,34 | 32,17 | 29,17 |
| 15 | 10 | 29,49 | 32,92 | 33,08 | 30,48 | 30,23 | 32,62 | 32,50 | 28,56 |
| 03 | 15 | 27,59 | 32,76 | 33,43 | 32,69 | 26,48 | 31,75 | 32,68 | 32,33 |
| 06 | 15 | 25,91 | 31,74 | 33,46 | 32,56 | 24,99 | 31,52 | 33,12 | 32,47 |
| 09 | 15 | 25,67 | 32,07 | 33,13 | 32,99 | 24,35 | 31,47 | 32,73 | 32,34 |
| 12 | 15 | 23,62 | 30,68 | 32,16 | 32,33 | 23,95 | 31,44 | 32,29 | 32,15 |
| 15 | 15 | 23,36 | 32,27 | 33,22 | 31,71 | 23,71 | 31,59 | 31,89 | 31,85 |
| 03 | 20 | 20,31 | 29,56 | 30,84 | 31,10 | 22,67 | 30,46 | 31,44 | 31,53 |
| 06 | 20 | 23,09 | 31,00 | 33,02 | 32,71 | 20,82 | 30,02 | 32,08 | 32,14 |
| 09 | 20 | 19,36 | 29,65 | 31,44 | 32,46 | 20,07 | 29,59 | 31,55 | 32,36 |
| 12 | 20 | 19,79 | 30,56 | 32,16 | 33,14 | 19,72 | 29,38 | 30,73 | 32,54 |
| 15 | 20 | 18,53 | 30,11 | 31,31 | 33,14 | 19,47 | 29,31 | 30,01 | 32,61 |
| 03 | 25 | 19,61 | 29,33 | 30,05 | 30,56 | 19,77 | 28,83 | 29,63 | 30,18 |
| 06 | 25 | 18,97 | 28,06 | 29,88 | 30,52 | 17,77 | 28,24 | 30,31 | 30,95 |
| 09 | 25 | 17,12 | 27,06 | 28,62 | 30,75 | 17,08 | 27,63 | 29,77 | 31,42 |
| 12 | 25 | 14,66 | 25,01 | 27,94 | 31,07 | 16,75 | 27,12 | 28,80 | 31,84 |
| 15 | 25 | 16,71 | 26,75 | 27,08 | 31,70 | 16,50 | 26,86 | 27,78 | 32,06 |
| | Mínimo | 14,66 | 25,01 | 25,32 | 20,87 | 16,50 | 25,68 | 23,65 | 19,11 |
| | Média | 26,12 | 29,84 | 30,48 | 29,71 | 25,96 | 29,51 | 29,99 | 29,31 |
| | Máximo | 37,33 | 32,92 | 33,46 | 33,14 | 37,24 | 32,62 | 33,12 | 32,61 |

A Tabela 3.11 apresenta as médias sobre a alteração de apenas uma posição na ordem quando aplicadas as metodologias para cada peso substituto. Considerando as médias apresentadas, o RR apresenta média superior ao RS, ROC e EW nos conjuntos de dados simulados pela distribuição triangular e pela uniforme. No entanto, os valores médios do RS, RR e ROC apresentam uma diferença pouco significativa para esta análise. Além disso, é possível considerar o percentual em que as alternativas alteraram duas posições no ordenamento, em relação ao resultado “original”. A Tabela 3.12 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 3.12 – Média de alteração de duas posições na ordem por pesos substitutos

| | | Distribuição Triangular | | | | Distribuição Uniforme | | | |
|----------|----------|-------------------------|-------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|-------|
| <i>n</i> | <i>m</i> | EW | RS | RR | ROC | EW | RS | RR | ROC |
| 03 | 05 | 13,58 | 5,40 | 4,02 | 3,39 | 11,96 | 4,26 | 3,11 | 2,73 |
| 06 | 05 | 16,55 | 6,25 | 4,16 | 3,60 | 13,93 | 5,35 | 3,62 | 3,01 |
| 09 | 05 | 14,89 | 5,94 | 4,87 | 3,03 | 14,48 | 5,59 | 4,13 | 2,72 |
| 12 | 05 | 15,01 | 6,52 | 5,78 | 3,09 | 14,76 | 5,83 | 4,80 | 2,49 |
| 15 | 05 | 15,07 | 7,27 | 7,01 | 2,83 | 14,88 | 6,01 | 5,46 | 2,28 |
| 03 | 10 | 18,13 | 10,04 | 9,25 | 8,40 | 18,04 | 11,23 | 10,49 | 9,57 |
| 06 | 10 | 19,10 | 11,19 | 9,35 | 8,04 | 19,06 | 11,70 | 10,37 | 9,04 |
| 09 | 10 | 19,09 | 11,43 | 10,33 | 7,91 | 19,33 | 12,29 | 10,84 | 8,37 |
| 12 | 10 | 19,37 | 13,87 | 11,85 | 8,30 | 19,50 | 12,83 | 11,69 | 7,79 |
| 15 | 10 | 19,65 | 14,28 | 13,76 | 8,78 | 19,50 | 13,17 | 12,64 | 7,30 |
| 03 | 15 | 18,61 | 14,37 | 14,08 | 13,06 | 17,77 | 14,62 | 14,47 | 13,57 |
| 06 | 15 | 18,16 | 14,61 | 14,22 | 12,68 | 17,94 | 14,81 | 14,40 | 13,02 |
| 09 | 15 | 18,41 | 15,35 | 15,20 | 12,77 | 17,84 | 15,33 | 14,56 | 12,35 |
| 12 | 15 | 17,69 | 16,00 | 15,75 | 12,33 | 17,74 | 15,75 | 15,08 | 11,85 |
| 15 | 15 | 17,87 | 15,85 | 15,13 | 10,33 | 17,75 | 16,16 | 15,74 | 11,36 |
| 03 | 20 | 15,44 | 16,75 | 17,24 | 16,52 | 16,35 | 16,07 | 16,39 | 15,60 |
| 06 | 20 | 17,13 | 15,73 | 15,67 | 14,31 | 16,03 | 16,09 | 16,36 | 15,27 |
| 09 | 20 | 15,36 | 16,60 | 16,46 | 15,03 | 15,72 | 16,39 | 16,46 | 14,83 |
| 12 | 20 | 15,73 | 16,75 | 16,56 | 13,96 | 15,62 | 16,70 | 16,63 | 14,44 |
| 15 | 20 | 15,14 | 17,38 | 17,17 | 13,64 | 15,51 | 16,98 | 16,91 | 14,01 |
| 03 | 25 | 14,92 | 16,54 | 17,01 | 16,22 | 14,90 | 16,67 | 17,13 | 16,55 |
| 06 | 25 | 14,84 | 16,24 | 16,99 | 16,33 | 14,25 | 16,50 | 17,26 | 16,45 |
| 09 | 25 | 13,94 | 16,47 | 16,90 | 16,30 | 13,89 | 16,61 | 17,08 | 16,25 |
| 12 | 25 | 12,19 | 16,48 | 17,02 | 16,40 | 13,68 | 16,81 | 17,08 | 15,93 |
| 15 | 25 | 13,70 | 16,83 | 16,90 | 15,86 | 13,66 | 16,93 | 17,05 | 15,65 |
| | Mínimo | 12,19 | 5,40 | 4,02 | 2,83 | 11,96 | 4,26 | 3,11 | 2,28 |
| | Média | 16,38 | 13,37 | 12,91 | 10,92 | 16,16 | 13,23 | 12,79 | 10,90 |
| | Máximo | 19,65 | 17,38 | 17,24 | 16,52 | 19,50 | 16,98 | 17,26 | 16,55 |

A partir da análise sobre a alteração de mais de uma posição na ordem obtida pela utilização de pesos substitutos, a metodologia mais adequada é indicada pelo menor percentual. Isto é, quanto menor o percentual de mudança para mais de uma posição, inferior ou superior, maior será a aproximação da ordenação em relação ao resultado original.

A partir da Tabela 3.12 é possível verificar que para os dados simulados pela distribuição triangular e os dados simulados pela distribuição uniforme, a recomendação é a mesma: o ROC apresenta menor percentual em relação ao RR, RS e EW.

Da mesma forma, pode-se avaliar o percentual de alteração para mais de duas posições na ordenação, e a indicação da metodologia mais adequada continua sendo referenciada pelo menor percentual indicado, pois quanto menor for o percentual obtido, mais próximo serão os resultados simulados em comparação aos originais. A Tabela 3.13 apresenta os resultados deste indicador, considerando as diferentes estruturas de decisão com *n* critérios e *m* alternativas.

Tabela 3.13 – Média de alteração de mais de duas posições na ordem por pesos substitutos

| | | Distribuição Triangular | | | | Distribuição Uniforme | | | |
|----------|----------|-------------------------|-------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|-------|
| <i>n</i> | <i>m</i> | EW | RS | RR | ROC | EW | RS | RR | ROC |
| 03 | 05 | 4,86 | 0,45 | 0,22 | 0,36 | 3,71 | 0,29 | 0,14 | 0,25 |
| 06 | 05 | 6,69 | 1,28 | 0,49 | 0,39 | 4,74 | 0,98 | 0,40 | 0,29 |
| 09 | 05 | 5,54 | 1,15 | 0,65 | 0,30 | 5,15 | 1,02 | 0,55 | 0,28 |
| 12 | 05 | 5,70 | 1,35 | 0,92 | 0,34 | 5,40 | 1,07 | 0,69 | 0,24 |
| 15 | 05 | 5,67 | 1,53 | 1,28 | 0,32 | 5,49 | 1,08 | 0,81 | 0,21 |
| 03 | 10 | 16,17 | 4,03 | 2,87 | 2,35 | 19,27 | 5,03 | 3,77 | 3,16 |
| 06 | 10 | 21,23 | 5,57 | 3,26 | 2,49 | 23,44 | 6,91 | 4,22 | 3,31 |
| 09 | 10 | 21,06 | 6,93 | 4,63 | 2,75 | 24,91 | 7,57 | 4,98 | 2,98 |
| 12 | 10 | 28,55 | 10,02 | 6,32 | 2,93 | 25,66 | 8,03 | 5,98 | 2,65 |
| 15 | 10 | 27,80 | 9,97 | 8,75 | 3,13 | 26,16 | 8,29 | 6,99 | 2,33 |
| 03 | 15 | 31,36 | 10,15 | 8,65 | 7,32 | 32,49 | 11,67 | 9,87 | 8,50 |
| 06 | 15 | 35,43 | 13,23 | 9,58 | 7,62 | 38,10 | 14,19 | 10,24 | 8,27 |
| 09 | 15 | 37,06 | 14,64 | 12,04 | 7,51 | 39,91 | 15,38 | 11,44 | 7,40 |
| 12 | 15 | 41,83 | 18,34 | 15,08 | 7,43 | 40,91 | 16,40 | 13,23 | 6,72 |
| 15 | 15 | 42,54 | 14,91 | 12,08 | 4,86 | 41,49 | 16,95 | 15,05 | 6,08 |
| 03 | 20 | 48,39 | 21,73 | 19,32 | 17,00 | 42,32 | 18,26 | 16,38 | 14,35 |
| 06 | 20 | 43,15 | 17,96 | 13,49 | 11,03 | 48,24 | 21,11 | 16,69 | 13,80 |
| 09 | 20 | 52,16 | 23,44 | 18,63 | 12,96 | 50,26 | 22,90 | 18,04 | 12,59 |
| 12 | 20 | 50,84 | 21,31 | 17,06 | 9,84 | 51,15 | 24,14 | 20,24 | 11,52 |
| 15 | 20 | 54,34 | 23,40 | 20,30 | 9,29 | 51,76 | 24,91 | 22,63 | 10,57 |
| 03 | 25 | 49,72 | 22,41 | 20,91 | 18,23 | 49,61 | 24,26 | 22,52 | 19,95 |
| 06 | 25 | 52,72 | 27,35 | 23,35 | 20,04 | 55,69 | 27,33 | 22,82 | 19,28 |
| 09 | 25 | 57,58 | 30,41 | 26,01 | 18,98 | 57,57 | 29,24 | 24,26 | 17,76 |
| 12 | 25 | 62,92 | 35,94 | 28,45 | 18,92 | 58,51 | 30,81 | 26,68 | 16,37 |
| 15 | 25 | 58,54 | 31,93 | 31,02 | 16,40 | 59,00 | 31,85 | 29,26 | 15,29 |
| | Mínimo | 4,86 | 0,45 | 0,22 | 0,30 | 3,71 | 0,29 | 0,14 | 0,21 |
| | Média | 34,47 | 14,78 | 12,21 | 8,11 | 34,44 | 14,79 | 12,32 | 8,17 |
| | Máximo | 62,92 | 35,94 | 31,02 | 20,04 | 59,00 | 31,85 | 29,26 | 19,95 |

A Tabela 3.13 apresenta os valores médios da proporção de casos para cada metodologia para pesos substitutos, quando são consideradas as proporções de casos em que as alternativas apresentam mudanças em mais de duas posições, inferiores e superiores. Para a indicação da metodologia mais adequada, é considerado o menor percentual médio dentro deste cenário. Por tal, a utilização do ROC apresenta vantagens sobre o RR, RS e EW, respectivamente.

As análises feitas com base no percentual de mudanças das posições nas ordenações podem ser resumidas pela média de cada ocorrência analisada. Graficamente, a Figura 3.5 permite visualizar os percentuais médios considerados para a aplicação de cada metodologia de peso substituto, considerando a mudança de uma, duas ou mais de duas posições no resultado das ordenações.

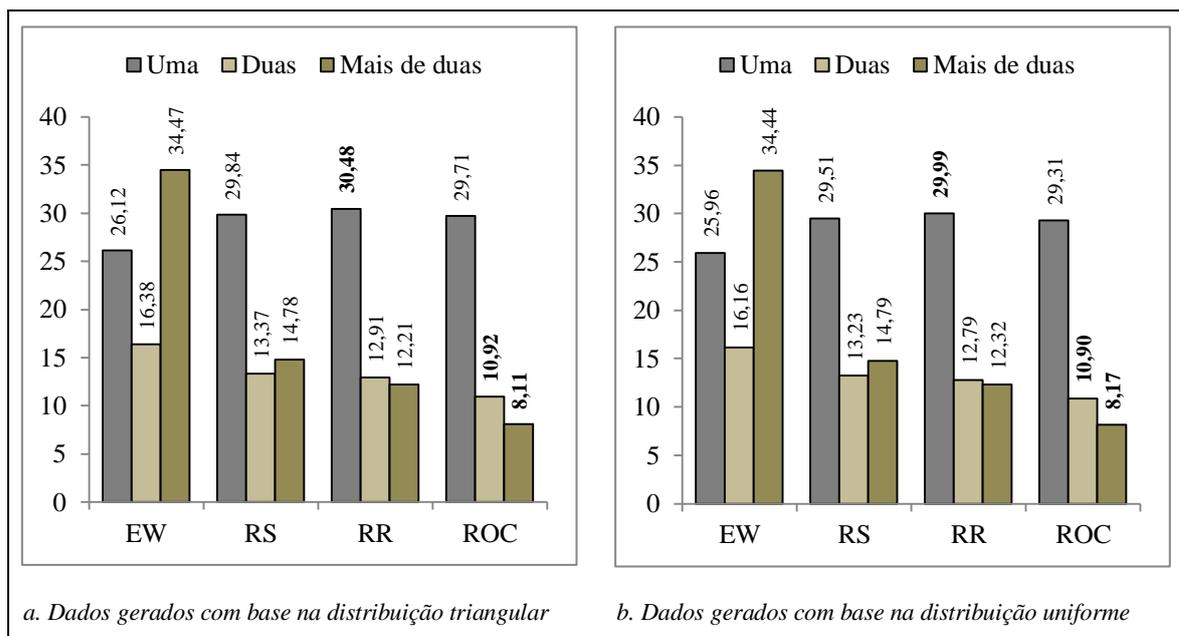


Figura 3.5 – Percentual sobre a alteração de posições para cada metodologia de peso substituto

A partir da Figura 3.5 é possível perceber que não há diferença significativa entre os resultados obtidos sobre os dados gerados pela distribuição triangular e pela uniforme. E, ainda, esta figura permite identificar a proporção do percentual observado quando as alterações de posições entre as alternativas.

Para o caso em que as mudanças podem ocorrer em apenas uma posição no ordenamento, a metodologia que apresenta melhor desempenho é a RR. Por outro lado, o ROC apresenta melhores indicadores quando analisados os contextos de alteração de duas ou mais posições na ordenação das alternativas. O percentual apontado para o ROC na avaliação da mudança de uma posição é muito próximo do melhor indicador e, em adição, seu percentual é relevante para as duas últimas observações. Com isso, pode-se assumir o ROC como a recomendação mais adequada, levando-se em consideração esta medida de avaliação.

A eficiência da metodologia de obtenção de pesos ROC foi comprovada em trabalhos com aplicação do método de agregação aditivo, como apresentado na Seção 2.2.1. A partir das medidas utilizadas pelo estudo, é possível indicar o ROC como a metodologia que apresenta desempenho satisfatório para a representação de pesos de critérios em problemas de decisão e na aplicação do método PROMETHEE II. A escolha do método foi motivada pela análise sobre a racionalidade não compensatória em métodos multicritério e pela oferta de uma pré-ordem completa que favorece o tratamento das problemáticas relacionadas à escolha de uma melhor alternativa e à ordenação das alternativas disponíveis.

3.5 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A realização do experimento permitiu obter resultados relevantes sobre o estudo do desempenho de metodologias para pesos substitutos com a aplicação do método PROMETHEE II. Os resultados do experimento são embasados por registros de análise comparativa e testes estatísticos que asseguram os fundamentos para a definição das medidas de desempenho utilizadas no processo de avaliação das metodologias selecionadas.

As medidas utilizadas para avaliar os resultados são eficientes e asseguram a consistência dos resultados obtidos. Em geral, os resultados não apresentam diferença significativa quando comparados os dados gerados a partir da simulação Monte Carlo com base na distribuição triangular e na distribuição uniforme. Com isso, a escolha entre essas distribuições de probabilidade para a simulação dos dados pode ser considerada indiferente.

A partir do experimento, foram analisadas as problemáticas relacionadas à seleção da melhor alternativa e à ordenação das alternativas, suportadas de forma eficiente pelo método PROMETHEE II. Para a seleção da melhor alternativa, as medidas utilizadas para verificar o desempenho das regras de pesos substitutos apresentaram relevância significativa para a descrição dos resultados. Para esta problemática, procurou-se estudar a proporção de casos em que a utilização de pesos substitutos oferece resultados semelhantes à utilização de pesos “verdadeiros”, ou de referência. Com isso, a proposta das medidas relativas à Taxa de Sucesso e a Média do Valor de Perda está relacionada a identificar a proporção de casos em que as metodologias apresentam desempenho mais próximo ao de referência.

Analisando-se a problemática de ordenação, foram estabelecidas medidas que avaliam a correlação dos resultados com base no coeficiente *Tau* de Kendall (SIEGEL, 1975). Este coeficiente permite descrever à quão adequada é uma ordenação em relação a uma referência e permite que um teste estatístico por níveis de significância seja aplicado para avaliar a adequação dos resultados. Em segunda instância, foi possível considerar o percentual de permanência e o percentual de alteração das posições cada alternativa.

Para as medidas utilizadas na avaliação da problemática de ordenação, o resultado dominante mostrou que o desempenho do ROC é mais adequado que o do RR, que é mais adequado que o RS, que é seguido pelo EW.

Os resultados do presente estudo apontaram que o EW não apresenta uma contribuição significativa na representação de pesos, em especial quando a ponderação dos critérios é importante para definir as preferências do decisor em um processo de decisão. Por outro lado, os resultados evidenciaram a eficiência do ROC sobre o RR, RS e EW para representar os

pesos dos critérios na seleção de uma melhor alternativa e na problemática de ordenação, com a aplicação do PROMETHEE II. Ainda, a contribuição do experimento permite assumir uma hierarquia sobre as metodologias para pesos substitutos, quando evidenciados os desempenhos destas na aplicação do método multicritério utilizado.

A metodologia para definição de pesos ROC é reconhecida na literatura como instruções para representação de pesos em problemas de decisão. O desempenho desta metodologia é satisfatório, pois seus argumentos são baseados na seleção de valores baseados no centroide do conjunto viável definido pela quantidade de pontos necessários para compor o problema de decisão. Para isto, o ROC utiliza a informação ordinal sobre os parâmetros para transformá-la na representação de números cardinais. Desta forma, a integração da metodologia de geração de pesos ROC com instruções de modelagem multicritério de problemas de decisão é oportuna e oferece benefícios para o tratamento de informações parciais referentes ao contexto.

Por esta perspectiva, o presente estudo apresenta a contribuição do desenvolvimento do método PROMETHEE-ROC, que integra as instruções do método multicritério assumindo as informações ordinais sobre os critérios para a aplicação dos pesos ROC. Este é um método novo que apresenta relevância para situações de decisão e que envolve múltiplos critérios e o decisor opta por assumir a racionalidade não compensatória no julgamento das alternativas, e possui apenas informação ordinal sobre os objetivos e critérios de avaliação.

A especificação da estrutura do PROMETHEE-ROC permite que o método seja aplicado de forma coerente e robusta em diversos contextos de decisão, pois contribui de forma estratégica para o tratamento de problemas complexos. Para a aplicação do método, foi selecionado o contexto que envolve o investimento de recursos para a geração de energia elétrica no Brasil. As características deste problema o classificam como um problema de decisão multicritério, pois envolve diversos aspectos contextuais e estratégicos para atingir a um objetivo de amplitude nacional relacionado ao desenvolvimento de diversas organizações. Além disso, a complexidade do problema permite que sejam utilizados métodos para apoiar o processo de decisão sobre a avaliação de tecnologias críticas para a geração de energia.

Para suportar as interações no método e aplica-lo ao contexto de decisão, foi desenvolvida uma ferramenta computacional que obedece aos requisitos funcionais e de usabilidade especificados para oferecer um recurso capaz de contribuir para a vantagem competitiva das organizações. A aplicação do PROMETHEE-ROC é feita em conjunto à apresentação da ferramenta e do tratamento do problema de decisão.

4 MÉTODO PROMETHEE-ROC E UMA APLICAÇÃO SOBRE A AVALIAÇÃO DE TECNOLOGIAS CRÍTICAS

Esta seção destina-se a descrever o método PROMETHEE-ROC e apresentar as especificações da ferramenta computacional desenvolvida para validar a aplicação do método. Como estudo prático, o método é aplicado para avaliar o conjunto de tecnologias críticas para geração de energia elétrica no contexto brasileiro. Nesta perspectiva, são apresentados o contexto e a aplicação do método, bem como a discussão sobre os resultados obtidos em relação à avaliação das tecnologias críticas selecionadas.

4.1 APRESENTAÇÃO DO MÉTODO PROMETHEE-ROC

A estrutura matemática do PROMETHEE II consiste na elaboração e análise das relações de sobreclassificação para obter o ordenamento das alternativas pelo valor de desempenho, utilizando parâmetros que representam as preferências do decisor para agregar as informações do problema de decisão. Dentre os parâmetros utilizados pelo método está o conjunto de pesos dos critérios, que representam a importância relativa de cada critério. Os pesos devem assumir valores precisos que contribuam para o contexto de decisão. No entanto, o decisor pode apresentar diversos fatores que o impeçam de definir esses valores. Diante desta situação, é evidenciada a oportunidade de utilizar métodos que facilitem o julgamento do decisor sobre os pesos dos critérios e permita que o problema seja conduzido por um método de apoio à decisão.

A interação das metodologias de pesos substitutos com o método PROMETHEE II é o alicerce para o PROMETHEE-ROC, que é formulado por uma racionalidade não compensatória para definir a ordem que representa a prioridade das alternativas, considerando o desempenho de cada uma delas, assumindo informação ordinal sobre os critérios de avaliação. No contexto de priorização de tecnologias críticas, este tipo de racionalidade permite uma consideração mais coerente sobre o impacto de cada alternativa no cenário de fornecimento de energia. No entanto, os desempenhos destas tecnologias devem ser avaliados a partir do impacto que cada critério exerce. Por esta contribuição, os pesos exercem influência significativa na modelagem deste problema.

A utilização de técnicas que representem o valor dos critérios em problemas de decisão é um recurso que minimiza o esforço do decisor no processo de elicitação e permite que

valores precisos sejam definidos para os pesos. A estrutura do PROMETHEE-ROC permite que problemas de decisão complexos sejam analisados com a compreensão de informações parciais sobre as preferências do decisor. Desta forma, a aplicação deste método é relevante para situações em que o decisor não apresenta segurança sobre os valores exatos dos parâmetros envolvidos no problema de decisão.

Em especial, para o problema de avaliação de tecnologias críticas para a geração de energia, as dificuldades encontradas pelo decisor podem ser associadas ao número de critérios envolvidos no problema e à exigência de conhecimentos especialistas sobre o assunto, uma vez que envolve aspectos estratégicos para o desenvolvimento nacional. Neste tipo de problema, o decisor pode assumir a racionalidade não compensatória para a avaliação das tecnologias e assumir informações parciais para definir suas preferências. Esta configuração permite a aplicação e a apresentação da estrutura lógica do método PROMETHEE-ROC sendo oportuna para o contexto de avaliação de tecnologias críticas para a geração de energia elétrica.

4.2 ESTRUTURA LÓGICA DO MÉTODO PROMETHEE-ROC

A estrutura lógica do método PROMETHEE-ROC consiste na interação da metodologia ROC no processo de representação das preferências do decisor sobre os pesos na estrutura do método PROMETHEE. Como ilustrada na Figura 4.1.

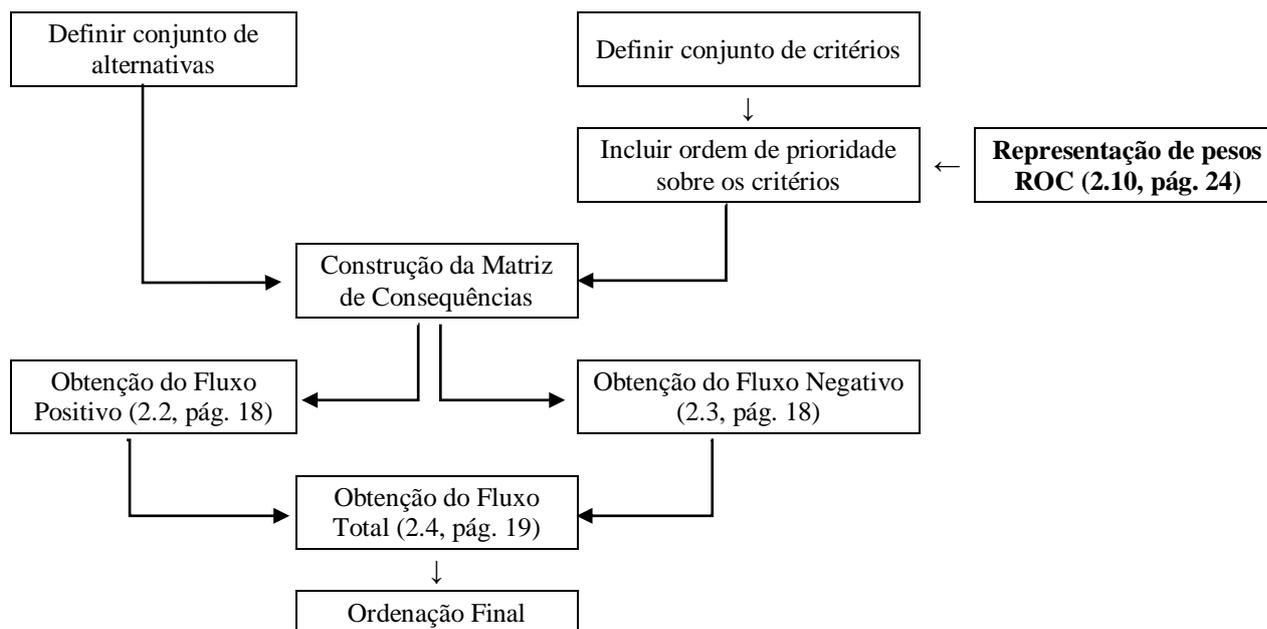


Figura 4.1 – Estrutura lógica do PROMETHEE-ROC

A Figura 4.1 ilustra as interações do método PROMETHEE II destacando a inserção da metodologia ROC no processo de inclusão dos atributos dos critérios. Com isso, para a estruturação do PROMETHEE-ROC, tem-se a definição do conjunto de alternativas de decisão e do conjunto de critérios de avaliação. Sobre os critérios, são incluídos seus atributos e a representação dos pesos pela metodologia ROC, apresentada na Equação (2.10, pág. 24). Esta é a etapa que destaca a contribuição do PROMETHEE-ROC, pois é solicitada apenas a informação sobre a ordem de prioridade dos critérios. Em seguida, a matriz de consequências é construída para a obtenção dos fluxos Positivo (Equação 2.2, pág. 18), Negativo (Equação 2.3, pág. 18) e Total (Equação 2.4, pág. 19). Por fim, é oferecida a ordenação das alternativas.

Para o melhor entendimento das interações realizadas pelo PROMETHEE-ROC é apresentado um problema de decisão para a obtenção de uma solução satisfatória para o contexto, permitindo uma análise de sensibilidade baseada em um teste de correlação para verificar a robustez dos resultados recomendados.

Para a estrutura do problema de decisão, são requisitados o conjunto de alternativas, o conjunto de objetivos e critérios de avaliação, e a informação ordinal que representa a importância dos critérios, em ordem decrescente e consecutiva. A modelagem de problemas com utilização do PROMETHEE-ROC é representada pela Figura 4.2.

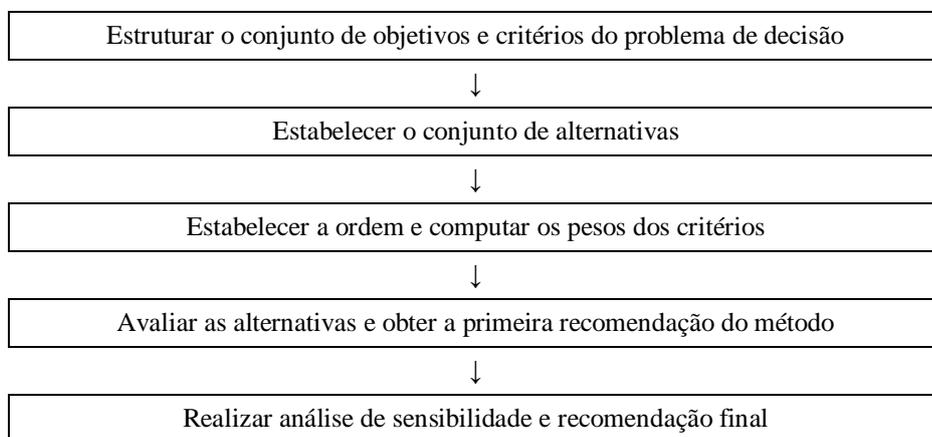


Figura 4.2 – Modelagem de problemas com utilização do PROMETHEE-ROC

Em primeira instância, o PROMETHEE-ROC recomenda a construção do conjunto de objetivos e critérios. Esta etapa destina-se a descrever o problema de decisão em que os parâmetros devem ser determinados com o objetivo de representar todos os interesses do processo de avaliação de forma concisa e não redundante. Em seguida, para a seleção das alternativas de decisão, o decisor deve considerar a viabilidade para construir a matriz de

consequências e definir o desempenho de cada alternativa sob a influência de cada critério. Esta etapa pode exigir várias revisões para a determinação final dos valores de avaliação.

Em seguida, é requisita a ordem decrescente e consecutiva dos critérios de avaliação. Nesta etapa o decisor deve informar a ordem de importância dos critérios considerando que a primeira alocação corresponde ao critério de maior importância. Todos os critérios devem ser ordenados e as posições devem ser apresentadas consecutivamente. Ainda, nesta etapa, a informação ordinal dos critérios será computada para a geração dos pesos ROC, proposta pelo método. Esta é a principal contribuição do modelo de decisão.

As etapas seguintes destinam-se a processar os dados através da estrutura matemática do método PROMETHEE II, apresentar o primeiro resultado e permitir que análises de sensibilidade sejam elaboradas para verificar a robustez do resultado proposto. Este requisito oferece flexibilidade para a determinação da solução mais adequada para o contexto de decisão.

Na etapa de análise de sensibilidade e teste de correlação, a estrutura do método assume os pressupostos da simulação Monte Carlo para gerar estruturas de dados aleatórias e análises comparativas do resultado recomendado. Para esta fase, a ferramenta computacional permite o emprego de variação sobre os pesos e/ou sobre os valores da matriz de consequência para simular os dados e verificar a correspondência das simulações. Em adição, a ferramenta oferece suporte para a realização do teste de correlação com base no coeficiente de correlação de Kendall (SIEGEL, 1975), que verifica a correlação existente entre os resultados simulados considerando níveis de significância. A análise de sensibilidade, ainda, permite verificar o percentual de alteração e as prováveis alocações das alternativas entre as posições nas ordenações obtidas.

O foco deste trabalho é a aplicação do método PROMETHEE-ROC sobre a extração de informação a partir da priorização de tecnologias críticas no contexto de geração e fornecimento de energia elétrica no território brasileiro. A avaliação de tecnologias críticas na área de energia permite a formulação de estratégias de gestão capazes de estimular o investimento em equipamentos e procedimentos que assegurem o fornecimento de energia, minimizando a interrupção do serviço.

4.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO PROMETHEE-ROC PARA AVALIAÇÃO DE TECNOLOGIAS CRÍTICAS

Para a aplicação do PROMETHEE-ROC foi selecionado o problema de decisão que consiste em avaliar o conjunto de tecnologias críticas disponíveis para o processo de geração de energia, utilizando objetivos relacionados ao desempenho operacional destas para no contexto estratégico e de desenvolvimento nacional. A aplicação do método segue a estrutura lógica ilustrada pela Figura 4.1 e é suportada por um Sistema de Apoio a Decisão (SAD) que será apresentado pelas seções seguintes.

4.3.1 Estruturar o conjunto de objetivos e critérios do problema de decisão

A etapa de estruturação do conjunto de objetivos e critérios do problema de decisão é um dos principais requisitos para o modelo de decisão, pois formaliza os aspectos que serão ponderados para avaliar o conjunto de alternativas. Para facilitar o processo desempenhado por esta etapa, foi utilizada a metodologia *Strategic Options Development Analysis* (SODA) (EDEN, 2004; ACKERMANN, 2012). SODA é um método que utiliza entrevistas e mapeamento cognitivo para indicar intenções e interesses individuais, com o objetivo de representar o posicionamento de um indivíduo em problemas que apresentam altos níveis de complexidade. Em geral, é um recurso que auxilia na definição de diretrizes com a identificação e descrição de parâmetros para problemas de decisão.

Dessa forma, foi possível mapear seis principais objetivos de interesse na avaliação das tecnologias críticas e definir o conjunto com dezenove critérios. As listas de objetivos e de critérios de avaliação são representadas pela Tabela 4.1, que também apresenta um código, uma direção de avaliação, restrita em maximização ou minimização do objetivo, e a escala ou unidade de medida para cada um dos critérios.

Os objetivos e critérios envolvidos no problema de priorização de tecnologias críticas exercem influência sobre aspectos ambientais, sociais, intelectuais, econômicos, industriais e estratégicos. Os dados são apresentados pela Tabela 4.1 e formalizam uma parte dos requisitos necessários para o processamento do problema na ferramenta computacional.

Os critérios são definidos considerando-se três tipos de escalas: Escala de Impacto (EI), a Escala de Tempo (ET) e a Escala de Condição de Limitação de Desenvolvimento Tecnológico (EC). As escalas utilizadas são apresentadas em níveis de influência, que variam do baixo ao alto grau de intervenção. Para a EI, assume-se a amplitude entre valores máximos

e mínimos para cada nível de impacto, com variação do mínimo ao mais alto impacto negativo observado. A EI compreende cinco pontos que abrangem situações de (i) impacto negativo ausente, (ii) baixo impacto negativo, (iii) impacto negativo moderado, (iv) alto impacto negativo e (v) impacto negativo muito alto. Os atributos que descrevem as características dos níveis de impacto assumem particularidades de cada critério de avaliação. Com isso, as especificações sobre as avaliações dos impactos são definidas a partir dos argumentos que formulam o perfil dos critérios de avaliação e suas influências em termos ambientais, sociais, intelectuais, econômicos, industriais e estratégicos.

A ET se refere ao intervalo temporal que as tecnologias críticas são produzidas e mantidas no mercado industrial. O interesse sobre esta consideração estimula os objetivos econômicos de investimento na produção e manutenção dos equipamentos e tecnologias. Com isso, são considerados os períodos de tempo para investimento em curto (até 5 anos), médio (até 15 anos) e longo (até 30 anos) prazos.

A EC contribui para a avaliação de objetivos estratégicos com intenção de envolver, ou não, o investimento de tecnologias críticas no desenvolvimento de outros processos produtivos. A partir desta escala é possível identificar, ou não, se a tecnologia energética faz parte de outro processo de desenvolvimento.

Estas escalas são associadas a cada tipo de critério indicado no problema de decisão, como representado na Tabela 4.1. Os objetivos e critérios, para o problema de decisão, foram identificados por um gestor especializado no assunto.

O processo de definição dos objetivos e critérios para a avaliação das tecnologias críticas é fundamental para a construção da modelagem do problema. A etapa seguinte consiste em estabelecer o conjunto de tecnologias críticas disponíveis para o contexto e na construção da matriz de avaliação, considerando o desempenho das tecnologias em relação aos critérios de avaliação.

Tabela 4.1 – Objetivos e Critérios de Avaliação

| Objetivos | Critérios | Código | Min /Max | Unid./ Escala |
|-----------------------|--|---------|----------|---------------|
| Obj 1 Ambiental | Impacto sobre a fertilidade do solo | Fert | Min | EI |
| | Impacto sobre a temperatura | Temp | Min | EI |
| | Impacto sobre o som | Soun | Min | EI |
| | Impacto sobre a água | Wat | Min | EI |
| | Impacto sobre o ar | Air | Min | EI |
| Obj 2 Social | Impacto sobre a geração de empregos local e nacional | Emp | Max | EI |
| | Impacto sobre o desenvolvimento local | Dev | Max | EI |
| | Impacto sobre a qualidade de emprego | QualEmp | Max | EI |
| Obj 3 Conhecimento | Impacto sobre a sinergia entre as fronteiras do conhecimento | Syn | Max | EI |
| | Impacto sobre a competência nacional (<i>know-how</i>) | Khow | Max | EI |
| Obj 4 Econômico | Período de tempo de interesse do mercado | Pmar | Max | ET |
| | Impacto sobre a demanda atual no mercado doméstico | DDMar | Max | EI |
| | Impacto sobre a demanda atual no mercado global | DGMar | Max | EI |
| | Impacto sobre o crescimento do mercado nacional | NaM | Max | EI |
| | Impacto sobre o crescimento do mercado global | GloM | Max | EI |
| Obj 5 Industrial | Impacto sobre a capacidade de produção | Cap | Max | EI |
| | Impacto da disponibilidade de entradas | Inp | Max | EI |
| Obj 6 Estratégico | Condição para limitar seu desenvolvimento | Curt | Min | EC |
| | Impacto sobre a matriz energética | Mtx | Max | EI |

4.3.2 Estabelecer o conjunto de tecnologias críticas

A indústria de geração de energia brasileira recebe investimentos para o desenvolvimento de diversas áreas e subáreas de produção. As oportunidades de desenvolver tecnologias que suportem a produção e geração de energia são evidenciadas por questões políticas e sociais, divulgadas em caráter público.

Dentre as tecnologias críticas disponíveis para a geração de energia elétrica no mercado brasileiro, para este estudo, o conjunto de alternativas consiste em quatorze tecnologias críticas alocadas em cinco grandes áreas tecnológicas, que são divididas em onze subáreas tecnológicas. Estas alternativas foram alocadas em áreas e subáreas assumindo o conhecimento do decisor especializado no assunto.

A Tabela 4.2 apresenta as áreas e subáreas selecionadas, o código e a lista de tecnologias críticas para o contexto analisado.

Tabela 4.2 – Conjunto de Tecnologias Críticas

| Área Tecnológica | Subárea Tecnológica | Tecnologia Crítica | Código |
|------------------|----------------------|--|--------|
| Química | Fisicoquímica | Baterias de íons de Lítio | BIL |
| | Química Orgânica | Reciclagem | Rec |
| | | Bioenergia | Bio |
| Ótica | Foto-automação | Fotossensores | FotS |
| | Foto-geração | Painéis fotovoltaicos | FotG |
| Telecomunicação | Controle e automação | Sistema de automação | Aut |
| | Comunicação | Sistemas de telecomunicação usando cabos de transmissão de energia | Com |
| | | Baterias de suporte para sinal de comunicação | Batt |
| Mecânica | Eólica | Potência eólica | Wind |
| | Hidroelétrica | Potência da água | Hydr |
| | | Unidade central de pequenas centrais hidrelétricas | SHC |
| | Solar | Energia solar | Solar |
| Elétrica | Bateria | Tecnologias de Baterias Avançadas | Acum |
| | Sistema | Equipamentos e Arranjos | EqAr |

O conjunto de tecnologias críticas foi definido por um especialista em consulta ao documento público que apresenta os equipamentos e procedimentos disponíveis para o território brasileiro.

O próximo passo consiste em estabelecer a ordem de prioridade dos objetivos e critérios para que o sistema compute os pesos representativos para cada um.

4.3.3 Estruturar a ordem e computar os pesos dos critérios

A principal contribuição do PROMETHEE-ROC é a aplicação do modelo de decisão com a representação de pesos assumindo a informação ordinal sobre o conjunto de critérios em um problema de decisão. Dessa forma, o SAD requer que a ordem dos critérios seja informada para que os pesos ROC sejam calculados para cada critério, com base na Equação (2.10, pág. 24). A Figura 4.3 representa a interface do SAD que exhibe os componentes que suportam esta etapa, tais como a matriz de avaliação e o vetor de dados sobre os critérios.

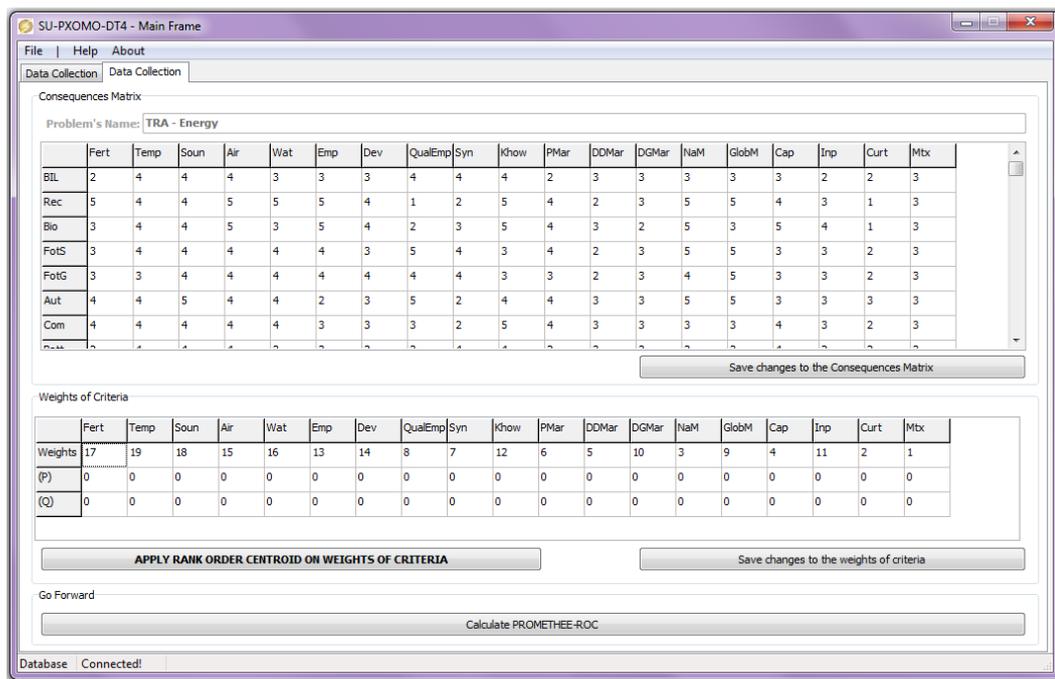


Figura 4.3 – Estruturas da Matriz de Consequência e dos Pesos dos Critérios

O processo de avaliação das tecnologias críticas como alternativas de decisão é baseada na performance que cada uma exerce em relação aos critérios selecionados, utilizando as escalas definidas para cada critério. Esta etapa é suportada pelo SAD que utiliza a estrutura de tabela para facilitar a revisão dos valores definidos pelo decisor, como pode ser visto pela Figura 4.3.

Ainda a partir da Figura 4.3, é possível visualizar os dados sobre os critérios de avaliação. Na estrutura do método multicritério utilizado neste trabalho, os critérios podem assumir diferentes tipos de funções para representar as preferências do decisor. A flexibilidade inserida no SAD permite que o decisor incorpore as informações sobre possíveis limiares de preferência e indiferença sobre os critérios. No entanto, para o contexto selecionado, é considerado que todos os critérios apresentam função de preferência usual, em que qualquer diferença entre o desempenho de alternativas representa uma preferência estrita. Assim os limiares de preferência e/ou indiferença são indicados por valores nulos, conforme os conceitos do método PROMETHEE (BRANS & VINCKE, 1985).

A definição dos pesos ROC assume a informação ordinal sobre os critérios para definir valores que representam a importância dos critérios para o problema em questão. Dessa forma, quanto maior o grau de prioridade dado a um critério, maior será o valor representado pelo peso ROC. Por esta perspectiva, os pesos são definidos de acordo com a posição dos

critérios no ordenamento estabelecido. Para o contexto de estudo, a ordem dos critérios e seus pesos ROC são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Ordem e Pesos ROC para os Critérios

| Rank | Critérios | Pesos ROC |
|------|-----------|-----------|
| 1 | Mtx | 0,1867 |
| 2 | Curt | 0,1341 |
| 3 | NaM | 0,1078 |
| 4 | Cap | 0,0902 |
| 5 | DDMar | 0,0771 |
| 6 | Pmar | 0,0665 |
| 7 | Syn | 0,0578 |
| 8 | QualEmp | 0,0503 |
| 9 | GloM | 0,0437 |
| 10 | DGMAR | 0,0378 |
| 11 | Inp | 0,0326 |
| 12 | Khow | 0,0278 |
| 13 | Emp | 0,0234 |
| 14 | Dev | 0,0193 |
| 15 | Air | 0,0156 |
| 16 | Wat | 0,0121 |
| 17 | Fert | 0,0088 |
| 18 | Soun | 0,0057 |
| 19 | Temp | 0,0028 |

Com base na matriz de consequências e nos dados referentes aos critérios, é possível avaliar as tecnologias críticas e obter a primeira recomendação proposta pela aplicação do PROMETHEE-ROC.

4.3.4 Avaliar as tecnologias críticas e obter a primeira recomendação do método

Para o contexto estudado, o conjunto de tecnologias críticas é tratado como o conjunto de alternativas de decisão, que serão avaliadas com base no PROMETHEE-ROC para indicar a solução mais adequada para o problema de avaliação destas alternativas. A estrutura matemática do método multicritério utilizado oferece a primeira recomendação de solução com base na teoria das relações de sobreclassificação, em que as alternativas assumem um

valor de fluxo que indicará a ordem de prioridade sobre elas, considerando-se o valor obtido como a avaliação de desempenho para cada alternativa de decisão.

Para esta etapa, o SAD oferece uma interface com recursos formatados por tabela e gráfico, capazes de facilitar a visualização dos resultados referentes à primeira recomendação obtida pelo PROMETHEE-ROC.

A Figura 4.4 ilustra a ordenação das tecnologias críticas, obtida em primeira instância.

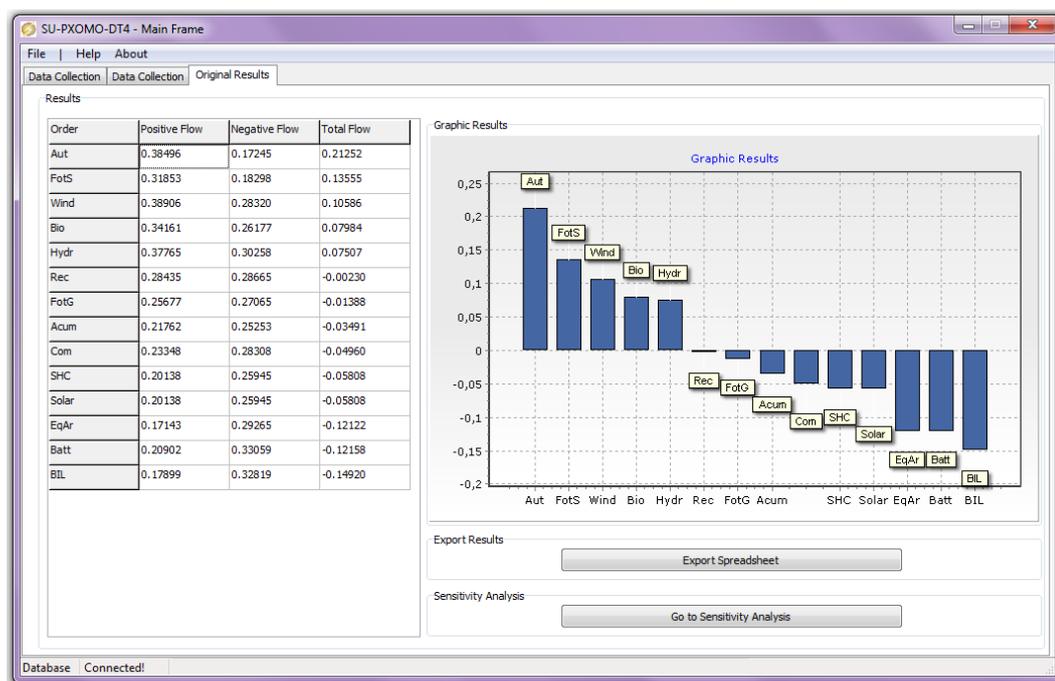


Figura 4.4 – Ordenação final das alternativas

O resultado da ordenação final é representado pela Tabela 4.4, em que é possível verificar o valor dos fluxos das alternativas, computados pelo método PROMETHEE-ROC.

De acordo com os resultados obtidos pela aplicação do método, a tecnologia crítica que deve ser priorizada é o Sistema de Automação (Aut), componente da área de Telecomunicação. Em seguida, são sugeridos os Fotosensores (FotS) e a Energia Eólica, componentes das áreas de Ótica e Mecânica, respectivamente.

Tabela 4.4 – Fluxos Positivo, Negativo e Total obtidos para as Tecnologias Críticas

| Ordem | Fluxo Positivo | Fluxo Negativo | Fluxo Total |
|-------|----------------|----------------|-------------|
| Aut | 0,38496 | 0,17245 | 0,21252 |
| FotS | 0,31853 | 0,18298 | 0,13555 |
| Wind | 0,38906 | 0,28320 | 0,10586 |
| Bio | 0,34161 | 0,26177 | 0,07507 |
| Hydr | 0,37765 | 0,30258 | 0,07507 |
| Rec | 0,28435 | 0,28665 | -0,00230 |
| FotG | 0,25677 | 0,27065 | -0,01388 |
| Acum | 0,21763 | 0,25253 | -0,03491 |
| Com | 0,23348 | 0,28308 | -0,04960 |
| SHC | 0,20138 | 0,25945 | -0,05808 |
| Solar | 0,20138 | 0,25945 | -0,05808 |
| EqAr | 0,17143 | 0,29265 | -0,12122 |
| Batt | 0,20902 | 0,33059 | -0,12158 |
| BIL | 0,17899 | 0,32819 | -0,14920 |

Um Sistema de Automação tem como principal característica a utilização de comandos programados para executar um processo operacional, utilizando recursos computadorizados com inserção mínima de erros. Este tipo de sistema apresenta técnicas eficientes capazes de serem aplicadas em diferentes sistemas de produção, pois apresentam alta velocidade de produção, custos reduzidos, menor emissão de resíduos, e melhores condições de segurança, considerando o bem-estar humano e o investimento de material e de especialistas.

Os Fotossensores são instrumentos utilizados na conversão de luz solar em eletricidade e são componentes de pesquisas inovadoras na área de produção de energia. Enquanto que, a Energia Eólica é uma alternativa para a geração de energia classificada como renovável, resultante da transformação da energia do vento em eletricidade. Este último tipo de energia é livre de emissão de gases de efeito estufa e pode ser produzida em qualquer região, apresentando impactos ambientais pouco problemáticos.

Em última colocação da ordenação obtida, estão as Baterias de íons de Lítio (BIL), componentes da área Química. Este tipo de componente armazena grande quantidade de energia e é utilizado em grande escala em equipamentos eletrônicos e diversos portáteis, pois satisfazem o consumo de pequenos usuários, mas não são resistentes a temperatura e oferta de energia em longo prazo.

A primeira recomendação obtida pela aplicação do método tem como base a avaliação considerada pelo decisor para o contexto de decisão. Os resultados são satisfatórios, considerando as avaliações feitas pelo decisor. A aplicação do método permite verificar a

contribuição dos pesos ROC na representação da importância dos critérios para um problema que apresenta um nível de complexidade alto. No entanto, surgem algumas críticas sobre a utilização dos pesos ROC na modelagem de problemas multicritério.

Uma das principais críticas sobre o ROC concentra na indicação que esta metodologia define um valor muito alto para o critério alocado em primeira posição, e a amplitude da diferença entre os valores dos outros critérios é menor. Com isso, as alternativas que apresentam melhores avaliações sob este critério tendem a ocupar as primeiras colocações no ordenamento final.

Por esta perspectiva, foi verificada a oportunidade de implementar a funcionalidade de análise de sensibilidade sobre os parâmetros do problema. Nesta etapa, é permitido ao decisor variar os pesos ou os valores da matriz de consequência, com a intenção de avaliar o quanto sensível é a recomendação sugerida pelo PROMETHEE-ROC. Com isso, o SAD proposto apresenta recursos de tabelas e gráficos sobre o resultado obtido, para que o decisor assuma as condições de flexibilidade sobre os dados e indique a recomendação final do processo de decisão.

4.3.5 Realizar análise de sensibilidade e recomendação final

Finalmente, a última etapa do modelo de decisão consiste em realizar uma análise de sensibilidade e definir a recomendação final para o problema de avaliação das alternativas. A análise de sensibilidade consiste em variar os valores de um dos elementos do problema de decisão, assumindo um intervalo de variação, e indicar o grau de sensibilidade dos resultados obtidos, ou seja, avaliar o quanto robusta é a recomendação fornecida pela aplicação do método.

Para isto, a estrutura do processo de análise de sensibilidade consiste em gerar casos de simulação baseados em dados aleatórios, e realizar um teste de correlação entre cada evento simulado e o resultado recomendado em primeira instância pelo SAD. Dessa forma, é utilizado o coeficiente de Kendall para verificar a correlação dos resultados simulados e um teste de hipóteses sobre níveis de significância.

A análise de sensibilidade utiliza os pressupostos da simulação Monte Carlo para gerar dados aleatórios com base em uma distribuição de probabilidade e um intervalo provável para a variação dos valores. Na especificação do SAD, a análise de sensibilidade pode ser construída considerando-se a variação dos valores dos pesos e/ou os valores de avaliação das alternativas por critérios, na matriz de consequências. Em adição, deve ser informada a

distribuição de probabilidade em que a simulação será executada, e o intervalo de variação desejado.

As distribuições de probabilidade disponíveis pelo SAD são implementadas para garantir a aleatoriedade dos dados para a geração de novos pesos e de novas matrizes de avaliação. Dessa forma, foram implementadas a distribuição uniforme e a distribuição triangular. O intervalo de variação é definido em termos percentuais, superior e inferior, em que os dados da simulação serão indicados, considerando-se o valor inicial como referência para a definição do limite de variação. Ainda, é possível indicar o número de eventos a serem simulados para realizar o teste de hipóteses e estimar o percentual de correspondência dos dados analisados.

A etapa de análise de sensibilidade fornecida pelo SAD permite que cada critério seja analisado individualmente, ou que um subconjunto de critérios seja analisado, ou que todos os critérios sejam avaliados simultaneamente, como ilustrado pela Figura 4.5.

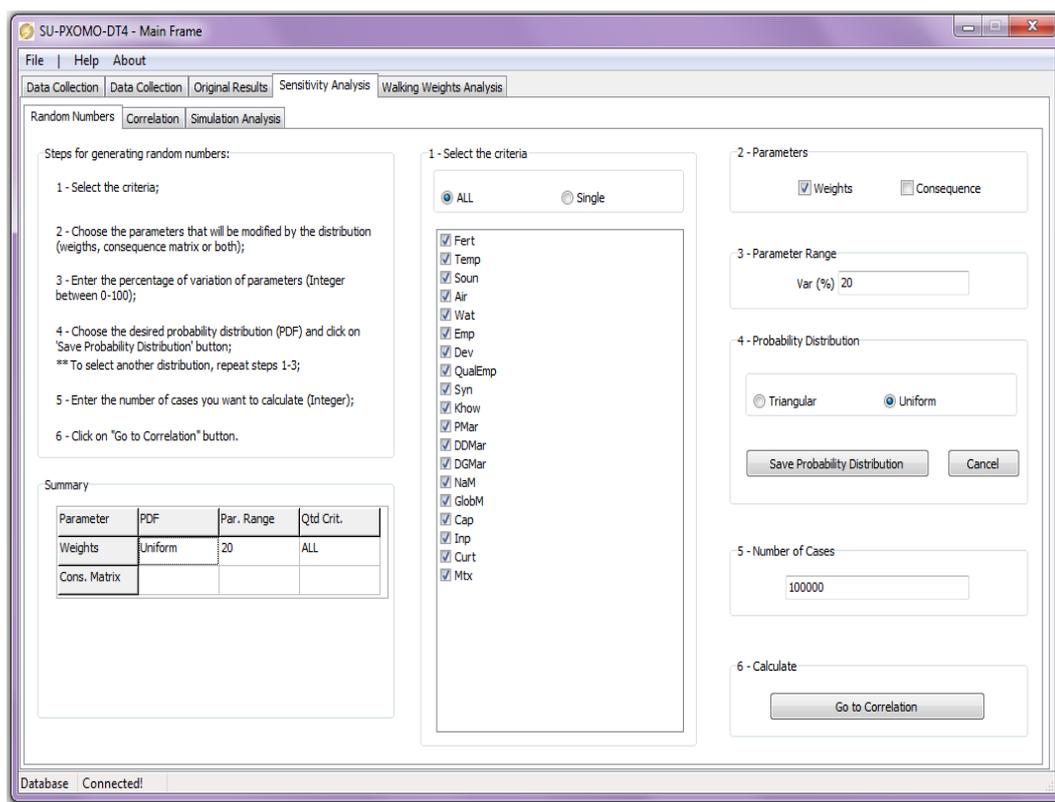


Figura 4.5 – Descrição para a análise de sensibilidade sobre os pesos dos critérios

Este nível de detalhes permite que o decisor observe as influências que cada parâmetro exerce sobre a avaliação das alternativas. Em primeira instância, para a realização da análise de sensibilidade, foram considerados 100.000 eventos de simulação, considerando a variação

de 20% sobre todos os pesos do conjunto de critérios. Assim, para cada elemento, considerou-se um intervalo de 20% superior e 20% inferior ao valor original, como limites para a geração de novos valores para o conjunto de pesos. Para a simulação dos pesos, assumiu-se a distribuição uniforme e o procedimento de geração de pesos aleatórios discutido na Seção (3.1.2), mantendo-se a ordem de prioridade entre eles.

Cada evento simulado é submetido ao teste de correlação baseado no coeficiente de Kendall, para avaliar o resultado da ordenação obtida. Este teste considera um nível de significância para avaliar a hipótese nula de que não há correlação entre os resultados original e simulado. Em conclusão, assume-se o percentual de casos considerados em correlação comprovada para o nível de significância. Por esta perspectiva, a simulação executada assumiu um nível de significância de 0,05 e os resultados apontam que há correlação entre os resultados obtidos para este nível de significância.

A etapa de análise de sensibilidade é suportada pelo SAD proposto, que oferece recursos adicionais para a visualização dos dados obtidos pela simulação na fase final. Para o teste de correlação é recomendada a verificação do percentual de permanência das alternativas nas posições originais do ordenamento, quando simuladas as estruturas de decisão. Por esta perspectiva, é possível computar o percentual de vezes em que as alternativas apresentaram a mesma posição original, quando simuladas, e a distribuição percentual verificada quando as alternativas se apresentam em outras posições. Em outras palavras, cada nova ordenação obtida, para o número de simulações, é comparada com a ordenação original, levando-se em consideração cada posição das alternativas e computando o percentual de casos em que as alternativas apresentaram a mesma posição original e o percentual em que as posições foram diferentes. Esta consideração é útil para verificar a robustez dos resultados recomendados.

A Figura 4.6 apresenta a interface gráfica do SAD que permite a visualização do percentual de mudanças ocorridas entre os resultados simulados pela análise. Na Figura 4.6 são destacados os resultados encontrados para a alternativa alocada em primeira posição. A partir dos resultados obtidos, observou-se que em 99,71% dos casos simulados a alternativa Aut manteve-se alocada em primeira posição e em apenas 0,29%, esta alternativa foi alocada em posições diferentes.

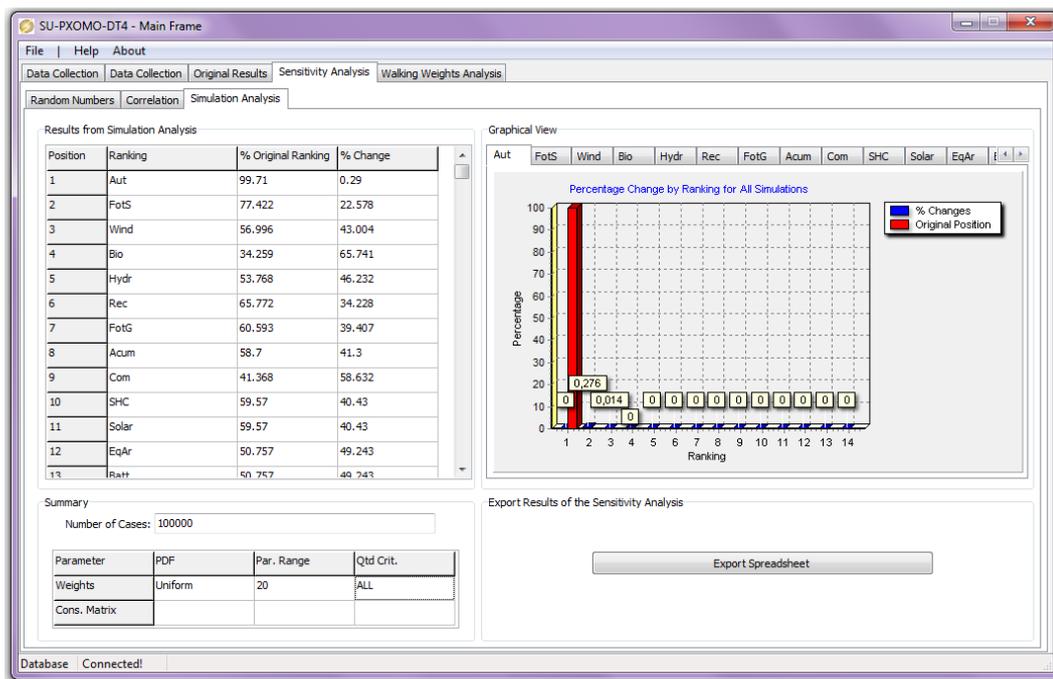


Figura 4.6 – Análise de Sensibilidade para a primeira posição

É interessante estudar o percentual de alocações diferentes entre as posições, dessa forma, representada pela Figura 4.6, é possível visualizar o percentual de mudança das ordenações para cada alternativa através de recursos gráficos. No gráfico apresentado pela Figura 4.6, a barra em vermelho representa a posição original da alternativa ordenada e as barras em azul, representam o percentual de mudança para cada posição diferente que a alternativa é alocada no processo de simulação. Desta forma, para a primeira posição, dos 0,29% em que apresentou mudança de posições, a alternativa Aut foi alocada na segunda posição em 0,276% dos casos e na terceira posição em 0,014% dos casos. Este tipo de análise pode ser feito para todas as alternativas. A Figura 4.7 apresenta a análise feita sobre a alternativa alocada na última posição.

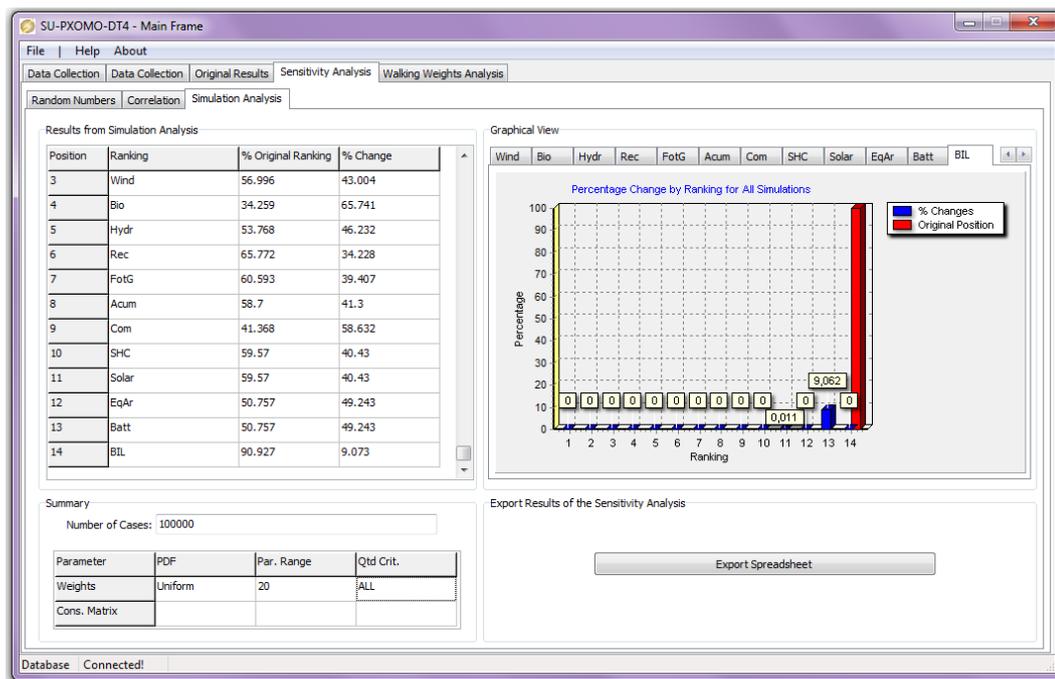


Figura 4.7 – Análise de Sensibilidade para a última posição

Da mesma forma, a barra vermelha, representada pelo gráfico na Figura 4.7, indica a posição original da alternativa na ordenação final. Enquanto que, as barras em azul representam os percentuais de mudança associados a cada posição diferente que a alternativa é alocada no processo de simulação.

Conforme os resultados simulados e apresentados pela Figura 4.7, em apenas 9,073% dos casos a alternativa alocada em última posição não se manteve nesta. A tecnologia identificada por BIL passou da 14ª posição para a 13ª em 9,062% dos casos e para a 11ª posição em 0,011% dos casos.

Em segunda instância, é possível realizar uma análise simples sobre os critérios de avaliação. O SAD apresenta um módulo interativo em que o decisor pode selecionar os critérios, um por vez, e variar seus valores, em termos percentuais, para verificar a influência desta alteração sobre a ordenação final de forma simultânea. Este tipo de análise é interessante para identificar os limites de valores que os critérios podem assumir para manter o resultado final da aplicação do método, ou os limites de alteração deste valor. A Figura 4.8 representa a interface deste módulo com destaque na variação do critério alocado em primeira posição, de acordo com as preferências do decisor.

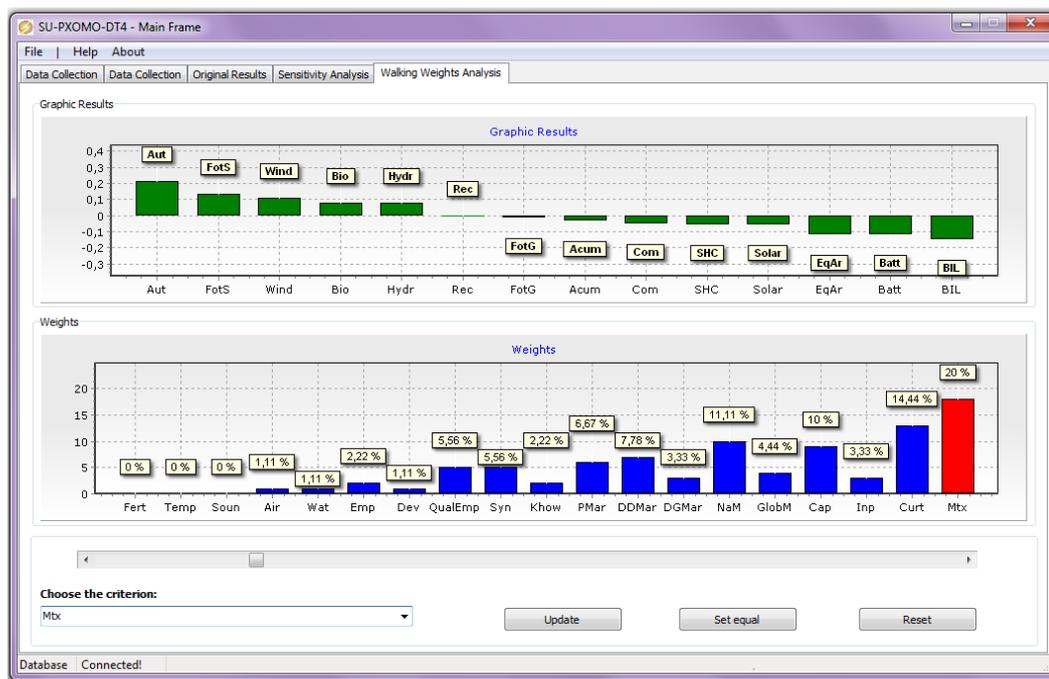


Figura 4.8 – Análise individual com destaque para o critério de maior peso

A interação deste tipo de análise consiste em selecionar um critério e variar seu percentual de importância, verificando que a penalidade desta variação é executada sobre a contribuição dos demais critérios. Em tempo de execução, o resultado das novas interações é ilustrado pelo gráfico de fluxos. Com isto, o decisor possui uma ferramenta que permite uma análise mais detalhada e oportuna.

Este módulo, ainda, permite que o decisor assuma valores iguais para todos os critérios. Esta funcionalidade pode ser útil no processo de análise quando o interesse é identificar as contribuições em que os critérios modificam significativamente os resultados obtidos. Por outro lado, as análises podem ter início do valor original dos pesos, determinado pelo decisor ou com base nas informações ordinais e pesos ROC.

Assumindo-se a crítica de que o peso ROC indica valores muito altos para o critério alocado em primeira posição, procurou-se analisar a sensibilidade dos resultados quando o pesos dos critérios alocados nas quatro primeiras são semelhantes, assim como as cinco últimas posições do ordenamento. O cenário simulado é apresentado pela Figura 4.9 e assegura os resultados obtidos para a primeira, segunda e última posição das alternativas ordenadas.



Figura 4.9 – Análise sobre os critérios de avaliação

Esta análise é útil para definir que a amplitude de valores definidos pelos pesos ROC não é o principal argumento para a ordenação das alternativas e que o desempenho delas nos diversos critérios influencia em sua alocação. Em adição, esta análise permite afirmar que os valores definidos pelos pesos ROC mantêm a aleatoriedade sobre a distribuição uniforme, em que os valores assumidos tem igual probabilidade de ocorrência. O que comprova a contribuição da metodologia para a representação de pesos em problemas de decisão multicritério.

A análise de sensibilidade permite detalhar e verificar possíveis diferenças e desconformidades entre os valores assumidos pelo método de apoio a decisão, quando consideradas as variações de valores para avaliar o grau de sensibilidade dos resultados. Assim, é possível obter referências para a recomendação que melhor se adapte às expectativas e preferências do decisor no processo de decisão. Para o caso analisado, o decisor apresentou confiança e evidenciou a coerência dos resultados apresentados para a solução sobre a priorização de tecnologias críticas na geração de energia no território brasileiro, o que favorece a divulgação e aplicação do PROMETHEE-ROC em diversos contextos organizacionais.

4.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE A APLICAÇÃO DO PROMETHEE-ROC

A integração da metodologia de geração de pesos ROC com as instruções do método multicritério PROMETHEE II oferece vantagens para a apresentação de uma metodologia que desenvolve essas abordagens para o tratamento de problemas de decisão multicritério. A metodologia apresentada é reconhecida por PROMETHEE-ROC, que compreende características para o tratamento de problemas complexos, com o envolvimento de vários critérios de avaliação, em que o decisor assume a racionalidade não compensatória sobre a avaliação das alternativas. A principal característica desta metodologia é a exigência de informações mínimas sobre as preferências do decisor quanto à definição da importância relativa dos critérios.

Em situações de decisão, o decisor pode não apresentar conforto em decidir sobre os valores exatos referentes à importância relativa dos critérios. Com isto, o método PROMETHEE-ROC oferece suporte para o tratamento de informações parciais sobre o peso dos critérios e oferece consideráveis vantagens para o tratamento de problemáticas do tipo de escolha de uma alternativa ou de ordenação das alternativas, permitindo uma fácil compreensão das interações entre os parâmetros que descrevem o problema de decisão. Para o tratamento de informações parciais, o PROMETHEE-ROC considera que a informação ordinal sobre os critérios é capaz de representar os interesses do decisor e, com isso, consegue transformar esta informação em valores cardinais para a inserção das preferências do decisor no modelo de decisão.

No entanto, o decisor pode, ainda, sentir-se inseguro em definir a ordem de prioridade sobre os critérios. Nesta situação, sugere-se que técnicas e procedimentos sejam utilizados para ajudar o decisor a obter a ordem de prioridade entre os critérios. Ainda, para a eficiência do PROMETHEE-ROC é preciso que os elementos sejam ordenados consecutivamente.

A aplicação do PROMETHEE-ROC foi especificada sobre o problema de avaliação de tecnologias críticas no contexto brasileiro e apresenta resultados satisfatórios. Para o caso estudado, foram selecionadas 14 tecnologias, representando componentes das áreas de Química, Ótica, Telecomunicação, Mecânica e Energia Elétrica. Cada tecnologia foi avaliada segundo 19 critérios distribuídos em grupos de objetivos ambientais, sociais, intelectuais, econômicos, industriais e estratégicos de influência para a geração de energia elétrica.

Para apoiar o método proposto, foi desenvolvido um SAD que oferece ferramentas e suporte computacional para a realização de interações na estrutura matemática do método, bem como instruções de validação dos resultados obtidos. O SAD oferece interfaces gráficas

amigáveis e instruções de fácil utilização, oferecendo componentes em formato de tabelas e gráficos para a visualização e leitura dos resultados obtidos.

Como requisitos funcionais do SAD, foram introduzidos módulos interativos que possibilitam análises de sensibilidade sobre os resultados obtidos. Estes módulos permitem que os resultados recomendados pelo PROMETHEE-ROC sejam revisados e variados conforme as preferências de análise do decisor, e proporcionam a flexibilidade de avaliar a viabilidade de resultados mais coerentes com os interesses assumidos pelo decisor em favor do contexto organizacional. Com isto, as perspectivas elaboradas pelos módulos de análise de sensibilidade podem ser consideradas no processo de aquisição de vantagens e argumentos estratégicos no processo de decisão.

A implementação das análises de sensibilidade foi especificada para avaliar a crítica de que os pesos ROC assumem valores muito altos para os critérios alocados em primeira posição, o que poderia conduzir a alocação das alternativas pelo melhor desempenho apresentado nestes critérios. No entanto, com testes realizados pela aplicação proposta, os resultados indicam que a amplitude dos valores obtidos pelos pesos ROC não é o principal argumento que define a alocação das alternativas, e sim, a avaliação de cada alternativa no conjunto de critérios de avaliação, uma vez que o PROMETHEE-ROC assume a racionalidade não compensatória para a avaliação das alternativas.

Com base em sua eficiência, o PROMETHEE-ROC pode ser aplicado em diversos contextos de decisão, agregando valor ao processo de tratamento de problemas que envolvem múltiplos critérios de avaliação e informação parcial sobre as preferências do decisor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

No contexto organizacional, as decisões são tomadas para garantir a diretriz e o fluxo de atividades produtivas, sendo, assim, as principais funções de um gestor ou decisor. Em geral, para obter a efetividade de uma decisão, o decisor precisa adquirir informações relevantes sobre o cenário de ação, o que possibilita o mapeamento dos diversos fatores e agentes influentes no contexto considerado.

Quando, em um processo de decisão, o decisor identifica a necessidade de avaliar uma situação com base em diferentes objetivos, e permite que estes representem seus interesses de avaliação e possam interagir entre si, é possível formular uma estrutura para problemas de decisão multicritério. Este contexto é constituído por um conjunto de objetivos e critérios, que avaliam um conjunto de alternativas, através de uma matriz de consequências, e as especificações de um método analítico, capaz de auxiliar na interação entre os parâmetros e oferecer recomendações satisfatórias para apoiar o processo de decisão.

Para o alcance da eficiência dos métodos de decisão multicritério, o decisor deve expressar suas preferências e informar valores exatos para os parâmetros do problema que definam seus interesses. Em geral, os valores devem ser definidos para os critérios de avaliação para compor o peso ou o grau de importância de cada critério para o problema, e o valor de avaliação das alternativas, considerando o desempenho delas em cada um dos critérios. No entanto, esta tarefa pode apresentar um nível de complexidade alto, sobretudo quando o número de parâmetros envolvidos no problema é significativamente alto.

Em geral, quando o número de parâmetros envolvidos no problema é elevado e o decisor apresenta argumentos que o impeçam de definir valores exatos para estes, o analista pode recorrer ao tratamento de informações parciais, definidas como representação aproximada das preferências do decisor. Esta situação é comumente observada no processo de definição dos pesos dos critérios. Os pesos definem o grau de importância de cada critério para o contexto de decisão e são fundamentais para a inserção das preferências do decisor, e aplicação do método multicritério.

O foco deste trabalho tem como motivação o tratamento de informações parciais sobre os pesos em problemas de decisão, que envolvem múltiplos critérios. Para este trabalho, as informações parciais sobre os pesos assumem uma escala ordinal, que define a priorização dos critérios para o contexto de decisão. Este tipo de informação não oferece maiores detalhes

sobre as preferências do decisor, mas permite representá-las com a aplicação de metodologias que transformam esta informação em valores cardinais, para serem aplicados aos métodos de apoio à decisão. Na literatura, existem várias metodologias para a representação de informações parciais que contribuem para a estrutura dos modelos multicritério de agregação aditiva. Esta contribuição estimula o desenvolvimento do presente trabalho.

O interesse deste trabalho foi estudar o desempenho de algumas das metodologias apresentadas na literatura com a utilização de um método de decisão multicritério de sobreclassificação. Para a escolha do método, foram considerados a exigência de interações entre os parâmetros e o formato de resposta que o método oferece, além de contribuir com a racionalidade não compensatória sobre a avaliação das alternativas. Por esta recomendação, o método PROMETHEE II foi escolhido, uma vez que as interações matemáticas efetuadas por ele são coerentes e o método oferece uma pré-ordem completa das alternativas, possibilitando a análise sobre a escolha de uma alternativa e sobre a ordenação de todo o conjunto.

Dentre as metodologias para o tratamento de informações parciais, são consideradas as aproximações definidas para pesos substitutos por EW (*Equal Weights*), RS (*Rank-Sum*), RR (*Reciprocal of the Rank*) e ROC (*Rank-Order Centroide*). A seleção destas metodologias foi suficiente para avaliar o desempenho de suas contribuições na aplicação do PROMETHEE II.

Com isso, o presente trabalho apresenta dois objetivos de interesse: (i) avaliar o desempenho das metodologias para pesos substitutos e indicar a de melhor adequação para o método PROMETHEE II; (ii) integrar as metodologias, apresentar uma nova contribuição para problemas de decisão multicritérios com informações parciais e aplicar esta nova abordagem em um contexto de decisão.

Para atender ao primeiro propósito, um experimento foi desenhado com o objetivo de elaborar simulações comparativas para avaliar o desempenho de cada regra de decisão na aplicação do método multicritério. Para isto, o experimento foi estruturado em etapas que garantiram a coerência do tratamento dos dados e ofereceram resultados satisfatórios para dois tipos de problemáticas: a seleção de uma alternativa e a ordenação das alternativas disponíveis. Este experimento foi suportado por uma ferramenta computacional desenvolvida para este fim.

Os resultados do presente estudo apontaram que o EW não apresenta uma contribuição significativa na representação de pesos, pois é uma metodologia que apresenta pouco impacto para a representação das preferências do decisor. No entanto, como resultado do experimento, obteve-se que, das metodologias selecionadas, o ROC apresentou melhores contribuições, quando considerado o volume de casos em que se buscou a adequação das metodologias. O

ROC é reconhecido no contexto de modelos de agregação aditiva e manteve coerência sobre o método de sobreclassificação. A contribuição desta metodologia é a utilização da informação ordinal sobre os critérios para transformá-la em valores cardinais que possam ser inseridos no método de decisão. Além disso, os valores indicados pelo ROC são baseados no centroide de um conjunto viável, limitado pela quantidade de pontos necessários, o que minimiza o possível viés de concentração dos valores. No entanto, é possível considerar uma hierarquia sobre as metodologias selecionadas, desta forma tem-se que $ROC > RR > RS > EW$.

Por esta contribuição, foi possível o desenvolvimento da integração dos métodos e apresenta uma nova abordagem: o PROMETHEE-ROC, que aplica as interações do método PROMETHEE II com o tratamento de representação obtida por pesos substitutos pelo ROC.

Esta nova abordagem é eficiente para problemas de decisão multicritério em que o decisor assume a racionalidade não compensatória para priorizar suas alternativas, e possui apenas a informação ordinal sobre os critérios de avaliação. A estrutura do PROMETHEE-ROC é modulada para atender a diferentes contextos de decisão e para a demonstração de sua contribuição, foi selecionado o problema de avaliação de tecnologias críticas para a geração de energia elétrica no território brasileiro.

Este problema envolve diferentes objetivos de interesse, tais como ambientais, sociais, intelectuais, econômicos, industriais e estratégicos, e tem um impacto significativamente alto para o desenvolvimento de diversas organizações no país. Ainda, este problema tem um enfoque estratégico, que integra diversos aspectos que contribuem para a sua complexidade.

A oportunidade da aplicação do PROMETHEE-ROC sobre o problema de avaliação das tecnologias críticas motivou o desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão. A estrutura deste sistema foi implementada com base nas especificações das metodologias selecionadas e é apresentado como uma ferramenta de apoio gerencial, uma vez que pode contribuir satisfatoriamente para o planejamento estratégico de organizações de diversos setores.

A contribuição dos procedimentos e as ferramentas desenvolvidas pelo presente trabalho evidenciam a elaboração de técnicas capazes de auxiliar e promover melhorias para o processo de decisão. Desta forma, a abordagem formulada pelo PROMETHEE-ROC pode agregar valor ao processo de aquisição de vantagem competitiva, considerando os requisitos do processo decisório e de desenvolvimento organizacional.

Contudo, considerando algumas limitações existentes no presente trabalho, é oportuna a apresentação de propostas para trabalhos futuros.

5.2 LIMITAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

O experimento sobre metodologias de representação de pesos é um recurso de ampla contribuição para o contexto de decisão, uma vez que permite explorar procedimentos e técnicas capazes de minimizar os esforços do processo de elicitação das preferências do decisor, requisito essencial para a eficiência dos métodos de apoio a decisão. E os recursos computacionais permitem a elaboração de diversas interações sobre o contexto em análise.

O presente trabalho limitou-se a estudar quatro metodologias de representação de pesos com base na informação ordinal sobre os critérios. Para trabalhos futuros, sugere-se o desenvolvimento de experimentos capazes de comparar o desempenho de outras metodologias.

A utilização das distribuições de probabilidade triangular e da uniforme para a geração de valores aleatórios para as matrizes de consequência pode ser considerada uma limitação do presente trabalho. Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se a verificação do desempenho do experimento com a utilização de outras distribuições de probabilidade para a geração das matrizes.

O estudo se propôs a estudar o método PROMETHEE. Com base nos resultados obtidos, sugere-se a elaboração de experimentos sobre outros métodos multicritério, assumindo-se as diferentes racionalidades disponíveis na literatura.

Para a aplicação do método proposto foi selecionado o contexto de avaliação de tecnologias críticas para a geração de energia elétrica. Os resultados foram satisfatórios e permitem sugerir a aplicação do método em outros contextos de decisão, que apresentam elevados graus de complexidade, vários fatores influentes, e permita a aplicação de métodos de apoio à decisão multicritério, tais como a modelagem de problemas de decisão em grupo com metodologias de suporte ao tratamento de informações parciais.

REFERÊNCIAS

- ACKERMANN, F. Problem structuring methods ‘in the Dock’: Arguing the case for Soft OR. *European Journal of Operational Research*, 219, 652-658, 2012.
- AFGAN, N.H.; CARVALHO, M.G. Multi-criteria assessment of new and renewable energy power plants. *Energy*, 27(8), 739-755, 2002.
- AGUAYO, E.A.; MATEOS, A.; JIMENEZ, A. A new dominance intensity method to deal with ordinal information about a DM’s preferences within MAVT. *Knowledge-based Systems*, 69, 159-169, 2014.
- AHN, B.S. Extending Malakooti’s model for ranking multicriteria alternatives with preference strength and partial information. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part A – Systems and Humans*, 33(3), 281-287, 2003.
- AHN, B.S. Compatible weighting method with rank order centroid: Maximum entropy ordered weighted averaging approach. *European Journal of Operational Research*, 212, 552-559, 2011.
- AHN, B.S.; PARK, K.S. Comparing methods for multiattribute decision making with ordinal weights. *Computers and Operations Research*, 35, 1660-1670, 2008.
- ALENCAR, M.H.; ALMEIDA, A.T. Assigning priorities to actions in a pipeline transporting hydrogen based on a multicriteria decision model. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 3610-3619, 2010.
- ALMEIDA, A.T.; VETSCHERA, R. A note on scale transformations in the PROMETHEE V method. *European Journal of Operational Research*, 219, 198-200, 2012.
- ALMEIDA, A.T. *Processo de Decisão nas Organizações: Construindo Modelos de Decisão Multicritério*, 1a Edição. São Paulo: Editora Atlas, 2013.
- ALMEIDA, J.A.; ALMEIDA, A.T.; COSTA, A.P.C.S. Portfolio Selection of Information Systems Projects Using PROMETHEE V with C-Optimal Concept. *Pesquisa Operacional*, 34, 1-25, 2014.
- ALMEIDA, A.T.; MORAIS, D.C.; ALENCAR, L.H.; CLEMENTE, T.R.N.; KRYM, E.M.; BARBOZA, C.Z. A Multicriteria Decision Model for Technology Readiness Assessment for Energy Based on PROMETHEE method with surrogate weights. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ENGINEERING AND ENGINEERING MANAGEMENT, Selangor - Malaysia, 2014, *Proceedings of IEEM 2014*.
- ALMEIDA-FILHO, A.T.; SOUZA, F.M.C.; ALMEIDA, A.T. A multicriteria decision model for aggregate planning based on the manufacturing. *Brazilian Journal of Operations and Production Management*, 4, 23-37, 2007.
- ALMEIDA-FILHO, A.T.; COSTA, A.P.C.S. Um modelo de otimização para priorização em planejamento de Sistemas de Informação. *Produção*, 20, 265-273, 2010.
- AZIZIAN, N.; SARKANI, S.; MAZZUCHI, T. A Comprehensive Review and Analysis of Maturity Assessment Approaches for Improved Decision Support to Achieve Efficient Defense Acquisition. In: WCECS 2009 – WORLD CONGRESS ON ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCE, 2009, 1150-1157.

- BANA e COSTA, C.A.; VINCKE, P.H. Measuring credibility of compensatory preference statements when trade-offs are interval determined. *Theory and Decision*, 39, 127-155, 1995.
- BARRON, F.H. Selecting a best multiattribute alternative with partial information about attribute weights. *Acta Psychologica*, 80, 91-103, 1992.
- BARRON, F.H.; BARRETT, B.E. Decision Quality Using Ranked Attribute Weights. *Management Science*, 42, 1515-1523, 1996.
- BECCALI, M.; CELLURA, M.; ARDENTE, D. Decision making in energy planning: The ELECTRE multicriteria analysis approach compared to a fuzzy-sets methodology. *Energy Conversion and Management*, 39, 1869-1881, 1998.
- BECCALI, M.; CELLURA, M.; MISTRETTA, M. Decision-making in energy planning. Application of the ELECTRE method at regional level for the diffusion of renewable energy technology. *Renewable Energy*, 28(13), 2063-2087, 2003.
- BEHZADIAN, M.; KAZEMZADEH, R.B.; ALBADVI, A.; AGHDASI, M. PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research*, 200(1), 198-215, 2010.
- BELTON, V.; STEWART T.J. *Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer, 2002.
- BIMBER, B.; POPPER, S.W. *What is a Critical Technology?* Santa Monica, CA: RAND Corporation, 1994.
- BRANS, J.P.; VINCKE, P. A preference ranking organization method. *Management Science*, 31, 647-656, 1985.
- BRANS, J.P.; MARESCHAL, B. *PROMÉTHÉE – GAIA: une méthodologie d'aide à la décision en présence de critères multiples*. Bruxelles: Éditions de L'Université de Bruxelles, 2002.
- BUTLER, J; JIA, J. DYER, J. Simulation techniques for the sensitivity analysis of multicriteria decision models. *European Journal of Operational Research*, 103, 531-546, 1997.
- CARRIZOSA, E.; CONDE, E.; FERNANDEZ, F.R.; PUERTO, J. Multicriteria Analysis with Partial Information about the Weighting Coefficients. *European Journal of Operational Research*, 81(2), 291-301, 1995.
- CASELLA, G.; BERGER, R.L. *Inferência Estatística*. 2ª edição. São Paulo: Cengage Learning, 2010.
- CAVALCANTE, C.A.V.; FERREIRA, R.J.P.; ALMEIDA, A.T. A preventive maintenance decision model based on multicriteria method PROMETHEE II integrated with Bayesian approach. *IMA Journal of Management Mathematics*, 20, 1-16, 2010.
- CHEN, Y.; KILGOUR, M.; HIPEL, K. Using a benchmark in case-based multiple-criteria ranking. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 39, 358- 368, 2009.
- CHEN, W.G.; LIU, W.Y.; GAO, Y.; HAN, F. Approach and Application of Technology Readiness Assessment based-on Multilevel Reference Condition. In: ICMSE 2013 - INTERNATIONAL CONFERENCE ON MANAGEMENT SCIENCE AND ENGINEERING, 2013, 1993-1998.

- CHOI, S.C. A Study on the Selection of Critical Technology Elements (CTEs) Using Integration Relations between Technologies or Components. *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, 13(1), 50-56, 2010.
- CHOO, E.U.; SCHONER, B.; WEDLEY, W.C. Interpretation of criteria weights in multicriteria decision making. *Computers & Industrial Engineering*, 37, 527-541, 1999.
- CHU, S.; MAJUMDAR, A. Opportunities and challenges for a sustainable energy future. *Nature*. 488, 294-303, 2012.
- CONTRERAS, I.; HINOJOSA, M.A.; MARMOL, A.M. Ranking alternatives in collective decision making with imprecise information. In: IEEE INTERNATIONAL ENGINEERING MANAGEMENT CONFERENCE. Estoril - Portugal, 2008, 57-61.
- CORMIO, C.; DICORATO, M.; MINOIA, A.; TROVATO, M. A regional energy planning methodology including renewable energy sources and environmental constraints. *Renewable and Sustainable Energy*, 99-103, 2003.
- DAHER, S.F.D.; ALMEIDA, A.T. The use of ranking veto concept to mitigate the compensatory effects of additive aggregation in group decisions on a water utility automation investment. *Group Decision and Negotiation*, 21, 185-204, 2012.
- DAMART, S.; DIAS, L.C.; MOUSSEAU, V. Supporting groups in sorting decisions: Methodology and use of a multi-criteria aggregation/disaggregation DSS. *Decision Support Systems*, 43(4), 1464-1475, 2007.
- DANIELSON, M.; EKENBERG, L.; He, Y. Augmenting Ordinal Methods of Attribute Weight Approximation. *Decision Analysis*, 11(1), 21-26, 2014.
- DANTZIG, G.B. *Linear Programming and Extensions*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1963.
- DAWES, R.M.; CORRIGAN, B. Linear Models in Decision Making. *Psychological Bulletin*, 81, 91-106, 1974.
- DEMING, S.N. The Role of Optimization Strategies in the Development of Analytical Chemical Methods. *American Laboratory*, 13(6), 42, 1981.
- Department of Defense - DoD - United States of America - USA – Technology Readiness Assessment (TRA) Deskbook - July 2009 - by Director, Research Directorate (DRD).
- DEVROYE, L. *Non-Uniform Random Variate Generation*. Springer-Verlag: New York, 1986.
- DIAS, L.C.; CLIMACO, J.N. Additive aggregation with variable interdependent parameters: the VIP analysis software. *J. Operational Research Society*, 51(9), 1070-1082, 2000.
- DIAS, L.C.; CLIMACO, J.N. Shortest path problems with partial information: Models and algorithms for detecting dominance. *European J. Oper. Research*, 121(1), 16-31, 2000.
- EDEN, C. Analyzing cognitive maps to help structure issues or problems. *European Journal of Operational Research*, 159, 673–686, 2004.
- EDWARDS, W. How to use multivariate utility measurement for social decision making. *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics*, 7, 326-340, 1977.
- EDWARDS, W.; BARRON, F.H. SMARTS and SMARTER: Improved simple methods for multiattribute utility measurement. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 60, 306-325, 1994.

- Empresa de Pesquisa Energética – EPE. Disponível em <<http://www.epe.gov.br/>> Acesso: 02/03/2015.
- FERNANDEZ, F.R.; MARMOL, A.; PUERTO, J. Improving weighting information in interactive decision procedures. A visual guide. In: 14TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON MULTIPLE CRITERIA DECISION MAKING (MCDM), Charlottesville, Virginia. 1994, *Lect. Notes in Econ. and Math. Systems*, 487, 260-271.
- FIGUEIRA, J.; DE SMET, Y.; BRANS, J.P. *MCDM methods for sorting and clustering problems: PROMETHEE TRI and PROMETHEE CLUSTER*. Université Libre de Bruxelles, Service de Mathématiques de la Gestion, 2004.
- FISHBURN, P.C. Noncompensatory preferences. *Synthese*, 33, 393-403, 1976.
- FONTANA, M.E; MORAIS, D.C. Using PROMETHEE V to Select Alternatives so as to Rehabilitate Water Supply Network with Detected Leaks. *Water Resources Management*, 27, 4021-4037, 2013.
- FRENCH, S. Uncertainty and imprecision: modeling and analysis. *Journal of the Operational Research Society*, 46, 70-79, 1995.
- FRENCH, S.; RIOS, D.I. Partial information and sensitivity analysis in multi-objective decision making. In: Lockett A.G e Islei, G. (eds), 424-433, 1989.
- GANDIBLEUX, X. Interactive multicriteria procedure exploiting a knowledge-based module to select electricity production alternatives: The CASTART system. *European Journal of Operational Research*, 113(2), 355-373, 1999.
- GARCEZ, T.V.; ALMEIDA, A.T. Multidimensional Risk Assessment of Manhole Events as a Decision Tool for Ranking the Vaults of an Underground Electricity Distribution System. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 29, 624-632, 2014.
- GEORGOPOULOU, E.; LALAS, D.; PAPAGIANNAKIS, L. A multicriteria decision aid approach for energy planning problems: The case of renewable energy option. *European Journal of Operational Research*, 103(1), 38-54, 1997.
- GOLABI, K.; KIRKWOOD, C.W.; SICHERMAN, A. Selecting a portfolio of solar energy projects using multiattribute preference theory. *Management Science*, 22(2), 174-189, 1981.
- GOMES, L.F.A.M.; GOMES, C.F.S.; ALMEIDA, A.T. *Tomada de Decisão Gerencial: Enfoque Multicritério*. Editora Atlas: 2002.
- GOUMAS, M.; LYGEROU, V. An extension of the PROMETHEE method for decision making in fuzzy environment: Ranking of alternative energy exploitation projects. *European Journal of Operational Research*, 123(3), 606-613, 2000.
- GUSMÃO, A.P.H.; COSTA, A.P.C.S. A model for evaluating efficiency - an application in information technology and systems investments. *Pesquisa Operacional*, 32, 597-616, 2012.
- HALOUANI, N.; CHABCHOUB, H.; MARTEL, J.M. PROMETHEE-MD-2T method for project selection. *European Journal of Operational Research*, 195(3), 841-895, 2009.
- HARALAMBOPOULOS, D.A.; POLATIDIS, H. Renewable energy projects: structuring a multi-criteria group decision making framework. *Renewable Energy*, 28(6), 961-973, 2003.
- JIMENEZ, A.; RIOS-INSUA, S.; MATEOS, A. A Decision Support System for Multiattribute Utility Evaluation based on Imprecise Assignments. *Decision Support Systems*, 36, 65-79, 2003.

- KAO, C. Weight determination for consistently ranking alternatives in multiple criteria decision analysis. *Applied Mathematical Modelling*, 34, 1779-1787, 2010.
- KAHRAMAN, C.; KAYA, I. A fuzzy multicriteria methodology for selection among energy alternatives. *Expert Systems with Applications*, 37(9), 6270-6281, 2010.
- KAHRAMAN, C.; KAYA, I.; CEBI, S. A comparative analysis for multiattribute selection among renewable energy alternatives using fuzzy axiomatic design and fuzzy analytic hierarchy process. *Energy*, 34(10), 1603-1616, 2009.
- KAVRAKOGLU, I. Multi-objective strategies in power system planning. *European Journal of Operations Research*, 12, 159-170, 1983.
- KAYA, T.; KAHRAMAN, C. Multicriteria decision making in energy planning using a modified fuzzy TOPSIS methodology. *Expert Systems with Applications*, 38(6), 6577-6585, 2011.
- KEENEY, R.L. *Value-focused thinking: A path to creative decision making*. Harvard University Press: Cambridge, 1992.
- KEENEY, R.L. Common mistakes in making value trade-offs. *Operations Research*, 50(6), 935-945, 2002.
- KEENEY, R.L.; RAIFFA, H. *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs*. New York: Wiley, 1976.
- LAHDELMA, R.; SALMINEN, P. SMAA-2: Stochastic multicriteria acceptability analysis for group decision making. *Operations Research*, 49(3), 444-454, 2001.
- LAHDELMA, R.; MIETTINEN, K.; SALMINEN, P. Ordinal criteria in stochastic multicriteria acceptability analysis (SMAA). *European Journal of Operational Research*, 147(1), 117-127, 2003.
- LARICHEV, O.I. Ranking multicriteria alternatives: The method ZAPROS III. *European Journal of Operational Research*, 131(3), 550-558, 2001.
- LEE, K.S.; PARK, K.S.; KIM, S.H. Dominance, potential optimality, imprecise information, and hierarchical structure in multi-criteria analysis. *Computers & Operations Research*, 29(9), 1267-1281, 2002.
- LOKEN, E. Use of multicriteria decision analysis methods for energy planning problems. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 11(7), 1584-1595, 2007.
- LOPES, Y.G.; ALMEIDA, A.T. A multicriteria decision model for selecting a portfolio of oil and gas exploration projects. *Pesquisa Operacional*, 33, 417-441, 2013.
- LOPES, Y.G.; ALMEIDA, A.T. Assessment of synergies for selecting a project portfolio in the petroleum industry based on a multi-attribute utility function. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 126, 131-140, 2015.
- MACHARIS, C.; BRANS, J.P.; MARESCHAL, B. The GDSS PROMETHEE procedure – A PROMETHEE-GAIA based procedure for group decision support. *Journal of Decision Systems*, 7, 283-307, 1998.
- MACHARIS, C.; SPRINGAEL, J.; BRUCKER, K.; VERBEK, A. (2004) PROMETHEE and AHP: The design of operational synergies in multicriteria analysis. Strengthening PROMETHEE with ideas of AHP. *European Journal of Operational Research*, 153, 307-317.

- MAHER, A-T.F; MARESCHAL, B. Water resources planning in the Middle East: Application of the PROMETHEE V multicriteria method. *European Journal of Operational Research*, 81, 500-511, 1995.
- MANKINS, J.C. Technology readiness assessment: a retrospective. *Acta Astronautica*, 65, 1216-1223, 2009.
- MARCH, J.G. *A Primer on Decision Making: How Decisions Happen*, The Free Press, New York, NY, USA, 1994.
- MARMOL, A.M.; PUERTO, J.; FERNANDEZ, F.R. Sequential incorporation of imprecise information in multiple criteria decision processes. *European Journal of Operational Research*, 137(1), 123-133, 2002.
- MATEOS, A.; JIMENEZ, A.; RIOS-INSUA, S. Solving dominance and potential optimality in imprecise multi-attribute additive problems. *Reliability Engineering & System Safety*, 79(2), 253-262, 2003.
- MATEOS, A.; RIOS-INSUA, S.; JIMENEZ, A. Dominance, potential optimality and alternative ranking in imprecise multi-attribute decision making. *Journal of the Operational Research Society*, 58(3), 326-336, 2007.
- MELO, F.C.L.; GOMES, J.R.; GREGORI, M.L.; SALGADO, M.C.V. A Tecnologia Crítica na Área Espacial Brasileira. *Revista Espaço Brasileiro*, 2003.
- MIRANDA, C.M.G.; ALMEIDA, A.T.; ALENCAR, L.H. A Multiple Criteria Decision Model for Assigning Priorities to Activities in Project Management. *International Journal of Project Management*, 27, 175-181, 2009.
- MORAIS, D.C; ALMEIDA, A.T. Group decision-making for leakage management strategy of water network. *Resources, Conservation and Recycling*, 52, 441-459, 2007.
- MORAIS, D.C.; ALMEIDA, A.T.; FIGUEIRA, J. R. A Sorting Model for Group Decision Making: A Case Study of Water Losses in Brazil. *Group Decision and Negotiation*, 23, 937-960, 2014.
- MORAIS, D.C.; ALMEIDA, A.T; ALENCAR, L.H.; CLEMENTE, T.R.N.; CAVALCANTI, C.Z.B. PROMETHEE-ROC Model for Assessing the Readiness of Technology for Generating Energy. *Mathematical Problems in Engineering (Print)*, 1-11, 2015.
- MOSHKOVICH, H.M.; MECHITOV, A.I.; OLSON, D.L. Ordinal judgments in multiattribute decision analysis *European J. Operational Research*, 137, 625-641, 2002.
- MURTY, K.G. *Linear programming*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1983.
- MUSTAJOKI, J.; HAMALAINEN, R.P.; SALO, A. Decision support by interval SMART/SWING-incorporating imprecision in the SMART and SWING methods. *Decision Sciences*, 32(2), 317-339, 2005.
- OZEROL, G.; KARASAKAL, E. A parallel between regret theory and outranking methods for multicriteria decision making under imprecise information. *Theory and Decision*, 65(1), 45-70, 2008.
- PARK, K.S. Mathematical programming models for characterizing dominance and potential optimality when multicriteria alternative values and weights are simultaneously incomplete. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part A-Systems and Humans*, 34(5), 601-614, 2004.

- PARK, K.S.; KIM, S.H. Tools for interactive multiattribute decision making with incompletely identified information. *Eur. J. Operational Research*, 98, 111-123, 1997.
- POLATIDIS, H.; HARALAMBOPOULOS, D.A.; MUNDA, G.; VREEKER, R. Selecting an appropriate multi-criteria decision analysis technique for renewable energy planning. *Energy Sources Part B – Economics Planning and Policy*, 1(2), 181-193, 2006.
- PORTER, M. *Competitive Strategy*, Free Press, New York, NY, USA, 1980.
- RAO, J.S.; SOBEL, M. Incomplete Dirichlet Integrals with Applications to Ordered Uniform Spacings. *J. Multivariate Analysis*, 10, 603-610, 1980.
- RAO, R.V.; PATEL, B.K. Decision making in the manufacturing environment using an improved PROMETHEE method. *International Journal of Production Research*, 48(16), 4665-4682, 2010.
- RIABACKE, M.; DANIELSON, M.; EKENBERG, L. State-of-the-Art Prescriptive Criteria Weight Elicitation. *Advances in Decision Sciences*, 2012.
- ROBERTS, R.; GOODWIN, P. Weight Approximations in Multi-attribute Decision Models. *Journal of Multi-criteria Decision Analysis*, 11, 291-303, 2002.
- ROY, B. *Multicriteria Methodology of Decision Aiding*. Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 1996.
- ROY, B.; BOUYSSOU, D. *Aide Multicritère à la Décision: Méthodes et Cas*, Paris: Economica, 1993.
- ROY, B.; BOUYSSOU, D. Main sources of inaccurate determination, uncertainty and imprecision in decision models. *Math. and Computer Modelling*, 12, 1245-1254, 1989.
- ROY, B.; MOUSSEAU, V. A theoretical framework for analyzing the notion of relative importance of criteria. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 5, 145-159, 1996.
- RUBINSTEIN, R.Y. Generating Random Vectors Uniformly Distributed inside and on the Surface of Difference Regions. *Eur. Journal of Operational Research*, 10, 205-209, 1982.
- SAATY, T.L. *Analytic Hierarchy Process*, New York: McGraw Hill, 1980.
- SAATY, T.L. *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. Pittsburgh, PA: RWS Publications, 1998.
- SAEID, M.; ABD GHANI, A.A.; SELAMAT, H. Rank-Order Weighting of Web Attributes for Website Evaluation. *Inter. Arab Journal of Information Technology*, 8(1), 30-38, 2011.
- SARABANDO, P.; DIAS, L.C. Multiattribute Choice with Ordinal Information: A Comparison of Different Decision Rules. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 39(3), 545-554, 2009.
- SARABANDO, P.; DIAS, L.C. Simple procedures of choice in multicriteria problems without precise information about the alternatives' values. *Computers & Operations Research*, 37(12), 2239-2247, 2010.
- SCHOT, J.W.; RIP, A. The Past and the Future of Constructive Technology Assessment. *Technological Forecasting and Social Change*, 54, 251-268, 1997.
- SCHWARZ, K.; PICKETT, S.T.A.; LATHROP, R.G.; WEATHERS, K.C.; POUYAT, R.V.; CADENASSO, M.L. The effects of the urban built environment on the spatial distribution of lead in residential soils. *Environmental Pollution*, 163, 32-39, 2012.

- SIEGEL, S. *Estatística não-paramétrica: para as ciências do comportamento*. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 350 p, 1975.
- SILVA, V.B; MORAIS, D.C.; ALMEIDA, A.T. A Multicriteria Group Decision Model to Support Watershed Committees in Brazil. *Water Resources Management*, 24, 4075-4091, 2010.
- SIMON, H. *Administrative Behaviour*, Free Press, New York, NY, USA, 3rd ed, 1976.
- SPENDLEY, W.; HEXT, G.R.; HIMSWORTH, F.R. Sequential Application of Simplex Designs in Optimization and Evolutionary Operation. *Technometrics*, vol. 4, p.441, 1962.
- STEUER, R.E. *Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation, and Application*. John Wiley & Sons, New York, 1986.
- STILLWELL, W.G.; SEAVER, D.A.; EDWARDS, W.A. Comparison of Weight Approximation Techniques in Multiattribute Utility Decision Making. *Organizational Behavior and Human Performance*, 28, 62-77, 1981.
- TROJAN, F; MORAIS, D.C. Using Electre TRI to support maintenance of water distribution networks. *Pesquisa Operacional*, 32, 423-442, 2012.
- VERASZTO, E.V.; SILVA, D.; MIRANDA, N.A.; SIMON, F.O. Tecnologia: buscando uma definição para o conceito. *Revista Prisma*, Universidade Estadual de São Paulo – UNICAMP, 2008.
- VETSCHERA, R.; ALMEIDA, A.T. A PROMETHEE-based approach to portfolio selection problems. *Computers & Operations Research*, 39, 1010-1020, 2012.
- VINCKE, P. *Multicriteria decision-aid*. New York: John Wiley, 1992.
- WAGNER, C.S.; POPPER, S.W. Identifying Critical Technologies in the United States: a review of the federal effort. *Journal of Forecasting*, 22, 113-128, 2003.
- WANG, J.; ZIONTS, S. Random-Weight Generation in Multiple Criteria Decision Models. In: MCDM 2006, Chania, Greece, 2006.
- WEI-GANG, C.; WO-YE, L.; YAN, G.; FEI, H. Approach and Application of Technology Readiness Assessment Based-on Multilevel Reference Condition. In: 2013 INTERNATIONAL CONFERENCE ON MANAGEMENT SCIENCE & ENGINEERING (20th), July 17-19, 2013, Harbin, P.R.China.
- WINTERFELDT, D.; EDWARDS, W. *Decision Analysis and Behavioural Research*. New York: Cambridge University Press, 1986.
- YAGER, R.R.; ALAJLAN, N. Multicriteria Decision-Making with Imprecise Importance Weights. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 22(4), 882-891, 2014.
- ZIONTS, S.; WALLENIUS, J. An interactive programming method for solving the multiple criteria problem. *Management Science*, 22, 652-663, 1976.
- ZIMMERMANN, H.J. An application-oriented view of modeling uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 122, 190-198, 2000.

APÊNDICE A – TABELAS DE RESULTADOS DO EXPERIMENTO SOBRE PESOS SUBSTITUTOS PARA A PROBLEMÁTICA DE ORDENAÇÃO

Tabela A.1 – Percentual de casos com correlação para $\alpha = 0,01$

| | | Distribuição Triangular | | | | Distribuição Uniforme | | | |
|----------|----------|-------------------------|-------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|-------|
| <i>n</i> | <i>m</i> | EW | RS | RR | ROC | EW | RS | RR | ROC |
| 03 | 05 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 06 | 05 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 09 | 05 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 12 | 05 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 15 | 05 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Mínimo | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Média | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Máximo | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 03 | 10 | 62,31 | 94,03 | 97,27 | 97,92 | 54,88 | 92,20 | 95,98 | 96,56 |
| 06 | 10 | 48,88 | 91,27 | 96,77 | 97,77 | 43,53 | 87,94 | 95,19 | 96,47 |
| 09 | 10 | 49,76 | 87,93 | 94,24 | 97,26 | 38,74 | 86,72 | 93,47 | 97,03 |
| 12 | 10 | 28,38 | 80,53 | 90,44 | 97,19 | 36,47 | 85,70 | 91,31 | 97,63 |
| 15 | 10 | 30,54 | 81,00 | 84,47 | 96,91 | 35,06 | 85,45 | 89,12 | 98,07 |
| Mínimo | | 28,38 | 80,53 | 84,47 | 96,91 | 35,06 | 85,45 | 89,12 | 96,47 |
| Média | | 43,97 | 86,95 | 92,64 | 97,41 | 41,74 | 87,60 | 93,01 | 97,15 |
| Máximo | | 62,31 | 94,03 | 97,27 | 97,92 | 54,88 | 92,20 | 95,98 | 98,07 |
| 03 | 15 | 83,18 | 99,82 | 99,94 | 99,87 | 79,60 | 99,52 | 99,92 | 99,77 |
| 06 | 15 | 77,91 | 97,88 | 99,84 | 99,87 | 70,68 | 97,46 | 99,74 | 99,84 |
| 09 | 15 | 74,48 | 97,76 | 99,55 | 99,88 | 66,49 | 97,13 | 99,49 | 99,86 |
| 12 | 15 | 61,32 | 95,41 | 98,79 | 99,79 | 64,10 | 96,88 | 99,06 | 99,87 |
| 15 | 15 | 60,51 | 98,51 | 99,50 | 99,97 | 62,40 | 96,97 | 98,68 | 99,90 |
| Mínimo | | 60,51 | 95,41 | 98,79 | 99,79 | 62,40 | 96,88 | 98,68 | 99,77 |
| Média | | 71,48 | 97,88 | 99,52 | 99,88 | 68,65 | 97,59 | 99,38 | 99,85 |
| Máximo | | 83,18 | 99,82 | 99,94 | 99,97 | 79,60 | 99,52 | 99,92 | 99,90 |
| 03 | 20 | 81,20 | 99,96 | 99,99 | 99,95 | 91,09 | 99,99 | 100 | 99,97 |
| 06 | 20 | 94,21 | 99,83 | 100 | 100 | 85,86 | 99,45 | 99,98 | 99,99 |
| 09 | 20 | 79,19 | 99,24 | 99,97 | 99,99 | 83,20 | 99,29 | 99,97 | 99,99 |
| 12 | 20 | 85,41 | 99,82 | 100 | 100 | 81,94 | 99,32 | 99,93 | 99,99 |
| 15 | 20 | 76,33 | 99,71 | 99,97 | 100 | 81,19 | 99,31 | 99,86 | 99,99 |
| Mínimo | | 76,33 | 99,24 | 99,97 | 99,95 | 81,19 | 99,29 | 99,86 | 99,97 |
| Média | | 83,27 | 99,71 | 99,99 | 99,99 | 84,66 | 99,47 | 99,95 | 99,99 |
| Máximo | | 94,21 | 99,96 | 100 | 100 | 91,09 | 99,99 | 100 | 99,99 |
| 03 | 25 | 97,48 | 100 | 100 | 100 | 95,83 | 100 | 100 | 100 |
| 06 | 25 | 94,82 | 99,80 | 100 | 100 | 92,41 | 99,84 | 100 | 100 |
| 09 | 25 | 91,53 | 99,73 | 99,99 | 100 | 91,01 | 99,78 | 100 | 100 |
| 12 | 25 | 77,61 | 99,45 | 99,98 | 100 | 90,15 | 99,78 | 99,99 | 100 |
| 15 | 25 | 91,87 | 99,73 | 99,98 | 100 | 89,92 | 99,77 | 99,98 | 100 |
| Mínimo | | 77,61 | 99,45 | 99,98 | 100 | 89,92 | 99,77 | 99,98 | 100 |
| Média | | 90,66 | 99,74 | 99,99 | 100 | 91,86 | 99,83 | 99,99 | 100 |
| Máximo | | 97,48 | 100 | 100 | 100 | 95,83 | 100 | 100 | 100 |

Tabela A.2 – Percentual de casos com correlação para $\alpha = 0,05$

| | | Distribuição Triangular | | | | Distribuição Uniforme | | | |
|----------|----------|-------------------------|-------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|-------|
| <i>n</i> | <i>m</i> | EW | RS | RR | ROC | EW | RS | RR | ROC |
| 03 | 05 | 15,29 | 36,13 | 40,13 | 41,93 | 17,46 | 40,61 | 44,30 | 46,07 |
| 06 | 05 | 8,58 | 35,18 | 40,92 | 44,45 | 12,43 | 39,19 | 44,16 | 48,47 |
| 09 | 05 | 10,20 | 36,49 | 38,49 | 48,95 | 11,23 | 37,41 | 42,19 | 50,77 |
| 12 | 05 | 10,11 | 33,46 | 35,68 | 48,54 | 10,63 | 35,82 | 39,65 | 52,83 |
| 15 | 05 | 10,33 | 30,71 | 31,36 | 50,40 | 10,21 | 34,85 | 36,60 | 54,43 |
| | Mínimo | 8,58 | 30,71 | 31,36 | 41,93 | 10,21 | 34,85 | 36,60 | 46,07 |
| | Média | 10,90 | 34,39 | 37,32 | 46,85 | 12,39 | 37,58 | 41,38 | 50,51 |
| | Máximo | 15,29 | 36,49 | 40,92 | 50,40 | 17,46 | 40,61 | 44,30 | 54,43 |
| 03 | 10 | 83,14 | 98,96 | 99,76 | 99,69 | 76,88 | 98,50 | 99,49 | 99,31 |
| 06 | 10 | 74,75 | 97,46 | 99,46 | 99,67 | 69,01 | 95,77 | 99,01 | 99,35 |
| 09 | 10 | 75,21 | 95,86 | 98,73 | 99,44 | 65,17 | 95,30 | 98,41 | 99,43 |
| 12 | 10 | 54,22 | 92,81 | 97,35 | 99,47 | 63,47 | 95,13 | 97,75 | 99,55 |
| 15 | 10 | 57,55 | 92,88 | 95,20 | 99,37 | 62,13 | 95,01 | 97,07 | 99,59 |
| | Mínimo | 54,22 | 92,81 | 95,20 | 99,37 | 62,13 | 95,01 | 97,07 | 99,31 |
| | Média | 68,97 | 95,59 | 98,10 | 99,53 | 67,33 | 95,94 | 98,35 | 99,45 |
| | Máximo | 83,14 | 98,96 | 99,76 | 99,69 | 76,88 | 98,50 | 99,49 | 99,59 |
| 03 | 15 | 94,32 | 100 | 100 | 99,98 | 92,02 | 99,97 | 99,99 | 99,97 |
| 06 | 15 | 91,93 | 99,48 | 99,98 | 99,99 | 87,46 | 99,31 | 99,96 | 99,98 |
| 09 | 15 | 90,65 | 99,46 | 99,93 | 99,98 | 85,12 | 99,25 | 99,91 | 99,99 |
| 12 | 15 | 82,43 | 98,67 | 99,76 | 99,96 | 84,22 | 99,11 | 99,84 | 99,98 |
| 15 | 15 | 83,60 | 99,66 | 99,93 | 100 | 83,55 | 99,16 | 99,77 | 99,98 |
| | Mínimo | 82,43 | 98,67 | 99,76 | 99,96 | 83,55 | 99,11 | 99,77 | 99,97 |
| | Média | 88,59 | 99,45 | 99,92 | 99,98 | 86,47 | 99,36 | 99,89 | 99,98 |
| | Máximo | 94,32 | 100 | 100 | 100 | 92,02 | 99,97 | 99,99 | 99,99 |
| 03 | 20 | 91,78 | 100 | 100 | 99,99 | 96,98 | 100 | 100 | 100 |
| 06 | 20 | 98,41 | 99,97 | 100 | 100 | 94,58 | 99,87 | 99,99 | 100 |
| 09 | 20 | 91,84 | 99,80 | 100 | 100 | 93,52 | 99,80 | 99,99 | 100 |
| 12 | 20 | 95,30 | 99,97 | 100 | 100 | 93,21 | 99,83 | 99,99 | 100 |
| 15 | 20 | 91,27 | 99,94 | 100 | 100 | 92,95 | 99,83 | 99,97 | 100 |
| | Mínimo | 91,27 | 99,80 | 100 | 99,99 | 92,95 | 99,80 | 99,97 | 100 |
| | Média | 93,72 | 99,94 | 100 | 100 | 94,25 | 99,87 | 99,99 | 100 |
| | Máximo | 98,41 | 100 | 100 | 100 | 96,98 | 100 | 100 | 100 |
| 03 | 25 | 99,53 | 100 | 100 | 100 | 98,98 | 100 | 100 | 100 |
| 06 | 25 | 98,50 | 99,98 | 100 | 100 | 97,70 | 99,97 | 100 | 100 |
| 09 | 25 | 97,58 | 99,95 | 100 | 100 | 97,21 | 99,96 | 100 | 100 |
| 12 | 25 | 91,35 | 99,89 | 100 | 100 | 96,95 | 99,95 | 100 | 100 |
| 15 | 25 | 97,81 | 99,95 | 100 | 100 | 97,01 | 99,95 | 100 | 100 |
| | Mínimo | 91,35 | 99,89 | 100 | 100 | 96,95 | 99,95 | 100 | 100 |
| | Média | 96,95 | 99,95 | 100 | 100 | 97,57 | 99,97 | 100 | 100 |
| | Máximo | 99,53 | 100 | 100 | 100 | 98,98 | 100 | 100 | 100 |

Tabela A.3 – Percentual de casos com correlação para $\alpha = 0,10$

| | | Distribuição Triangular | | | | Distribuição Uniforme | | | |
|----------|----------|-------------------------|-------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|-------|
| <i>n</i> | <i>m</i> | EW | RS | RR | ROC | EW | RS | RR | ROC |
| 03 | 05 | 40,55 | 71,39 | 76,65 | 79,30 | 45,44 | 76,52 | 81,10 | 82,78 |
| 06 | 05 | 29,46 | 69,11 | 77,33 | 80,38 | 37,85 | 73,03 | 80,42 | 83,39 |
| 09 | 05 | 33,54 | 70,72 | 75,11 | 83,56 | 35,49 | 72,07 | 78,28 | 84,89 |
| 12 | 05 | 33,04 | 67,77 | 71,06 | 83,34 | 34,33 | 70,80 | 75,48 | 86,27 |
| 15 | 05 | 33,49 | 64,85 | 65,83 | 84,55 | 33,65 | 69,95 | 72,55 | 87,34 |
| | Mínimo | 29,46 | 64,85 | 65,83 | 79,3 | 33,65 | 69,95 | 72,55 | 82,78 |
| | Média | 34,02 | 68,77 | 73,20 | 82,23 | 37,35 | 72,47 | 77,57 | 84,93 |
| | Máximo | 40,55 | 71,39 | 77,33 | 84,55 | 45,44 | 76,52 | 81,10 | 87,34 |
| 03 | 10 | 91,06 | 99,79 | 99,96 | 99,90 | 86,61 | 99,65 | 99,86 | 99,77 |
| 06 | 10 | 86,00 | 98,97 | 99,82 | 99,91 | 81,03 | 98,11 | 99,66 | 99,79 |
| 09 | 10 | 85,96 | 98,03 | 99,56 | 99,81 | 78,62 | 97,70 | 99,44 | 99,81 |
| 12 | 10 | 69,48 | 96,59 | 98,95 | 99,83 | 77,15 | 97,74 | 99,11 | 99,84 |
| 15 | 10 | 72,65 | 96,52 | 97,96 | 99,79 | 76,38 | 97,77 | 98,80 | 99,85 |
| | Mínimo | 69,48 | 96,52 | 97,96 | 99,79 | 76,38 | 97,7 | 98,8 | 99,77 |
| | Média | 81,03 | 97,98 | 99,25 | 99,85 | 79,96 | 98,19 | 99,37 | 99,81 |
| | Máximo | 91,06 | 99,79 | 99,96 | 99,91 | 86,61 | 99,65 | 99,86 | 99,85 |
| 03 | 15 | 97,00 | 100 | 100 | 100 | 95,37 | 100 | 100 | 99,99 |
| 06 | 15 | 95,38 | 99,75 | 99,99 | 100 | 92,27 | 99,67 | 99,99 | 99,99 |
| 09 | 15 | 94,75 | 99,73 | 99,98 | 100 | 90,96 | 99,64 | 99,97 | 100 |
| 12 | 15 | 89,12 | 99,30 | 99,91 | 99,99 | 90,26 | 99,56 | 99,93 | 99,99 |
| 15 | 15 | 90,37 | 99,85 | 99,98 | 100 | 89,87 | 99,60 | 99,91 | 99,99 |
| | Mínimo | 89,12 | 99,3 | 99,91 | 99,99 | 89,87 | 99,56 | 99,91 | 99,99 |
| | Média | 93,32 | 99,73 | 99,97 | 100 | 91,75 | 99,69 | 99,96 | 99,99 |
| | Máximo | 97,00 | 100 | 100 | 100 | 95,37 | 100 | 100 | 100 |
| 03 | 20 | 95,37 | 100 | 100 | 100 | 98,49 | 100 | 100 | 100 |
| 06 | 20 | 99,29 | 99,99 | 100 | 100 | 97,01 | 99,95 | 100 | 100 |
| 09 | 20 | 95,54 | 99,9 | 100 | 100 | 96,42 | 99,89 | 100 | 100 |
| 12 | 20 | 97,75 | 99,99 | 100 | 100 | 96,33 | 99,92 | 100 | 100 |
| 15 | 20 | 95,42 | 99,98 | 100 | 100 | 96,27 | 99,92 | 99,99 | 100 |
| | Mínimo | 95,37 | 99,9 | 100 | 100 | 96,27 | 99,89 | 99,99 | 100 |
| | Média | 96,67 | 99,97 | 100 | 100 | 96,90 | 99,94 | 100 | 100 |
| | Máximo | 99,29 | 100 | 100 | 100 | 98,49 | 100 | 100 | 100 |
| 03 | 25 | 99,79 | 100 | 100 | 100 | 99,48 | 100 | 100 | 100 |
| 06 | 25 | 99,18 | 99,99 | 100 | 100 | 98,67 | 99,99 | 100 | 100 |
| 09 | 25 | 98,69 | 99,97 | 100 | 100 | 98,36 | 99,98 | 100 | 100 |
| 12 | 25 | 94,67 | 99,94 | 100 | 100 | 98,32 | 99,98 | 100 | 100 |
| 15 | 25 | 98,83 | 99,98 | 100 | 100 | 98,33 | 99,98 | 100 | 100 |
| | Mínimo | 94,67 | 99,94 | 100 | 100 | 98,32 | 99,98 | 100 | 100 |
| | Média | 98,23 | 99,98 | 100 | 100 | 98,63 | 99,99 | 100 | 100 |
| | Máximo | 99,79 | 100 | 100 | 100 | 99,48 | 100 | 100 | 100 |

Tabela A.4 – Percentual de casos com correlação para $\alpha = 0,15$

| | | Distribuição Triangular | | | | Distribuição Uniforme | | | |
|----------|----------|-------------------------|-------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|--------|
| <i>n</i> | <i>m</i> | EW | RS | RR | ROC | EW | RS | RR | ROC |
| 03 | 05 | 63,30 | 89,63 | 93,01 | 93,87 | 69,07 | 92,29 | 94,81 | 95,22 |
| 06 | 05 | 53,48 | 86,13 | 92,22 | 93,43 | 62,87 | 88,61 | 93,54 | 94,85 |
| 09 | 05 | 58,32 | 87,22 | 90,70 | 94,79 | 60,63 | 88,18 | 92,19 | 95,35 |
| 12 | 05 | 58,02 | 85,74 | 88,36 | 94,58 | 59,40 | 87,67 | 90,64 | 95,84 |
| 15 | 05 | 58,33 | 83,88 | 84,85 | 95,06 | 58,71 | 87,41 | 89,14 | 96,24 |
| | Mínimo | 53,48 | 83,88 | 84,85 | 93,43 | 58,71 | 87,41 | 89,14 | 94,85 |
| | Média | 58,29 | 86,52 | 89,83 | 94,35 | 62,14 | 88,83 | 92,06 | 95,50 |
| | Máximo | 63,30 | 89,63 | 93,01 | 95,06 | 69,07 | 92,29 | 94,81 | 96,24 |
| 03 | 10 | 93,74 | 99,92 | 99,98 | 99,94 | 90,01 | 99,83 | 99,93 | 99,85 |
| 06 | 10 | 89,80 | 99,39 | 99,90 | 99,95 | 85,62 | 98,72 | 99,81 | 99,89 |
| 09 | 10 | 89,61 | 98,64 | 99,75 | 99,90 | 83,63 | 98,44 | 99,68 | 99,90 |
| 12 | 10 | 75,79 | 97,66 | 99,35 | 99,92 | 82,56 | 98,50 | 99,47 | 99,91 |
| 15 | 10 | 78,77 | 97,61 | 98,70 | 99,87 | 81,82 | 98,48 | 99,22 | 99,93 |
| | Mínimo | 75,79 | 97,61 | 98,7 | 99,87 | 81,82 | 98,44 | 99,22 | 99,85 |
| | Média | 85,54 | 98,64 | 99,54 | 99,92 | 84,73 | 98,79 | 99,62 | 99,90 |
| | Máximo | 93,74 | 99,92 | 99,98 | 99,95 | 90,01 | 99,83 | 99,93 | 99,93 |
| 03 | 15 | 98,09 | 100 | 100 | 100 | 96,92 | 100 | 100 | 99,99 |
| 06 | 15 | 96,91 | 99,86 | 99,99 | 100 | 94,57 | 99,79 | 100 | 100 |
| 09 | 15 | 96,59 | 99,85 | 99,99 | 100 | 93,7 | 99,79 | 99,98 | 100 |
| 12 | 15 | 92,32 | 99,57 | 99,95 | 100 | 93,02 | 99,73 | 99,97 | 100 |
| 15 | 15 | 93,45 | 99,92 | 99,99 | 100 | 92,84 | 99,75 | 99,95 | 100 |
| | Mínimo | 92,32 | 99,57 | 99,95 | 100 | 92,84 | 99,73 | 99,95 | 99,99 |
| | Média | 95,47 | 99,84 | 99,98 | 100 | 94,21 | 99,81 | 99,98 | 100 |
| | Máximo | 98,09 | 100 | 100 | 100 | 96,92 | 100 | 100 | 100 |
| 03 | 20 | 96,83 | 100 | 100 | 100 | 99,01 | 100 | 100 | 100,00 |
| 06 | 20 | 99,58 | 100 | 100 | 100 | 97,93 | 99,97 | 100 | 100,00 |
| 09 | 20 | 96,92 | 99,94 | 100 | 100 | 97,55 | 99,93 | 100 | 100,00 |
| 12 | 20 | 98,60 | 99,99 | 100 | 100 | 97,55 | 99,96 | 100 | 100,00 |
| 15 | 20 | 96,99 | 99,99 | 100 | 100 | 97,53 | 99,95 | 100 | 100,00 |
| | Mínimo | 96,83 | 99,94 | 100 | 100 | 97,53 | 99,93 | 100 | 100 |
| | Média | 97,78 | 99,98 | 100 | 100 | 97,91 | 99,96 | 100 | 100 |
| | Máximo | 99,58 | 100 | 100 | 100 | 99,01 | 100 | 100 | 100 |
| 03 | 25 | 99,91 | 100 | 100 | 100 | 99,71 | 100 | 100 | 100,00 |
| 06 | 25 | 99,53 | 100 | 100 | 100 | 99,21 | 99,99 | 100 | 100,00 |
| 09 | 25 | 99,24 | 99,99 | 100 | 100 | 98,98 | 99,99 | 100 | 100,00 |
| 12 | 25 | 96,53 | 99,97 | 100 | 100 | 98,97 | 99,99 | 100 | 100,00 |
| 15 | 25 | 99,32 | 99,98 | 100 | 100 | 99,00 | 99,99 | 100 | 100,00 |
| | Mínimo | 96,53 | 99,97 | 100 | 100 | 98,97 | 99,99 | 100 | 100 |
| | Média | 98,91 | 99,99 | 100 | 100 | 99,17 | 99,99 | 100 | 100 |
| | Máximo | 99,91 | 100 | 100 | 100 | 99,71 | 100 | 100 | 100 |

Tabela A.5 – Percentual de permanência entre posições para estruturas com cinco alternativas

| | | Distribuição Triangular | | | | Distribuição Uniforme | | | |
|----------|-----------------|-------------------------|-------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|-------|
| <i>n</i> | <i>posições</i> | EW | RS | RR | ROC | EW | RS | RR | ROC |
| 03 | 1 ^a | 63,65 | 81,56 | 83,64 | 84,57 | 63,77 | 80,90 | 82,79 | 83,62 |
| 03 | 2 ^a | 39,03 | 62,04 | 65,18 | 66,72 | 41,92 | 63,55 | 66,51 | 67,82 |
| 03 | 3 ^a | 34,65 | 54,71 | 59,08 | 60,71 | 37,76 | 59,33 | 63,34 | 64,93 |
| 03 | 4 ^a | 38,37 | 57,20 | 60,77 | 62,06 | 41,70 | 63,35 | 66,42 | 67,68 |
| 03 | 5 ^a | 58,98 | 75,90 | 78,75 | 79,97 | 63,92 | 80,70 | 82,71 | 83,38 |
| | Média | 46,94 | 66,28 | 69,48 | 70,81 | 49,81 | 69,57 | 72,35 | 73,49 |
| 06 | 1 ^a | 54,02 | 76,00 | 79,84 | 81,80 | 58,97 | 79,72 | 83,34 | 85,12 |
| 06 | 2 ^a | 32,29 | 57,49 | 62,67 | 65,46 | 36,98 | 61,47 | 66,38 | 69,37 |
| 06 | 3 ^a | 28,09 | 53,97 | 60,04 | 62,63 | 33,09 | 57,31 | 62,19 | 65,34 |
| 06 | 4 ^a | 31,55 | 59,24 | 65,04 | 67,72 | 36,93 | 61,70 | 66,37 | 69,41 |
| 06 | 5 ^a | 52,70 | 78,44 | 82,55 | 84,15 | 59,29 | 79,77 | 83,36 | 85,16 |
| | Média | 39,73 | 65,03 | 70,03 | 72,35 | 45,05 | 67,99 | 72,33 | 74,88 |
| 09 | 1 ^a | 52,96 | 77,09 | 80,37 | 84,78 | 57,57 | 79,24 | 82,38 | 86,24 |
| 09 | 2 ^a | 34,02 | 58,78 | 61,11 | 68,92 | 35,66 | 60,29 | 64,45 | 70,88 |
| 09 | 3 ^a | 30,86 | 55,16 | 56,33 | 65,26 | 31,69 | 55,88 | 60,29 | 67,07 |
| 09 | 4 ^a | 35,52 | 60,48 | 62,40 | 70,42 | 35,74 | 60,48 | 64,84 | 71,03 |
| 09 | 5 ^a | 57,88 | 79,58 | 82,19 | 86,42 | 57,47 | 79,12 | 82,46 | 86,00 |
| | Média | 42,25 | 66,22 | 68,48 | 75,16 | 43,63 | 67,00 | 70,88 | 76,24 |
| 12 | 1 ^a | 53,60 | 76,32 | 78,48 | 84,99 | 56,89 | 78,40 | 80,92 | 86,89 |
| 12 | 2 ^a | 33,60 | 56,59 | 58,49 | 69,00 | 34,93 | 59,09 | 62,71 | 72,58 |
| 12 | 3 ^a | 30,90 | 52,55 | 53,97 | 65,15 | 31,09 | 54,72 | 58,14 | 68,54 |
| 12 | 4 ^a | 34,83 | 57,39 | 59,52 | 69,78 | 35,04 | 59,25 | 62,60 | 72,40 |
| 12 | 5 ^a | 57,52 | 77,21 | 80,00 | 85,78 | 56,59 | 78,45 | 80,98 | 86,92 |
| | Média | 42,09 | 64,01 | 66,09 | 74,94 | 42,91 | 65,98 | 69,07 | 77,47 |
| 15 | 1 ^a | 56,84 | 75,45 | 74,53 | 85,68 | 56,12 | 77,93 | 79,60 | 87,55 |
| 15 | 2 ^a | 34,68 | 54,66 | 54,31 | 70,43 | 34,41 | 58,39 | 60,26 | 73,54 |
| 15 | 3 ^a | 30,61 | 49,78 | 50,46 | 66,71 | 30,67 | 53,86 | 55,10 | 69,73 |
| 15 | 4 ^a | 34,06 | 54,60 | 56,37 | 70,90 | 34,54 | 58,64 | 60,21 | 73,58 |
| 15 | 5 ^a | 56,08 | 75,37 | 77,09 | 86,21 | 56,23 | 78,03 | 79,58 | 87,61 |
| | Média | 42,45 | 61,97 | 62,55 | 75,99 | 42,39 | 65,37 | 66,95 | 78,40 |

Tabela A.6 – Percentual de permanência entre posições para estruturas com dez alternativas

| | | Distribuição Triangular | | | | Distribuição Uniforme | | | |
|----------|-----------------|-------------------------|-------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|-------|
| <i>n</i> | <i>posições</i> | EW | RS | RR | ROC | EW | RS | RR | ROC |
| 03 | 1 ^a | 53,20 | 75,42 | 76,88 | 79,02 | 57,80 | 76,59 | 77,69 | 79,49 |
| 03 | 2 ^a | 30,45 | 54,39 | 55,76 | 58,25 | 33,09 | 55,61 | 56,70 | 58,98 |
| 03 | 3 ^a | 24,15 | 47,15 | 48,31 | 50,52 | 24,76 | 46,34 | 47,88 | 50,16 |
| 03 | 4 ^a | 22,33 | 44,42 | 45,92 | 48,07 | 21,61 | 42,33 | 44,02 | 46,55 |
| 03 | 5 ^a | 22,14 | 44,06 | 46,21 | 49,01 | 20,26 | 40,15 | 42,52 | 45,42 |
| 03 | 6 ^a | 23,13 | 45,78 | 48,54 | 51,03 | 20,15 | 40,14 | 42,80 | 45,59 |
| 03 | 7 ^a | 25,42 | 48,54 | 50,77 | 52,90 | 21,60 | 41,96 | 43,94 | 46,67 |
| 03 | 8 ^a | 29,12 | 52,48 | 53,90 | 55,88 | 24,72 | 46,35 | 47,78 | 50,09 |
| 03 | 9 ^a | 37,22 | 59,23 | 60,57 | 62,94 | 32,81 | 55,26 | 56,51 | 58,81 |
| 03 | 10 ^a | 60,26 | 77,95 | 79,20 | 81,32 | 57,52 | 76,54 | 77,66 | 79,60 |
| | Média | 32,74 | 54,94 | 56,61 | 58,89 | 31,43 | 52,13 | 53,75 | 56,14 |
| 06 | 1 ^a | 51,67 | 76,06 | 78,83 | 81,48 | 51,19 | 75,76 | 78,89 | 81,55 |
| 06 | 2 ^a | 28,19 | 55,19 | 58,21 | 62,70 | 27,17 | 53,62 | 57,42 | 61,68 |
| 06 | 3 ^a | 21,25 | 46,34 | 49,88 | 54,50 | 20,19 | 44,04 | 47,74 | 52,07 |
| 06 | 4 ^a | 18,42 | 42,37 | 46,20 | 50,58 | 17,49 | 39,21 | 42,99 | 47,07 |
| 06 | 5 ^a | 17,10 | 40,29 | 45,08 | 49,24 | 16,45 | 37,49 | 40,96 | 44,78 |
| 06 | 6 ^a | 17,45 | 40,05 | 45,38 | 49,17 | 16,60 | 37,07 | 41,09 | 44,81 |
| 06 | 7 ^a | 18,81 | 40,63 | 46,54 | 50,37 | 17,69 | 39,06 | 43,13 | 46,85 |
| 06 | 8 ^a | 21,86 | 44,31 | 49,76 | 53,94 | 20,48 | 43,62 | 47,77 | 51,81 |
| 06 | 9 ^a | 29,40 | 52,33 | 57,01 | 61,28 | 27,23 | 53,21 | 57,33 | 61,34 |
| 06 | 10 ^a | 53,80 | 73,89 | 77,83 | 80,58 | 50,99 | 75,70 | 79,00 | 81,43 |
| | Média | 27,80 | 51,15 | 55,47 | 59,38 | 26,55 | 49,88 | 53,63 | 57,34 |
| 09 | 1 ^a | 50,39 | 75,62 | 79,24 | 83,01 | 48,82 | 74,98 | 78,44 | 82,91 |
| 09 | 2 ^a | 27,37 | 53,27 | 57,30 | 63,69 | 25,83 | 51,81 | 56,26 | 63,47 |
| 09 | 3 ^a | 21,14 | 43,96 | 47,51 | 54,60 | 19,28 | 41,96 | 46,27 | 53,74 |
| 09 | 4 ^a | 18,53 | 39,81 | 42,68 | 50,02 | 16,78 | 37,35 | 41,46 | 48,66 |
| 09 | 5 ^a | 17,72 | 37,99 | 40,32 | 48,25 | 15,84 | 35,22 | 39,00 | 46,36 |
| 09 | 6 ^a | 17,72 | 37,73 | 40,05 | 47,75 | 16,00 | 35,48 | 38,95 | 46,12 |
| 09 | 7 ^a | 18,76 | 39,62 | 42,46 | 49,94 | 16,87 | 37,46 | 41,05 | 48,48 |
| 09 | 8 ^a | 21,83 | 44,21 | 47,84 | 55,03 | 19,34 | 42,20 | 46,29 | 53,74 |
| 09 | 9 ^a | 29,57 | 53,92 | 58,04 | 65,03 | 25,97 | 51,99 | 56,48 | 63,24 |
| 09 | 10 ^a | 54,92 | 76,43 | 80,00 | 84,12 | 48,93 | 74,99 | 78,66 | 82,77 |
| | Média | 27,80 | 50,26 | 53,54 | 60,14 | 25,37 | 48,34 | 52,29 | 58,95 |
| 12 | 1 ^a | 40,98 | 70,40 | 76,47 | 82,72 | 47,34 | 73,61 | 77,24 | 83,64 |
| 12 | 2 ^a | 22,54 | 46,43 | 53,18 | 63,07 | 25,03 | 50,24 | 54,33 | 64,79 |
| 12 | 3 ^a | 17,28 | 36,96 | 43,51 | 53,86 | 18,71 | 40,38 | 43,94 | 55,20 |
| 12 | 4 ^a | 15,05 | 32,41 | 38,45 | 48,57 | 16,35 | 35,71 | 38,53 | 50,02 |
| 12 | 5 ^a | 14,42 | 30,65 | 36,34 | 46,41 | 15,47 | 33,86 | 36,62 | 47,99 |
| 12 | 6 ^a | 14,55 | 30,60 | 36,25 | 46,47 | 15,20 | 33,91 | 36,39 | 48,13 |
| 12 | 7 ^a | 15,35 | 32,40 | 38,33 | 48,57 | 16,35 | 35,88 | 38,78 | 50,08 |
| 12 | 8 ^a | 17,78 | 37,39 | 42,75 | 53,54 | 18,74 | 40,45 | 43,98 | 55,13 |
| 12 | 9 ^a | 24,01 | 47,30 | 52,28 | 62,62 | 25,10 | 50,30 | 54,40 | 65,02 |
| 12 | 10 ^a | 46,87 | 71,63 | 75,37 | 82,13 | 47,63 | 73,74 | 77,49 | 84,02 |
| | Média | 22,88 | 43,62 | 49,29 | 58,80 | 24,59 | 46,81 | 50,17 | 60,40 |
| 15 | 1 ^a | 44,95 | 70,42 | 72,47 | 82,09 | 46,62 | 73,04 | 75,69 | 84,40 |
| 15 | 2 ^a | 23,46 | 46,25 | 48,63 | 62,00 | 24,61 | 49,15 | 51,88 | 66,07 |
| 15 | 3 ^a | 17,53 | 36,47 | 38,56 | 52,13 | 18,37 | 39,84 | 41,37 | 56,77 |
| 15 | 4 ^a | 15,28 | 31,97 | 33,65 | 47,35 | 16,06 | 34,83 | 36,33 | 51,92 |
| 15 | 5 ^a | 14,42 | 30,50 | 31,58 | 45,21 | 14,95 | 32,85 | 33,95 | 49,66 |
| 15 | 6 ^a | 14,51 | 29,95 | 30,93 | 45,04 | 14,90 | 32,93 | 34,20 | 49,53 |
| 15 | 7 ^a | 15,37 | 31,77 | 32,69 | 47,02 | 16,07 | 34,93 | 36,15 | 52,20 |
| 15 | 8 ^a | 17,60 | 35,91 | 37,28 | 51,85 | 18,52 | 39,33 | 41,21 | 56,84 |
| 15 | 9 ^a | 23,20 | 45,44 | 46,82 | 61,61 | 24,38 | 49,21 | 51,92 | 66,08 |
| 15 | 10 ^a | 44,31 | 69,64 | 71,48 | 81,77 | 46,55 | 73,05 | 76,00 | 84,68 |
| | Média | 23,06 | 42,83 | 44,41 | 57,61 | 24,10 | 45,92 | 47,87 | 61,82 |

Tabela A.7 – Percentual de permanência entre posições para estruturas com quinze alternativas – Parte A

| | | Distribuição Triangular | | | | Distribuição Uniforme | | | |
|----------|-----------------|-------------------------|-------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|-------|
| <i>n</i> | <i>posições</i> | EW | RS | RR | ROC | EW | RS | RR | ROC |
| 03 | 1 ^a | 49,65 | 73,61 | 73,90 | 77,13 | 55,07 | 74,66 | 75,13 | 77,62 |
| 03 | 2 ^a | 26,83 | 51,13 | 51,03 | 55,34 | 30,17 | 52,32 | 52,67 | 55,33 |
| 03 | 3 ^a | 20,06 | 41,89 | 42,20 | 45,51 | 21,61 | 42,13 | 42,69 | 45,09 |
| 03 | 4 ^a | 16,93 | 37,02 | 37,85 | 40,51 | 17,28 | 36,36 | 37,13 | 39,44 |
| 03 | 5 ^a | 15,47 | 34,21 | 35,52 | 38,21 | 15,18 | 33,09 | 34,32 | 36,92 |
| 03 | 6 ^a | 14,59 | 32,41 | 34,28 | 37,54 | 14,22 | 31,06 | 32,56 | 35,48 |
| 03 | 7 ^a | 14,30 | 31,72 | 33,98 | 37,40 | 13,65 | 30,06 | 31,78 | 34,80 |
| 03 | 8 ^a | 14,14 | 31,29 | 33,87 | 37,13 | 13,64 | 29,61 | 31,61 | 34,77 |
| 03 | 9 ^a | 14,52 | 31,48 | 33,80 | 36,79 | 13,63 | 29,97 | 31,77 | 35,00 |
| 03 | 10 ^a | 15,06 | 32,40 | 34,31 | 37,00 | 14,41 | 30,96 | 32,47 | 35,32 |
| 03 | 11 ^a | 16,12 | 34,20 | 35,69 | 37,79 | 15,36 | 33,00 | 34,33 | 36,51 |
| 03 | 12 ^a | 17,89 | 37,54 | 38,55 | 40,53 | 17,74 | 36,23 | 37,03 | 39,36 |
| 03 | 13 ^a | 21,54 | 43,44 | 43,58 | 46,57 | 21,61 | 42,31 | 42,78 | 45,03 |
| 03 | 14 ^a | 28,68 | 52,94 | 53,11 | 57,31 | 30,14 | 52,57 | 52,88 | 55,56 |
| 03 | 15 ^a | 50,85 | 75,46 | 75,99 | 79,17 | 55,16 | 74,90 | 75,56 | 77,83 |
| | Média | 22,44 | 42,72 | 43,84 | 46,93 | 23,26 | 41,95 | 42,98 | 45,60 |
| 06 | 1 ^a | 56,68 | 74,45 | 77,43 | 80,55 | 47,36 | 73,87 | 76,86 | 79,80 |
| 06 | 2 ^a | 28,02 | 52,69 | 55,10 | 60,07 | 23,80 | 50,51 | 53,53 | 58,17 |
| 06 | 3 ^a | 18,82 | 42,15 | 45,17 | 50,00 | 16,91 | 39,51 | 42,38 | 47,31 |
| 06 | 4 ^a | 14,88 | 36,08 | 39,56 | 44,20 | 13,95 | 33,94 | 36,32 | 41,04 |
| 06 | 5 ^a | 12,93 | 32,32 | 36,00 | 40,16 | 12,23 | 30,31 | 32,53 | 36,81 |
| 06 | 6 ^a | 12,03 | 30,11 | 33,94 | 37,85 | 11,35 | 28,29 | 30,72 | 34,29 |
| 06 | 7 ^a | 11,59 | 29,14 | 32,37 | 36,23 | 10,90 | 27,04 | 29,76 | 33,08 |
| 06 | 8 ^a | 11,47 | 28,51 | 30,82 | 34,65 | 11,13 | 26,90 | 29,49 | 33,15 |
| 06 | 9 ^a | 11,67 | 28,59 | 30,30 | 34,42 | 10,96 | 26,65 | 29,71 | 33,22 |
| 06 | 10 ^a | 12,29 | 29,05 | 30,63 | 34,85 | 11,42 | 27,93 | 30,77 | 34,51 |
| 06 | 11 ^a | 13,01 | 30,82 | 31,79 | 36,39 | 12,16 | 30,20 | 32,89 | 36,77 |
| 06 | 12 ^a | 14,65 | 33,72 | 34,36 | 39,39 | 13,98 | 33,54 | 36,31 | 40,58 |
| 06 | 13 ^a | 17,59 | 38,50 | 39,28 | 45,03 | 16,90 | 39,47 | 42,25 | 47,05 |
| 06 | 14 ^a | 24,43 | 48,42 | 49,95 | 55,45 | 24,05 | 50,13 | 53,35 | 57,96 |
| 06 | 15 ^a | 47,52 | 71,76 | 74,43 | 77,94 | 47,44 | 73,86 | 76,80 | 79,87 |
| | Média | 20,51 | 40,42 | 42,74 | 47,15 | 18,97 | 39,48 | 42,24 | 46,24 |
| 09 | 1 ^a | 47,27 | 72,58 | 74,76 | 80,09 | 44,72 | 73,03 | 76,81 | 81,52 |
| 09 | 2 ^a | 24,18 | 48,90 | 50,97 | 58,65 | 22,10 | 48,66 | 52,96 | 60,44 |
| 09 | 3 ^a | 17,54 | 38,74 | 40,79 | 48,23 | 15,93 | 37,79 | 41,66 | 49,21 |
| 09 | 4 ^a | 14,43 | 33,20 | 35,91 | 43,41 | 13,23 | 31,86 | 35,24 | 42,71 |
| 09 | 5 ^a | 12,93 | 29,93 | 33,10 | 40,15 | 11,61 | 28,48 | 31,62 | 38,58 |
| 09 | 6 ^a | 11,69 | 27,53 | 31,15 | 37,79 | 10,93 | 26,28 | 29,24 | 36,13 |
| 09 | 7 ^a | 11,23 | 26,50 | 28,99 | 35,93 | 10,64 | 25,19 | 28,24 | 34,71 |
| 09 | 8 ^a | 11,13 | 26,11 | 27,78 | 34,63 | 10,42 | 24,92 | 28,18 | 33,93 |
| 09 | 9 ^a | 11,14 | 26,11 | 27,16 | 34,00 | 10,45 | 25,43 | 28,31 | 34,36 |
| 09 | 10 ^a | 11,51 | 26,78 | 27,37 | 34,25 | 10,87 | 26,42 | 29,42 | 35,73 |
| 09 | 11 ^a | 12,36 | 28,31 | 28,55 | 35,69 | 11,56 | 28,32 | 31,36 | 38,17 |
| 09 | 12 ^a | 13,95 | 31,11 | 31,19 | 38,84 | 13,24 | 31,91 | 34,99 | 42,48 |
| 09 | 13 ^a | 16,47 | 36,30 | 36,82 | 44,86 | 15,85 | 37,60 | 41,32 | 48,91 |
| 09 | 14 ^a | 22,73 | 46,39 | 47,44 | 55,89 | 22,19 | 48,45 | 52,83 | 60,28 |
| 09 | 15 ^a | 44,21 | 70,50 | 72,44 | 78,63 | 44,78 | 72,93 | 76,89 | 81,58 |
| | Média | 18,85 | 37,93 | 39,63 | 46,74 | 17,90 | 37,82 | 41,27 | 47,92 |

Tabela A.8 – Percentual de permanência entre posições para estruturas com quinze alternativas – Parte B

| | | Distribuição Triangular | | | | Distribuição Uniforme | | | |
|----------|-----------------|-------------------------|-------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|-------|
| <i>n</i> | <i>posições</i> | EW | RS | RR | ROC | EW | RS | RR | ROC |
| 12 | 1 ^a | 44,77 | 70,66 | 72,25 | 81,38 | 43,40 | 71,68 | 75,51 | 82,40 |
| 12 | 2 ^a | 22,28 | 45,79 | 47,29 | 60,42 | 21,56 | 46,84 | 50,89 | 61,70 |
| 12 | 3 ^a | 15,64 | 34,56 | 36,93 | 49,47 | 15,42 | 36,04 | 39,49 | 50,65 |
| 12 | 4 ^a | 12,99 | 28,85 | 31,19 | 42,73 | 12,70 | 30,33 | 33,34 | 44,12 |
| 12 | 5 ^a | 11,36 | 25,33 | 28,19 | 38,64 | 11,46 | 27,06 | 29,68 | 39,85 |
| 12 | 6 ^a | 10,51 | 23,42 | 26,12 | 36,01 | 10,60 | 25,15 | 27,45 | 37,43 |
| 12 | 7 ^a | 10,12 | 22,43 | 24,89 | 34,70 | 10,26 | 24,08 | 26,21 | 36,06 |
| 12 | 8 ^a | 9,75 | 22,20 | 24,24 | 34,60 | 10,00 | 23,74 | 25,90 | 35,71 |
| 12 | 9 ^a | 9,90 | 22,62 | 24,46 | 34,99 | 10,29 | 24,03 | 26,18 | 35,98 |
| 12 | 10 ^a | 10,40 | 24,01 | 25,22 | 36,34 | 10,61 | 24,99 | 27,27 | 37,39 |
| 12 | 11 ^a | 10,86 | 25,49 | 27,20 | 38,51 | 11,41 | 26,96 | 29,32 | 39,63 |
| 12 | 12 ^a | 11,95 | 29,09 | 30,49 | 42,30 | 12,93 | 30,21 | 33,34 | 43,77 |
| 12 | 13 ^a | 14,35 | 34,57 | 36,26 | 48,50 | 15,48 | 36,24 | 39,77 | 50,49 |
| 12 | 14 ^a | 19,41 | 45,51 | 47,44 | 59,23 | 21,44 | 47,04 | 51,19 | 61,70 |
| 12 | 15 ^a | 38,78 | 70,08 | 72,92 | 80,92 | 43,54 | 71,78 | 75,47 | 82,29 |
| | Média | 16,87 | 34,97 | 37,01 | 47,92 | 17,41 | 36,41 | 39,40 | 49,28 |
| 15 | 1 ^a | 40,41 | 68,52 | 68,92 | 80,85 | 42,25 | 70,55 | 73,93 | 82,99 |
| 15 | 2 ^a | 20,20 | 43,64 | 44,65 | 60,29 | 21,14 | 45,76 | 49,02 | 63,24 |
| 15 | 3 ^a | 14,78 | 33,93 | 35,67 | 50,56 | 15,16 | 35,14 | 37,34 | 52,40 |
| 15 | 4 ^a | 12,18 | 28,83 | 31,06 | 45,02 | 12,61 | 29,21 | 30,99 | 45,57 |
| 15 | 5 ^a | 10,91 | 26,01 | 28,88 | 42,02 | 11,14 | 25,97 | 27,36 | 41,66 |
| 15 | 6 ^a | 10,25 | 24,24 | 27,53 | 40,37 | 10,39 | 23,90 | 25,11 | 39,06 |
| 15 | 7 ^a | 9,83 | 24,02 | 27,43 | 40,08 | 10,19 | 23,06 | 24,19 | 37,73 |
| 15 | 8 ^a | 9,66 | 24,27 | 27,67 | 40,40 | 9,95 | 22,78 | 23,97 | 36,84 |
| 15 | 9 ^a | 9,62 | 24,71 | 28,33 | 41,67 | 10,10 | 22,88 | 24,35 | 37,31 |
| 15 | 10 ^a | 9,94 | 26,54 | 29,78 | 43,68 | 10,32 | 23,78 | 25,40 | 38,87 |
| 15 | 11 ^a | 10,69 | 29,12 | 32,32 | 46,91 | 11,20 | 25,86 | 27,21 | 41,30 |
| 15 | 12 ^a | 11,85 | 33,33 | 36,17 | 51,49 | 12,57 | 29,49 | 31,03 | 45,55 |
| 15 | 13 ^a | 14,17 | 40,00 | 42,42 | 57,98 | 15,21 | 34,98 | 37,32 | 52,14 |
| 15 | 14 ^a | 19,31 | 51,49 | 54,48 | 68,67 | 21,13 | 45,63 | 48,61 | 63,07 |
| 15 | 15 ^a | 39,60 | 75,90 | 78,26 | 86,39 | 42,32 | 70,65 | 74,01 | 83,04 |
| | Média | 16,23 | 36,97 | 39,57 | 53,09 | 17,05 | 35,31 | 37,32 | 50,72 |

Tabela A.9 – Percentual de permanência entre posições para estruturas com vinte alternativas – Parte A

| | | Distribuição Triangular | | | | Distribuição Uniforme | | | |
|----------|-----------------|-------------------------|-------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|-------|
| <i>n</i> | <i>posições</i> | EW | RS | RR | ROC | EW | RS | RR | ROC |
| 03 | 1 ^a | 50,81 | 69,50 | 69,93 | 72,66 | 53,85 | 73,69 | 73,78 | 76,59 |
| 03 | 2 ^a | 26,52 | 46,21 | 46,01 | 48,50 | 28,79 | 50,54 | 50,30 | 53,57 |
| 03 | 3 ^a | 18,17 | 35,84 | 35,27 | 37,25 | 19,87 | 39,89 | 39,66 | 42,41 |
| 03 | 4 ^a | 14,04 | 30,31 | 29,66 | 31,52 | 15,69 | 33,82 | 33,91 | 36,38 |
| 03 | 5 ^a | 11,91 | 26,26 | 26,27 | 28,34 | 13,51 | 30,05 | 30,17 | 32,37 |
| 03 | 6 ^a | 10,42 | 23,94 | 24,62 | 27,32 | 12,25 | 26,98 | 27,93 | 29,99 |
| 03 | 7 ^a | 9,71 | 22,64 | 23,89 | 27,48 | 11,43 | 25,57 | 26,53 | 29,14 |
| 03 | 8 ^a | 9,19 | 22,09 | 23,83 | 27,48 | 10,71 | 24,60 | 25,60 | 28,52 |
| 03 | 9 ^a | 8,74 | 21,57 | 23,56 | 27,16 | 10,41 | 23,89 | 25,24 | 28,26 |
| 03 | 10 ^a | 8,41 | 21,67 | 23,97 | 27,23 | 10,32 | 23,32 | 25,17 | 28,25 |
| 03 | 11 ^a | 8,47 | 21,68 | 23,66 | 26,76 | 10,32 | 23,49 | 25,23 | 28,12 |
| 03 | 12 ^a | 8,65 | 22,22 | 23,77 | 26,56 | 10,32 | 24,06 | 25,50 | 28,52 |
| 03 | 13 ^a | 8,95 | 22,50 | 23,62 | 26,35 | 10,65 | 24,63 | 25,52 | 28,55 |
| 03 | 14 ^a | 9,52 | 23,13 | 23,97 | 26,52 | 11,34 | 25,54 | 26,41 | 29,07 |
| 03 | 15 ^a | 10,22 | 24,71 | 24,99 | 27,04 | 12,09 | 27,25 | 27,86 | 30,22 |
| 03 | 16 ^a | 11,20 | 26,75 | 27,00 | 28,78 | 13,53 | 29,80 | 29,94 | 32,04 |
| 03 | 17 ^a | 12,72 | 30,06 | 29,75 | 32,03 | 15,85 | 33,52 | 33,54 | 36,01 |
| 03 | 18 ^a | 15,94 | 35,42 | 35,39 | 37,91 | 20,23 | 39,94 | 39,60 | 42,30 |
| 03 | 19 ^a | 22,44 | 44,60 | 44,64 | 48,40 | 28,81 | 50,41 | 50,29 | 53,45 |
| 03 | 20 ^a | 41,29 | 68,14 | 68,38 | 72,38 | 53,30 | 73,18 | 73,61 | 76,57 |
| | Média | 15,87 | 31,96 | 32,61 | 35,38 | 18,66 | 35,21 | 35,79 | 38,52 |
| 06 | 1 ^a | 44,54 | 73,62 | 76,89 | 80,16 | 45,08 | 72,47 | 75,30 | 78,76 |
| 06 | 2 ^a | 21,83 | 49,45 | 53,01 | 58,23 | 22,22 | 48,54 | 50,72 | 55,92 |
| 06 | 3 ^a | 15,76 | 38,89 | 41,62 | 47,07 | 15,26 | 37,39 | 39,59 | 44,43 |
| 06 | 4 ^a | 13,09 | 32,95 | 35,10 | 40,09 | 12,35 | 31,15 | 32,86 | 37,74 |
| 06 | 5 ^a | 11,35 | 29,22 | 31,29 | 35,82 | 10,70 | 27,02 | 29,01 | 33,20 |
| 06 | 6 ^a | 10,54 | 26,44 | 28,92 | 33,33 | 9,58 | 24,84 | 26,40 | 30,19 |
| 06 | 7 ^a | 9,90 | 24,88 | 27,53 | 31,47 | 9,04 | 22,89 | 24,85 | 28,47 |
| 06 | 8 ^a | 9,57 | 23,94 | 26,83 | 30,64 | 8,43 | 21,58 | 23,86 | 27,22 |
| 06 | 9 ^a | 9,21 | 23,03 | 26,43 | 29,86 | 8,41 | 21,18 | 22,94 | 25,93 |
| 06 | 10 ^a | 9,17 | 22,97 | 26,47 | 29,56 | 8,06 | 20,65 | 22,90 | 25,68 |
| 06 | 11 ^a | 9,27 | 23,34 | 26,33 | 29,48 | 8,17 | 20,74 | 22,78 | 25,88 |
| 06 | 12 ^a | 9,62 | 23,92 | 26,29 | 29,94 | 8,05 | 21,00 | 23,22 | 26,33 |
| 06 | 13 ^a | 9,93 | 25,22 | 27,07 | 30,59 | 8,52 | 21,84 | 23,68 | 27,02 |
| 06 | 14 ^a | 10,55 | 26,41 | 28,20 | 32,36 | 8,85 | 22,82 | 24,92 | 28,11 |
| 06 | 15 ^a | 11,64 | 28,73 | 30,00 | 34,32 | 9,59 | 24,55 | 26,28 | 30,13 |
| 06 | 16 ^a | 13,25 | 31,92 | 32,94 | 37,66 | 10,73 | 27,28 | 29,10 | 33,36 |
| 06 | 17 ^a | 15,45 | 35,83 | 37,11 | 41,98 | 12,33 | 31,01 | 33,17 | 37,92 |
| 06 | 18 ^a | 19,46 | 41,30 | 43,86 | 48,47 | 15,37 | 37,27 | 39,52 | 44,66 |
| 06 | 19 ^a | 27,34 | 51,00 | 54,11 | 58,58 | 22,14 | 48,42 | 50,85 | 56,03 |
| 06 | 20 ^a | 51,25 | 73,21 | 76,67 | 79,46 | 45,43 | 72,98 | 75,40 | 78,88 |
| | Média | 16,64 | 35,31 | 37,83 | 41,95 | 14,92 | 32,78 | 34,87 | 38,79 |

Tabela A.10 – Percentual de permanência entre posições para estruturas com vinte alternativas – Parte B

| | | Distribuição Triangular | | | | Distribuição Uniforme | | | |
|----------|-----------------|-------------------------|-------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|-------|
| <i>n</i> | <i>posições</i> | EW | RS | RR | ROC | EW | RS | RR | ROC |
| 09 | 1 ^a | 39,18 | 72,04 | 76,26 | 80,57 | 42,19 | 71,42 | 75,39 | 80,47 |
| 09 | 2 ^a | 18,43 | 46,51 | 51,65 | 58,52 | 20,43 | 46,58 | 50,81 | 58,54 |
| 09 | 3 ^a | 12,77 | 35,04 | 39,83 | 46,94 | 14,34 | 35,53 | 38,76 | 46,67 |
| 09 | 4 ^a | 10,68 | 28,72 | 33,26 | 39,92 | 11,65 | 29,48 | 31,97 | 39,42 |
| 09 | 5 ^a | 9,22 | 25,02 | 28,62 | 34,93 | 10,00 | 25,22 | 27,91 | 34,76 |
| 09 | 6 ^a | 8,55 | 22,53 | 25,80 | 31,86 | 9,05 | 22,91 | 25,36 | 31,42 |
| 09 | 7 ^a | 7,93 | 20,83 | 23,70 | 29,06 | 8,49 | 21,26 | 23,57 | 29,29 |
| 09 | 8 ^a | 7,72 | 20,17 | 22,53 | 27,52 | 8,06 | 20,04 | 22,49 | 28,03 |
| 09 | 9 ^a | 7,28 | 19,07 | 21,27 | 26,32 | 7,80 | 19,23 | 21,86 | 27,16 |
| 09 | 10 ^a | 7,46 | 18,92 | 20,77 | 26,05 | 7,68 | 19,07 | 21,19 | 26,43 |
| 09 | 11 ^a | 7,35 | 18,84 | 20,72 | 25,69 | 7,66 | 19,27 | 21,29 | 26,77 |
| 09 | 12 ^a | 7,47 | 19,09 | 21,04 | 26,24 | 7,76 | 19,65 | 21,78 | 27,34 |
| 09 | 13 ^a | 7,75 | 19,65 | 21,51 | 27,34 | 7,98 | 20,27 | 22,42 | 28,11 |
| 09 | 14 ^a | 8,14 | 20,68 | 22,48 | 28,59 | 8,59 | 21,46 | 23,75 | 29,60 |
| 09 | 15 ^a | 8,95 | 22,05 | 23,87 | 30,55 | 8,91 | 23,03 | 25,53 | 31,73 |
| 09 | 16 ^a | 9,70 | 24,08 | 26,66 | 33,75 | 10,11 | 25,47 | 28,14 | 34,73 |
| 09 | 17 ^a | 11,28 | 27,54 | 30,70 | 38,04 | 11,46 | 29,17 | 32,13 | 39,41 |
| 09 | 18 ^a | 13,62 | 33,20 | 37,04 | 44,60 | 14,23 | 35,25 | 38,71 | 46,31 |
| 09 | 19 ^a | 19,37 | 43,62 | 48,32 | 55,93 | 20,26 | 46,60 | 50,72 | 58,16 |
| 09 | 20 ^a | 39,65 | 68,71 | 73,38 | 78,65 | 42,41 | 71,60 | 75,35 | 80,22 |
| | Média | 13,13 | 30,32 | 33,47 | 39,55 | 13,95 | 31,13 | 33,96 | 40,23 |
| 12 | 1 ^a | 42,03 | 72,11 | 75,50 | 81,97 | 40,78 | 70,25 | 74,40 | 81,44 |
| 12 | 2 ^a | 20,17 | 47,54 | 50,85 | 61,11 | 19,42 | 44,82 | 48,82 | 59,77 |
| 12 | 3 ^a | 14,15 | 36,41 | 39,27 | 49,87 | 13,78 | 33,84 | 37,09 | 48,03 |
| 12 | 4 ^a | 11,37 | 30,00 | 32,49 | 42,99 | 11,21 | 27,95 | 30,67 | 40,99 |
| 12 | 5 ^a | 9,70 | 26,01 | 28,51 | 38,27 | 9,78 | 23,98 | 26,48 | 36,21 |
| 12 | 6 ^a | 8,94 | 23,71 | 26,12 | 35,14 | 8,89 | 21,67 | 24,03 | 32,82 |
| 12 | 7 ^a | 8,14 | 21,92 | 24,76 | 33,16 | 8,40 | 20,14 | 21,95 | 30,76 |
| 12 | 8 ^a | 7,84 | 20,84 | 23,87 | 31,76 | 7,73 | 18,93 | 20,68 | 29,08 |
| 12 | 9 ^a | 7,68 | 20,10 | 23,12 | 30,86 | 7,69 | 18,41 | 20,17 | 28,47 |
| 12 | 10 ^a | 7,43 | 19,47 | 22,99 | 30,58 | 7,72 | 18,05 | 19,88 | 27,83 |
| 12 | 11 ^a | 7,43 | 19,60 | 23,15 | 30,44 | 7,54 | 18,17 | 19,76 | 27,77 |
| 12 | 12 ^a | 7,68 | 19,77 | 23,11 | 30,91 | 7,52 | 18,44 | 20,19 | 28,34 |
| 12 | 13 ^a | 7,92 | 20,33 | 23,68 | 31,75 | 7,92 | 19,02 | 20,83 | 29,13 |
| 12 | 14 ^a | 8,25 | 21,42 | 24,12 | 32,56 | 8,22 | 20,01 | 21,95 | 30,58 |
| 12 | 15 ^a | 8,77 | 22,93 | 25,62 | 34,57 | 8,98 | 21,78 | 23,67 | 32,98 |
| 12 | 16 ^a | 9,67 | 25,27 | 27,53 | 37,03 | 9,71 | 23,84 | 26,47 | 36,37 |
| 12 | 17 ^a | 11,00 | 28,89 | 31,19 | 41,22 | 11,04 | 27,53 | 30,63 | 40,91 |
| 12 | 18 ^a | 13,53 | 34,82 | 37,09 | 47,66 | 13,74 | 33,70 | 37,21 | 48,09 |
| 12 | 19 ^a | 19,34 | 45,64 | 48,25 | 59,04 | 19,31 | 44,82 | 49,02 | 59,51 |
| 12 | 20 ^a | 41,57 | 70,72 | 73,14 | 80,40 | 40,75 | 70,21 | 74,06 | 80,96 |
| | Média | 13,63 | 31,38 | 34,22 | 43,06 | 13,51 | 29,78 | 32,40 | 41,50 |

Tabela A.11 – Percentual de permanência entre posições para estruturas com vinte alternativas – Parte C

| | | Distribuição Triangular | | | | Distribuição Uniforme | | | |
|----------|-----------------|-------------------------|-------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|-------|
| <i>n</i> | <i>posições</i> | EW | RS | RR | ROC | EW | RS | RR | ROC |
| 15 | 1 ^a | 29,00 | 66,08 | 70,55 | 80,58 | 39,88 | 69,34 | 72,68 | 82,20 |
| 15 | 2 ^a | 15,04 | 40,48 | 45,41 | 59,53 | 19,10 | 43,85 | 46,78 | 61,10 |
| 15 | 3 ^a | 11,40 | 30,48 | 35,09 | 48,74 | 13,41 | 32,61 | 34,93 | 49,59 |
| 15 | 4 ^a | 9,97 | 25,82 | 29,58 | 42,42 | 10,87 | 26,76 | 28,45 | 42,54 |
| 15 | 5 ^a | 8,83 | 22,73 | 25,91 | 38,13 | 9,55 | 22,92 | 24,19 | 37,54 |
| 15 | 6 ^a | 8,22 | 20,73 | 23,90 | 35,47 | 8,64 | 20,75 | 21,93 | 34,24 |
| 15 | 7 ^a | 7,63 | 19,48 | 22,67 | 33,56 | 8,07 | 19,07 | 20,14 | 31,89 |
| 15 | 8 ^a | 7,38 | 18,74 | 21,26 | 32,45 | 7,86 | 18,19 | 18,86 | 30,64 |
| 15 | 9 ^a | 7,23 | 18,58 | 20,98 | 32,17 | 7,62 | 17,51 | 18,36 | 29,68 |
| 15 | 10 ^a | 6,90 | 18,54 | 20,29 | 31,73 | 7,56 | 17,19 | 17,94 | 29,14 |
| 15 | 11 ^a | 6,99 | 18,53 | 20,24 | 32,23 | 7,36 | 17,36 | 17,95 | 28,91 |
| 15 | 12 ^a | 7,11 | 19,07 | 20,17 | 32,49 | 7,58 | 17,42 | 18,24 | 29,44 |
| 15 | 13 ^a | 7,41 | 20,07 | 20,58 | 33,27 | 7,79 | 18,15 | 19,01 | 30,36 |
| 15 | 14 ^a | 7,83 | 20,90 | 21,66 | 34,48 | 8,09 | 19,15 | 20,22 | 31,67 |
| 15 | 15 ^a | 8,34 | 22,11 | 22,52 | 36,40 | 8,81 | 20,62 | 21,67 | 34,16 |
| 15 | 16 ^a | 9,13 | 24,41 | 24,82 | 39,06 | 9,73 | 22,79 | 24,43 | 37,56 |
| 15 | 17 ^a | 10,68 | 27,85 | 28,21 | 43,16 | 10,90 | 26,75 | 28,34 | 42,48 |
| 15 | 18 ^a | 13,33 | 33,39 | 34,16 | 49,85 | 13,45 | 32,34 | 34,97 | 49,63 |
| 15 | 19 ^a | 18,63 | 44,37 | 45,44 | 61,02 | 19,28 | 43,68 | 47,01 | 61,37 |
| 15 | 20 ^a | 38,93 | 69,79 | 71,16 | 81,82 | 39,78 | 69,43 | 72,75 | 82,21 |
| | Média | 12,00 | 29,11 | 31,23 | 43,93 | 13,27 | 28,79 | 30,44 | 42,82 |

Tabela A.12 – Percentual de permanência entre posições para estruturas com 25 alternativas – Parte A

| | | Distribuição Triangular | | | | Distribuição Uniforme | | | |
|----------|-----------------|-------------------------|-------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|-------|
| <i>n</i> | <i>posições</i> | EW | RS | RR | ROC | EW | RS | RR | ROC |
| 03 | 1 ^a | 56,75 | 79,19 | 79,20 | 81,99 | 52,66 | 72,60 | 72,94 | 75,93 |
| 03 | 2 ^a | 29,90 | 55,66 | 55,46 | 59,56 | 27,82 | 49,11 | 49,09 | 52,32 |
| 03 | 3 ^a | 20,57 | 43,11 | 42,99 | 46,27 | 19,35 | 38,11 | 37,96 | 40,81 |
| 03 | 4 ^a | 15,76 | 35,41 | 35,38 | 38,11 | 15,26 | 32,00 | 31,60 | 34,19 |
| 03 | 5 ^a | 13,04 | 30,77 | 30,44 | 33,27 | 12,58 | 27,66 | 27,58 | 29,90 |
| 03 | 6 ^a | 11,40 | 27,07 | 27,08 | 29,73 | 11,07 | 25,13 | 25,06 | 27,17 |
| 03 | 7 ^a | 10,21 | 24,74 | 25,05 | 27,55 | 9,96 | 23,25 | 23,32 | 25,39 |
| 03 | 8 ^a | 9,38 | 22,79 | 23,17 | 25,68 | 9,39 | 21,76 | 22,31 | 24,40 |
| 03 | 9 ^a | 8,85 | 21,61 | 22,17 | 24,76 | 8,98 | 20,78 | 21,55 | 24,05 |
| 03 | 10 ^a | 8,44 | 20,72 | 21,32 | 24,39 | 8,57 | 19,92 | 21,01 | 24,05 |
| 03 | 11 ^a | 8,05 | 20,48 | 21,17 | 24,10 | 8,36 | 19,34 | 20,73 | 23,53 |
| 03 | 12 ^a | 7,87 | 20,00 | 21,03 | 24,15 | 8,36 | 19,12 | 20,61 | 23,50 |
| 03 | 13 ^a | 7,80 | 19,78 | 20,93 | 24,12 | 8,28 | 18,85 | 20,61 | 23,42 |
| 03 | 14 ^a | 7,68 | 20,00 | 21,12 | 24,15 | 8,20 | 19,05 | 20,53 | 23,47 |
| 03 | 15 ^a | 7,98 | 20,24 | 21,47 | 24,29 | 8,40 | 19,32 | 20,75 | 23,51 |
| 03 | 16 ^a | 8,07 | 20,57 | 21,74 | 24,61 | 8,64 | 19,89 | 20,92 | 23,62 |
| 03 | 17 ^a | 8,51 | 21,49 | 22,31 | 25,11 | 8,97 | 20,74 | 21,71 | 24,09 |
| 03 | 18 ^a | 8,96 | 22,68 | 22,95 | 25,70 | 9,35 | 21,73 | 22,27 | 24,38 |
| 03 | 19 ^a | 9,59 | 23,67 | 24,07 | 26,64 | 10,15 | 23,16 | 23,45 | 25,54 |
| 03 | 20 ^a | 10,68 | 25,70 | 25,59 | 28,20 | 10,94 | 25,13 | 25,31 | 27,37 |
| 03 | 21 ^a | 12,19 | 28,48 | 28,31 | 31,02 | 12,51 | 27,91 | 27,77 | 30,02 |
| 03 | 22 ^a | 14,41 | 32,00 | 31,69 | 34,90 | 14,96 | 31,96 | 31,61 | 34,27 |
| 03 | 23 ^a | 18,77 | 38,16 | 37,73 | 41,09 | 19,27 | 38,05 | 37,88 | 40,59 |
| 03 | 24 ^a | 27,42 | 47,98 | 47,76 | 51,27 | 28,10 | 49,14 | 48,89 | 51,96 |
| 03 | 25 ^a | 51,76 | 70,78 | 70,74 | 74,26 | 52,76 | 72,48 | 72,55 | 75,63 |
| | Média | 15,76 | 31,72 | 32,03 | 35,00 | 15,72 | 30,25 | 30,72 | 33,32 |

Tabela A.13 – Percentual de permanência entre posições para estruturas com 25 alternativas – Parte B

| | | Distribuição Triangular | | | | Distribuição Uniforme | | | |
|----------|-----------------|-------------------------|-------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|-------|
| <i>n</i> | <i>posições</i> | EW | RS | RR | ROC | EW | RS | RR | ROC |
| 06 | 1 ^a | 45,53 | 74,02 | 75,78 | 79,02 | 43,65 | 71,79 | 74,30 | 77,98 |
| 06 | 2 ^a | 21,68 | 49,32 | 50,97 | 56,07 | 20,79 | 47,19 | 49,19 | 54,94 |
| 06 | 3 ^a | 15,04 | 37,67 | 39,19 | 44,32 | 14,36 | 35,64 | 37,82 | 42,76 |
| 06 | 4 ^a | 12,12 | 30,68 | 32,78 | 37,13 | 11,35 | 29,27 | 31,06 | 35,68 |
| 06 | 5 ^a | 10,41 | 26,29 | 28,25 | 32,27 | 9,54 | 25,39 | 26,88 | 30,96 |
| 06 | 6 ^a | 9,06 | 23,59 | 25,21 | 29,23 | 8,62 | 22,36 | 23,99 | 27,75 |
| 06 | 7 ^a | 8,43 | 21,31 | 23,21 | 26,46 | 7,73 | 20,56 | 21,99 | 25,44 |
| 06 | 8 ^a | 7,76 | 19,46 | 21,43 | 24,48 | 7,32 | 19,17 | 20,66 | 24,08 |
| 06 | 9 ^a | 7,37 | 18,48 | 20,00 | 23,14 | 6,89 | 18,34 | 19,64 | 22,83 |
| 06 | 10 ^a | 7,25 | 17,35 | 18,97 | 21,52 | 6,84 | 17,58 | 19,11 | 22,03 |
| 06 | 11 ^a | 7,04 | 16,84 | 18,39 | 21,02 | 6,64 | 17,15 | 18,56 | 21,26 |
| 06 | 12 ^a | 7,03 | 16,45 | 17,93 | 20,21 | 6,44 | 16,81 | 18,18 | 20,83 |
| 06 | 13 ^a | 7,10 | 16,28 | 17,57 | 19,81 | 6,52 | 16,60 | 18,03 | 20,87 |
| 06 | 14 ^a | 7,13 | 16,31 | 17,34 | 19,46 | 6,51 | 16,81 | 18,30 | 20,79 |
| 06 | 15 ^a | 7,06 | 16,50 | 17,38 | 19,64 | 6,51 | 16,85 | 18,56 | 21,29 |
| 06 | 16 ^a | 7,42 | 17,06 | 17,68 | 19,86 | 6,75 | 17,49 | 19,00 | 21,90 |
| 06 | 17 ^a | 7,57 | 17,71 | 18,68 | 20,86 | 7,07 | 18,18 | 19,60 | 22,86 |
| 06 | 18 ^a | 7,94 | 18,50 | 19,28 | 21,99 | 7,37 | 19,23 | 20,57 | 23,97 |
| 06 | 19 ^a | 8,52 | 20,11 | 20,52 | 23,60 | 7,84 | 20,44 | 21,87 | 25,53 |
| 06 | 20 ^a | 9,36 | 22,05 | 22,67 | 26,26 | 8,55 | 22,59 | 23,73 | 27,37 |
| 06 | 21 ^a | 10,62 | 25,02 | 26,01 | 29,84 | 9,49 | 25,25 | 26,79 | 30,83 |
| 06 | 22 ^a | 12,78 | 29,34 | 30,60 | 34,91 | 11,32 | 29,42 | 31,06 | 35,71 |
| 06 | 23 ^a | 16,43 | 36,50 | 38,16 | 42,87 | 14,30 | 35,54 | 37,82 | 42,96 |
| 06 | 24 ^a | 24,83 | 48,57 | 50,74 | 55,22 | 20,88 | 46,89 | 49,49 | 54,67 |
| 06 | 25 ^a | 51,38 | 73,32 | 75,69 | 78,55 | 43,86 | 71,72 | 74,23 | 77,94 |
| | Média | 13,47 | 28,35 | 29,78 | 33,11 | 12,29 | 27,93 | 29,62 | 33,33 |
| 09 | 1 ^a | 37,61 | 68,81 | 74,82 | 79,46 | 40,82 | 70,63 | 74,59 | 79,50 |
| 09 | 2 ^a | 18,41 | 43,46 | 48,88 | 56,28 | 18,99 | 45,25 | 49,25 | 56,92 |
| 09 | 3 ^a | 13,01 | 32,77 | 35,63 | 43,60 | 13,21 | 34,01 | 37,02 | 44,86 |
| 09 | 4 ^a | 10,50 | 26,59 | 28,22 | 35,57 | 10,67 | 27,63 | 30,21 | 37,42 |
| 09 | 5 ^a | 9,14 | 22,54 | 23,75 | 30,59 | 9,01 | 23,68 | 25,76 | 32,36 |
| 09 | 6 ^a | 8,02 | 20,04 | 20,86 | 26,89 | 8,06 | 21,13 | 23,19 | 29,02 |
| 09 | 7 ^a | 7,58 | 18,26 | 19,11 | 24,47 | 7,58 | 19,20 | 21,15 | 26,70 |
| 09 | 8 ^a | 7,08 | 16,92 | 17,62 | 23,03 | 6,99 | 17,84 | 19,70 | 24,77 |
| 09 | 9 ^a | 6,66 | 16,15 | 16,87 | 21,71 | 6,73 | 17,04 | 18,72 | 23,60 |
| 09 | 10 ^a | 6,52 | 15,53 | 16,23 | 20,71 | 6,45 | 16,59 | 18,15 | 22,74 |
| 09 | 11 ^a | 6,28 | 15,04 | 16,10 | 20,38 | 6,20 | 15,80 | 17,73 | 22,20 |
| 09 | 12 ^a | 6,21 | 14,98 | 16,14 | 20,13 | 6,10 | 15,71 | 17,41 | 21,68 |
| 09 | 13 ^a | 6,17 | 14,53 | 16,29 | 20,27 | 6,17 | 15,56 | 17,39 | 21,47 |
| 09 | 14 ^a | 6,20 | 14,65 | 16,57 | 20,54 | 6,18 | 15,44 | 17,63 | 21,69 |
| 09 | 15 ^a | 6,18 | 14,83 | 16,95 | 21,12 | 6,17 | 15,91 | 17,54 | 21,96 |
| 09 | 16 ^a | 6,39 | 15,29 | 17,36 | 21,65 | 6,31 | 16,19 | 17,98 | 22,53 |
| 09 | 17 ^a | 6,57 | 15,82 | 18,35 | 22,86 | 6,50 | 16,71 | 18,70 | 23,57 |
| 09 | 18 ^a | 7,04 | 17,02 | 19,16 | 24,41 | 6,92 | 17,87 | 19,97 | 24,76 |
| 09 | 19 ^a | 7,37 | 18,34 | 21,00 | 26,00 | 7,52 | 19,17 | 21,14 | 26,59 |
| 09 | 20 ^a | 8,00 | 20,48 | 23,15 | 28,74 | 8,00 | 21,01 | 22,91 | 28,98 |
| 09 | 21 ^a | 8,96 | 23,19 | 26,13 | 32,47 | 8,86 | 23,63 | 25,79 | 32,54 |
| 09 | 22 ^a | 10,20 | 27,56 | 30,94 | 37,99 | 10,49 | 27,46 | 30,23 | 37,26 |
| 09 | 23 ^a | 12,87 | 34,88 | 39,32 | 46,77 | 13,01 | 33,89 | 36,75 | 44,65 |
| 09 | 24 ^a | 19,03 | 48,38 | 53,26 | 60,47 | 19,09 | 45,30 | 49,12 | 56,95 |
| 09 | 25 ^a | 41,84 | 75,38 | 79,02 | 83,15 | 40,41 | 70,52 | 74,22 | 79,50 |
| | Média | 11,35 | 26,06 | 28,47 | 33,97 | 11,46 | 26,53 | 28,89 | 34,57 |

Tabela A.14 – Percentual de permanência entre posições para estruturas com 25 alternativas – Parte C

| | | Distribuição Triangular | | | | Distribuição Uniforme | | | |
|----------|-----------------|-------------------------|-------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|-------|
| <i>n</i> | <i>posições</i> | EW | RS | RR | ROC | EW | RS | RR | ROC |
| 12 | 1 ^a | 30,51 | 59,56 | 70,18 | 76,62 | 39,03 | 69,28 | 73,45 | 80,54 |
| 12 | 2 ^a | 14,18 | 35,00 | 44,53 | 53,25 | 18,39 | 43,66 | 47,72 | 58,48 |
| 12 | 3 ^a | 10,20 | 26,09 | 33,25 | 42,04 | 12,68 | 32,40 | 35,65 | 46,38 |
| 12 | 4 ^a | 8,45 | 20,98 | 27,14 | 35,38 | 10,19 | 26,20 | 28,62 | 39,10 |
| 12 | 5 ^a | 7,11 | 18,12 | 23,20 | 30,58 | 8,64 | 22,46 | 24,58 | 34,18 |
| 12 | 6 ^a | 6,69 | 16,07 | 20,33 | 27,13 | 7,68 | 19,86 | 21,39 | 30,43 |
| 12 | 7 ^a | 6,23 | 14,91 | 18,55 | 25,03 | 7,38 | 18,12 | 19,54 | 28,00 |
| 12 | 8 ^a | 5,83 | 13,99 | 17,08 | 23,34 | 6,75 | 16,70 | 18,44 | 26,27 |
| 12 | 9 ^a | 5,56 | 13,38 | 16,03 | 22,06 | 6,46 | 15,98 | 17,13 | 24,78 |
| 12 | 10 ^a | 5,35 | 12,85 | 15,32 | 21,23 | 6,30 | 15,26 | 16,44 | 24,01 |
| 12 | 11 ^a | 5,30 | 12,41 | 14,76 | 20,60 | 6,02 | 14,95 | 16,25 | 23,05 |
| 12 | 12 ^a | 5,09 | 12,36 | 14,77 | 20,54 | 6,05 | 14,56 | 15,67 | 22,84 |
| 12 | 13 ^a | 5,19 | 12,46 | 14,73 | 20,25 | 5,94 | 14,59 | 15,95 | 22,51 |
| 12 | 14 ^a | 5,26 | 12,57 | 14,74 | 20,67 | 6,01 | 14,53 | 16,03 | 22,87 |
| 12 | 15 ^a | 5,28 | 12,87 | 15,30 | 21,15 | 6,04 | 14,67 | 16,15 | 23,11 |
| 12 | 16 ^a | 5,35 | 13,15 | 15,80 | 21,70 | 6,26 | 15,15 | 16,75 | 23,88 |
| 12 | 17 ^a | 5,77 | 13,66 | 16,35 | 22,67 | 6,36 | 15,84 | 17,25 | 24,62 |
| 12 | 18 ^a | 5,96 | 14,50 | 17,76 | 23,99 | 6,90 | 16,78 | 18,23 | 25,84 |
| 12 | 19 ^a | 6,42 | 15,85 | 18,91 | 25,77 | 7,39 | 17,93 | 19,64 | 27,80 |
| 12 | 20 ^a | 7,05 | 17,29 | 20,71 | 28,31 | 7,76 | 19,69 | 21,60 | 30,13 |
| 12 | 21 ^a | 7,81 | 20,11 | 23,40 | 31,66 | 8,54 | 22,22 | 24,41 | 33,67 |
| 12 | 22 ^a | 9,27 | 24,15 | 27,95 | 37,08 | 10,18 | 25,87 | 28,66 | 39,03 |
| 12 | 23 ^a | 12,17 | 31,16 | 35,71 | 45,64 | 12,76 | 32,13 | 35,51 | 46,44 |
| 12 | 24 ^a | 19,42 | 45,60 | 50,24 | 60,23 | 18,17 | 43,57 | 47,63 | 58,26 |
| 12 | 25 ^a | 50,35 | 74,87 | 78,18 | 83,51 | 38,82 | 69,31 | 73,39 | 80,57 |
| | Média | 10,23 | 22,56 | 26,60 | 33,62 | 11,07 | 25,27 | 27,44 | 35,87 |
| 15 | 1 ^a | 40,34 | 68,29 | 69,64 | 80,61 | 38,06 | 68,26 | 71,69 | 81,52 |
| 15 | 2 ^a | 18,21 | 41,74 | 42,71 | 57,89 | 17,78 | 42,35 | 45,81 | 59,99 |
| 15 | 3 ^a | 12,68 | 30,60 | 30,58 | 45,38 | 12,32 | 31,23 | 33,61 | 47,83 |
| 15 | 4 ^a | 9,98 | 24,43 | 24,26 | 37,52 | 10,05 | 25,03 | 26,93 | 40,13 |
| 15 | 5 ^a | 8,66 | 20,48 | 20,03 | 32,55 | 8,55 | 21,18 | 22,84 | 35,18 |
| 15 | 6 ^a | 7,74 | 18,31 | 17,85 | 28,88 | 7,86 | 18,95 | 20,22 | 31,61 |
| 15 | 7 ^a | 6,98 | 16,33 | 16,06 | 26,39 | 7,14 | 17,35 | 18,29 | 29,21 |
| 15 | 8 ^a | 6,73 | 15,23 | 15,21 | 24,77 | 6,62 | 16,14 | 16,88 | 27,29 |
| 15 | 9 ^a | 6,43 | 14,19 | 14,29 | 23,48 | 6,30 | 14,87 | 15,87 | 25,86 |
| 15 | 10 ^a | 6,15 | 13,85 | 13,77 | 22,53 | 6,07 | 14,53 | 15,19 | 24,85 |
| 15 | 11 ^a | 6,07 | 13,48 | 13,58 | 22,09 | 6,06 | 14,14 | 14,73 | 24,14 |
| 15 | 12 ^a | 5,96 | 13,32 | 13,42 | 21,77 | 5,96 | 13,81 | 14,59 | 23,61 |
| 15 | 13 ^a | 5,95 | 13,46 | 13,59 | 22,14 | 5,89 | 13,74 | 14,42 | 23,73 |
| 15 | 14 ^a | 5,90 | 13,64 | 13,41 | 22,37 | 5,90 | 13,91 | 14,51 | 23,87 |
| 15 | 15 ^a | 6,11 | 13,85 | 14,03 | 23,16 | 5,96 | 14,42 | 14,90 | 23,91 |
| 15 | 16 ^a | 6,14 | 14,22 | 14,61 | 24,27 | 6,15 | 14,39 | 15,31 | 24,63 |
| 15 | 17 ^a | 6,24 | 15,03 | 15,51 | 25,21 | 6,45 | 15,07 | 15,88 | 25,83 |
| 15 | 18 ^a | 6,77 | 16,15 | 16,92 | 27,26 | 6,76 | 16,04 | 16,99 | 26,99 |
| 15 | 19 ^a | 7,08 | 17,64 | 18,24 | 29,58 | 7,22 | 17,14 | 18,08 | 29,09 |
| 15 | 20 ^a | 7,68 | 19,85 | 20,47 | 32,58 | 7,74 | 18,66 | 19,89 | 31,58 |
| 15 | 21 ^a | 8,67 | 22,45 | 23,64 | 36,34 | 8,61 | 21,20 | 22,78 | 34,88 |
| 15 | 22 ^a | 10,19 | 26,63 | 28,16 | 41,69 | 9,90 | 24,99 | 26,91 | 40,21 |
| 15 | 23 ^a | 12,52 | 33,23 | 35,09 | 49,24 | 12,25 | 31,02 | 33,71 | 47,74 |
| 15 | 24 ^a | 17,99 | 44,84 | 47,03 | 60,96 | 17,46 | 42,12 | 45,91 | 59,79 |
| 15 | 25 ^a | 39,19 | 70,84 | 73,01 | 82,20 | 37,91 | 68,50 | 72,00 | 81,60 |
| | Média | 11,05 | 24,48 | 25,00 | 36,03 | 10,84 | 24,36 | 25,92 | 37,00 |