



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

ADRIANA CAVALCANTE MARQUES

**SELEÇÃO DE PORTFÓLIO DE PROJETOS COM MÉTODO FITRADEOFF: uma
abordagem considerando análise combinatorial**

Recife
2024

ADRIANA CAVALCANTE MARQUES

**SELEÇÃO DE PORTFÓLIO DE PROJETOS COM MÉTODO FITRADEOFF: uma
abordagem considerando análise combinatorial**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Pesquisa Operacional.

Orientador: Prof. Dr. Adiel Teixeira de Almeida.

Coorientador: Prof. Dra. Eduarda Asfora Frej.

Recife

2024

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

| | |
|-------|---|
| M357s | <p>Marques, Adriana Cavalcante. Seleção de portfólio de projetos com método FITradeoff: uma abordagem considerando análise combinatorial / Adriana Cavalcante Marques. – 2024. 106 f.: il., fig., tab. e siglas.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Adiel Teixeira de Almeida. Coorientadora: Profa. Dra. Eduarda Asfora Frej. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2024. Inclui Referências e Apêndice.</p> <p>1. Engenharia de Produção. 2. Análise de decisão de portfólio. 3. Apoio à decisão multicritério. 4. FITradeoff. 5. Informações parciais. 6. Metaheurísticas. 7. Problema de portfólio de projetos. I. Almeida, Adiel Teixeira de (Orientador). II. Frej, Eduarda Asfora (Coorientadora). III. Título.</p> <p style="text-align: right;">UFPE</p> <p>658.5 CDD (22. ed.) BCTG/2024-64</p> |
|-------|---|

ADRIANA CAVALCANTE MARQUES

**SELEÇÃO DE PORTFÓLIO DE PROJETOS COM MÉTODO FITRADEOFF: uma
abordagem considerando análise combinatorial**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção. Área de Concentração: Pesquisa Operacional.

Aprovada em: 12/03/2024.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Eduarda Asfora Frej (Coorientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Profa. Dra. Ana Paula Cabral Seixas Costa (Examinadora interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Profa. Dra. Luciana Hazin Alencar (Examinadora interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Eduardo de Freitas Rocha Loures (Examinador externo)
Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Profa. Dra. Mariana Rodrigues de Almeida (Examinadora externa)
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

AGRADECIMENTOS

À Deus, fonte de força e sabedoria, por guiar meus passos durante essa jornada desafiadora.

Ao meu marido, Rafael, meu maior apoio e companheiro incansável, obrigada por me incentivar e impulsionar em todos os desafios que me proponho, e não só isso, por entrar de cabeça comigo em todos os projetos e ser, ainda, o meu porto seguro. E à nossa bolinha de pelos e amor, a Zoe, que trouxe alegria aos dias mais intensos.

À minha família, base fundamental em minha vida, agradeço aos meus pais, Vera e Faule, pelo amor incondicional, ao meu irmão, André, pela parceria constante e às minhas tias pelo suporte emocional valioso. Cada um de vocês desempenhou um papel crucial na minha trajetória acadêmica e pessoal.

Aos meus orientadores, Professor Adiel e Professora Eduarda, expresso minha gratidão pela orientação dedicada, pelo incentivo constante e pelos insights valiosos que moldaram meu trabalho. Seu comprometimento com a excelência acadêmica foi inspirador. Estendo minha gratidão aos demais professores do PPGEP e membros da banca, por dedicarem parte do seu tempo para contribuir com meu desenvolvimento acadêmico.

Aos amigos do PPGEP, compartilho meu reconhecimento pelo companheirismo, pelo compartilhamento de conhecimento e pelo apoio mútuo ao longo desses anos, sem essa divisão da carga emocional com vocês esse processo teria sido muito mais difícil. Em especial às meninas, Ana Clara e Lívia, que compartilharam comigo não só as alegrias e angústias, mas também a convivência diária. E ao meu amigo, Manoel, que esteve comigo durante toda essa jornada, muito obrigada por sua leveza, seu tempo, sua ajuda e sua amizade.

E aos meus amigos da vida, que estiveram ao meu lado nos momentos bons e desafiadores, meu mais sincero obrigado por se fazerem sempre presentes independente da distância física.

Este caminho de pesquisa e descoberta foi enriquecido pela presença de cada um de vocês. Agradeço por fazerem parte desta jornada e por contribuírem para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

“There are no solutions, only trade-offs.”

(Thomas Sowell)

RESUMO

O atual cenário global, marcado por escassez de recursos, incertezas e desafios na gestão de múltiplos critérios, frequentemente está associado à complexidade da seleção de portfólios de projetos. A geração eficiente de portfólios que otimizem o uso de recursos e alcancem os objetivos estratégicos é uma tarefa complexa. Este trabalho apresenta uma nova proposta para o método flexível e interativo FITradeoff na análise de decisão de portfólio, com uso de informações parciais sobre as preferências dos decisores. Neste contexto, duas abordagens foram propostas. A primeira envolve a geração explícita de portfólios, enquanto a segunda utiliza metaheurísticas para otimizar o processo de geração de portfólios. A primeira abordagem proposta utiliza especificamente o conceito de portfólios c-ótimos e estratégias de refinamento de viabilidade e eficiência durante o processo de geração de um portfólio, procurando manter tanto o esforço computacional quanto o cognitivo dentro de limites razoáveis. Essa tese também propõe uma metaheurística para reduzir o espaço de soluções ao gerar portfólios de projetos viáveis e eficientes incorporando as preferências do tomador de decisões. A abordagem do FITradeoff para portfólio combinatório é incorporada a um Sistema de Apoio à Decisão (SAD). A capacidade de operar via SAD, desenvolvido como parte integrante desta tese, destaca-se como uma contribuição significativa, proporcionando uma implementação prática dos métodos propostos. Os resultados compartilham evidências relevantes, demonstrando que, computacionalmente, o uso dos métodos propostos apresenta bom desempenho tanto em termos de minimizar o esforço computacional quanto em reduzir o esforço cognitivo exigido do tomador de decisão. Embora as duas abordagens propostas abordem a problemática da geração de portfólios a partir de perspectivas distintas, essas abordagens se complementam, proporcionando insights que podem ser integrados para diferentes contextos, sendo flexíveis e permitindo a replicação em situações diversas. Essa sinergia entre as abordagens oferece uma estrutura abrangente que pode ser aplicada de maneira eficaz em situações práticas, consolidando assim a utilidade e a adaptabilidade desses modelos para a resolução do problema de portfólios de projetos.

Palavras-chave: análise de decisão de portfólio; apoio à decisão multicritério; FITradeoff; informações parciais; metaheurísticas; problema de portfólio de projetos.

ABSTRACT

The current global scenario, marked by resource scarcity, uncertainties, and challenges in managing multiple criteria, is often associated with the complexity of project portfolio selection. The efficient generation of portfolios that optimize resource usage and achieve strategic objectives is a complex task. This work presents a new proposal for the flexible and interactive FITradeoff method in portfolio decision analysis, incorporating partial information about decision-makers' preferences. In this context, two approaches were proposed. The first involves the explicit generation of portfolios, while the second utilizes metaheuristics to optimize the portfolio generation process. The first proposed approach specifically uses the concept of c -optimal portfolios and refinement strategies of feasibility and efficiency during the process of generating a portfolio while endeavoring to keep both computational and cognitive efforts within reasonable limits. This thesis also proposes novel metaheuristic-based multiattribute decision approach reduce the solution space when generating feasible and efficient project portfolios incorporating the decision-maker's preferences. The FITradeoff approach to combinatorial portfolio is incorporated into a Decision Support System (DSS). The ability to operate via the DSS, developed as an integral part of this thesis, stands out as a significant contribution, providing a practical implementation of the proposed methods. The results share relevant evidence, demonstrating that the computational outcomes using the proposed methods exhibit good performance in terms of minimizing computational effort and reducing the cognitive effort required of the decision-maker. While the two proposed approaches address the challenge of portfolio generation from distinct perspectives, they complement each other, offering insights that can be integrated into different contexts. They are flexible, allowing replication in diverse situations. This synergy between the approaches provides a comprehensive framework that can be effectively applied in practical situations, consolidating the utility and adaptability of these models for solving the project portfolio problem.

Keywords: portfolio decision analysis; multicriteria decision making/aiding; FITradeoff; partial information; metaheuristics; project portfolio problem.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Estrutura organizacional da pesquisa..... | 21 |
| Figura 2 - Classificação de métodos MCDM. | 25 |
| Figura 3 - Métodos e modelos utilizados em artigos..... | 30 |
| Figura 4 - Etapas do DSS do FITradeoff para seleção de portfólio. | 46 |
| Figura 5 - Árvore de busca para geração de portfólio de projetos. | 47 |
| Figura 6 - Resultados da simulação referentes ao tempo total da fase de preparação..... | 54 |
| Figura 7 - Gráfico de barras relacionado aos resultados parciais antes da elicitação..... | 59 |
| Figura 8 - Gráfico de radar relacionado aos resultados parciais antes da elicitação. | 59 |
| Figura 9 - Primeira pergunta de elicitação feita pelo DSS. | 60 |
| Figura 10 - Etapas da abordagem metaheurística multicritério proposta para o problema de portfólio. | 63 |
| Figura 11 - Processo de ordenação das constantes de escala dos critérios no DSS. | 71 |
| Figura 12 - A terceira pergunta do processo de elicitação no DSS. | 73 |
| Figura 13 - Ranking dos portfólios e suas relações de dominância em um diagrama de Hasse. | 74 |
| Figura 14 - Fluxograma de funcionalidades do SAD para portfólio combinatório..... | 77 |
| Figura 15 - Tela de introdução dos dados na forma manual. | 79 |
| Figura 16 - Tela de geração dos portfólios de projetos. | 80 |
| Figura 17 - Tela da avaliação intracritério..... | 81 |
| Figura 18 - Tela para verificação dos portfólios eficientes e viáveis gerados..... | 82 |
| Figura 19 - Tela para ordenação das constantes de escala através da comparação par a par... 83 | |
| Figura 20 - Tela para ordenação das constantes de escala através da avaliação global. | 84 |
| Figura 21 - Tela de comparação de alternativas na etapa de elicitação flexível. | 85 |
| Figura 22 - Tela dos resultados do SAD. | 86 |
| Figura 23 - Tela com gráfico dos limites das constantes de escala. | 87 |
| Figura 24 - Fluxograma com as funcionalidades do sistema com a inclusão do módulo de geração de portfólios através de metaheurística. | 88 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Síntese da literatura pesquisada no contexto de Análise de Decisão de Portfólio. . | 37 |
| Tabela 2 - Pseudocódigo do FITradeoff para portfólio combinatório..... | 49 |
| Tabela 3 - Cenários simulados..... | 52 |
| Tabela 4 - Resultados da simulação em relação ao tempo computacional em diferentes etapas da metodologia proposta..... | 53 |
| Tabela 5 - Resultados da simulação referentes ao número de portfólios em diferentes etapas da metodologia proposta e ao número de perguntas necessárias. (Nº = número; TV = Teste de Viabilidade; TE = Teste de Eficiência; PO = Potencialmente Ótimos).. | 55 |
| Tabela 6 - Pseudocódigo da metaheurística de geração de portfólio de projetos..... | 67 |
| Tabela 7 - Descrição dos Critérios e Escala. | 69 |
| Tabela 8 - Matriz de Consequências..... | 70 |
| Tabela 9 - Portfólios viáveis e eficientes gerados pela metaheurística. | 72 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|------------|---|
| AHP | <i>Analytic Hierarchy Process</i> |
| ANP | <i>Analytic Network Process</i> |
| ANP | Agência Nacional do Petróleo |
| CW | Clarke & Wright |
| DM | <i>Decision Maker</i> - Tomador de Decisões |
| DSS | <i>Decision Support System</i> - Sistema de Apoio à Decisão |
| ELECTRE | <i>Elimination et Choice Translating Reality</i> |
| FITradeoff | <i>Flexible and Interactive Tradeoff Method</i> |
| GA | <i>Genetic algorithm</i> - Algoritmo Genético |
| INPI | Instituto Nacional de Propriedade Industrial |
| LPP | <i>Linear Programming Problem</i> - Problema de Programação Linear |
| MACBETH | <i>Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique</i> |
| MADM | <i>Multiple Attribute Decision Making</i> - Tomada de Decisão Multiatributo |
| MAUT | <i>Multi Attribute Utility Theory</i> - Teoria da Utilidade Multiatributo |
| MAVT | <i>Multiple Attribute Value Theory</i> - Teoria do Valor Multiatributo |
| MCDM | <i>Multiple criteria decision-making</i> - Tomada de Decisão Multicritério |
| MODM | <i>Multi-Objective Decision Making</i> - Tomada de Decisão Multiobjetivo |
| MOMH | <i>Multi-Objective Metaheuristics</i> - Metaheurísticas Multiobjetivo |
| NSGA-II | <i>Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II</i> - Algoritmo Genético de Classificação Não Dominada II |
| PDA | <i>Portfolio Decision Analysis</i> - Análise de Decisão de Portfólios |
| PLMO | Programação Linear Multiobjetivo |
| PROBE | <i>Portfolio Robustness Evaluation</i> - Avaliação da Robustez de um Portfólio |
| PROMETHEE | <i>Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations</i> |
| ROI | Retorno sobre o Investimento |

| | |
|---------|--|
| RPM | Modelagem de Portfólio Robusto |
| SAD | Sistema de Apoio à Decisão |
| SMARTER | <i>Simple Multi-Attribute Rating Technique Expanding the Range</i> |
| SMARTS | <i>Simple Multi Attribute Rating Technique</i> |
| TOPSIS | <i>Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution</i> |
| VND | <i>Variable Neighborhood Descent</i> - Descida de Vizinhaça Variável |
| VNS | <i>Variable Neighborhood Search</i> - Busca de Vizinhaça Variável |
| VRP | <i>Vehicle Routing Problem</i> - Problema de Roteamento de Veículos |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 14 |
| 1.1 | Justificativa e Relevância | 17 |
| 1.2 | Objetivos do Trabalho | 18 |
| 1.2.1 | <i>Objetivo Geral</i> | 18 |
| 1.2.2 | <i>Objetivos Específicos</i> | 19 |
| 1.3 | Estrutura da Tese | 19 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 22 |
| 2.1 | Fundamentação Teórica..... | 22 |
| 2.1.1 | <i>Decisão Multicritério</i> | 22 |
| 2.1.2 | <i>Análise de Decisão de Portfólio</i> | 27 |
| 2.2 | Revisão de Literatura | 31 |
| 2.2.1 | <i>Problema de Seleção de Portfólio de Projetos no Contexto de Decisão Multicritério</i> 31 | |
| 2.2.2 | <i>Heurísticas e Metaheurísticas para Análise de Decisão de Portfólio</i> | 35 |
| 2.3 | Síntese do estado da arte e posicionamento deste trabalho | 37 |
| 3 | MODELO DE DECISÃO MULTICRITÉRIO PARA SELEÇÃO DE PORTFÓLIO DE PROJETOS COM FITRADEOFF E ANÁLISE COMBINATORIAL..... | 41 |
| 3.1 | O processo de elicitação flexível no método FITradeoff..... | 41 |
| 3.2 | Uma nova abordagem do FITradeoff para seleção de portfólio de projetos | 44 |
| 3.2.1 | <i>O método</i> | 44 |
| 3.2.2 | <i>Um estudo de simulação sobre as propriedades computacionais do FITradeoff para seleção de portfólio</i> | 50 |
| 3.2.3 | <i>Resultados comparativos com outros métodos e discussão</i> | 57 |
| 4 | MODELO COM ABORDAGEM HEURÍSTICA DE DECISÃO MULTICRITÉRIO PARA O PROBLEMA DE PORTFÓLIO DE PROJETOS COM FITRADEOFF | 62 |
| 4.1 | O input dos dados e ordenação das constantes de escala dos critérios..... | 63 |
| 4.2 | Heurísticas para problemas de portfólio de projetos | 64 |
| 4.3 | O processo de avaliação intercritério..... | 67 |
| 4.4 | Ordenação de portfólio de projetos: um caso prático da indústria de óleo e gás..... | 68 |
| 4.4.1 | <i>Descrição do problema</i> | 68 |
| 4.4.2 | <i>Aplicação da Metaheurística e processo de elicitação de preferências</i> | 71 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.4.3 | <i>Resultados e Discussão</i> | 73 |
| 5 | SISTEMA DE APOIO À DECISÃO PARA PORTFÓLIO COMBINATÓRIO COM O MÉTODO FITRADEOFF | 76 |
| 5.1 | Importação de dados | 78 |
| 5.2 | Geração dos portfólios | 79 |
| 5.3 | Avaliação Intracritério e Intercritério (elicitação das preferências) | 80 |
| 5.4 | Análise e exportação dos resultados | 85 |
| 5.5 | Integração com metaheurísticas..... | 87 |
| 6 | CONCLUSÕES E DIRECIONAMENTOS PARA TRABALHOS FUTUROS ... | 90 |
| 6.1 | Considerações finais | 90 |
| 6.2 | Sugestões para trabalhos futuros | 95 |
| | REFERÊNCIAS | 97 |
| | APÊNDICE A – NOTAÇÕES MATEMÁTICAS | 106 |

1 INTRODUÇÃO

A gestão eficiente de portfólios de projetos tem se tornado uma questão crítica para pesquisadores e organizações em diversos setores. A seleção de projetos para compor um portfólio é uma tarefa complexa que envolve a alocação otimizada de recursos escassos para maximizar os benefícios e atingir os objetivos estratégicos. No entanto, esse processo enfrenta desafios significativos, uma vez que está intrinsecamente ligado a um ambiente dinâmico e incerto, onde a competição por recursos é intensa e as metas organizacionais estão em constante evolução.

O cenário atual das organizações é caracterizado por problemas como o fato de elas terem muitos projetos ativos. Em geral, esses projetos não estão alinhados com seus objetivos estratégicos; há projetos que não agregam valor à organização e há projetos importantes que não dispõem de recursos suficientes. Portanto, as organizações podem ter portfólios de projetos desequilibrados. No entanto, resolver esse problema não é uma atividade simples de realizar, especialmente quando os potenciais projetos a serem selecionados vêm de áreas e disciplinas distintas (WANG et al., 2005).

A questão do problema de seleção de portfólios de projetos tem ocupado a atenção de pesquisadores e gestores há décadas. Na gestão de portfólio de projetos, as atividades mais importantes são voltadas a alocação de recurso, como a seleção e análise de continuidade de projetos (KAISER et al., 2015; KILLEN, 2017). O foco desta tese se dá na seleção de novos projetos para formação de portfólios, ou seja, na estruturação dos portfólios. O processo de formação e seleção de portfólio de maneira apropriada, considerando os diversos projetos potenciais e suas interações, é uma tarefa que envolve múltiplos critérios, restrições e incertezas. Esse problema é ainda mais acentuado em um contexto globalizado, no qual as organizações precisam estar preparadas para responder às mudanças rápidas e imprevisíveis do mercado.

Sob essa perspectiva, Salehi (2015) afirma que o tomador de decisões (DM) considera um amplo conjunto de critérios e objetivos para avaliar e selecionar projetos. Esses critérios estão associados a atributos intangíveis ou conflitantes. O problema de seleção do portfólio de projetos consiste em selecionar um subconjunto de projetos que agregue mais valor à organização, sendo extraídos de um amplo conjunto de projetos a partir de uma avaliação por multicritérios, e que se mantenha dentro do orçamento limitado que a organização disponibiliza.

A literatura mundial oferece um conjunto diversificado de abordagens para resolver o desafio da seleção de portfólios de projetos. Essas abordagens variam desde métodos baseados

em análises financeiras tradicionais até abordagens mais avançadas que incorporam elementos de teoria de decisão multicritério e otimização. A variedade de métodos reflete a complexidade do problema e a busca contínua por soluções mais eficazes e adaptáveis.

A seleção de portfólios consiste em um problema de otimização combinatória, e geralmente é impraticável avaliar todos os portfólios possíveis para selecionar aquele que melhor se encaixa no orçamento e agrega o valor mais significativo para a organização. Nesse contexto, várias abordagens foram desenvolvidas para tratar de questões relacionadas ao uso de vários critérios na seleção do portfólio de projetos, como a modelagem de portfólio robusto (RPM) (LIESIÖ et al., 2007; TERVONEN et al., 2017), a avaliação da robustez de um portfólio (PROBE) (LOURENÇO et al., 2012; LOURENÇO et al., 2017), a abordagem do FITradeoff custo-benefício para problemática de portfólio (FREJ et al., 2021), e a abordagem baseada no PROMETHEE (VETSCHERA & DE ALMEIDA, 2012).

Para o avanço no contexto da análise de decisão do portfólio, há orientações sobre a evolução dos modelos cruzados e a garantia de que os novos avanços metodológicos sejam sistematicamente avaliados por meio de engajamentos com tomadores de decisão reais (LIESIÖ et al., 2021).

Assim, é sabido que muito se discute na literatura sobre métodos de seleção de projetos para portfólios que buscam superar o problema de otimização combinatória usando abordagens de tomada de decisão multicritério (MCDM) (AOUNI et al., 2018; MOHAGHEGHI et al., 2019). A abordagem multicritério reconhece a natureza multifacetada do problema de seleção de portfólios. Nesse contexto, os decisores devem considerar não apenas uma única métrica de desempenho, mas sim um conjunto de critérios que abrangem aspectos financeiros, estratégicos, de risco e outros relevantes. A incorporação desses múltiplos critérios introduz um desafio adicional, uma vez que as preferências individuais podem ser subjetivas e divergentes.

A incerteza é uma característica intrínseca da seleção de portfólios de projetos. Muitas vezes, as informações disponíveis são parciais, imperfeitas ou sujeitas a mudanças ao longo do tempo. Nesse contexto, é essencial desenvolver métodos que possam lidar eficazmente com a falta de informações completas, permitindo que os gestores tomem decisões informadas mesmo diante da incerteza.

Por informação parcial, entende-se informações incompletas ou imprecisas, sendo assim mais fácil cognitivamente de ser fornecida pelos decisores. Métodos que utilizam de informação parcial são muito úteis para lidar com problemas de decisão multicritério quando o tomador de decisões não está disposto a fornecer as informações detalhadas frequentemente exigidas por métodos tradicionais.

Neste contexto, foram elaborados métodos multicritérios que utilizam de informações parciais ou incompletas a respeito das preferências dos decisores para tornar o processo de elicitação cognitivamente menos oneroso. Contudo, um fato relevante é observado com relação a existência de um método estruturado de elicitação que possua uma baixa taxa de inconsistência ao ser utilizado, uma vez que comumente era utilizado como base o procedimento de swing, o qual em estudos comportamentais apresenta cerca de 50% de inconsistências (BORCHERDING et al., 1991).

Devido à alta taxa de inconsistências encontradas com o uso do procedimento de tradeoff, o método de elicitação FITradeoff (Tradeoff flexível e interativo) (DE ALMEIDA et al., 2016) surgiu reduzindo a taxa de inconsistências e aprimorando o procedimento do tradeoff, uma vez que preservava a estrutura axiomática deste, contudo exigindo menos esforço cognitivo dos decisores ao permitir o fornecimento de informações parciais.

A problemática de ordenação já foi desenvolvida com objetivo de selecionar projetos para formar portfólios com o uso do procedimento de elicitação do FITradeoff. Os portfólios contêm os projetos mais bem ordenados até que o teto do orçamento disponível seja atingido. Normalmente, a relação benefício-custo é usada para fazer a ordenação (FREJ et al., 2021; EDWARDS, 1977; SHARPE; KEELIN, 1998; BUEDE; BRESNICK, 2007; PHILLIPS; BANA E COSTA, 2007). No entanto, essa abordagem não é tão adequada para lidar com programação e inclusão de restrições (LOURENÇO et al., 2017).

Dessa forma, a ideia principal deste trabalho consiste em utilizar o procedimento de elicitação do FITradeoff, com o uso de informação parcial em relação as preferências do decisor para problemática de análise de decisão em portfólio de projetos. Para isso duas abordagens são apresentadas, a primeira com a geração explícita das combinações dos projetos em portfólios e utilização de mecanismos para reduzir o esforço computacional inerente ao processo de otimização combinatória característico do problema de portfólio.

A segunda abordagem analisa heurísticas e apresenta uma modelagem alternativa para o problema combinatório de geração de portfólios de projetos. A abordagem proposta combina heurísticas para gerar as melhores combinações de projetos com um método MCDM que trabalha com as informações de preferências incompletas do tomador de decisão, o FITradeoff, para encontrar uma ordenação dos portfólios. Portanto, este trabalho difere das abordagens existentes na forma como a heurística está associada a uma abordagem de decisão de múltiplos critérios para resolver um problema de portfólio.

1.1 Justificativa e Relevância

A seleção de portfólios de projetos continua a ser um desafio crucial em um ambiente empresarial cada vez mais competitivo e dinâmico. A literatura revela uma ampla gama de abordagens que buscam abordar essa complexidade, considerando critérios diversos, informações parciais e empregando técnicas avançadas de decisão.

A busca por soluções robustas e eficientes tem levado à combinação de métodos multicritério com outras técnicas. Essa abordagem híbrida visa explorar as vantagens de ambos os domínios, permitindo a obtenção de soluções de alta qualidade em espaços de busca complexos.

Para estabelecer um procedimento estruturado para elicitare as preferências do tomador de decisões a fim de resolver o problema de seleção de portfólio, propõe-se uma abordagem de informação parcial baseada na Teoria de Valor Multiatributo, fundamentada nas ideias do método FITradeoff (DE ALMEIDA et al., 2016; FREJ et al., 2019).

A principal motivação para o desenvolvimento dessa abordagem surgiu da necessidade de superar o problema combinatório inerente ao processo de geração de portfólios de projetos, de modo que fosse possível obter as preferências do DM de forma flexível, ou seja, que pode ser adaptada de acordo com os desejos do decisor, e considerando informações de preferência parciais ou incompletas, isto é, sem solicitar diretamente ao tomador de decisões valores exatos para os pesos dos atributos e formas específicas para funções de valor marginal. O verdadeiro desafio inovador enfrentado por este documento é usar uma abordagem que gere boas soluções e exija baixo esforço computacional.

Para superar esse desafio, este trabalho propõe uma abordagem com o uso de uma árvore de busca combinada com o conceito de portfólios c-ótimos e não dominados, o que evita a geração de portfólios indesejáveis a priori. Um estudo de simulação sobre as propriedades computacionais do FITradeoff proposto para o problema de seleção de portfólios é apresentado neste documento, e os resultados também são apresentados por meio de uma análise comparativa dos problemas práticos encontrados na seleção de portfólios com outras abordagens.

Além disso, observa-se que a combinação de métodos multicritério com heurísticas emerge como uma promissora direção para enfrentar esses desafios, permitindo decisões mais informadas e estratégicas na construção de portfólios de projetos.

Portanto, uma segunda abordagem proposta neste trabalho é a utilização de heurística associada ao método multicritério. O algoritmo heurístico proposto tem a matriz de dominância

como entrada, que é obtida durante a avaliação intercritério com a interação do DM. Além disso, outro desafio é como obter uma ordem de prioridade dos portfólios viáveis e eficientes gerados em um modelo de MCDM que exija menos esforço cognitivo do tomador de decisão do que outros métodos. Os resultados são apresentados por meio da discussão de uma aplicação prática detalhada em uma grande empresa brasileira de petróleo e gás. O objetivo é obter uma ordenação das melhores combinações de projetos em portfólios.

A análise multicritério para a seleção e ordenação de portfólios de projetos emerge como uma ferramenta poderosa com repercussões significativas em diversos setores. Na esfera acadêmica, ela contribui para o avanço do conhecimento, especificamente no escopo desta tese, ao oferecer métodos robustos e inovadores para abordar a complexidade inerente à problemática de portfólio de projetos. Para a sociedade, representa um mecanismo que impulsiona o desenvolvimento sustentável, permitindo a escolha e implementação eficiente de iniciativas que consideram não apenas os aspectos econômicos, mas também os sociais e ambientais. Nos órgãos governamentais, essa abordagem proporciona uma base objetiva para a tomada de decisões, alinhada com políticas públicas e responsabilidade social. No contexto empresarial, ela se traduz em ganhos tangíveis, otimizando o uso de recursos e maximizando os retornos sobre investimentos. Em última análise, a análise multicritério para a seleção de portfólios de projetos é um catalisador para a eficiência, a sustentabilidade e o avanço estratégico, consolidando-se como uma ferramenta essencial para aprimorar a análise de decisão em portfólio em diversos cenários.

Assim, o presente trabalho se justifica por estender a aplicabilidade do método multicritério para problemática de portfólio de projetos, combinando os conceitos de árvore de busca, portfólios c-ótimo e metaheurísticas.

1.2 Objetivos do Trabalho

1.2.1 *Objetivo Geral*

O objetivo geral deste trabalho é estender o conceito de elicitação flexível com uso de informação parcial a respeito das preferências dos decisores para a problemática de seleção de portfólio de projetos utilizando abordagem combinatória. Dessa forma, o trabalho objetiva apresentar a extensão do método multicritério FITradeoff a qual combina as abordagens de otimização combinatória, heurísticas e elicitação flexível com informação parcial para a problemática de portfólio de projetos.

1.2.2 *Objetivos Específicos*

O presente trabalho tem os seguintes objetivos específicos:

- Explorar e mapear estratégias e métodos para geração de portfólios que superem a limitação do problema combinatório;
- Desenvolver técnicas e estratégias capazes de reduzir o espaço de geração de portfólios em enumeração completa através do conceito de árvore de busca;
- Propor um algoritmo de integração do procedimento de geração de portfólios com análise combinatória ao modelo multicritério com utilização de elicitación flexível e permitindo o uso de informações parciais/incompletas;
- Construir algoritmo que combina heurísticas para geração de portfólio de projetos e propor a incorporação da abordagem de elicitación de preferências do decisor;
- Aplicar modelo heurístico proposto em problema real para validação da abordagem;
- Desenvolver e apresentar um sistema de apoio à decisão para viabilizar a implementação do FITradeoff para portfólio combinatório e potencializar seu uso no ambiente organizacional;

Com a realização dos objetivos apresentados, pretende-se contribuir para literatura com a extensão dos conceitos de elicitación flexível combinado com modelos heurísticos e a otimização combinatória para problemas de seleção de portfólios de projetos, com a possibilidade de inclusão de restrições adicionais.

1.3 Estrutura da Tese

O trabalho está estruturado em 6 capítulos (Figura 1). O Capítulo 1, a Introdução, apresenta uma contextualização sobre o escopo do trabalho, bem como a apresentação da justificativa, relevância e os objetivos deste trabalho.

O Capítulo 2, a Fundamentação teórica e revisão bibliográfica, explora tanto os conceitos que fundamentam a área da literatura de decisão multicritério como os aspectos relevantes no contexto da análise de decisão de portfólio. Adicionalmente, é realizado mapeamento do estado da arte com relação aos principais trabalhos desenvolvidos sob a problemática de portfólio de projetos através de utilização de métodos multicritérios e heurísticas.

O Capítulo 3, o Modelo multicritério para seleção de portfólios de projetos com FITradeoff e análise combinatorial, apresenta a metodologia desenvolvida a qual se caracteriza como uma extensão do método FITradeoff para a problemática de portfólio combinatório,

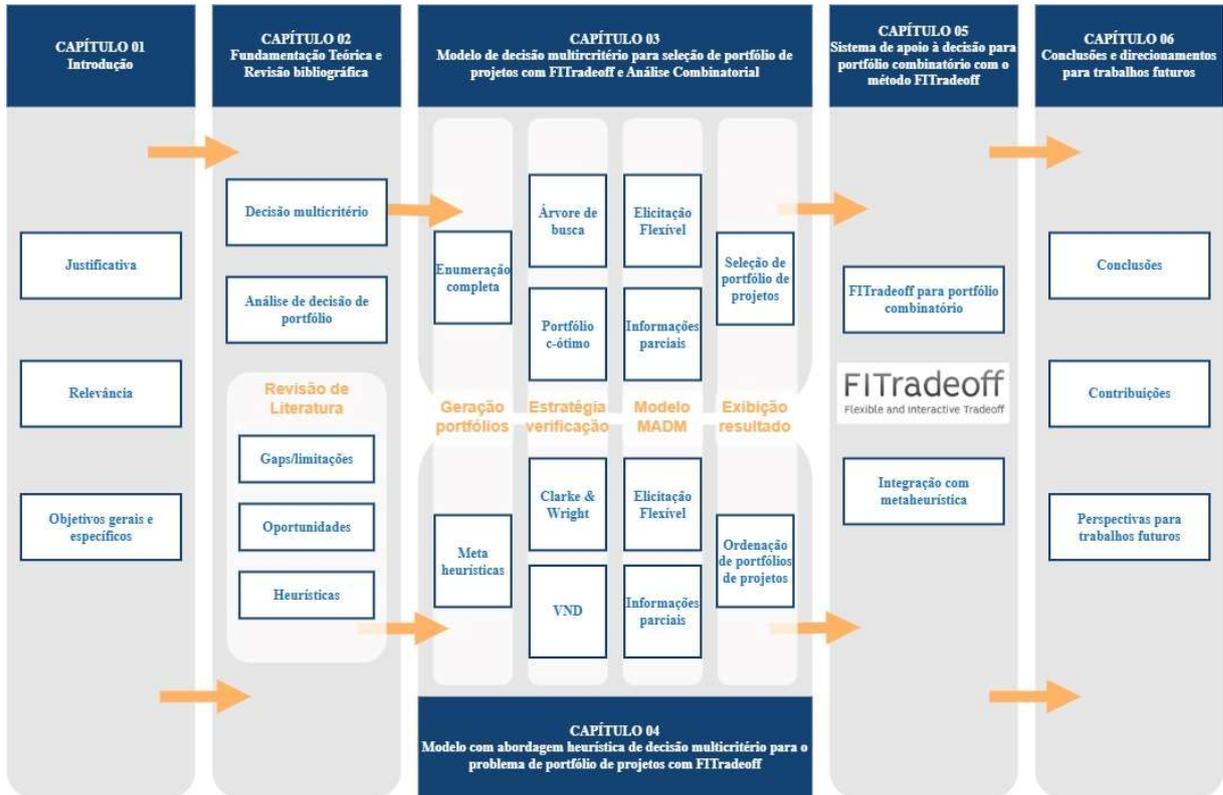
utilizando o procedimento de geração explícita de portfólios de projetos. Neste capítulo são detalhadas as definições, suposições matemáticas e é especificado o algoritmo proposto. Com base neste modelo foram publicados em periódico e anais (MARQUES et al., 2020a; MARQUES et al., 2020b; MARQUES et al., 2022). Através de simulações são apontados os resultados promissores obtidos com a utilização do método proposto.

O Capítulo 4, o Modelo com abordagem heurística de decisão multicritério para o problema de portfólio de projetos com FITradeoff, apresenta os fundamentos básicos que nortearam a proposição e desenvolvimento do algoritmo com metaheurística para geração de portfólio de projetos (MARQUES et al., 2021). Por meio de uma aplicação em um problema real, são discutidos os resultados de modo a validar a nova abordagem.

O Capítulo 5, Sistema de apoio à decisão para portfólio combinatório com o método FITradeoff, apresenta a estrutura, interfaces e funcionalidades do sistema desenvolvido para apoiar o processo decisório com os modelos propostos nesta tese.

Por fim, o Capítulo 6, sintetiza as considerações finais da pesquisa, consolidando o atendimento aos objetivos determinados, além de identificar propostas e perspectivas para futuras pesquisas na área.

Figura 1 - Estrutura organizacional da pesquisa.



Fonte: A Autora (2024).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta o referencial teórico sobre decisão multicritério que servirá como base para o desenvolvimento da nova abordagem proposta neste trabalho. Além disso, será apresentado um mapeamento do estado da arte a respeito do problema de seleção de portfólio de projetos com o uso de métodos multicritério e heurísticas.

2.1 Fundamentação Teórica

A fundamentação teórica deste trabalho abrange os principais conceitos relacionados à decisão multicritério e a análise de decisão de portfólio.

2.1.1 Decisão Multicritério

A decisão multicritério é uma abordagem que visa auxiliar na tomada de decisões complexas, nas quais é necessário considerar múltiplos critérios e alternativas. Essa abordagem tem sido amplamente utilizada em diversas áreas (WAŦRÓBSKI et al., 2019), como em cuidados da saúde (KHAN et al., 2022), na área ambiental (KIKER et al., 2005), na avaliação de tecnologias de energia limpa (EFFATPANAHA et al., 2022), no setor de construção (JATO-ESPINO et al., 2014), entre outras.

A tomada de decisão multicritério, MCDM (*Multiple criteria decision-making*), é uma área que engloba uma ampla gama de métodos e abordagens usados para apoiar decisões em situações em que múltiplos critérios ou atributos devem ser considerados. Na literatura, várias técnicas e abordagens de MCDM foram sugeridas para ajudar a estruturar e analisar decisões complexas que envolvem tradeoffs entre critérios conflitantes. Os métodos MCDM podem ser amplamente classificados em duas categorias baseado no conjunto de alternativas a serem avaliadas (DE ALMEIDA, 2013; YALCIN et al., 2022): métodos MCDM com conjunto discreto de alternativas ou de tomada de decisão multiatributo (MADM - *Multiple Attribute Decision Making*); e métodos contínuos de tomada de decisão multiobjetivo (MODM - *Multi-Objective Decision Making*).

Outra característica importante para classificação e escolha do método multicritério a ser utilizado pelo tomador de decisão é a compensação que pode existir entre os critérios do modelo de agregação (DE ALMEIDA, 2013). Podendo então serem classificados como compensatórios, o qual considera os tradeoffs entre os critérios, e como não compensatórios, nos quais não existe essa relação de compensação do desempenho de uma alternativa em um critério comparando com outro critério.

A MODM lida com situações em que decisões precisam otimizar simultaneamente múltiplos objetivos que podem ser conflitantes. Dentro da classificação desses métodos com conjunto de alternativas contínuas, destacam-se os métodos de programação matemática, como a Programação Linear Multiobjetivo (PLMO) e a Programação por metas.

Os métodos de PLMO são classificados também de acordo com o grau de intervenção do agente decisor, como: (1) métodos interativos (DE ALMEIDA, 2013), os quais envolvem etapas alternadas entre diálogo, i.e., interação com o decisor e cálculo de soluções eficientes, como por exemplo o método STEM; (2) métodos com articulação a priori, dado que as informações de preferência são obtidas do decisor antes do processo de solução (YALCIN et al., 2022), como por exemplo o método de programação por metas e o método lexicográfico; (3) métodos com articulação a posteriori, em que primeiramente é gerado o conjunto de soluções eficientes e a jusante são agregadas as preferências do decisor, como por exemplo o método da função épsilon e métodos de soma ponderada.

Com relação aos métodos baseados em conjunto de alternativas discreto, a MADM é uma categoria que se concentra em situações em que decisões precisam ser tomadas com base em múltiplos critérios ou atributos. Nesse contexto, os decisores geralmente buscam avaliar e classificar alternativas em relação a esses critérios para tomar uma decisão.

Uma parcela significativa dos métodos MCDM é composta por métodos MADM, os quais podem ser divididos com relação a racionalidade: (1) os métodos não compensatórios, englobando os métodos de sobreclassificação (*outranking*), em que a relação de sobreclassificação é obtida considerando a superioridade de uma alternativa em relação a outra; (2) os métodos compensatórios sendo caracterizados pelos métodos de critério único de síntese, em que se agrega os critérios em um único para sintetizar ou resumir as informações relevantes das alternativas.

Dentre os métodos de sobreclassificação destacam-se os métodos ELECTRE (*Elimination et Choice Translating Reality*) (ROY, 1968) e PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*) (BRANS, 1982). Dentre os métodos de critério único de síntese os mais populares são: (1) os métodos baseados na Teoria de Utilidade, como o MAUT (*Multi Attribute Utility Theory*) (KEENEY & RAIFFA, 1976); (2) os métodos baseados na distância para solução ideal, como o TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*) (HWANG & YOON, 1981); (3) outros métodos baseados no modelo aditivo determinístico, que podem ser diferenciados com base no processo de elicitación de preferências junto ao decisor.

Neste contexto, os critérios são agregados aditivamente através de uma função valor. Para encontrar o valor total de uma alternativa é preciso definir a função valor marginal de cada critério j , $v_j(x_j)$, encontrada através da avaliação intracritério, e o valor das constantes de escala k_j , obtida na avaliação intercritério.

Destaca-se que a avaliação é realizada no espaço de consequências, em que para cada alternativa a existe um vetor de consequências, sendo x_j a consequência x relativa ao critério j . No caso dos modelos aditivos (KEENEY & RAIFFA, 1976), a agregação pode ser representada da seguinte forma (Equação 1):

$$v(x) = \sum_{j=1}^p k_j v_j(x_j) \quad (1)$$

A avaliação intracritério corresponde a avaliação de desempenho de cada alternativa para cada critério, que resultará na função valor marginal, em que a cada consequência x_i é atribuído um valor entre 0 e 1, através de um processo de transformação de escala. Etapa essa fundamental, dado que é necessário que os critérios estejam em uma mesma escala de medida para serem, assim, comparáveis entre si. Existem alguns procedimentos para avaliação intracritério como: método da bisseção, método das diferenças, construção de escala quantitativa de valor e avaliação direta (ANGELIS & KANAVOS, 2016).

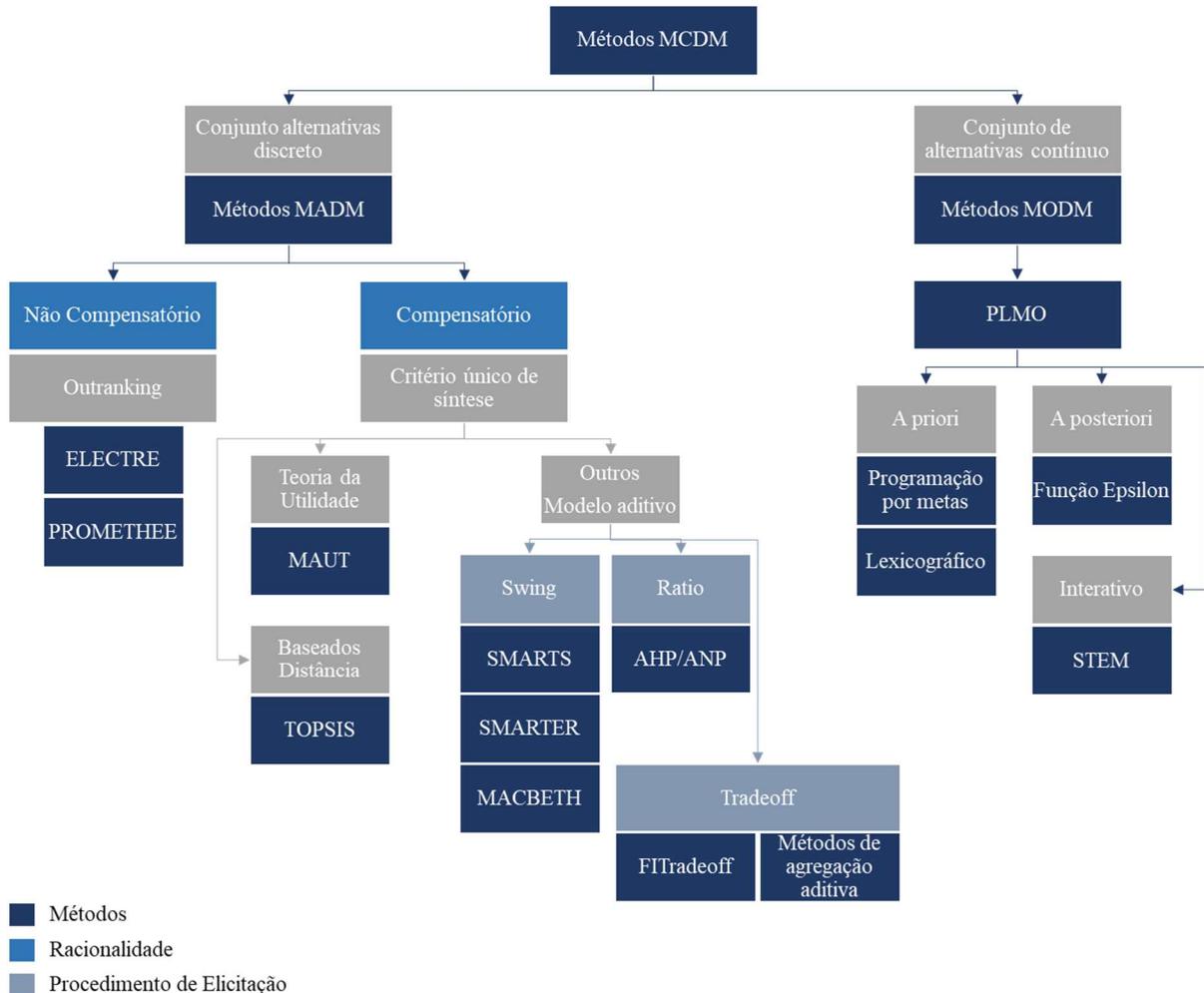
Já na avaliação intercritério é realizada a formalização dos “pesos”, i.e., obtenção das constantes de escalas k_j . Ressalta que, nos modelos aditivos, não deve ser estabelecida as constantes de escala com base no grau de importância dos critérios (DE ALMEIDA et al., 2015) uma vez que é preciso considerar o range de valores das consequências. As constantes de escala significam a taxa de substituição entre critérios e está associado ao desempenho de cada alternativa em cada critério. Dado essa complexidade do estabelecimento dos valores das constantes de escala se faz necessária a utilização de procedimentos de elicitación das preferências dos decisores.

Existem diferentes formas de parametrização do modelo aditivo, i.e., procedimentos de elicitación sendo os principais: (1) tradeoff (KEENEY & RAIFFA, 1976), em que os decisores são solicitados a avaliar o quanto estão dispostos a sacrificar ou ganhar em um critério em troca de uma mudança em outro critério; (2) swing (VON WINTERFELDT & EDWARDS, 1986), onde são apresentados aos decisores pares de alternativas e é solicitado que indiquem a sua preferência ou intensidade de preferência em uma escala, este procedimento assume linearidade da função valor marginal, utilizado nos métodos SMARTS (*Simple Multi Attribute Rating Technique*), SMARTER (*Simple Multi-Attribute Rating Technique Expanding the Range*) e MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*); (3)

ratio, em que os decisores são solicitados a fornecer razões numéricas que refletem suas preferências entre pares de critérios, utilizado nos métodos AHP (*Analytic Hierarchy Process*), ANP (*Analytic Network Process*).

A Figura 2 sintetiza os tipos de classificações e subgrupos que são formados com as características de cada método comentado neste trabalho.

Figura 2 - Classificação de métodos MCDM.



Fonte: Adaptado de Yalcin et al. (2022)

Dentre os procedimentos de elicitación citados, o tradeoff é o procedimento com maior rigor em relação a estrutura axiomática, e apresenta como vantagem aos demais a possibilidade de utilização de funções valores lineares e não lineares na avaliação intracritério (DE ALMEIDA, 2013).

No procedimento de tradeoff, os decisores são solicitados a expressar suas preferências por meio de comparações par a par entre alternativas hipotéticas, no caso, consequências, até encontrar seus pontos de indiferença, ou seja, os pontos em que estão igualmente satisfeitos com ambas as alternativas. Ao identificar o ponto de indiferença são formadas equações que

são incluídas no modelo. Após resolver o sistema de equações formado a partir das informações de preferências do decisor são obtidos os valores das constantes de escala. De posse dessas informações, deve ser realizada a agregação aditiva para resolução do problema multicritério (KEENEY & RAIFFA, 1976).

Dessa forma, o procedimento tradicional de trade-off introduzido por Keeney & Raiffa (1976), lida com informações completas obtidas pelos tomadores de decisões; isto é, o estabelecimento de valores exatos para pesos e funções de valor, ou o estabelecimento de pontos de indiferença entre consequências que permitem o cálculo desses valores de pesos.

O principal problema relacionado ao tradeoff tradicional é que a informação necessária é muito precisa e difícil de fornecer, exigindo muito esforço cognitivo e sendo muito demorada para o tomador de decisões (SALO & HAMALAINEN, 1992; SALO & HAMALAINEN, 2001; KIRKWOOD & SARIN, 1985; WEBER, 1987). Essa dificuldade na informação a ser fornecida pelo tomador de decisões pode desencorajá-lo a enfrentar um processo de tomada de decisão tão difícil e cognitivamente exigente quanto esses métodos tradicionais requerem (DE ALMEIDA et al., 2016).

Além disso, muitas inconsistências são encontradas ao aplicar esses métodos devido à alta carga cognitiva exigida pelos tomadores de decisões (BORCHERDING et al., 1991). Nesse contexto, com o objetivo de facilitar o processo de tomada de decisão para o tomador de decisões com informações mais simples, numerosas abordagens usando informações parciais foram desenvolvidas na literatura (DA SILVA et al., 2023).

Em resumo, embora o procedimento tradeoff seja robusto, ele apresenta desafios. O processo de encontrar os pontos de indiferença pode ser difícil para os decisores, levando a inconsistências nas respostas e erros de elicitación (BORCHERDING et al., 1991). Adicionalmente, o procedimento presume que os decisores têm uma compreensão clara de suas preferências, o que nem sempre é o caso. Essas limitações motivaram o desenvolvimento de procedimentos de elicitación flexíveis.

Esses procedimentos de elicitación flexíveis permitem aos decisores expressar suas preferências de maneira mais intuitiva e menos onerosa (DE ALMEIDA et al., 2016). Esses procedimentos buscam facilitar a coleta de informações sobre as preferências dos decisores de maneira mais adaptada às complexidades das decisões multicritério e exigindo um menor grau de esforço cognitivo dos decisores.

O FITradeoff (*Flexible and Interactive Tradeoff Method*) é um exemplo de método de elicitación flexível. Ele foi desenvolvido no âmbito da Teoria de Valor Multiatributo (MAVT) por de Almeida et al. (2016) considerando a estrutura completa do procedimento tradicional

tradeoff, mas para superar as limitações do procedimento tradicional este permite que os decisores se expressem, na análise comparativa de consequências, por meio de relações de preferências e não de indiferença, ou seja, levando em conta informações parciais sobre as preferências do tomador de decisões.

Sua flexibilidade permite a aplicação de informações parciais do decisor, enquanto a iteratividade possibilita adaptações ao longo do processo, de acordo com interações contínuas com o decisor. Dessa forma, o FITradeoff não exige ajustes em situações de indiferença, tornando-se uma ferramenta versátil para diferentes problemáticas, como a de escolha (DE ALMEIDA et al., 2016), ordenação (FREJ et al., 2019), classificação (KANG et al., 2020) e portfólio (FREJ et al., 2021; MARQUES et al., 2022).

No FITradeoff, os pesos dos critérios são elicitados com base em informações parciais sobre as preferências do decisor em relação a um conjunto de alternativas, seguindo o escopo do método de agregação aditiva. Isso simplifica o processo de decisão multicritério, eliminando a necessidade de uma constante de escala fixa, comum em muitos métodos multicritério tradicionais.

Em resumo, cada método tem suas características específicas, tanto relacionadas a racionalidade, a estrutura de preferências e aos procedimentos de elicitação de preferências, e a escolha entre eles muitas vezes depende do contexto específico da decisão, da natureza do problema, das características dos critérios e das preferências dos decisores.

2.1.2 Análise de Decisão de Portfólio

No contexto da análise de decisão multicritério emergem diferentes problemáticas que delineiam a natureza dos desafios enfrentados pelos decisores e serve para classificar o tipo de problema com base na decisão que precisa ser efetuada com relação as alternativas em avaliação.

A problemática de escolha, primeira dentre elas, concentra-se na seleção de uma única opção mais desejável dentre várias alternativas. Esse cenário exige uma análise cuidadosa para discernir a alternativa ótima com base nos critérios relevantes. A problemática de classificação busca segmentar as alternativas em classes pré-definidas. Esse enfoque é valioso quando a necessidade é agrupar alternativas em categorias distintas, proporcionando uma visão mais clara das relações entre elas (ROY, 1996).

Já a problemática de ordenação, busca estabelecer um ranking das alternativas, destacando as preferências relativas entre elas. A problemática de descrição, por sua vez, atua

como um suporte adicional, auxiliando na formalização da descrição das alternativas e suas consequências, contribuindo para o processo cognitivo (ROY, 1996).

Além dessas, a problemática de portfólio ganha destaque na decisão multicritério e é abordada neste trabalho. Ela se refere à seleção estratégica de um subconjunto de alternativas dentro de um conjunto disponível, respeitando as restrições impostas ao problema. A Análise de Decisão de Portfólios (*Portfolio Decision Analysis - PDA*), nesse contexto, surge como uma abordagem especializada para estruturar a análise de portfólio, considerando rigorosamente questões de valor e incerteza (MORTON, 2015).

Salo et al. (2011) definem a Análise de Decisão de Portfólios como “um corpo de teoria, métodos e práticas que busca auxiliar os tomadores de decisão a fazerem seleções informadas a partir de um conjunto discreto de alternativas, por meio de modelagem matemática que leva em consideração restrições relevantes, preferências e incertezas”.

Esta conceituação de PDA é fundamentada nas peculiaridades inerentes ao problema e nas exigências específicas para sua resolução. Sua intencional amplitude metodológica se reflete na inclusão de diversas abordagens, tais como programação estocástica, metaheurísticas multiobjetivo, variações de métodos consolidados de suporte à decisão, que englobam desde a teoria de valor multiatributo até métodos de classificação e pontuação, além da aplicação de ponderação ad hoc. Essa abrangência metodológica visa assegurar uma flexibilidade que permita adaptar-se a diferentes contextos decisórios, ampliando a aplicabilidade da PDA em variados cenários de tomada de decisão.

Consoante a amplitude desta área, torna-se desafiador demarcar com precisão os parâmetros básicos que podem ser usados para categorizar uma pesquisa em Análise de Decisão de Portfólios. Diante disso, Liesiö et al. (2021) estabelecem algumas características centrais que se fazem presentes em problemas de Análise de Decisão de Portfólios:

- Restrição de Recursos/Orçamento: A escassez inevitável de recursos, como por exemplo, financeiros, tempo de equipe e atenção política, impõe limites à perseguição de todas as oportunidades de decisão. Essas restrições, relevante para a tomada de decisões no contexto organizacional, podem ser de difícil modificação.
- Benefícios: A seleção de uma alternativa para o portfólio busca gerar benefícios positivos, tangíveis (como receitas mais altas) ou intangíveis (como o fortalecimento da base de conhecimento). Esses benefícios frequentemente se apresentam de forma multidimensional, combinando diversos tipos (por exemplo, fortalecimento da marca).

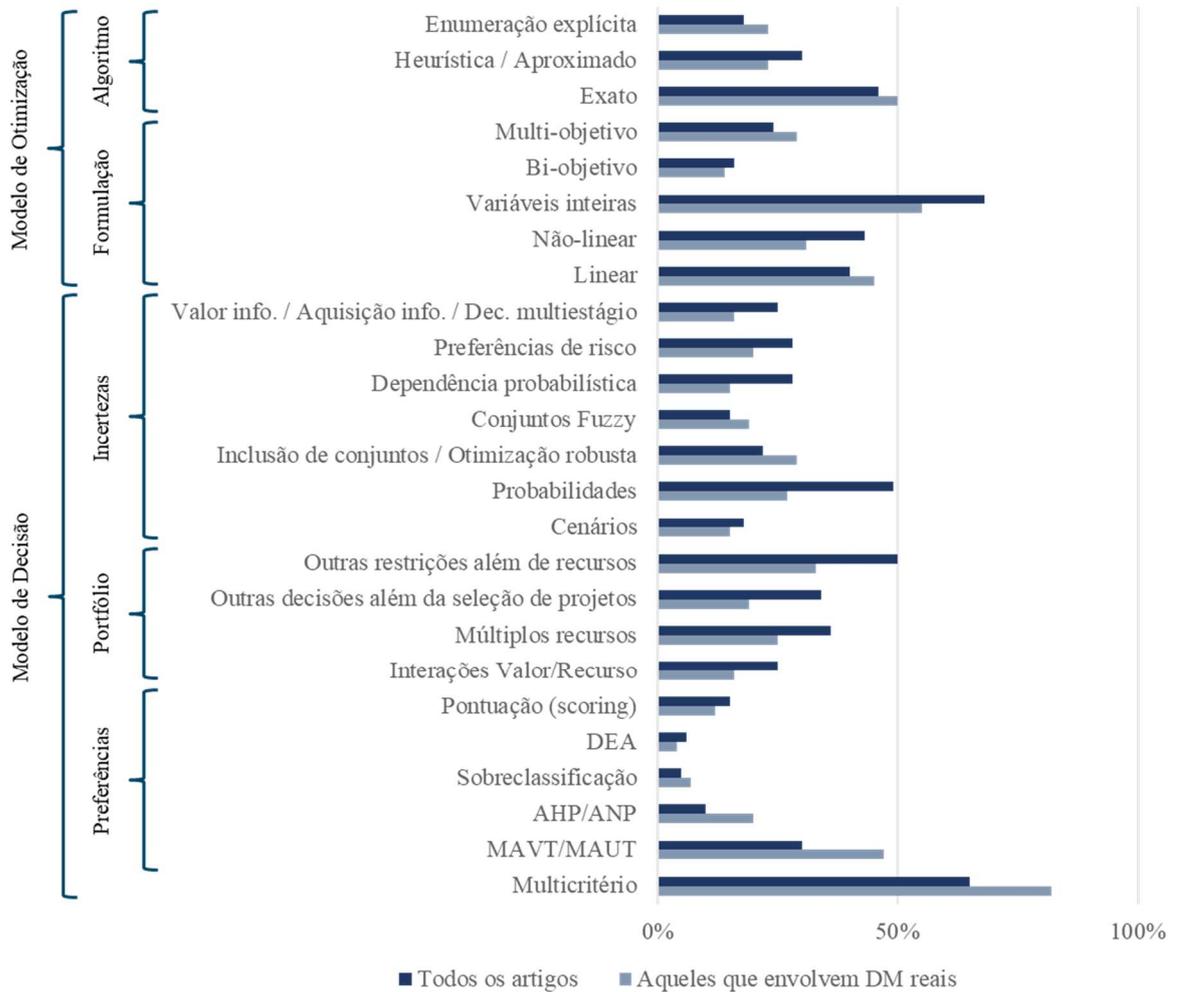
- **Inter-relacionamentos:** A relação sistemática (embora não necessariamente simples) entre o valor de selecionar um portfólio de alternativas e os benefícios obtidos ao selecionar suas partes constituintes é um aspecto crucial. Dependendo do contexto, realizar projetos em conjunto pode resultar em mais ou menos valor do que a soma dos valores individuais, assim como os custos podem variar.
- **Portfólio Incumbente:** Em muitos casos, um portfólio existente pode ter um status especial, impactando a implementação do novo portfólio. O desafio de transição entre portfólios pode ser substancial, influenciando a própria seleção do novo portfólio.
- **Áreas de Decisão:** Frequentemente, as alternativas podem ser agrupadas em áreas de decisão. Dentro dessas áreas, a comparação de alternativas, como projetos, é mais fácil devido à sua homogeneidade. No entanto, desafios podem surgir ao transitar de um portfólio incumbente para um novo, exigindo ajustes nos padrões de alocação de recursos em diversas áreas de decisão.

Decisões de portfólio frequentemente são complicadas por diversos fatores significativos. Segundo Liesio et al. (2021), destaca-se três principais questões neste sentido. Em primeiro lugar, espera-se que essas decisões contribuam para o alcance de múltiplos objetivos decisórios. Em segundo lugar, dado que o 'valor' de um projeto raramente é conhecido no momento de seu lançamento, a decisão de seleção de projetos precisa ser baseada em estimativas incertas de seus valores. Além disso, o valor gerado por um portfólio de produtos pode ser fortemente afetado por incertezas exógenas.

Em terceiro lugar, pode haver interações entre os projetos. Por fim, o número de portfólios alternativos geralmente é elevado, ou seja, o número possível de combinações de projetos para formar portfólios, o que reforça a vastidão das opções de portfólio e a complexidade associada a essas decisões.

O trabalho de Liesiö et al. (2021) oferece uma revisão abrangente sobre a Análise de Decisão de Portfólios, o qual analisa avanços recentes na pesquisa na última década com base em artigos de periódicos da área de pesquisa operacional e de ciências da gestão. A Figura 3 retrata o resultado da revisão da literatura sobre PDA relacionando com os métodos mais utilizados.

Figura 3 - Métodos e modelos utilizados em artigos.



Fonte: Adaptado de Liesiö et al. (2021).

Em síntese, a Análise de Decisão de Portfólios emerge como um campo de pesquisa dinâmico, intrinsecamente conectado à prática, enfatizando a necessidade contínua de avaliação sistemática de novos métodos por meio de interações com tomadores de decisão reais para o progresso do conhecimento.

Entre as oportunidades destacadas por Liesiö et al. (2021), a exploração de interfaces integradas a metodologias complementares se destaca como um promissor campo para aprofundar a compreensão matemática e computacional na PDA. O alinhamento entre os métodos de PDA e otimização matemática apresenta sinergias notáveis, com potencial para resolver problemas mais amplos ou abordar questões anteriormente intratáveis. Essa convergência adquire relevância significativa em aplicações de PDA em que a solução

transcende a mera seleção estática, influenciando o agendamento prospectivo de projetos, tornando-se crucial em cenários de grande escala.

Adicionalmente, o emprego de ferramentas como simulação ou redes bayesianas emerge como um meio eficaz para avaliar as ramificações de projetos, ampliando consideravelmente o escopo de aplicação da PDA. Esse entrelaçamento estratégico não só aprimora a capacidade de resolver desafios complexos, mas também proporciona uma abordagem mais holística e dinâmica para enfrentar problemas substanciais em contextos de tomada de decisões estratégicas.

2.2 Revisão de Literatura

Nesta seção, será apresentada a revisão de literatura deste trabalho sobre os métodos multicritérios e heurísticos utilizados para a resolução do problema de seleção de portfólio de projetos. Dessa maneira, busca-se realizar uma análise abrangente dos estudos predominantes que norteiam a fundamentação desta tese.

2.2.1 *Problema de Seleção de Portfólio de Projetos no Contexto de Decisão Multicritério*

O gerenciamento de projetos tornou-se mais crítico por ser uma atividade crucial para a sobrevivência das empresas no mercado e para garantir a eficiência das políticas públicas. Nesse contexto, os gerentes enfrentam continuamente o problema de decidir em quais projetos investir. Eles precisam considerar que os recursos disponíveis são limitados e buscar maximizar os resultados do portfólio, levando em conta vários critérios (MORTON et al., 2016).

Essa realidade se repete nas mais diversas esferas, seja como vivenciada por gestores do setor privado ou público (FERNANDEZ et al., 2013; HAKANEN et al., 2011; MONTIBELLER & ALBERTO FRANCO, 2011), e em diferentes áreas. Por exemplo, a área de educação (HUANG et al., 2008; LITVINCHEV et al., 2010; STUMMER & HEIDENBERGER, 2003) muitas vezes tem de escolher um portfólio de projetos que impulse a pesquisa e o desenvolvimento, mas o orçamento é restrito. Além disso, a área da saúde (RODRIGUES et al., 2011) apresenta o mesmo desafio. O volume de recursos - seja como financiamento, recursos humanos, materiais ou equipamentos - disponibilizados é limitado. Isso tem um impacto direto na sociedade, como foi visto e vivenciado nesse período de crise dos serviços de saúde em decorrência da pandemia da COVID-19.

Os métodos necessários para encontrar soluções para esses problemas precisam combinar estruturação de problemas, elicitación de preferências, métodos de multicritérios para avaliar

portfólios alternativos, algoritmos de otimização e softwares interativos que envolvam as partes interessadas (BARBATI et al., 2018).

Com relação às técnicas para resolver o problema, a literatura contém muitos modelos com abordagens quantitativas e qualitativas para a seleção de projetos (HUANG et al., 2008). Esses modelos incluem modelos matemáticos e financeiros; modelos que usam listas de verificação e pontuação; modelos da Teoria da Decisão; modelos de portfólio; heurística e metaheurística (BAKER, 1974; LIBERATORE, 1987; SCHMIDT & FREELAND, 1992; COOPER et al., 1999).

Os modelos de programação inteira que usam branch and bound (VETSCHERA, 1994), bem como o uso de heurísticas e metaheurísticas, que fornecem uma compensação entre o tempo de computação necessário e a qualidade do espaço aproximado da solução (ADEWUMI & MOODLEY, 2012; DOERNER et al., 2004), também são amplamente usados para resolver problemas de seleção de portfólio (URLI & TERRIEN, 2010; FERNANDEZ et al., 2015; BALDEIRAS et al., 2018).

Os problemas de seleção de portfólios envolvem outro nível de complexidade além do processo que visa à maximização dos benefícios, que é limitado por certas restrições. Nesse outro nível, são considerados: o processo de seleção de projetos a serem incluídos nos portfólios, a natureza do problema combinatório, bem como a formação de portfólios com a agregação das consequências dos projetos selecionados (VETSCHERA & DE ALMEIDA, 2012; LITVINCHEV et al., 2010).

Esse último processo pode ser realizado em diferentes momentos. Uma possibilidade é, primeiramente, realizar uma análise de valor dos projetos, na qual a entrada é obtida por meio de um modelo de valor multiatributo para posterior agregação em portfólios. Essa entrada pode ser considerada como o valor do benefício de cada projeto (LOURENÇO et al., 2012). A agregação de projetos pertencentes aos portfólios é então feita pela agregação do valor do benefício dos projetos, bem como de seus custos. Alguns estudos que usam essa abordagem foram resumidos por (DE ALMEIDA et al., 2014) e concluiu-se que, para o tomador de decisão, isso simplifica a tarefa de avaliação multicritério, que deve ser realizada apenas em itens individuais.

Outra abordagem é o processo de agregar inicialmente as consequências dos projetos em cada critério e, em seguida, realizar uma análise multicritério dos portfólios gerados. Nessa abordagem, é importante enfatizar que há diferentes maneiras de tratar a relação entre os benefícios e as consequências de projetos individuais e seu impacto sobre o benefício do projeto

inteiro. Este documento considerará, para fins de simplificação, que os critérios são monotônicos e podem aplicar a agregação aditiva.

Essa abordagem pode ser limitada devido à natureza combinatória do problema, que, à medida que o tamanho da amostra (número de projetos) do problema aumenta, um número realmente grande de portfólios pode ser gerado por suas combinações. Isso pode tornar o processo de geração de portfólios eficientes e viáveis difícil e demorado, o que pode ser um desafio para o DM (DE ALMEIDA et al., 2014).

Apesar desse desafio, muitos estudos foram desenvolvidos usando essa segunda abordagem, alguns dos quais são apresentados no contexto de projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (HEIDENBERGER & STUMMER, 1999). O presente trabalho usará essa segunda abordagem em um processo de geração que enumera explicitamente todas as combinações possíveis de projetos. No entanto, serão adicionadas ferramentas à análise que simplificam e facilitam os esforços do gerente geral. Alguns benefícios do uso dessa abordagem por meio de um processo de geração explícito são declarados por (VETSCHERA, 1994). Por exemplo, é cognitivamente mais simples para os tomadores de decisão porque não há informações implícitas a serem consideradas e devido à flexibilidade que essa abordagem oferece em termos de operações de agregação de atributos.

A seleção do portfólio de projetos geralmente envolve vários critérios e, tradicionalmente, esse problema é tratado pela Teoria do Valor Multiatributo (MAVT). Uma revisão da literatura nesse contexto (VETSCHERA & DE ALMEIDA, 2012) destaca, entre os métodos de sobreclassificação (*outranking*), o uso frequente do PROMETHEE para resolver o problema do portfólio. Além disso, os problemas de seleção de portfólio são frequentemente abordados por meio de métodos compensatórios, como os que realizam agregação aditiva.

Muitos estudos aplicados e teóricos foram desenvolvidos, conforme mencionado anteriormente, usando modelos aditivos, mas muitos deles fazem uso de informações completas para chegar a uma recomendação, o que o DM pode considerar um processo muito demorado e cognitivamente oneroso (SALO et al., 2011). Os tomadores de decisão podem não estar dispostos ou não ser capazes de fornecer as informações de preferência exigidas por esses métodos mais tradicionais (WEBER, 1987). Os métodos que visam a reduzir a carga cognitiva de um DM com relação ao fornecimento de informações sobre os tradeoffs (pesos) exatos dos critérios, usando informações incompletas ou parciais, são mais aconselháveis (LIESIÖ et al., 2008; FLIEDNER & LIESIO, 2016; LOURENÇO et al., 2012) e são usados tanto na problemática de escolha em MCDM (MÁRMOL et al., 2002) quanto na problemática de classificação (PARK & KIM, 1997).

Nesse contexto, foi desenvolvido o método FITradeoff (DE ALMEIDA et al., 2016; DE ALMEIDA et al., 2023), com o objetivo de apresentar ao DM que o processo de elicitação de preferências pode ser flexível e interativo. Esse método tem sido aplicado na seleção de fornecedores (FREJ et al., 2017; RODRIGUES et al., 2020); na seleção de regras de programação (PERGHER et al., 2020); na seleção de pacotes de tecnologia agrícola (CARRILLO et al., 2018) e na área de saúde (CAMILO et al., 2020); no setor de energia (DE MACEDO et al., 2018; FOSSILE et al., 2020); em um sistema de abastecimento de água (MONTE & MORAIS, 2019); em decisões relacionadas a sistemas e tecnologia da informação (GUSMÃO & MEDEIROS, 2016; POLETO et al., 2020); e em experimentos de neurociência (ROSELLI et al., 2019, 2020).

Além disso, o FITradeoff já foi, também, desenvolvido no contexto de seleção de projetos para formar portfólios (FREJ et al., 2021). Este por sua vez, propõe uma heurística com base na razão custo-benefício. A função valor multicritério é utilizada para medir o benefício dos projetos, os quais são avaliados pela razão custo-benefício, depois os projetos são ordenados e por fim, seleciona os projetos até a limitação do budget.

O modelo proposto por Frej et al. (2021) e a abordagem multicritério apresentada nesta tese diferem em vários aspectos cruciais. Em primeiro lugar, na metodologia de agregação, enquanto o modelo do FITradeoff custo-benefício emprega uma heurística baseada na razão custo-benefício para avaliar individualmente os projetos antes de selecioná-los até a restrição orçamentária, a abordagem aqui sugerida primeiro agrega as consequências dos projetos para, em seguida, avaliar os portfólios resultantes. Em segundo lugar, o modelo proposto nesta tese vai além da avaliação individual de projetos, possibilitando a análise das relações entre projetos e a avaliação comparativa de diferentes portfólios. Essas diferenças ressaltam a abordagem mais holística e integrativa proposta nesta tese, que busca uma análise multicritério abrangente e ponderada na seleção de portfólios de projetos.

A metodologia de modelagem de portfólio robusto (RPM) para seleção de portfólio foi proposta (LIESIÖ et al., 2007) usando informações parciais e os conceitos de portfólios não dominados. Tervonen et al. (2017), apresentaram uma extensão dessa metodologia que modificou o índice inicialmente proposto com a metodologia RPM para portfólios e usou os conceitos de portfólios potencialmente ótimos. Entretanto, esses estudos não apresentam uma elicitação estruturada das preferências do decisor.

Também foi apresentado um novo Sistema de Apoio à Decisão para a seleção de um portfólio robusto de projetos, denominado PROBE (*Portfolio Robustness Evaluation*) (LOURENÇO et al., 2012), que incluiu, como maior diferencial, a análise aprofundada da

robustez do "melhor" portfólio, considerando as incertezas que afetam os custos e benefícios dos portfólios. Uma aplicação prática desse modelo foi realizada no contexto do setor elétrico (LOURENÇO et al., 2017).

O problema de decisão de portfólio tem sido amplamente abordado pelo MAVT e este estudo propõe um método de apoio multicritério à decisão baseado nos conceitos de elicitación flexível para o problema de seleção de portfólio de projetos e utiliza informações incompletas de preferências obtidas dos decisores que são inseridas em um DSS. O método apresenta, como diferencial em relação aos existentes, a elicitación de constantes de escala com informações parciais, preservando a estrutura axiomática do procedimento tradicional de tradeoff e com a vantagem do possível uso de funções de valor marginal não lineares. Observe, entretanto, que não é recomendável usar funções de valor não lineares para o problema da mochila. O método proposto também usa estratégias para reduzir o esforço computacional e cognitivo do decisor em um processo de geração explícito, como será explicado nos próximos capítulos.

2.2.2 *Heurísticas e Metaheurísticas para Análise de Decisão de Portfólio*

O problema de seleção de portfólio é um dos problemas de otimização mais importantes e estudados no domínio da Engenharia Financeira. No entanto, determinar a solução não é trivial, uma vez que o problema NP-completo em questão se torna cada vez mais demandante à medida que o número de projetos aumenta. Metaheurísticas oferecem um compromisso prático entre o tempo de computação necessário e a qualidade do espaço de solução aproximado (ADEWUMI; MOODLEY, 2012; DOERNER et al., 2004).

As metaheurísticas são técnicas poderosas aplicáveis de maneira geral a um vasto número de problemas. Uma metaheurística refere-se a uma estratégia mestra iterativa que orienta e modifica as operações de heurísticas subordinadas ao combinar inteligentemente diferentes conceitos para explorar (diversificar) e explorar (intensificar) o espaço de busca (EHRGOTT & GANDIBLEUX, 2002).

As técnicas de metaheurísticas para resolver problemas de programação multiobjetivo foram introduzidas por volta de 1990 e têm proliferado desde então. Isso incluiu a aplicação de metaheurísticas multiobjetivo (*Multi-Objective Metaheuristics* - MOMH), com o objetivo de aproximar o (sub)conjunto de soluções ótimas de Pareto.

Dois traços característicos são encontrados nesses métodos: eles são exclusivamente inspirados por algoritmos evolutivos ou algoritmos de busca de vizinhança. Além disso, os métodos pioneiros são uma derivação direta de metaheurísticas de otimização de único objetivo,

com adaptações mínimas para integrar o conceito de soluções eficientes na otimização de múltiplos objetivos (EHRGOTT & GANDIBLEUX, 2002).

O problema de seleção de portfólio pode ser estendido pela adição de várias restrições para fornecer uma representação mais realista do problema. Quando essas restrições adicionais são incluídas no modelo, métodos exatos falham em lidar eficientemente e eficazmente com essa complexidade (ADEWUMI; MOODLEY, 2012).

Além de ter que respeitar várias restrições, o processo envolvido na identificação do conjunto de portfólios eficientes não é trivial. Quando os tomadores de decisão enfrentam um grande número de projetos concorrentes, abordagens heurísticas oferecem um equilíbrio entre a qualidade do espaço de solução e o esforço computacional necessário para alcançá-lo (DOERNER et al., 2004).

Uma vez que heurísticas e metaheurísticas podem fornecer resultados de qualidade em tempos razoáveis, alguns estudos na literatura utilizam metaheurísticas para apoiar a seleção de portfólio, utilizando a Busca de Vizinhança Variável (*Variable Neighborhood Search* - VNS) (ÖZPEYNIRCI et al., 2022), algoritmo genético (CHEN et al., 2010) e outros que serão abordados a seguir. Crama e Schyns (2003) aplicaram o Simulated Annealing para problemas complexos de seleção de portfólio. Os autores afirmam que quando o modelo clássico de média-variância de Markowitz é enriquecido com restrições realistas adicionais, o modelo se torna um problema de programação quadrática inteira mista, e algoritmos de otimização exata enfrentam dificuldades nesse contexto.

Doerner et al. (2004) aplicaram a Otimização de Colônia de Formigas de Pareto para a Seleção de Portfólio Multiobjetivo. Os resultados foram comparados com o Simulated Annealing de Pareto e o Algoritmo Genético de Classificação Não Dominada. Os resultados e comparações indicam que o modelo proposto possui três vantagens: a saber, pode lidar com interações e restrições de projetos complexos melhor do que as outras duas metaheurísticas; é robusto, mostrando resultados interessantes em várias características de problemas; e informações heurísticas podem ser facilmente integradas ao algoritmo.

Urli and Terrien (2010) propuseram um método em duas etapas para lidar com um problema prático de portfólio de projetos. A primeira etapa corresponde a uma metaheurística híbrida Scatter/Tabu Search para gerar portfólios eficientes. A segunda conduz uma análise a priori dos portfólios não dominados para propor uma classificação dos portfólios não dominados

Carazo et al. (2010) propuseram uma metaheurística para considerar se os projetos candidatos são independentes ou se há interrelações entre eles. Nesse caso, avaliar se a

combinação de projetos gera resultados positivos ou negativos é indispensável. O procedimento compreende a duas etapas. A primeira gera um conjunto inicial de pontos eficientes usando Tabu Search, e a segunda melhora esse conjunto inicial usando Scatter Search.

Rivera et al. (2013) abordaram questões de cooperação na seleção de portfólio social. Para lidar com esse problema, eles combinaram um Sistema de Classificação de Colônia de Formigas e estruturas de preferência para gerar soluções e atualizá-las para obter três frentes não dominadas. Fernandez et al. (2015) também aplicaram um método baseado em Colônia de Formigas de Classificação, que aborda casos considerando múltiplos objetivos na seleção de portfólio.

Além das metaheurísticas mencionadas anteriormente, Baldeiras et al. (2018) propuseram uma combinação do Algoritmo Genético e sistemas Grey para estudar a incerteza na seleção de portfólio e compararam os resultados com o Algoritmo Genético (GA – *Genetic Algorithm*) tradicional e o Algoritmo Genético de Classificação Não Dominada II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II* -NSGA II). O estudo concluiu que a combinação do sistema Grey com o Algoritmo Genético supera o desempenho do Algoritmo Genético e do NSGA II.

2.3 Síntese do estado da arte e posicionamento deste trabalho

A Tabela 1 apresenta uma síntese dos métodos empregados nos estudos analisados na revisão de literatura conduzida nesta pesquisa. No âmbito das investigações voltadas à resolução de problemas de análise de decisão de portfólio, a classificação foi dividida em dois grupos distintos: o primeiro compreendendo trabalhos que empregaram métodos multicritério e o segundo englobando aqueles que utilizaram heurísticas ou metaheurísticas.

Tabela 1 - Síntese da literatura pesquisada no contexto de Análise de Decisão de Portfólio.

| Autores | Heurística/ Metaheurística | Método Multicritério |
|---|-------------------------------|----------------------|
| Baldeiras, F., Gomez-Santillan, C., Cruz-Reyes, L., Rangel-Valdez, N., & Morales-Rodriguez, M. (2018) | NSGA (Algoritmo Genético) | |
| Chen, Y., Mabu, S., & Hirasawa, K. (2010) | Algoritmo Genético | |
| Rivera, G.; Gomez, C.; Fernandez, E.; Cruz, L.; Castillo, O.; Bastiani, S. (2013) | Colônia de Formigas | |
| Doerner, K; Gutjahr, W.; Hartl, R.; Strauss, C., Stummer, C. (2004) | Colônia de Formigas | |

| | | |
|--|---------------------|-----------------------------|
| Carazo, A.; Gomez, T.; Molina, J.; Hernandez-Diaz, A.; Guerrero, F. (2010) | Tabu/Scatter Search | |
| Urli, B.; Terrien, F. (2010) | Tabu/Scatter Search | |
| Crama, Y.; Schyns, M. (2003) | Simulated Annealing | |
| Özpeynirci, S., Özpeynirci, Ö., & Mousseau, V. (2022) | VNS | |
| Lourenço, J. C., Morton, A., & Bana E Costa, C. A. (2012) | | PROBE (baseado no MACBETH) |
| Lourenço, J. C., Soares, J. O., & Bana e Costa, C. A. (2017) | | PROBE (baseado no MACBETH) |
| Liesiö J, Mild P, Salo A. (2007) | | RPM |
| Tervonen, T., Liesiö, J., & Salo, A. (2017) | | RPM |
| Vetschera, R., & de Almeida, A. T. (2012) | | PROMETHEE V |
| KhaliliDamghani, Kaveh et al. (2013) | | TOPSIS |
| KhaliliDamghani, Kaveh et al. (2013) | | Programação por metas |
| Eilat, H. et al. (2006) | | DEA |
| Leao et al. (2019) | | AHP e PROMETHEE II |
| Hassanzadeh, F.; Nemati, H.; Sun, M. (2014) | | PLMO |
| Lopes, Y. G.; de Almeida, A. T. (2013) | | MAUT |
| Frej, E. A., Ekel, P., & de Almeida, A. T. (2021) | | FITradeoff Custo-Benefício |
| Zhang et al. (2024) | | Portfolio Utility Functions |

Fonte: A Autora (2024).

A partir da análise do estado da arte dos métodos para tomada de decisão multicritério com aplicação na problemática de portfólio, é possível observar que existem algumas lacunas na literatura em relação a modelos e aplicações no problema de seleção de portfólios de projetos. Por exemplo, a falta de uma definição clara do protocolo para elicitar as preferências do tomador de decisão, ou a necessidade de uma pré-seleção de projetos candidatos para compor o portfólio, ou seja, projetos que valem a pena financiar (LOURENÇO et al., 2012). Há também uma falta de exploração adicional de estratégias para superar a natureza combinatória do problema, a fim de evitar dificuldades de natureza computacional e para visualizar resultados. É observado na literatura, em contrapartida, o uso de métodos aproximativos e avaliação prévia dos projetos para compor os portfólios como estratégias para desviar da limitação do problema de otimização combinatória.

Com base nessas observações e em relação à primeira lacuna descrita, a contribuição deste trabalho é propor para o contexto de problemas de portfólio uma abordagem baseada no método FITradeoff, que utiliza informações parciais sobre as constantes de escala dos critérios no contexto da MAVT (*Multiple Attribute Value Theory*). Este método foi desenvolvido com base na estrutura axiomática sólida do procedimento tradicional de tradeoff (KEENEY & RAIFFA, 1976). No entanto, ele não exige que o DM estabeleça valores exatos de indiferença entre vetores de consequências de alternativas hipotéticas. Em vez disso, o FITradeoff utiliza as relações de preferência estritas fornecidas pelo DM para encontrar uma solução.

Com relação a segunda lacuna, essa tese reúne uma importante contribuição inovadora ao propor um framework baseado na árvore de busca e estratégias de viabilidade e eficiência para a resolução do problema de otimização combinatória utilizando a enumeração explícita no processo de geração dos portfólios de projetos.

Ao analisar os estudos anteriormente mencionados, constata-se também que uma ampla variedade de metaheurísticas é utilizada para resolver o problema de portfólio. Além disso, alguns autores verificam que o desempenho de determinadas metaheurísticas é superior em comparação com outras em situações específicas. Contudo, em termos gerais não é possível afirmar categoricamente qual metaheurística é mais indicada para o problema de análise de portfólio de projetos de forma genérica, dado que a escolha da metaheurística depende de vários fatores, incluindo as características específicas do problema, as preferências do tomador de decisão, a natureza dos dados disponíveis e as restrições computacionais.

No geral, observa-se que os resultados obtidos com a utilização de heurísticas/metaheurísticas para a resolução desse tipo de problema são significativos e atendem ao propósito de encontrar uma solução excelente em tempos computacionais viáveis para o processo de geração de portfólios, os quais devem ser submetidos posteriormente a análises pelos tomadores de decisão.

Neste contexto, a contribuição adicional deste trabalho considerando os métodos já existentes na literatura se baseia na integração de metodologias para resolução de problemas de otimização combinatória, com a proposição da metaheurística, com método multicritério de agregação aditiva com elicitação flexível.

Por fim, a construção de um sistema de apoio à decisão é fundamental no contexto da resolução do problema de seleção de portfólio de projetos, uma vez que proporciona uma estrutura robusta e adaptável que pode ser aplicada em diversas situações. Proporcionando, assim, aos tomadores de decisão uma ferramenta para apoiar as decisões, que pode ser adaptada às nuances específicas de diferentes setores, organizações ou desafios. O sistema desenvolvido

nesta tese é um produto tecnológico que está disponível no site (<https://fitradeoff.org/>), e em processo de registro no INPI.

3 MODELO DE DECISÃO MULTICRITÉRIO PARA SELEÇÃO DE PORTFÓLIO DE PROJETOS COM FITRADEOFF E ANÁLISE COMBINATORIAL

Diversas são as ferramentas de apoio à decisão multicritério e ampla é a literatura que sustenta cada um desses enfrentamentos (AOUNI et al., 2018; MOHAGHEGHI et al., 2019). Todavia, como já indicado como ambiente de desenvolvimento dessa tese e, diante de sua relevância no cenário de apoio à decisão multicritério, o método FITradeoff se destaca. É o método do qual deriva a presente pesquisa, servindo de base para as adaptações propostas, resultados e, conseqüentemente, conclusões desenvolvidas.

O método FITradeoff pode ser dividido em três etapas. A primeira etapa corresponde à avaliação intracritério, na qual uma função de valor marginal é obtida para cada critério. A segunda etapa do método corresponde à ordenação das constantes de escala dos critérios, considerando o espaço de conseqüências dos critérios. E a terceira etapa inicia o processo flexível de elicitação. Nesta última, o tomador de decisão expressa suas preferências em relação a duas conseqüências (KANG et al., 2018).

3.1 O processo de elicitação flexível no método FITradeoff

Uma vez determinado o método a ser utilizado, é fundamental que se esclareça quais os norteadores da sua lógica de funcionamento e o impacto que tal operação tem sobre aqueles que utilizam a ferramenta de apoio à decisão multicritério e qual seria a dimensão de esforço que caberia aos decisores.

O processo flexível de elicitação proposto pelo FITradeoff tem como objetivo obter os valores das constantes de escala usando informações parciais para elicitar as preferências do tomador de decisão. Em modelos aditivos, os pesos não significam o grau de importância para cada critério, uma vez que o problema da escala deve ser considerado. Portanto, o peso representa a taxa de substituição (KEENEY & RAIFFA, 1976). No entanto, o processo de compensação para obter esses pesos não é fácil para os tomadores de decisão, pois eles precisam avaliar os parâmetros e fornecer um nível exato de satisfação em um determinado critério pelo qual estão dispostos a trocar por um melhor nível de satisfação em outro.

Assim, o processo de elicitação FITradeoff foi desenvolvido precisamente para permitir que os tomadores de decisão reduzam o tempo e o esforço necessários. O FITradeoff permite que eles forneçam informações incompletas durante o processo de elicitação. Além disso, não é necessário estabelecer um valor exato de indiferença, mas apenas relações de preferência. Os tomadores de decisão não precisam realizar essa análise para todos os pares de critérios

adjacentes. O processo flexível permite que o tomador de decisão, caso não queira mais fornecer relações de preferência, obtenha uma recomendação de decisão parcial com as informações fornecidas até aquele momento.

Para entender melhor como esse processo ocorre, primeiro, será apresentado como funciona o procedimento de tradeoff tradicional (KEENEY & RAIFFA, 1976).

Considere um conjunto de critérios conflitantes $C = \{c_1, c_2, \dots, c_p\}$ e que cada critério c_j tem uma constante de escala (ou peso) k_j , que representa a compensação entre os critérios. Então, primeiro, os tomadores de decisão ordenam os pesos dos critérios, e uma ordem de preferência é obtida da seguinte forma:

$$k_1 > k_2 > k_3 > \dots > k_p \quad (2)$$

Como o critério c_1 tem uma importância relativa maior que c_2 , deveria haver algum valor intermediário, considerando o intervalo de valores das consequências entre o pior e o melhor resultado, para c_1 no qual o tomador de decisão é indiferente ao melhor resultado de c_2 , e todos os outros critérios (c_3, \dots, c_p) são considerados como tendo resultados piores, o que significa que:

$$k_1 v_1(Y_1^I) = k_2 \quad (3)$$

Na Equação (3), v_1 é a função de valor do critério c_1 , e Y_1^I é o ponto de indiferença entre as duas consequências. Considerando a função de agregação aditiva e que o valor do melhor resultado é igual a 1 e o pior é definido como 0, então $v_2(best_2) = 1$.

No processo de elicitação do FITradeoff, ao invés de solicitar ao tomador de decisão o ponto de indiferença como descrito anteriormente, é solicitada informação sobre relações de preferência em relação aos níveis dos diferentes critérios adjacentes. Em seguida, pergunta-se ao tomador de decisão se ele prefere um nível intermediário Y_1^I do critério c_1 ou o melhor resultado de c_2 . Se o tomador de decisão preferir o ponto intermediário, então a desigualdade (4) pode ser registrada. Considerando outro ponto intermediário Y_1'' , e se o tomador de decisão preferir o melhor resultado em c_2 do que ao segundo ponto intermediário em c_1 , então a desigualdade (5) será obtida.

$$k_1 v_1(Y_1^I) > k_2 \quad (4)$$

$$k_1 v_1(Y_1'') < k_2 \quad (5)$$

Esse procedimento será repetido para outros pares de critérios adjacentes, e novas desigualdades semelhantes a (4) e (5) serão obtidas. Essas desigualdades serão usadas para construir um espaço de peso viável ϕ , o qual é um conjunto viável de vetores de peso que satisfazem as equações fornecidas:

$$\varphi = \begin{cases} k_1 > k_2 > k_3 > \dots > k_p \\ k_1 v_1(Y'_1) > k_2 \\ k_1 v_1(Y''_1) < k_2 \\ \dots \\ k_j v_j(Y'_j) > k_{j+1} \\ k_j v_j(Y''_j) < k_{j+1} \\ \dots \\ k_{p-1} v_{p-1}(Y'_{p-1}) > k_p \\ k_{p-1} v_{p-1}(Y''_{p-1}) < k_p \end{cases} \quad (6)$$

Em cada iteração do processo de elicitação, o problema de programação linear (*Linear Programming Problem* - LPP) na Equação (7) (DE ALMEIDA et al., 2016) é executado para obter o conjunto de alternativas potencialmente ótimas. Uma alternativa é potencialmente ótima se o seu valor global for maior ou igual ao valor global de todas as outras alternativas, simultaneamente, para pelo menos um vetor de pesos. Assim, em cada atualização do espaço de pesos, verifica-se quais dessas alternativas permanecem potencialmente ótimas. O processo então termina quando apenas uma única alternativa permanece neste conjunto ou quando o tomador de decisão não está mais disposto a fornecer informações de preferência. Portanto, um conjunto parcial de alternativas potencialmente ótimas é obtido.

$$\begin{aligned} & \text{Max } \sum_{j=1}^p k_j v_j(x_{ij}), i=1, \dots, n \\ & \text{s.t.} \\ & \sum_{j=1}^p k_j v_j(x_{ij}) \geq \sum_{j=1}^p k_j v_j(x_{jz}), z=1, 2, \dots, n, z \neq i \\ & k_j v_j(Y'_j) - \varepsilon \geq k_{j+1} \text{ for } j=1 \text{ to } p-1 \\ & k_j v_j(Y''_j) + \varepsilon \leq k_{j+1} \text{ for } j=1 \text{ to } p-1 \\ & \sum_{j=1}^p k_j = 1 \\ & k_j \geq 0, j=1, \dots, p \end{aligned} \quad (7)$$

O valor atribuído à constante ε , em (7), é o menor possível de acordo com a precisão da linguagem computacional e foi introduzido para evitar a desigualdade estrita. Ao fazer isso, essas desigualdades podem ser tornadas equivalentes a (4) e (5). A análise de (7) busca verificar a potencial otimalidade de uma alternativa a_i , maximizando o valor de a_i (onde as variáveis de decisão são as constantes de escala k_j) e sujeita à primeira inequação do LPP que valida se seu valor é maior ou igual aos valores de todas as outras alternativas para pelo menos um vetor de pesos no espaço de pesos (DE ALMEIDA et al., 2016). E também, está sujeito às restrições do espaço de pesos φ (6) e às restrições de normalização e não-negatividade.

3.2 Uma nova abordagem do FITradeoff para seleção de portfólio de projetos

3.2.1 O método

Para aplicar o método FITradeoff no contexto de problemas de seleção de portfólio, o método proposto utiliza a seguinte abordagem: [1] as propriedades dos projetos em cada critério são agregadas; [2] o processo de geração ocorre enumerando explicitamente todas as combinações possíveis de projetos, [3] a viabilidade e eficiência do portfólio são verificadas, e finalmente [4] uma análise multicritério é conduzida usando o processo de elicitación flexível e interativo.

Portanto, para reduzir o esforço computacional durante o processo de geração de portfólio, é proposto utilizar o conceito de portfólio c -ótimo (ver, por exemplo, Vetschera & de Almeida, (2012)), que fornece uma solução ótima para um número fixo de c projetos e varia sistematicamente c . Esse conceito pode ser representado como na Equação (8)

$$\sum_d t_d = c \quad (8)$$

onde o problema de decisão de portfólio considerado diz respeito a um conjunto $D = \{d: d = 1, \dots, l\}$ de l projetos, e um portfólio é um subconjunto de $S \subseteq D$ de vários projetos. A variável t_d é uma variável binária que é ajustada para um se o projeto $d \in S$ e zero caso contrário. Os projetos são avaliados em um conjunto de critérios de benefício e um conjunto de critérios de consumo de recursos.

Esses critérios são divididos pelo uso associado de recursos (r_{d1}, \dots, r_{dq}) onde r_{dq} representa o consumo do recurso q pelo projeto d , e os outros critérios (e_{d1}, \dots, e_{dp}) , representam os benefícios do projeto.

Aqui estão algumas definições nesse contexto que já são conhecidas na literatura (VETSCHERA & DE ALMEIDA, 2012; LOURENÇO et al., 2012; VETSCHERA, 1994).

Definição 1. Seja $R_q(S)$ o consumo de recursos de um portfólio S dado por,

$$R_q(S) = \sum_{d \in S} r_{dq} \quad (9)$$

logo, é a soma do consumo de recursos, por exemplo, o custo ou o recurso financeiro exigido, de todos os projetos incluídos no portfólio.

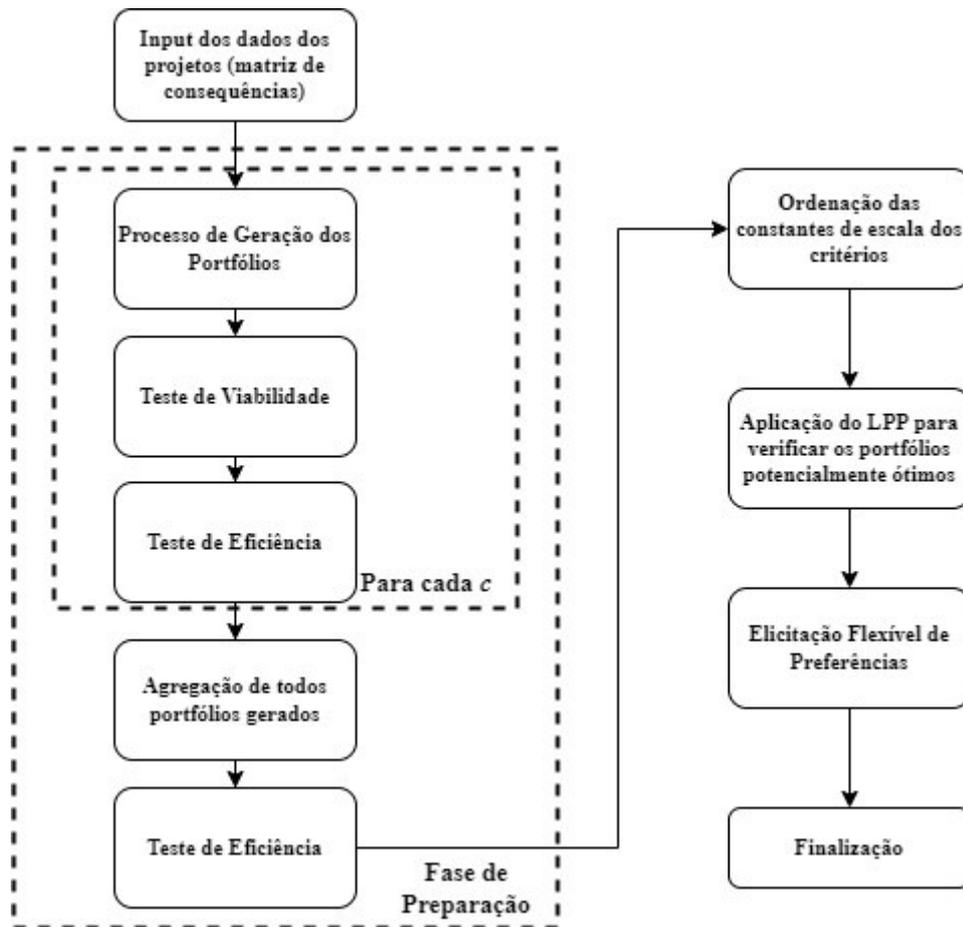
Definição 2. Os benefícios do portfólio dependerão dos benefícios dos projetos que ele contém. O benefício x_j do portfólio S no critério j é determinado como (ver, por exemplo, Vetschera (1994)):

$$x_j(S) = \sum_{d \in S} e_{dj} \quad (10)$$

A proposta de um modelo de seleção de portfólio é então dividida em duas fases: a fase de preparação e uma segunda fase em que as preferências são obtidas e o modelo FITradeoff é aplicado. A fase de preparação começa com o processo de geração explícita da combinação de portfólios para um valor fixo c de projetos. Por meio desse processo, as propriedades dos c projetos incluídos nesses portfólios são agregadas, como já descrito nas definições 1 e 2. Além disso, os testes de viabilidade e eficiência são realizados nesta fase. Esse procedimento é repetido para cada valor de c , e, finalmente, os portfólios viáveis e eficientes gerados são agregados e a análise de eficiência é realizada mais uma vez. Neste ponto, todos os portfólios de tamanhos diferentes são comparados, concluindo assim a fase de preparação.

A fase é chamada de fase de preparação, pois os portfólios possíveis estão sendo gerados e analisados, e não há participação dos tomadores de decisão neste ponto. No final desta fase, inicia-se a interação com os tomadores de decisão. Isso leva ao fornecimento da ordenação dos pesos dos critérios, e o LPP será executado com base no conjunto disponível de vetores de peso, obtendo assim um conjunto de portfólios potencialmente ótimos. Em seguida, o procedimento para elicitare as preferências dos tomadores de decisão começa e o processo continua de forma similar ao projetado para o FITradeoff para o problema de escolha (DE ALMEIDA et al., 2016) (Figura 4).

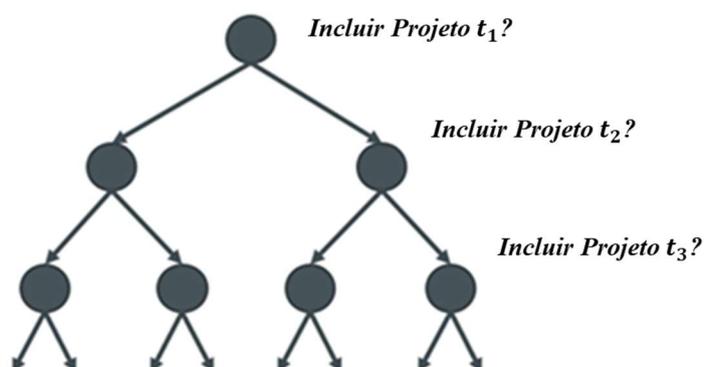
Figura 4 - Etapas do DSS do FITradeoff para seleção de portfólio.



Fonte: A Autora (2024).

O processo de geração de portfólio é projetado para a combinação dos projetos e pode ser representado por uma árvore de busca (Figura 5). A abordagem de geração explícita é usada para verificar se o Projeto t_1 pode ser incluído no portfólio, em seguida, prosseguir para o próximo projeto, para verificar se deve ou não incluir o projeto t_2 , e assim por diante. Esse processo representa um problema combinatório na classe de 2^l , sendo l o número de projetos que devem ou não ser incluídos nos portfólios.

Figura 5 - Árvore de busca para geração de portfólio de projetos.



Fonte: Adaptado de Vetschera (1994).

Nesta fase, é utilizada a abordagem de geração explícita de portfólios de projetos. Algumas vantagens e desvantagens podem ser reveladas ao comparar a abordagem de geração explícita com a baseada em programação matemática (VETSCHERA, 1994). Uma das vantagens é que a geração explícita é cognitivamente mais simples para os tomadores de decisão e pode ser mais fácil de alcançar um consenso. Uma segunda vantagem é a flexibilidade que essa abordagem oferece em termos de operações de agregação em atributos.

No processo de geração de portfólios, uma questão que deve ser destacada é que, embora a abordagem de programação matemática, ou seja, algoritmos aproximativos, possa considerar todas as alternativas possíveis, mesmo que implicitamente, o melhor portfólio pode não ser detectado no processo, e os tomadores de decisão poderão não analisar essa opção. Esse problema não está presente no processo de geração explícita usando a árvore de busca.

O processo de geração destacado aqui é um problema combinatório e possivelmente exigirá um esforço computacional excessivo. Para superar esse problema, abordagens para reduzir a complexidade e o número de portfólios gerados serão implementadas em cada subconjunto de portfólios de c projetos. Estratégias de viabilidade e eficiência (VETSCHERA, 1994) são utilizadas para tentar evitar a geração de alternativas indesejáveis a priori.

A viabilidade dos portfólios de projetos é verificada durante o processo de geração, ou seja, à medida que o projeto está sendo combinado para a geração de um portfólio, aqueles que violam o budget preestabelecido são eliminados. Um ramo da árvore pode ser eliminado da análise se o budget foi violado no processo de geração (VETSCHERA, 1994) e a inclusão de qualquer projeto ainda não analisado não restaurará essa viabilidade.

Definição 3. O tomador de decisão no contexto deste problema tem um limite de orçamento, budget, B_q para cada recurso q . Essa restrição deve ser cumprida para garantir a viabilidade do portfólio e é calculada por

$$\sum_{d \in S} r_{dq} \leq B_q \quad (11)$$

Em relação a essa restrição, é importante destacar que esta tese lidará com problemas e aplicações com apenas uma restrição, o budget. No entanto, o método proposto permite a inclusão de mais de uma restrição, representando as limitações em determinados recursos principais para a inclusão de projetos no portfólio. Por exemplo, na questão da limitação de recursos durante a pandemia de COVID-19, hospitais podem ter limitações orçamentárias e no número de leitos. Outro exemplo está relacionado à formação de portfólios de projetos de pesquisa em universidades. As restrições podem ser tanto orçamentárias quanto no número de bolsas disponíveis. Assim, haverá um limite (B_q) para cada um dos critérios relacionados ao uso do recurso associado, e uma restrição o representará e será adicionada ao problema (Equação 11).

Esse processo de eliminação de ramos da árvore de geração é alcançado de duas maneiras: ou o ramo não é viável, não respeitando a restrição do budget, ou um ramo da árvore pode ser eliminado se, considerando que foi utilizado um operador de soma para a agregação, os critérios violadores de consumo de recursos aumentam monotonamente quando mais projetos são incluídos, e isso é atendido verificando se os projetos ainda não incluídos têm valores não negativos.

Ao dividir em c classes, sendo c o número de projetos que um portfólio contém, e começando o processo de geração com c igual a 1, ramos da árvore de busca podem ser eliminados se, por exemplo, para um problema com 10 projetos, quando no processo de geração c é igual a 5 (ou seja, avaliando portfólios contendo 5 projetos), isto é, não há portfólio que possa ser gerado sem violar a viabilidade. Consequentemente, não há necessidade de procurar c maior que 5, porque quando há apenas 5 projetos, isso já viola a limitação do orçamento, e, portanto, incluir mais projetos não restaurará a viabilidade.

A segunda estratégia utilizada é a abordagem para verificar a eficiência dos portfólios viáveis gerados, que é um número já reduzido comparado ao número de todos os possíveis portfólios. Esta etapa consiste em eliminar todas as alternativas dominadas em uma comparação par a par, ou seja, a alternativa A domina a alternativa B se A for considerada pelo menos tão boa quanto B em todos os critérios e estritamente melhor que B em pelo menos um critério.

Definição 4. Um portfólio m domina outro portfólio n se, em uma comparação par a par, $R_{mq} \leq R_{nq}$ and $x_{mj} > x_{nj}$, or $R_{mq} < R_{nq}$ and $x_{mj} \geq x_{nj}$, para todo q e j , onde R_{mq} é o consumo do recurso q pelo portfólio m , e x_{mj} é o valor agregado do portfólio m no critério j calculado de acordo com (9) e (10). O subconjunto de portfólios eficientes só pode ser determinado pela comparação par a par de todos os portfólios viáveis, e o portfólio é chamado eficiente quando nenhum outro o domina.

Essa avaliação de dominância difere da avaliação de dominação usada no método FITradeoff, pois considera os valores absolutos das consequências dos portfólios obtidos usando a agregação aditiva descrita nas definições 1 e 2.

Após eliminar todos os portfólios que não atendem às restrições de recursos e os portfólios dominados para cada c , sendo o número fixo de c variando de $\{1, \dots, l\}$. Esse processo é repetido para cada valor diferente de c . Todos os portfólios são agrupados e a análise de eficiência é realizada mais uma vez considerando o conjunto completo de portfólios viáveis e eficientes de cada c . Dessa forma, o processo de elicitação pode ser realizado usando o método FITradeoff para selecionar o portfólio ótimo. O pseudocódigo a seguir (Tabela 2) sistematiza o algoritmo do método proposto.

Tabela 2 - Pseudocódigo do FITradeoff para portfólio combinatório.

Algoritmo 01: Pseudocódigo do FITradeoff para portfólio combinatório

Armazena os dados fornecidos pelo tomador de decisões (DM).

$B_q, Q, l, p, r_{dq}, e_{dj}$

Inicie o processo de geração de portfólios para valores fixos de c .

$c := 1$.

Enquanto ($c \leq l$) **faça**

Inicie o processo de geração de todas as combinações possíveis de projetos dentro da capacidade máxima c de projetos por portfólio.

$portfolio_size := 0, i := 1$.

$Total_combinations = l!/c!(l - c)!$

Enquanto ($i \leq Total_combinations$) **faça**

Inicie o processo de testar todas as combinações inserindo projetos em diferentes posições de um vetor sem repetição

Para ($d := 1, \dots, l$) **faça**

$portfolio_size_i = portfolio_size_i + 1$

Se $portfolio_size_i \leq c$,

então insira o projeto d no portfólio i

calcule o consumo do recurso q pelo portfólio i (definição 1) ($R_{iq} = R_{iq} + r_{dq}$).

verifique a viabilidade do portfólio gerado.

Se $R_{iq} > B_q$, (definição 3)

então elimine o último portfólio inserido que viola a restrição e atualize R_{iq} e $portfolio_size_i$

senão

Para ($j = 1, \dots, p$) **faça**

Calcule o benefício do portfólio i em cada critério j (definição 2)

($x_{ij} = x_{ij} + e_{aj}$).

$i = i + 1$.

Fim Enquanto

Se nenhum portfólio pôde ser gerado,

então atualize $c := c + 1$.

Verifique a eficiência dos portfólios em uma comparação par a par e elimine os dominados (baseado na definição 4).

Para ($i = 1, \dots, n$) **faça**

Para ($h = i+1, \dots, n$) **faça**

Calcule a diferença entre as consequências da alt_i e alt_h ,

Se a diferença é igual a 0 em todos os critérios e maior que 0 em pelo menos um critério,

Então alt_i domina alt_h

senão alt_i é dominada e não será comparada com as outras alternativas devido à transitividade.

Atualize a *consequence_matrix* (o número de alternativas será o número de portfólios viáveis e não dominados).

$c = c + 1$.

Fim Enquanto

Atualize a *consequence_matrix* com as alternativas, esses sendo agora os portfólios previamente selecionados e seus respectivos dados de consumo de recursos e benefícios.

Verifique mais uma vez a eficiência de todos os portfólios em uma comparação par a par e elimina os dominados (com base na definição 4).

Inicie o método FITradeoff.

Ordene os pesos (constantes de escala) dos critérios (k_j).

Rode o LPP (Equação 7) para tentar resolver o problema com base no conjunto disponível de vetores de peso.

Realize o processo de elicitação flexível de preferências.

Recomendação do melhor portfólio.

Fonte: A Autora (2024).

Para analisar o comportamento da abordagem proposta, foi realizado um estudo de simulação considerando diferentes cenários. Para ilustrar como esse procedimento funciona, são apresentadas quatro aplicações utilizando alguns problemas e exemplos encontrados na literatura sobre seleção de portfólio.

3.2.2 Um estudo de simulação sobre as propriedades computacionais do FITradeoff para seleção de portfólio

Considerando o modelo proposto na subseção anterior, é possível reconhecer que uma solução para o problema de portfólio poderia ser alcançada de fato pela abordagem clássica de otimização combinatória com um processo flexível, conforme percebido no modelo proposto.

No entanto, outras questões surgem a partir desse ponto em relação à eficiência da abordagem proposta em um Sistema de Apoio à Decisão: 1) Quanto tempo leva a primeira etapa (fase de preparação)? e 2) Quanto tempo leva a segunda etapa?

Para examinar o esforço computacional e as propriedades do FITradeoff proposto para portfólio combinatório e fornecer informações relevantes para responder às perguntas acima, testes devem ser realizados considerando uma variedade de parâmetros, ou seja, o número de critérios, o número de projetos e diferentes níveis de restrição.

Foi realizado um estudo de simulação considerando os seguintes parâmetros: o número de projetos variando em $l = 5, 10, 15, 20, 25$, o número de critérios de consumo de recursos sendo $Q = 1$, e o número de critérios de benefícios sendo $p = 5, 12$. O orçamento considerado foi de 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% e 90% da soma do consumo de recursos de todos os projetos. A abordagem proposta foi realizada usando o SAD.

Foram criados noventa cenários simulados aleatoriamente, conforme apresentado na Tabela 3. Cinquenta instâncias do problema foram geradas e replicadas 10 vezes para cada cenário simulado, o que representa um total de 45.000 simulações. O padrão de pesos dos critérios foi estabelecido aleatoriamente em cada iteração.

Tabela 3 - Cenários simulados.

| Número de critérios = 5 | | | | | | | | | | |
|--|-----|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Budget (% do consumo total de recursos) | | | | | | | | | | |
| | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% | 60% | 70% | 80% | 90% | |
| Número de Alternativas | 5 | Cenário 1 | Cenário 2 | Cenário 3 | Cenário 4 | Cenário 5 | Cenário 6 | Cenário 7 | Cenário 8 | Cenário 9 |
| | 10 | Cenário 10 | Cenário 11 | Cenário 12 | Cenário 13 | Cenário 14 | Cenário 15 | Cenário 16 | Cenário 17 | Cenário 18 |
| | 15 | Cenário 19 | Cenário 20 | Cenário 21 | Cenário 22 | Cenário 23 | Cenário 24 | Cenário 25 | Cenário 26 | Cenário 27 |
| | 20 | Cenário 28 | Cenário 29 | Cenário 30 | Cenário 31 | Cenário 32 | Cenário 33 | Cenário 34 | Cenário 35 | Cenário 36 |
| | 25 | Cenário 37 | Cenário 38 | Cenário 39 | Cenário 40 | Cenário 41 | Cenário 42 | Cenário 43 | Cenário 44 | Cenário 45 |
| Número de critérios = 12 | | | | | | | | | | |
| Budget (% do consumo total de recursos) | | | | | | | | | | |
| | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% | 60% | 70% | 80% | 90% | |
| Número de Alternativas | 5 | Cenário 46 | Cenário 47 | Cenário 48 | Cenário 49 | Cenário 50 | Cenário 51 | Cenário 52 | Cenário 53 | Cenário 54 |
| | 10 | Cenário 55 | Cenário 56 | Cenário 57 | Cenário 58 | Cenário 59 | Cenário 60 | Cenário 61 | Cenário 62 | Cenário 63 |
| | 15 | Cenário 64 | Cenário 65 | Cenário 66 | Cenário 67 | Cenário 68 | Cenário 69 | Cenário 70 | Cenário 71 | Cenário 72 |
| | 20 | Cenário 73 | Cenário 74 | Cenário 75 | Cenário 76 | Cenário 77 | Cenário 78 | Cenário 79 | Cenário 80 | Cenário 81 |
| | 25 | Cenário 82 | Cenário 83 | Cenário 84 | Cenário 85 | Cenário 86 | Cenário 87 | Cenário 88 | Cenário 89 | Cenário 90 |

Fonte: A Autora (2024).

O estudo de simulação foi realizado para obter as seguintes informações: [1] o tempo gasto no processo de geração e teste de viabilidade; [2] o tempo gasto no teste de eficiência; [3] o tempo total gasto na fase de preparação; [4] o número de portfólios remanescentes após o teste de viabilidade; [5] o número de portfólios remanescentes após o teste de eficiência; [6] o número de portfólios potencialmente ótimos após o LPP baseado apenas nas informações da ordenação dos pesos dos critérios; e [7] o número de perguntas necessárias para resolver o problema.

Tabela 4 - Resultados da simulação em relação ao tempo computacional em diferentes etapas da metodologia proposta.

| Número de critérios = 5 | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Número projetos | MÉDIA | | | | | MÍNIMO | | | | | MÁXIMO | | | | |
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 25* | 5 | 10 | 15 | 20 | 25* | 5 | 10 | 15 | 20 | 25* |
| Tempo Geração e Teste de Viabilidade | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:08:24 | 00:10:17 | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:00:10 | 00:00:21 | 00:00:33 | 00:17:20 | 00:30:29 |
| Tempo Teste de Eficiência | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:00:17 | 00:00:11 | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:00:04 | 00:00:07 | 00:00:33 | 00:00:31 |
| Tempo Total da Fase de preparação | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:08:40 | 00:10:27 | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:00:10 | 00:00:25 | 00:00:40 | 00:17:53 | 00:31:00 |
| Número de critérios = 12 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Número projetos | MÉDIA | | | | | MÍNIMO | | | | | MÁXIMO | | | | |
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 25* | 5 | 10 | 15 | 20 | 25* | 5 | 10 | 15 | 20 | 25* |
| Tempo Geração e Teste de Viabilidade | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:00:01 | 00:24:56 | 00:23:16 | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:00:20 | 00:00:25 | 00:00:57 | 01:18:32 | 01:09:23 |
| Tempo Teste de Eficiência | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:00:01 | 00:00:47 | 00:00:20 | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:00:01 | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:00:05 | 00:00:09 | 00:01:44 | 00:00:56 |
| Tempo Total da Fase de preparação | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:00:02 | 00:25:43 | 00:23:36 | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:00:00 | 00:00:02 | 00:00:00 | 00:00:20 | 00:00:30 | 00:01:06 | 01:19:49 | 01:10:19 |

Fonte: A Autora (2024).

Com os resultados obtidos nas simulações, pode-se observar na Tabela 4 que o tempo necessário para o processo de geração e análise de viabilidade é maior do que o tempo necessário para a análise de eficiência, um resultado já esperado devido ao grande número de possibilidades a serem analisadas no primeiro teste. Outro fator a ser destacado é que budgets mais restritos (ou seja, percentagens mais baixas do total do consumo de recursos, isto é, dos custos) resultam em tempos computacionais mais curtos. E orçamentos mais altos, ou seja, problemas menos restritos, consomem mais esforço computacional, uma vez que menos portfólios serão eliminados na análise de viabilidade.

Foi realizada uma análise para verificar se a eficiência das etapas depende da distribuição dos custos dos projetos dentro do portfólio. Duas situações específicas foram testadas: projetos com custos comparáveis e o caso extremo de um portfólio candidato com um projeto muito caro que consumiria 60% do orçamento. Os resultados mostram que o tempo computacional demandado em ambos os casos foi semelhante em cada etapa. A etapa que consome a maior

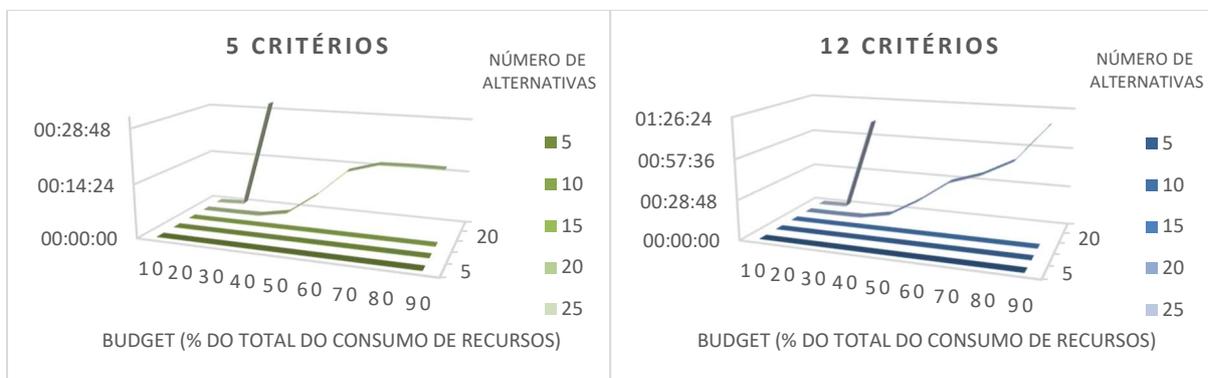
parte do tempo computacional é a primeira (geração e teste de viabilidade), ou seja, cerca de 96% do tempo total gasto na fase de preparação.

Os resultados mostram que, quando há até 15 projetos, mesmo considerando problemas com 5 ou 12 critérios, o tempo total gasto na fase de preparação é muito pequeno, exigindo no máximo um pouco mais de um minuto, independentemente da quantidade do orçamento estabelecido. Quando são analisados 20 ou mais projetos, esse tempo aumenta para uma média de 8 minutos e um máximo de 18 minutos para problemas com 5 critérios e uma média de 25 minutos e um máximo de 1 hora e 20 minutos para problemas com 12 critérios.

Para problemas que consideram 25 projetos, observou-se que, quando o consumo total de recursos é de 40% ou mais, o tempo computacional necessário foi muito alto, tornando a análise dos cenários 40 a 45 e 85 a 90 inviável. O esforço computacional requerido até 30% do orçamento para problemas com 25 projetos, considerando 5 ou 12 critérios, é razoável, atingindo no máximo 1 hora e 10 minutos e uma média de 23 minutos. A Figura 6 ilustra os resultados médios alcançados.

É importante enfatizar que esses tempos computacionais são considerados razoáveis, uma vez que se referem ao tempo gasto na fase de preparação, na qual não há interação com o DM. Assim, o analista pode inserir os dados iniciais e aguardar que o DSS execute a análise e os procedimentos iniciais, e somente após a conclusão da fase de preparação, que exige o maior esforço computacional em relação ao problema de natureza combinatória, o DM participaria do processo, iniciando com as etapas de ordenação das constantes de escala dos critérios e elicitação flexível. No processo interativo com o DM, o tempo computacional nesta etapa é praticamente imperceptível para o tomador de decisão. Apenas um fracionamento de segundo é necessário para atualizar as perguntas da elicitação.

Figura 6 - Resultados da simulação referentes ao tempo total da fase de preparação.



Fonte: A Autora (2024).

Também foram coletados resultados referentes ao número de portfólios remanescentes em quatro estágios diferentes do procedimento proposto (Tabela 5): inicialmente, existe as combinações possíveis para l definido como 5, 10, 15, 20 e 25 (igual a 2^l) – N° Total de Combinações; segundo, é o número de portfólios após verificar o teste de viabilidade - N° Portfólios depois do TV (Teste de viabilidade); terceiro, é o número restante de portfólios obtido após o teste de eficiência - N° Portfólios depois do TE (Teste de eficiência); e, finalmente, há o número de portfólios após a aplicação do LPP com base apenas nas informações do ranking dos pesos dos critérios - N° Portfólios PO (Potencialmente Ótimos). A Tabela 5 resume os resultados médios, mínimos e máximos para os problemas considerando 5 e 12 critérios.

Tabela 5 - Resultados da simulação referentes ao número de portfólios em diferentes etapas da metodologia proposta e ao número de perguntas necessárias. (N° = número; TV = Teste de Viabilidade; TE = Teste de Eficiência; PO = Potencialmente Ótimos).

| Número de critérios = 5 | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|-------|------|-------|---------|----------|--------|------|-------|---------|----------|--------|------|-------|---------|----------|
| Número de Projetos | MÉDIA | | | | | MÍNIMO | | | | | MÁXIMO | | | | |
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 25* | 5 | 10 | 15 | 20 | 25* | 5 | 10 | 15 | 20 | 25* |
| N° Total de Combinações | 32 | 1024 | 32768 | 1048576 | 33554432 | 32 | 1024 | 32768 | 1048576 | 33554432 | 32 | 1024 | 32768 | 1048576 | 33554432 |
| N° Portfólios depois do TV | 15 | 511 | 16382 | 524480 | 307061 | 0 | 4 | 19 | 137 | 637 | 30 | 1018 | 32747 | 1048440 | 872523 |
| N° Portfólios depois do TE | 2 | 32 | 206 | 743 | 271 | 0 | 2 | 5 | 22 | 42 | 4 | 61 | 391 | 1297 | 565 |
| N° Portfólios PO | 1 | 2 | 3 | 4 | 6 | 0 | 1 | 1 | 1 | 3 | 2 | 3 | 6 | 7 | 9 |
| N° de respostas | 1 | 2 | 8 | 6 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 2 | 6 | 14 | 14 | 14 |
| Número de critérios = 12 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Número de Projetos | MÉDIA | | | | | MÍNIMO | | | | | MÁXIMO | | | | |
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 25* | 5 | 10 | 15 | 20 | 25* | 5 | 10 | 15 | 20 | 25* |
| N° Total de Combinações | 32 | 1024 | 32768 | 1048576 | 33554432 | 32 | 1024 | 32768 | 1048576 | 33554432 | 32 | 1024 | 32768 | 1048576 | 33554432 |
| N° Portfólios depois do TV | 15 | 511 | 16383 | 503874 | 296795 | 0 | 6 | 25 | 119 | 493 | 30 | 1016 | 32741 | 1048455 | 844766 |
| N° Portfólios depois do TE | 9 | 117 | 542 | 2738 | 435 | 0 | 3 | 8 | 19 | 43 | 18 | 236 | 1052 | 5993 | 970 |
| N° Portfólios PO | 2 | 4 | 6 | 16 | 12 | 0 | 1 | 2 | 4 | 8 | 4 | 11 | 12 | 45 | 17 |
| N° de respostas | 2 | 7 | 16 | 12 | 3 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 9 | 27 | 29 | 29 | 4 |

Fonte: A Autora (2024).

Os resultados apresentados na Tabela 5 são importantes para verificar a qualidade das estratégias usadas para minimizar a complexidade do problema e o número de portfólios gerados. Observe que os resultados ilustrados para problemas contendo 25 projetos são os resultados resumidos apenas dos cenários 37, 38, 39, 82, 83 e 84, ou seja, até 30% do consumo total de recursos devido às limitações computacionais. No entanto, apenas uma faixa muito pequena de problemas formulados com mais de 25 projetos não seria abrangida pela abordagem

proposta. Observa-se também que os valores mínimos referentes a problemas com 5 projetos são iguais a 0. Isso acontece quando a restrição orçamentária é muito limitante, e nenhum portfólio pode ser gerado.

Em termos gerais, o teste de eficiência apresenta resultados melhores do que o teste de viabilidade, em relação à redução percentual no número de portfólios gerados. O número de portfólios eliminados pelo teste de viabilidade irá alterar de acordo com a variação do percentual do orçamento avaliado. Assim, quanto mais restritivo for o budget, menor será o número de portfólios viáveis e, conseqüentemente, a qualidade do teste de viabilidade será maior. Em média, o teste de viabilidade mostra uma taxa de redução de 53% no número de portfólios gerados em comparação com o número total de combinações possíveis.

O teste de eficiência tem um impacto maior na redução do número de portfólios gerados à medida que o número de projetos analisados aumenta. A porcentagem média de redução no número de portfólios gerados é de 87% em relação ao número de portfólios viáveis. Da mesma forma, isso ocorre com a aplicação do LPP, e a porcentagem média de redução é de 89%.

Assim, a partir desses resultados, verifica-se a qualidade das estratégias utilizadas, que reduzem drasticamente o número de portfólios a serem analisados pelos decisores. Para uma análise custo-benefício do método proposto, considere o custo como o tempo computacional total necessário e o benefício como a redução percentual no número de combinações possíveis de projetos atribuídas a portfólios viáveis e eficientes para os decisores analisarem. O pior cenário é que o custo seja em torno de uma hora; no entanto, isso reduz 99% do número total de combinações, restando um número mínimo de portfólios para os decisores analisarem.

Os resultados encontrados neste estudo de simulação corroboram outros resultados (MENDES et al., 2020) em relação ao número de alternativas potencialmente ótimas obtidas usando apenas a informação da ordem das constantes de escala dos critérios. Finalmente, o número de perguntas feitas aos decisores pelo FITradeoff resulta em números pequenos, no máximo 29 perguntas respondidas considerando 12 critérios. Portanto, é um processo menos cansativo e requer menos esforço cognitivo dos decisores que fornecem informações de preferência.

O processo de elicitação flexível coloca perguntas que pedem ao DM que escolha entre duas conseqüências, para avaliação de Y_j' ou Y_j'' . O DM poderia responder das seguintes maneiras: que prefere a conseqüência A, que prefere a conseqüência B, que é indiferente entre a conseqüência A e B, que não está disposto a dar mais respostas, ou as respostas do DM foram inconsistentes. Depois que o DM escolhe uma das alternativas, o LPP na Equação (7) é executado para encontrar soluções potencialmente ótimas. Vale mencionar que essas perguntas

de elicitação foram obtidas usando uma heurística (consultar para mais informações, de Almeida et al. (2016)).

Os resultados também corroboram com Mendes et al. (2020), especificamente que a influência do aumento do número de alternativas sobre o número de perguntas respondidas pelos decisores só tem maior significado em problemas com 5, 10 e 15 alternativas, enquanto para problemas com 20 ou mais projetos esse aumento não influencia o número de perguntas. Outra questão importante está relacionada ao número de critérios. Observa-se que quando um problema tem menos critérios, isso resulta em um número menor de perguntas feitas ao DM para as quais ele tem que encontrar uma solução.

3.2.3 *Resultados comparativos com outros métodos e discussão*

Para exemplificar ainda mais a aplicação do FITradeoff para portfólio combinatório, foi buscado alguns exemplos na literatura que haviam sido resolvidos por outros métodos para comparar os resultados encontrados. Três artigos diferentes foram selecionados. O primeiro (MAVROTAS et al., 2006) utiliza uma combinação de PROMETHEE e programação inteira; o segundo utiliza a otimização de múltiplos níveis de satisfação (BARBATI et al., 2018); e, finalmente, o terceiro propõe uma abordagem baseada na razão benefício-custo com uso de informações incompletas (FREJ et al., 2021).

Para analisar o primeiro exemplo ilustrativo (MAVROTAS et al., 2006), problema foi resolvido com 20 projetos e 6 critérios, considerando o orçamento disponível de 4000 k€. O DSS levou 11 minutos para resolver, resultando em uma solução com dois portfólios ótimos contendo 16 projetos, que são consideradas soluções equivalentes (YANASSE et al., 2000), com base no valor da distância de equivalência, ou seja, a diferença máxima entre alternativas, estabelecida em 0,01 (solução 01 inclui os projetos: A, B, C, D, E, F, G, H, J, K, L, M, P, Q, R e S; e a solução 02: B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, P, Q, R e S). Essa solução difere dos resultados obtidos pela aplicação direta do PROMETHEE II e da formulação da mochila (MAVROTAS et al., 2006), que foram eliminados no teste de viabilidade.

O segundo exemplo analisado (BARBATI et al., 2018), está relacionado ao exemplo 1 apresentado, que contém 5 projetos e 3 critérios, e o orçamento disponível foi considerado igual a 100. Foram realizadas duas análises, uma considerando pesos iguais e outra considerando uma ordem em que $k_1 > k_2 > k_3$. Na análise considerando pesos iguais, obteve-se como solução o portfólio P3, contendo os projetos A3, A4 e A5, que não foi considerado entre os preferidos na análise da abordagem do valor linear ou pelo procedimento de programação de compromisso. No entanto, este portfólio apresenta em sua análise 3 projetos satisfatórios em

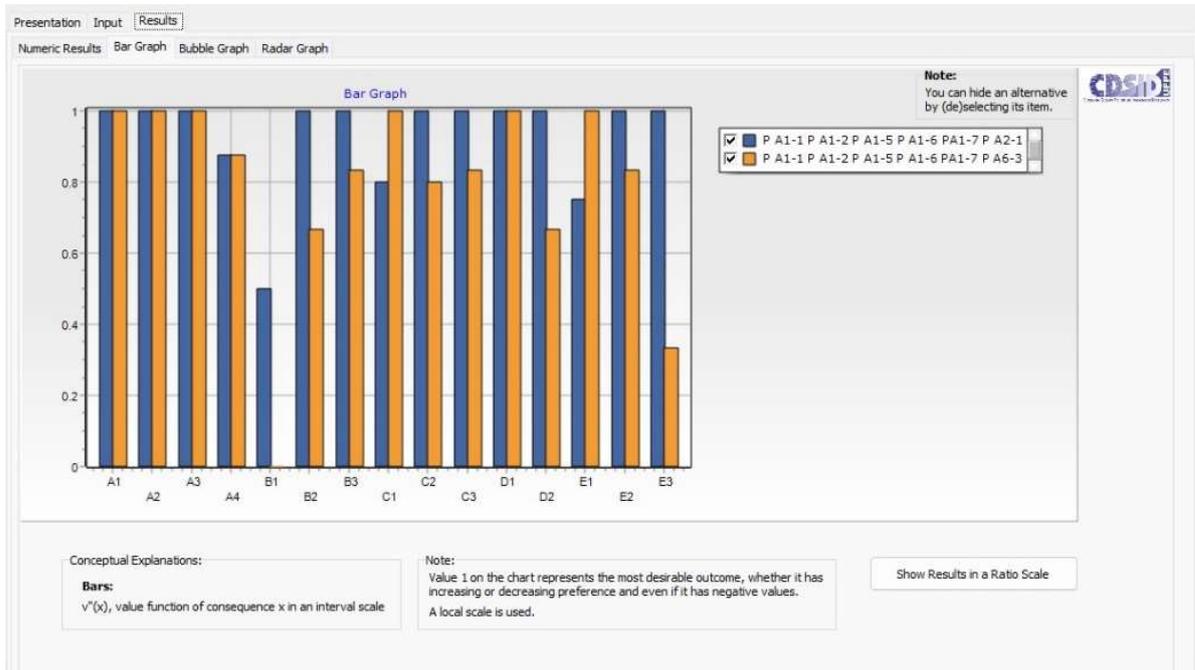
cada critério e domina todos os outros portfólios (BARBATI et al., 2018). Para alcançar esse resultado, o tempo necessário na fase de preparação foi de até um segundo e já resultou no portfólio ótimo sem a necessidade de responder a nenhuma pergunta de preferência.

Na segunda análise, considerando a ordem dos constantes de escala dos critérios mencionados acima, o tempo necessário também foi insignificante e foram encontrados 4 portfólios potencialmente ótimos antes de iniciar o processo de elicitación. Após responder a 8 perguntas de preferência, o portfólio P7 foi obtido como resultado e contém os projetos A1, A2 e A5. Este é o portfólio ótimo em relação à abordagem do valor linear (BARBATI et al., 2018).

Por fim, o caso prático de energia elétrica, para o qual portfólios de projetos de P&D precisavam ser selecionados, foi analisado (FREJ et al., 2021). O problema tem 15 critérios e 46 projetos para serem analisados. Para poder utilizar o modelo proposto dentro de um período razoável, um orçamento mais restrito no valor de R\$ 25.000.000 foi considerado, e as informações necessárias do DM sobre a ordenação das constantes de escala dos critérios usadas foram as fornecidas pelos autores.

A fase de preparação durou 4 minutos e reduziu o número de portfólios para 15 portfólios viáveis e eficientes. Ao aplicar o LPP com as informações da ordenação dos pesos dos critérios, essa quantidade foi reduzida para 2 portfólios potencialmente ótimos. Neste ponto, antes de começar a elicitar preferências, o DM já pode visualizar resultados parciais em termos numéricos, gráficos de barras (Figura 7) ou gráficos de radar (Figura 8).

Figura 7 - Gráfico de barras relacionado aos resultados parciais antes da elicitação.



Fonte: A Autora (2024).

Figura 8 - Gráfico de radar relacionado aos resultados parciais antes da elicitação.



Fonte: A Autora (2024).

Essa apresentação dos resultados atuais pode ser visualizada a qualquer momento durante o processo de elicitação, e os portfólios potencialmente ótimos encontrados até aquele momento serão exibidos. Se o tomador de decisões considerar que os resultados parciais obtidos são

suficientes para seus objetivos, o sistema de apoio à decisão é flexível e permite que o processo de elicitación seja interrompido.

Apenas uma pergunta precisou ser respondida no processo de elicitación para encontrar o portfólio ótimo para o problema. A Figura 9 mostra a primeira pergunta do processo de elicitación, na qual a consequência B foi considerada preferível (FREJ et al., 2021). O que também pode ser observado são os resultados relativos ao teste de equivalência entre as duas alternativas potencialmente ótimas. Neste caso, a diferença máxima entre as alternativas excede o limite estipulado de 0,01, portanto, os portfólios não são considerados equivalentes.

Figura 9 - Primeira pergunta de elicitación feita pelo DSS.

Which consequence do you prefer?
Answer the questions by choosing one option

| Criterion | Consequence A | Consequence B |
|-----------|---------------|---------------|
| C1 | X1: 3 | |
| C2 | W2: 1 | B2: 5 |
| C3 | W3: 1 | B3: 5 |
| C4 | W4: 1 | B4: 5 |
| C5 | W5: 1 | B5: 5 |
| C6 | W6: 1 | B6: 5 |
| C7 | W7: 1 | B7: 5 |
| C8 | W8: 1 | B8: 5 |
| C9 | W9: 1 | B9: 5 |
| C10 | W10: 1 | B10: 5 |
| C11 | W11: 1 | B11: 5 |
| C12 | W12: 1 | B12: 5 |
| C13 | W13: 1 | B13: 5 |
| C14 | W14: 1 | B14: 5 |
| C15 | W15: 1 | B15: 5 |

Note :
W_i is the worst outcome of criterion C_i
X_i is an outcome in between best and worst of criterion C_i
B_i is the best outcome of criterion C_i

Options:
 Consequence A
 Consequence B
 Indifferent
 No Answer

Number of Questions Answered: 0
Number of Potentially Optimal Alternatives: 2

Chosen Order:
C1 - A1
C2 - A2
C3 - A3
C4 - A4
C5 - B1
C6 - C1
C7 - E1

Equivalence Test:
(Maximum difference between P, O, A.s)
Between | Max. Difference
P A1-1 P A1-2 P A1-5 P A1-6 | 0,13900000
P A1-1 P A1-2 P A1-5 P A1-6 | 0,00000000

Fonte: A Autora (2024).

O portfólio ótimo resultante contém um total de 6 projetos ([P A1-1], [P A1-2], [P A1-5], [P A1-6], [P A1-7] e [P A2-1]). Os projetos que compõem a solução encontrada estão entre as cinco primeiras posições no ranking de projetos obtido como resultados na abordagem baseada na relação custo-benefício com informações incompletas (FREJ et al., 2021).

Por meio deste estudo, foi possível observar que a metodologia proposta apresenta bons resultados em comparação com outros métodos, em um tempo computacional razoável e exige menos esforço cognitivo dos tomadores de decisão.

No presente capítulo, foi delineado um modelo robusto de decisão multicritério para a seleção de portfólio de projetos, incorporando o FITradeoff com análise combinatorial. Esta abordagem oferece uma visão abrangente e integrativa na tomada de decisões, considerando a

avaliação comparativa de diferentes portfólios. No próximo capítulo, será avançado para uma discussão sobre uma variação desse modelo, introduzindo uma abordagem heurística que visa superar a complexidade para problemas ainda maiores e trazer uma variação dos resultados apresentados através da ordenação dos portfólios gerados. Ao incorporar elementos de eficiência computacional e flexibilidade adaptativa, o novo modelo promete aprimorar a tomada de decisões em contextos complexos de portfólio de projetos, proporcionando uma contribuição significativa para a literatura e prática em decisões multicritério.

4 MODELO COM ABORDAGEM HEURÍSTICA DE DECISÃO MULTICRITÉRIO PARA O PROBLEMA DE PORTFÓLIO DE PROJETOS COM FITRADEOFF

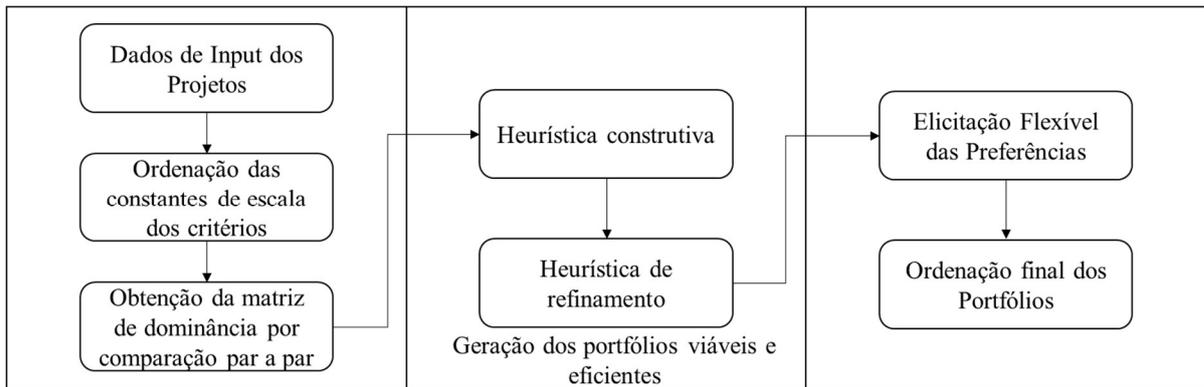
Diante dos avanços metodológicos apresentados no capítulo anterior, que abordou uma perspectiva do FITradeoff com análise combinatória para a problemática de portfólio, e tendo identificado as limitações para problemas muito grandes, surge a necessidade de um modelo capaz de avaliar comparativamente os portfólios viáveis gerados em problemas mais complexos.

A complexidade inerente a problemas de portfólio, especialmente quando envolvem um grande número de projetos concorrentes, motiva a busca por abordagens eficientes que equilibrem a qualidade das soluções com o esforço computacional necessário para atingi-las, conforme discutido na seção 2.2.2. Nesse contexto, este capítulo apresenta uma extensão do FITradeoff, incorporando uma abordagem metaheurística para a resolução da problemática de portfólio.

O FITradeoff para portfólio com análise combinatorial, representa uma ferramenta com o propósito de escolha do melhor portfólio dentre as opções viáveis e eficientes identificadas, resultando ao decisor apenas o portfólio escolhido. A abordagem proposta, neste capítulo, visa comparar os portfólios eficientes e viáveis gerados pela metaheurística, proporcionando uma ordenação destes portfólios. Tal estratégia foi motivada por situações práticas em organizações e instituições que buscam realizar todos os projetos agrupados em portfólios que possam capturar as relações existentes, mas devido as restrições é necessária realizar uma priorização entre eles.

A abordagem proposta consiste em três etapas que serão detalhadas nos subitens seguintes. A primeira etapa é a ordenação das constantes de escala, na qual uma matriz de dominação é obtida por meio de comparações par a par. A segunda etapa corresponde a uma metaheurística híbrida Clarke & Wright/VND (*Variable Neighborhood Descent*) para gerar portfólios viáveis e eficientes. A terceira, elicitación das preferências do decisor, elicita parâmetros de constante de escala sob informações incompletas para propor uma ordenação dos portfólios. A Figura 10 ilustra o passo a passo dessa proposta.

Figura 10 - Etapas da abordagem metaheurística multicritério proposta para o problema de portfólio.



Fonte: A Autora (2024).

4.1 O input dos dados e ordenação das constantes de escala dos critérios

O *input*, isto é, os dados de entrada, para avaliação de um problema de decisão multicritério é a matriz de consequências do conjunto de l projetos, $D = \{d: d = 1, \dots, l\}$ que será avaliada usando p critérios $C = \{c_1, \dots, c_p\}$ limitados a q restrições (r_1, \dots, r_q) .

Nessa primeira etapa, o DM ordena os pesos dos atributos com base em suas preferências, considerando as possíveis consequências associadas a cada atributo. Como resultado, obtém-se desigualdades da forma $k_1 \geq k_2 \geq \dots \geq k_p$. Tais desigualdades formam um espaço inicial de pesos (DE ALMEIDA et al., 2016), que servem como restrições e serão usadas em modelos de Problema de Programação Linear para procurar relações de dominância entre projetos. A Equação (12) mostra o modelo de LPP que é executado para cada par de projetos, a fim de verificar relações de dominância entre eles.

Na Equação (12), a função objetivo é maximizar a diferença entre o valor global das alternativas, obtidos de acordo com o modelo de agregação aditiva (KEENEY & RAIFFA, 1976). O ranking dos pesos dos atributos estabelecidos pelo DM entra como uma restrição para o modelo LPP. Os pesos dos atributos k_j são não negativos, normalizados e somam 1. x_{ij} é o valor resultante da alternativa a_i no critério c_j , e v_j é a função valor dos critérios c_j . As constantes de escala k_j são as variáveis de decisão no problema de programação linear.

$$\begin{aligned}
\text{Max Dif } (a_i, a_b) &= \sum_{j=1}^p k_j v_j(x_{ij}) - \sum_{j=1}^p k_j v_j(x_{bj}), \forall i, b; i \neq b \\
\text{s. t.} \\
k_1 &\geq k_2 \geq \dots \geq k_p \\
\sum_{j=1}^p k_j &= 1 \\
k_j &\geq 0, j = 1 \dots p
\end{aligned} \tag{12}$$

O modelo verificará a dominância par a par entre as alternativas para verificar as relações de preferência, indiferença e incomparabilidade. Uma matriz de dominância par a par é obtida a partir do resultado desta etapa (FREJ et al., 2019).

4.2 Heurísticas para problemas de portfólio de projetos

Uma vez que a matriz de dominância é criada a partir da avaliação dos projetos considerando as preferências do DM em relação à ordenação das constantes de escala dos critérios, a metodologia proposta passa para a geração de portfólios viáveis e eficientes.

O objetivo é encontrar um conjunto de projetos que, quando combinados, constituam um portfólio limitado pelos recursos disponíveis. Analogamente, o método proposto pode ser comparado a um problema de roteamento de veículos capacitados com um único depósito. Encontrar os melhores caminhos entre n projetos caracteriza um problema de otimização combinatória NP-completo. Além disso, para resolver isso, um algoritmo metaheurístico é proposto neste capítulo.

A família de metaheurísticas inclui, mas não se limita a, programação lógica com restrições, algoritmos genéticos, métodos evolutivos, redes neurais, *simulated annealing*, busca tabu, estratégias de busca não-monotônicas, busca adaptativa aleatória gulosa, sistemas de colônia de formigas, busca em vizinhança variável, busca dispersa (*scatter search*), e suas combinações (EHRGOTT & GANDIBLEUX, 2002).

O objetivo é fornecer uma abordagem metaheurística no campo da geração e seleção de portfólios de projetos, usando uma extensão do algoritmo de economia paralela (*parallel savings*) de Clarke e Wright para construir a solução inicial, no qual, em vez de economias, foi considerado o ganho com a inserção de projetos, assim como a busca em vizinhança variável para o processo de refinamento.

O algoritmo foi proposto por Clarke & Wright (1964) para o Problema de Roteamento de Veículos (VRP - *Vehicle Routing Problem*) capacitado com um único depósito. Na extensão do algoritmo proposta, um portfólio dedicado é formado para cada projeto. As economias são

obtidas ao mesclar duas rotas e são calculadas para todos os pares de rotas, ou seja, todos os pares de portfólios. Em seguida, os portfólios são combinados, começando pelo par que oferece os maiores ganhos. O algoritmo é repetido até que nenhuma das fusões remanescentes seja viável.

Foi modificada a função fusão do algoritmo original de Clarke & Wright (CW) para detectar e rejeitar fusões ilegais, restritas pelas restrições dos recursos disponíveis, que podem ser uma ou mais restrições. Também foi modificada a matriz de distância atribuindo um zero aos arcos que conectam o depósito aos projetos. A matriz de distância é modificada da seguinte forma. A distância é a matriz de dominância obtida pela comparação par a par dos projetos, de modo que representa um parâmetro que incorpora as inter-relações entre os projetos. Neste sentido, a representação matricial possibilita a inclusão das sinergias entre os projetos, como apresentado por (DE ALMEIDA & DUARTE, 2011), quando for viável sua quantificação. Por exemplo, na matriz, a relação entre dois projetos pode ser expressa por um valor que excede a mera soma dos valores individuais destes. Essa abordagem permite capturar e integrar os benefícios potenciais resultantes da combinação de projetos específicos, levando em consideração as interações dinâmicas e complementares entre eles. Dessa forma, a matriz emerge como uma ferramenta crucial na análise e na tomada de decisões sobre a composição do portfólio de projetos, proporcionando uma visão mais abrangente e estratégica das possíveis combinações e seus impactos no alcance dos objetivos organizacionais.

No âmbito deste estudo, destaca-se o emprego da matriz de dominância par a par dos projetos como uma ferramenta central na avaliação realizada. Essa abordagem permite a análise das relações individuais entre os projetos, possibilitando uma compreensão mais clara de suas características e desempenhos. No entanto, é importante ressaltar que, devido à natureza dessa matriz, sua aplicação não abrange a identificação e quantificação das sinergias entre os projetos.

O algoritmo inicia com esta solução inicial criada pelo algoritmo CW modificado. Cada iteração gera um conjunto de soluções vizinhas para a solução atual, e a melhor delas desse conjunto da vizinhança é escolhida como a solução atual. A melhor solução viável até agora (*incumbent*) é atualizada se a solução atual for viável e melhor do que a *incumbent*. O procedimento continua até que um ou mais critérios de parada sejam atendidos.

O processo de busca local utiliza a descida de vizinhança variável (VND) (DUARTE et al., 2018). Foi utilizado dois operadores de movimento para gerar a vizinhança para a solução atual: 1. Troca 1-1 ou swap: dois projetos são trocados entre portfólios; 2. Movimento Or-opt ou reinserção: um dos projetos de um portfólio é retirado da posição atual e inserido em alguma

posição de outro portfólio. Observe que foram consideradas apenas trocas de projetos entre portfólios, porque o mesmo portfólio gerará a mesma solução.

O processo de refinamento descrito, ou seja, a solução de vizinhança, só é analisado se for melhor que a atual e se estiver em conformidade com as restrições. O algoritmo termina quando não pode ser encontrada outra solução melhor ou se o número total de iterações foi atingido. O pseudocódigo para o algoritmo proposto é descrito a seguir (Tabela 6).

Tabela 6 - Pseudocódigo da metaheurística de geração de portfólio de projetos.

Algoritmo 02: Pseudocódigo da metaheurística de geração de portfólio de projetos

| | |
|-----|--|
| 1: | Gere uma solução inicial com a heurística de Clarke e Wright, respeitando as restrições do orçamento e dos recursos disponíveis. |
| 2: | Se a solução inicial é viável, |
| 3: | então defina como incumbent. |
| 4: | $num_move_i := 1$ ($i = 1, 2$). |
| 5: | Enquanto ($num_move_i < max_num_move$) faça |
| 6: | Se $num_move_i = 1$, |
| 7: | então use o operador de movimento swap inter rotas, |
| 8: | gere uma solução vizinha da incumbent, respeitando as restrições do orçamento e dos recursos disponíveis. |
| 9: | Se a melhor solução vizinha é melhor do que o resultado atual (incumbent) |
| 10: | então Atualize a incumbent e $num_move_i := 1$. |
| 12: | senão $num_move_i := num_move_i + 1$. |
| 13: | Se $num_move_i = 2$, |
| 14: | então use o operador de movimento de reinserção (or-opt) inter rotas, |
| 15: | gere uma solução vizinha da incumbent, respeitando as restrições do orçamento e dos recursos disponíveis. |
| 16: | Se a melhor solução vizinha é melhor do que o resultado atual (incumbent) |
| 17: | então Atualize a incumbent e $num_move_i := 1$. |
| 18: | senão $num_move_i := num_move_i + 1$. |
| 19: | Fim Enquanto |
| 20: | Até critério de parada seja alcançado. |

Fonte: A Autora (2024).

4.3 O processo de avaliação intercritério

Uma lista das melhores combinações de projetos em portfólios viáveis é encontrada ao final do algoritmo. Em seguida, inicia-se a etapa de avaliação intercritério na abordagem proposta. Na avaliação intercritério, o DM julga qualitativamente as diferenças par a par na atratividade entre critérios adjacentes. Esta etapa tem como objetivo encontrar uma

ordenação/priorização de portfólios de projetos usando um processo de elicitação flexível e interativo.

O processo de elicitação busca encontrar as relações de preferência do DM entre diferentes níveis de resultados de pares adjacentes de critérios. Dois cenários hipotéticos são considerados nos quais o DM avaliará se prefere ou é indiferente à possibilidade, comparando um resultado intermediário Y_1 do critério c_1 com o melhor resultado do critério c_2 , considerando todos os outros critérios no nível de pior resultado.

A partir das relações de preferência estabelecidas pelo DM durante o processo de elicitação, desigualdades são incluídas na Equação (12). Se o DM prefere Y_1 ao melhor resultado do critério c_2 então $Y_1 = Y_1'$ e a desigualdade $k_1 v_1(Y_1') \geq k_2$ é incluída como uma restrição no LPP. No outro caso, se o DM prefere o melhor resultado do critério c_2 a Y_1 então $Y_1 = Y_1''$ e a desigualdade $k_1 v_1(Y_1'') \leq k_2$ será incluída. Essas desigualdades formam o espaço de peso viável e serão obtidas ao longo do processo de elicitação até que o DM não esteja mais disposto a responder ou encontre a solução ótima.

$$\begin{aligned}
 \text{Max Dif } (a_i, a_b) &= \sum_{j=1}^p k_j v_j(x_{ij}) - \sum_{j=1}^p k_j v_j(x_{bj}), \forall i, b; i \neq b \\
 \text{s. t.} \\
 k_1 &\geq k_2 \geq \dots \geq k_p \\
 k_j v_j(Y_j') &\geq k_{j+1} - \varepsilon, \text{ for } j = 1 \text{ to } p - 1 \\
 k_j v_j(Y_j'') &\leq k_{j+1} + \varepsilon, \text{ for } j = 1 \text{ to } p - 1 \\
 \sum_{j=1}^p k_j &= 1 \\
 k_j &\geq 0, j = 1 \dots p
 \end{aligned} \tag{13}$$

Na Equação (13), o LPP está sujeito às restrições de normalização e não-negatividade, bem como às restrições do espaço de peso obtido pelo processo de elicitação. A cada resposta do DM, o modelo na Equação (13) é executado, e resultados parciais do problema são obtidos. A qualquer momento, o DM pode visualizar os resultados parciais e, se estiver satisfeito, pode interromper o processo, tornando-o flexível e interativo.

4.4 Ordenação de portfólio de projetos: um caso prático da indústria de óleo e gás

4.4.1 Descrição do problema

O desenvolvimento e as atualizações de pesquisas na indústria de produção e exploração de petróleo no Brasil avançaram nos últimos anos desde a consolidação da Agência Nacional

do Petróleo (ANP). Esses avanços são resultado de esforços para enfrentar os desafios atuais em ambientes de águas profundas e ultra profundas, produção de óleo pesado ou mesmo nas áreas clássicas de engenharia de reservatórios, produção, perfuração e completação (PESSÔA FILHO et al., 2006).

O problema de portfólio de projetos abordado neste capítulo está relacionado à geração e ordenação de portfólios de projetos, que serão executados por uma empresa de petróleo, uma das mais fortes e importantes do Brasil na indústria de petróleo e gás. Os projetos envolvem campanhas de intervenção e operação em terra em diferentes regiões do Brasil. Análises e planejamentos muito detalhados são necessários devido ao cenário de incertezas inerente ao processo de contratação e aquisição de recursos críticos e aos compromissos com agências e entidades reguladoras.

A problemática analisada envolve doze projetos a serem avaliados através de seis critérios. Um grupo formado por partes interessadas da empresa, engenheiros e consultores definiu em consenso os seis critérios de avaliação considerando critérios estratégicos, operacionais, de impacto social e ambiental. A Tabela 7 resume o conjunto de critérios definidos.

Tabela 7 - Descrição dos Critérios e Escala.

| | Critérios | Tipo | Escala | Orientação |
|-------|--|----------------------|---------------|-------------------|
| c_1 | Grau de impacto gerado pelo risco de não cumprir compromissos | Critério Estratégico | 5 | Maximização |
| c_2 | Compliance dos objetivos, compromissos e resultados esperados do projeto | Critério Estratégico | 3 | Maximização |
| c_3 | Percentual de estruturação do projeto e disponibilidade de recursos | Operacional | Contínuo | Maximização |
| c_4 | Qualificação das entidades executoras (adequação ao mercado para a execução das qualificações técnicas necessárias para os projetos) | Critério de Mercado | 5 | Minimização |
| c_5 | Quantidade de tempo necessário para iniciar o projeto | Operacional | Contínuo | Minimização |
| c_6 | Prontidão para lidar com aspectos ambientais e sociais | Social e ambiental | 2 | Minimização |

Fonte: A Autora (2024).

Os projetos foram avaliados em escalas diferentes, de acordo com a Tabela 7. Para os critérios discretos, foi utilizada uma escala Likert de três ou cinco pontos. Para o primeiro critério (c_1), cuja orientação é de maximização, uma vez que deve ser priorizado os projetos com maiores impactos, o nível 5, representa o pior grau de impacto, sendo a aplicação de

multas, perda de concessão, parada da operação, e o nível 1, o melhor desempenho, seriam os projetos que não possuem compromissos. O segundo critério (c_2), também de maximização, o melhor desempenho, nível 1, significa que está bem adequado aos compromissos e objetivos, já o nível 3, representa um déficit no compliance, sendo necessária sua priorização para corrigir esse cenário. O quarto critério (c_4), cuja orientação é de minimização, o nível 1, representa uma adequação total ao mercado, já o nível 5, representa o caso em que não haja adequação gerando um risco muito alto de interrupção do projeto. Por fim, o último critério (c_6), é um critério binário de minimização, em que 0 representa que se tem a prontidão com relação as exigências sociais e ambientais para execução do projeto e 1, caso contrário.

A restrição do problema é representada pela limitação das células de recursos humanos disponíveis para executar os projetos. Uma equipe de recursos é necessária para executar cada um dos doze projetos, mas apenas quatro dessas equipes estão disponíveis simultaneamente.

Após a meticulosa definição dos critérios e escalas, procedeu-se à avaliação dos doze projetos, atribuindo valores distintos para cada critério, resultando na construção da matriz de consequências do problema em questão. Cada projeto foi minuciosamente analisado com base nos seis critérios estabelecidos, gerando uma representação matricial que reflete o impacto relativo de cada projeto em relação aos diferentes aspectos estratégicos, operacionais, sociais e ambientais. Essa matriz de consequências é essencial para fundamentar a abordagem multicritério proposta, que visa gerar e ordenar portfólios de projetos de intervenção e operação onshore para uma renomada empresa do setor de petróleo no Brasil. A matriz foi validada por todos os integrantes do grupo de trabalho em consenso e é apresentada na Tabela 8.

Tabela 8 - Matriz de Consequências.

| Projetos | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Proj 1 | 2 | 3 | 0.2 | 1 | 8 | 0 |
| Proj 2 | 2 | 3 | 0.6 | 2 | 8 | 0 |
| Proj 3 | 2 | 3 | 0.6 | 3 | 8 | 0 |
| Proj 4 | 2 | 3 | 0.4 | 5 | 8 | 0 |
| Proj 5 | 1 | 2 | 0 | 2 | 24 | 1 |
| Proj 6 | 2 | 3 | 0 | 2 | 8 | 1 |
| Proj 7 | 2 | 3 | 0.25 | 3 | 8 | 1 |
| Proj 8 | 2 | 1 | 0.8 | 3 | 8 | 1 |
| Proj 9 | 2 | 1 | 0 | 1 | 13 | 1 |
| Proj 10 | 4 | 3 | 0 | 1 | 8 | 0 |
| Proj 11 | 2 | 2 | 0.6 | 1 | 0 | 0 |
| Proj 12 | 4 | 2 | 0 | 1 | 18 | 0 |

Fonte: A Autora (2024).

4.4.2 Aplicação da Metaheurística e processo de eliciação de preferências

As informações na Tabela 8 são inseridas no sistema de suporte à decisão. Em seguida, conforme mostrado na Figura 10, os pesos dos critérios devem ser ordenados. Para isso, um dos integrantes do grupo de trabalho, caracterizado como o DM, deve então fornecer informações sobre a ordenação das constantes de escala, como ilustrado na Figura 11. No problema analisado, a ordem obtida foi a seguinte: $k_5 > k_2 > k_1 > k_4 > k_3 > k_6$.

Figura 11 - Processo de ordenação das constantes de escala dos critérios no DSS.

Ranking of criteria scaling constants
By pairwise comparison
Answer the following questions by choosing consequences A or B

Consequences

Consequence A

| Criterion | Worst (Wi) | Best (Bi) |
|-----------|------------|-----------|
| C1 | W1:2 | B1:8 |
| C2 | W2:3 | B2:9 |
| C3 | W3:1.65 | B3:1.65 |
| C4 | W4:10 | B4:1 |
| C5 | W5:42 | B5:8 |
| C6 | W6:3 | B6:0 |

Consequence B

| Criterion | Worst (Wi) | Best (Bi) |
|-----------|------------|-----------|
| C1 | W1:2 | B1:8 |
| C2 | W2:3 | B2:9 |
| C3 | W3:0.2 | B3:1.65 |
| C4 | W4:10 | B4:1 |
| C5 | W5:42 | B5:8 |
| C6 | W6:3 | B6:0 |

Which consequence do you prefer?

Consequence A
 Consequence B

Legend:

- No Selection --
- C1-C1
- C2-C2
- C3-C3
- C4-C4
- C5-C5
- C6-C6

Chosen order of scaling constants:

- No Selection --
- C5
- C2
- C1
- C4
- C3
- C6

Restart OK

Continue

W_i is the worst outcome of criterion C_i
B_i is the best outcome of criterion C_i

Alternatively the ranking of scaling constants can be done by Overall evaluation.

inict INSTITUTO NACIONAL DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA INSID INSTITUTO NACIONAL DE SISTEMAS DE INFORMÁTICA E DECISÃO CDSID UFPE CENTRO DE SISTEMAS E INFORMÁTICA

Fonte: A Autora (2024).

O LPP na Equação (12) é executado com as informações da ordenação das constantes de escala para obter a matriz de dominância par a par. O algoritmo retornou um resultado do processo de geração de portfólio em 3,2 segundos após criar a solução inicial e executar onze movimentos na vizinhança usando os operadores de movimento na heurística de refinamento (Tabela 9). O algoritmo parou quando não foi mais possível obter uma solução melhor na vizinhança que respeitasse a restrição da limitação de recursos.

Tabela 9 - Portfólios viáveis e eficientes gerados pela metaheurística.

| Portfólio | Projetos |
|------------------|----------------------------------|
| PORT A | [Proj 3; Proj 7; Proj 8; Proj 9] |
| PORT B | [Proj 2] |
| PORT C | [Proj 1] |
| PORT D | [Proj 5; Proj11; Proj 12] |
| PORT E | [Proj 4; Proj 6; Proj 10] |

Fonte: A Autora (2024).

A abordagem proposta então passa para a fase de elicitação das preferências do DM na avaliação intercritério. Portfólios são gerados agregando os projetos neles contidos, onde os critérios são os benefícios do portfólio, e o consumo de recursos do portfólio é a soma dos recursos associados aos projetos (MARQUES et al., 2022).

Essa fase tem como objetivo obter uma ordenação dos portfólios eficientes e viáveis gerados para que os tomadores de decisão possam priorizar as operações e campanhas de intervenção da empresa, considerando que só é possível processar um número limitado de projetos simultaneamente.

O processo de elicitação no DSS começa a fase da elicitação com perguntas entre as consequências de pares adjacentes de critérios, onde o DM deve selecionar uma opção (Consequência A, Consequência B, Indiferente, Sem Resposta ou Inconsistência). A Figura 12 ilustra a terceira pergunta que o sistema fez ao DM. Foi possível obter uma ordem final após o DM responder a sete perguntas, o que será comentado na próxima seção.

Figura 12 - A terceira pergunta do processo de eliciação no DSS.

Which consequence do you prefer?
Answer the questions by choosing one option

Consequence A

C1: W1:42

C2: X2:6

C3: W3:2

C4: W4:10

C5: W5:0.2

C6: W6:3

Consequence B

C1: W1:42

C2: W2:3

C3: B3:8

C4: W4:10

C5: W5:0.2

C6: W6:3

Options:

Consequence A

Consequence B

Indifferent

No Answer

Inconsistency

OK

Questions Answered: 2

Number of levels: 2

Show Current Results

Legend of criteria scaling constants:

C1 - C5

C2 - C2

C3 - C1

C4 - C4

C5 - C3

C6 - C6

Logos: INCT, INSID, CDSID/UFRR

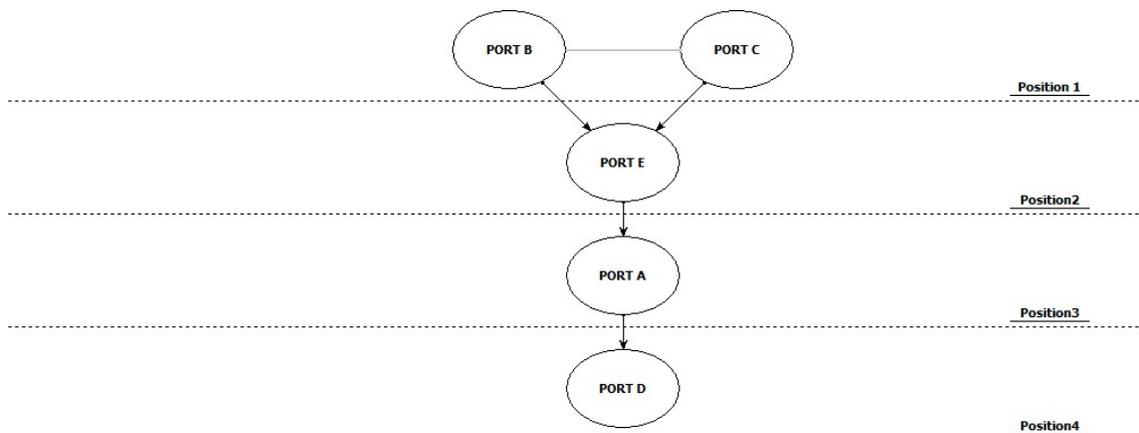
Fonte: A Autora (2024).

4.4.3 Resultados e Discussão

Como resultado do processo descrito acima, a ordenação final dos portfólios foi obtida, conforme mostrado na Figura 13. Os resultados foram apresentados ao comitê de gestão da empresa, que os avaliou como aderentes à realidade e aos cenários atuais. Assim, os resultados obtidos com o uso da abordagem proposta foram validados.

Foi obtida uma relação de indiferença entre o portfólio B e o portfólio C. No entanto, como ambos consistem apenas em um projeto cada, ambos os portfólios podem ser executados simultaneamente, respeitando ainda a restrição dos recursos disponíveis. Os demais portfólios serão executados respeitando a ordem de priorização obtida.

Figura 13 - Ranking dos portfólios e suas relações de dominância em um diagrama de Hasse.



Fonte: A Autora (2024).

Foi obtida uma relação de indiferença entre o portfólio B e o portfólio C. No entanto, como ambos consistem apenas em um projeto cada, ambos os portfólios podem ser executados simultaneamente, respeitando ainda a restrição dos recursos disponíveis. À primeira vista, a restrição orçamentária sugeriria a solução direta de consolidar esses dois projetos em um único portfólio. No entanto, o algoritmo proposto busca transcender tais limitações, buscando desbloquear ganhos potenciais por meio da combinação estratégica de projetos dentro de portfólios. Essa metodologia está fundamentada nas relações em pares derivadas das avaliações de projetos em critérios alinhados com as preferências do tomador de decisões.

Nesse contexto, a priorização de objetivos pelo algoritmo, alcançando explicitamente ganhos enquanto adere à restrição orçamentária, desempenhou um papel decisivo. Consequentemente, o algoritmo não formulou o portfólio englobando os projetos 1 e 2.

No entanto, é importante observar que, à medida que o modelo avança, surge uma possibilidade de avaliação mais abrangente pelos tomadores de decisão. Eles podem ponderar a viabilidade de realizar ambos os projetos dentro da alocação máxima de orçamento ou fazer uma escolha criteriosa entre eles. Essa faceta introduz uma flexibilidade e análise mais aprofundada ao processo de tomada de decisão.

A abordagem algorítmica destaca a interação complexa entre restrições orçamentárias, otimização de ganhos e preferências do tomador de decisões. A resposta visa proporcionar uma visão mais abrangente das considerações estratégicas em jogo, elucidando essas complexidades. Os demais portfólios serão executados respeitando a ordem de priorização obtida.

A proposta oferece ao nível de gestão estratégica da indústria um sistema de suporte à tomada de decisões que é estruturado e alinhado com os objetivos da organização. Além disso, é flexivelmente estruturado e pode ser facilmente adaptado a mudanças nos parâmetros organizacionais (pesos dos atributos) e na demanda externa (mais ou menos projetos). Portanto, a abordagem proposta torna-se parte do processo de tomada de decisão da empresa, que pode ser revisado de acordo com as necessidades da gestão da empresa, considerando novas premissas que surgem no cenário atual de incertezas e mudanças.

A solução do problema de portfólio de projetos utilizando a abordagem proposta neste capítulo, traz diversos benefícios para uma empresa de petróleo e gás, incluindo uma melhor alocação de recursos, como capital, recursos humanos e tempo; aumento do retorno sobre o investimento (ROI) ao investir em projetos mais propensos a gerar retornos mais altos, maximizando assim a lucratividade da empresa; gestão de riscos, ao diversificar o portfólio e investir em uma combinação de projetos de alto e baixo risco, a empresa pode reduzir sua exposição a possíveis perdas; alinhamento com a estratégia da empresa, garantindo que os investimentos da empresa estejam consistentes com seus objetivos de longo prazo; tomada de decisões aprimorada, avaliando opções de investimento por meio de um método robusto, a empresa toma decisões mais informadas e objetivas; e vantagem competitiva no mercado, ajudando a empresa a se diferenciar dos concorrentes e aprimorar sua posição no mercado.

5 SISTEMA DE APOIO À DECISÃO PARA PORTFÓLIO COMBINATÓRIO COM O MÉTODO FITRADEOFF

A crescente complexidade dos processos decisórios, especialmente no contexto de seleção de portfólio de projetos, demanda abordagens inovadoras que possam agilizar e otimizar esse processo. Diante desse cenário, a automação e facilitação do processo decisório por meio de uma ferramenta computacional tornam-se imperativas. O desenvolvimento do Sistema de Apoio à Decisão intitulado *FITradeoff - Flexible and Interactive Tradeoff Elicitation - Portfolio Combinatorial*, destinado à aplicação dos modelos propostos para portfólio combinatório, representa uma resposta eficaz a essa necessidade.

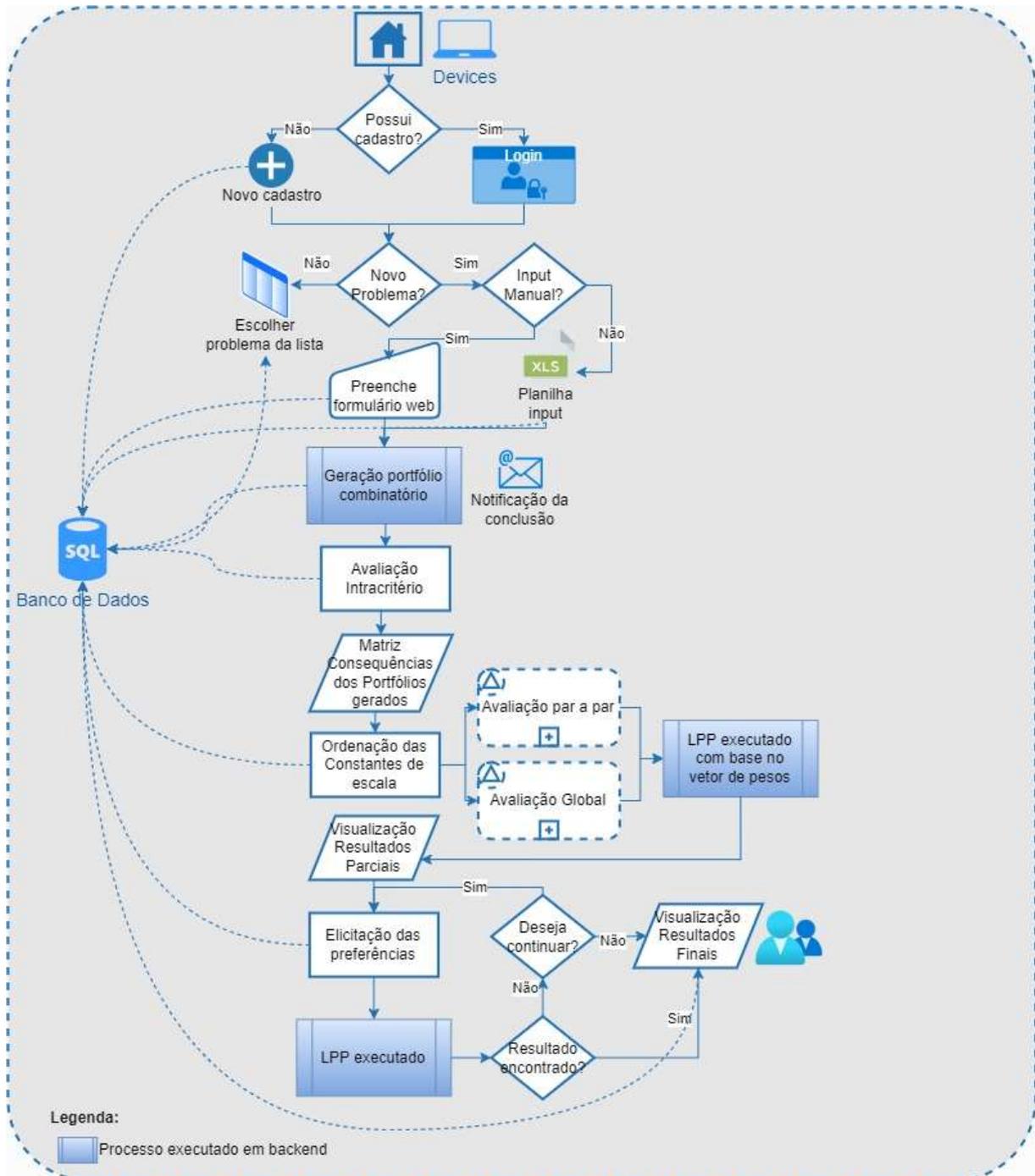
A interface de acesso ao SAD desempenha um papel crucial nesse contexto, pois é a principal interação entre o usuário e a ferramenta. Sua concepção deve ser intuitiva, amigável e eficiente, visando proporcionar uma experiência satisfatória ao tomador de decisão. A estrutura e modulação do sistema são projetadas de forma a oferecer uma navegação fluida, garantindo que o usuário possa utilizar as funcionalidades do sistema de maneira eficaz e sem entraves.

A contribuição desse sistema para a sociedade é significativa, pois proporciona uma abordagem avançada e eficiente para lidar com a complexidade inerente à seleção de portfólio de projetos. Ao automatizar o processo decisório, o SAD não apenas economiza tempo, mas também reduz possíveis erros decorrentes de análises manuais.

Aspectos da arquitetura do sistema são cuidadosamente elaborados para garantir não apenas a funcionalidade técnica, mas também a satisfação do usuário. A usabilidade é uma prioridade, e a arquitetura é projetada para se adaptar às necessidades dinâmicas do usuário, oferecendo flexibilidade e eficácia. A Figura 14 ilustra o fluxograma das funcionalidades do SAD proposto.

Dessa forma, o sistema desenvolvido não apenas representa uma solução técnica avançada para o problema de seleção de portfólio de projetos, mas também se destaca pela preocupação com a experiência do usuário, tornando-se uma ferramenta valiosa para otimização de decisões estratégicas em diversos contextos.

Figura 14 - Fluxograma de funcionalidades do SAD para portfólio combinatório.



Fonte: A Autora (2024).

O Sistema de Apoio à Decisão foi concebido para ser aplicado e acessado por diferentes intervenientes no processo decisório, sendo desenvolvido como uma aplicação web por meio de um servidor intranet. Esta infraestrutura possibilita a conexão em tempo real, permitindo o acesso ao sistema em qualquer estação de trabalho a qualquer tempo para a aplicação dos modelos de resolução do problema de seleção de portfólio de projetos, conforme discutidos nos Capítulos 3 e 4.

A versão piloto do sistema pode ser solicitada nos endereços eletrônicos do laboratório de pesquisa CDSID (www.cdsid.org.br) e no próprio endereço do FITradeoff (www.fitradeoff.org). O SAD foi desenvolvido no Ambiente Delphi 2010, utilizando a linguagem de programação Object Pascal. Além disso, é projetado para integração com bibliotecas gráficas, como o TeeChart®, bibliotecas para resolução da programação matemática, como o LP Solve e pacote em C++, e faz uso do banco de dados MySQL. O decisor tem a flexibilidade de optar pela inclusão de dados do problema por meio de planilhas no Excel, parte do pacote Microsoft Office®, ou realizar esse processo diretamente no sistema.

A apresentação do software segue as três principais fases para a resolução do problema: importação dos dados de entrada (item 5.1); geração dos portfólios (item 5.2); elicitação de preferências do decisor (item 5.3); e análise e exportação dos resultados (item 5.4). Este design visa facilitar a usabilidade e compreensão do sistema ao longo do processo decisório.

5.1 Importação de dados

Primeiramente, faz-se necessário que o usuário se cadastre na plataforma a partir de um formulário, informando dados básicos do decisor e o propósito da utilização dos sistemas FITradeoff. O sistema faz interlocução com os decisores através do envio de emails para o endereço informado no cadastro.

O novo sistema do FITradeoff permite a introdução dos dados via planilha *MSExcel* no formato de compatibilidade 2003 ou de forma manual (ver Figura 15), o que é especialmente útil para as pessoas que não utilizam o *MSExcel*. As informações necessárias para a construção do problema no SAD são: nome do problema, nome das alternativas, nomes dos critérios sua direção (maximização/minimização), o tipo da escala (contínua ou discreta) e respectiva quantidade de níveis da escala (discretização) quando aplicável, as consequências das alternativas com respeito a cada um dos critérios, a informação relativa ao valor do recurso que se encontra disponível para os projetos incluídos no portfólio (budget) e da quantidade de recurso requerida para execução de cada projeto (custo).

Figura 15 - Tela de introdução dos dados na forma manual.

FITradeoff.org

FITradeoff

Flexible and Interactive Tradeoff

FU-TXPNM-WF1
Logout

[<< Back](#) Help Reset

Please insert the data to register a new problem:

Problem name:

Problematic: Combinatorial Portfolio

Budget: ?

Alternatives information

Name of alternative:

Number of alternatives: ?
Add

List of alternatives:

Edit Delete

Criteria information

Name of criteria:

Criterion direction: -- No Selection --

Number of criteria: ?

Scale type: -- No Selection --
[Discrete Criteria \(?\)](#)

List of criteria:

Edit Delete

Add

Save problem





Fonte: A Autora (2024).

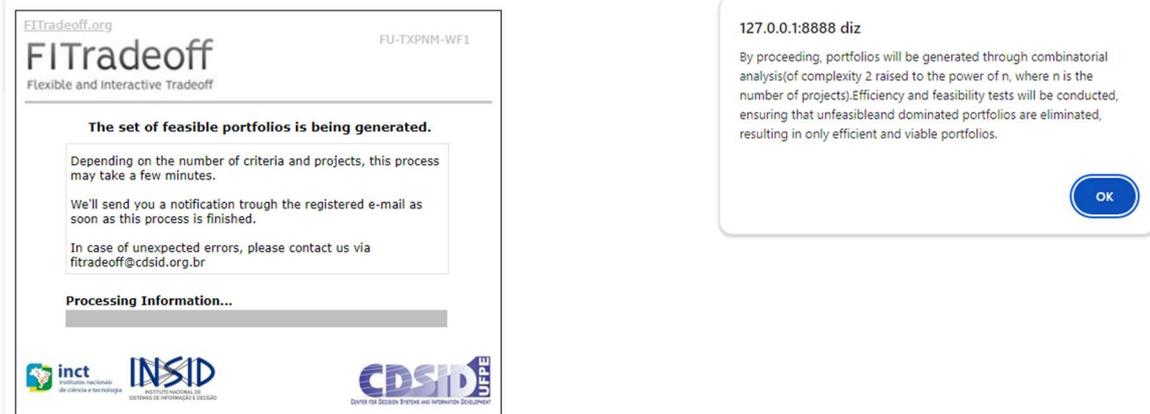
5.2 Geração dos portfólios

Na problemática de portfólio combinatório o decisor pretende selecionar um portfólio que apresente o melhor desempenho dentre todos os portfólios possíveis de serem gerados a partir de combinações de um conjunto de alternativas (projetos), respeitando uma restrição de recurso que é requerido pelo portfólio. Nesta situação, o FITradeoff para portfólio combinatório realiza a geração de todos os portfólios viáveis e eficientes a partir da combinação das alternativas, após isso o sistema considera o conceito de potencial otimalidade, buscando, portanto, uma alternativa que consiga ser melhor ou tão boa quanto todas as demais alternativas do espaço de ações.

Após a inserção dos dados o sistema irá calcular todas as combinações possíveis dos projetos e utilizando o framework proposto no capítulo 03 desta tese reduzir o número de portfólios para apenas os viáveis e eficientes. A depender do número de projetos inseridos no problema, ou seja, do tamanho da instância do problema o tempo necessário para a geração dos portfólios pode variar. Devido a esse fator, é possível deixar a página processando a informação (ver Figura 16) e quando o processo estiver finalizado, o decisor irá receber um e-mail no

endereço informado no formulário do cadastro comunicando a conclusão da etapa e possibilidade de continuar com a análise do problema para selecionar o melhor portfólio dentre os gerados.

Figura 16 - Tela de geração dos portfólios de projetos.



Fonte: A Autora (2024).

5.3 Avaliação Intracritério e Intercritério (elicitación das preferências)

A etapa de avaliação intracritério desempenha um papel crucial no processo de modelagem de problemas multicritério, sendo responsável pela obtenção da função valor marginal que expressa as preferências dos decisores em vários níveis de aspiração, apresentando-se em uma escala mensurável para cada critério em consideração.

O sistema viabiliza a utilização de funções valor não-lineares para a avaliação intracritério. Além da função linear, é possível conduzir uma fase de elicitación de preferências em relação à forma das funções valor associadas aos critérios do problema, denominada elicitación intracritério (Figura 17).

Figura 17 - Tela da avaliação intracritério.

FITradeoff.org
FITradeoff
 Flexible and Interactive Tradeoff

FU-TXPNM-WF1
 Logout

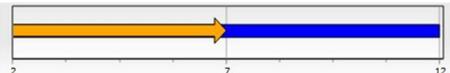
Intra-Criteria Evaluation

Help Reset

Select one criterion to start the elicitation:

You can either:
[Declare as a linear function](#) if you do not want to elicit the marginal value function ?
 Or Proceed to elicitation below.

Considering the criterion "Canp" comparing the two ranges below,
 which range do you prefer to increase, in order to have a greater increase in the value of the range?



From 2 to 7 .
 From 7 to 12 .
 Indifferent.



Fonte: A Autora (2024).

É crucial salientar que, no contexto da problemática específica em discussão, que envolve a seleção de portfólio combinatório, a agregação das consequências das alternativas, representadas pelos projetos, é conduzida de maneira aditiva para a formação dos portfólios, conforme explicado no capítulo 03 desta tese. Em outras palavras, ao contrário do que acontece na problemática de escolha, a avaliação dos critérios e alternativas hipotéticas ocorre na escala construída dos portfólios, não na escala individual dos projetos. Isso implica na realização de análises comparativas entre diferentes portfólios de projetos hipotéticos.

Dando seguimento ao processo no sistema, será apresentada ao usuário uma tela exibindo todas as informações dos portfólios viáveis e eficientes gerados (Figura 18). Nessa página, é apresentado ao decisor o número de portfólios possíveis e a quantidade de portfólios excluídos a partir do modelo proposto. Além disso, destaca-se a importância do valor da distância equivalente (*equivalence threshold*). Este valor representa a máxima diferença que o valor global associado a um par de alternativas pode apresentar para que essas alternativas sejam consideradas indiferentes entre si. Caso o usuário opte pelo valor zero, um par de alternativas será considerado indiferente se tiverem o mesmo valor global em todo o espaço de pesos viável.

Figura 18 - Tela para verificação dos portfólios eficientes e viáveis gerados.

FITradeoff.org

FITradeoff

Flexible and Interactive Tradeoff

127.0.0.1:8888 diz

There are 2^n possible combinations of projects to form portfolios, totaling 4096 possible portfolios. After conducting tests, 3973 unfeasible and dominated portfolios were eliminated. Forward, you will be directed to the inter-criteria evaluation phase, where the comparative analysis should be conducted based on the resulting 123 portfolios.

OK

Input Data:

| Criteria: | Canp | StatusCanp | RecMob | InsProj | Nes | LicAmb | Budget |
|--|------|------------|--------|---------|-----|--------|--------|
| 0-Cont Min; 1-Cont Max; 2-Disc Min; 3- Disc Max; 4- Int Min; 5- Int Max: | 5 | 5 | 1 | 4 | 0 | 4 | 4 |
| Number of levels of discrete criteria | 5 | 3 | 0 | 5 | 0 | 2 | |
| Consequence Matrix: | | | | | | | |
| ALT A | 2 | 3 | 0.2 | 1 | 8 | 0 | 1 |
| ALT B | 2 | 3 | 0.6 | 2 | 8 | 0 | 1 |
| ALT H | 2 | 1 | 0.8 | 3 | 8 | 1 | 1 |
| ALT J | 4 | 3 | 0 | 1 | 8 | 0 | 1 |
| ALT K | 2 | 2 | 0.6 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| ALT L | 4 | 2 | 0 | 1 | 18 | 0 | 1 |
| ALT A; ALT J | 6 | 6 | 0.2 | 2 | 16 | 0 | 2 |
| ALT A; ALT K | 4 | 5 | 0.8 | 2 | 8 | 0 | 2 |
| ALT A; ALT L | 6 | 5 | 0.2 | 2 | 26 | 0 | 2 |
| ALT B; ALT C | 4 | 6 | 1.2 | 5 | 16 | 0 | 2 |

Equivalence threshold:
Maximum difference for the global values of two alternatives, below of which they can be considered indifferent:



Fonte: A Autora (2024).

Ao prosseguir, o decisor é direcionado para uma página em que realizará a ordenação das constantes de escala. O Sistema de Apoio à Decisão oferece a possibilidade de ordenar os pesos tanto por meio de uma avaliação global dos critérios quanto por comparação par a par entre eles.

Na ordenação dos critérios por comparação par a par, são apresentadas situações hipotéticas de comparação em gráficos, e o decisor deve selecionar a preferência entre o valor máximo da consequência fictícia A ou B (Figura 19). O SAD utiliza uma heurística para reduzir o número de perguntas, exibindo os critérios ordenadamente à medida que as respostas são armazenadas.

Figura 19 - Tela para ordenação das constantes de escala através da comparação par a par.

Ranking of criteria scaling constants
By pairwise comparison
Answer the following questions by choosing consequences A or B

Consequences

Consequence A

| Criterion | Worst (W) | Best (B) |
|-----------|-----------|-----------|
| Canp | (W1): 2 | (B1): 12 |
| Statu | (W2): 1 | (B2): 12 |
| RecMo | (W3): 0 | (B3): 2,6 |
| InsPr | (W4): 13 | (B4): 1 |
| Nes | (W5): 47 | (B5): 0 |
| LicAm | (W6): 3 | (B6): 0 |

Consequence B

| Criterion | Worst (W) | Best (B) |
|-----------|-----------|-----------|
| Canp | (W1): 2 | (B1): 12 |
| Statu | (W2): 1 | (B2): 12 |
| RecMo | (W3): 0 | (B3): 2,6 |
| InsPr | (W4): 13 | (B4): 1 |
| Nes | (W5): 47 | (B5): 0 |
| LicAm | (W6): 3 | (B6): 0 |

Which consequence do you prefer?

Consequence A
 Consequence B
 Indifferent

Restart OK

Legend:
 Canp-Canp
 Statu-StatusCanp
 RecMo-RecMob
 InsPr-InsProj
 Nes-Nes
 LicAm-LicAmb

Chosen order of scaling constants:

Continue

WI is the worst outcome of criterion Ci
 Bi is the best outcome of criterion Ci

Alternatively the ranking of scaling constants can be done by Overall evaluation.

inct INSTITUTO NACIONAL DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
 INSID INSTITUTO NACIONAL DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO E DECISÃO
 CDSIP UFPE CENTRO DE SISTEMAS ESTATÍSTICA E INFORMÁTICA

Fonte: A Autora (2024).

Na ordenação dos critérios por avaliação global, o usuário deve inicialmente ordenar os critérios de acordo com o impacto que terão no resultado final do problema, conforme suas preferências (Figura 20). O procedimento envolve escolher o primeiro critério presumindo que possui o maior valor de constante de escala e, portanto, otimizará a performance ao máximo. Esse processo é repetido até que todos os critérios sejam ordenados.

Figura 20 - Tela para ordenação das constantes de escala através da avaliação global.

The screenshot displays the FITradeoff software interface for ranking criteria scaling constants. The main area shows a bar chart with six criteria: Canp, Statu, RecMo, InsPr, Nes, and LicAm. Each criterion has a bar representing its weight (W) and a target value (B). The weights are: Canp (W1:2), Statu (W2:1), RecMo (W3:0), InsPr (W4:13), Nes (W5:47), and LicAm (W6:3). The target values are: Canp (B1:12), Statu (B2:12), RecMo (B3:2,6), InsPr (B4:1), Nes (B5:0), and LicAm (B6:0). The interface also includes a sidebar with a list of criteria and a 'Choose' button to select the order of scaling constants.

Fonte: A Autora (2024).

Com a conclusão do processo de avaliação das constantes de escala, o sistema direciona para etapa de avaliação intercritério, denominada elicitación flexível. O procedimento utilizado para elicitación de preferências é o de elicitación por decomposição. Na Elicitación por Decomposição é realizada a comparação de duas consequências hipotéticas que são apresentadas ao decisor, como ilustra a Figura 21.

O processo de elicitación no SAD oferece ao decisor cinco opções de resposta para cada questão apresentada. Estas opções incluem: (1) escolher Consequência A (*Consequence A*), indicando preferência pela primeira consequência; (2) optar por Consequência B (*Consequence B*), indicando preferência pela segunda consequência; (3) declarar Indiferença (*Indifferent*) quando as consequências são igualmente satisfatórias; (4) selecionar Sem resposta (*No answer*), indicando que o decisor opta por não responder à pergunta, sendo solicitado a fornecer a razão, e o sistema não prossegue com perguntas para esse par de critérios; e (5) indicar Inconsistência (*Inconsistency*), se o decisor perceber alguma preferência inconsistente, permitindo retornar à pergunta anterior ou reiniciar a elicitación sem perder a informação de ordenação dos pesos.

Figura 21 - Tela de comparação de alternativas na etapa de elicitación flexível.

FITradeoff.org
FITradeoff
 Flexible and Interactive Tradeoff

FU-TXPNM-WF1
 Logout
 Help Reset

Which consequence do you prefer?

Answer the questions by choosing one option.

Consequence A

RecMo: (W1):0

Canp: (W2):2

Nes: (W3):53

Statu: (W4):1

InsPr: (X5):7

LicAm: (W6):4

Consequence B

RecMo: (W1):0

Canp: (W2):2

Nes: (W3):53

Statu: (W4):1

InsPr: (W5):13

LicAm: (B6):0

Note: W is the worst outcome of criterion C_i
X is a outcome in between best and worst of criterion C_i
B is the best outcome of criterion C_i

Options:

Consequence A

Consequence B

Indifferent

No Answer

OK

Questions Answered: 5
 Potentially Optimal Alternatives: 3

Show Current Results

Which consequence do you prefer?

7 of InsPr - InsProj
 0 of LicAm - LicAmb

Equivalence Test:
 (Maximum difference between P.O.A.s)

| Between | Max. Difference |
|---------------|-----------------|
| Port32-Port40 | 0,1164 |
| Port40-Port32 | 0,1245 |
| Port32-Port45 | 0,0406 |
| Port45-Port32 | 0,1127 |
| Port40-Port45 | 0,0118 |
| Port45-Port40 | 0,0833 |

inct Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia
 INSID INSTITUTO NACIONAL DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO E SEGURANÇA
 CDSID CENTRO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO E SEGURANÇA
 UFPE

Fonte: A autora (2024).

Ao restarem até três alternativas potencialmente ótimas durante o processo, realiza-se um teste de equivalência entre elas. Esse teste envolve verificar se a máxima diferença entre cada par de alternativas é menor ou igual ao valor de distância equivalente fornecido anteriormente. Se a hipótese for confirmada, o SAD identifica as alternativas como indiferentes; caso contrário, são apresentados os resultados do teste, incluindo a máxima diferença entre as alternativas avaliadas par a par, fornecendo ao decisor uma informação útil que pode ser usada como critério de parada.

É relevante ressaltar que o software armazena resultados tanto da avaliação intracritério quanto da elicitación de preferências. Dessa maneira, o decisor tem a possibilidade de retornar ao problema analisado e a autonomia para decidir se deseja manter a sua estrutura de preferências inalterada ou se prefere reavaliar todo o processo, considerando possíveis indícios de mudanças nas suas preferências ao longo do tempo.

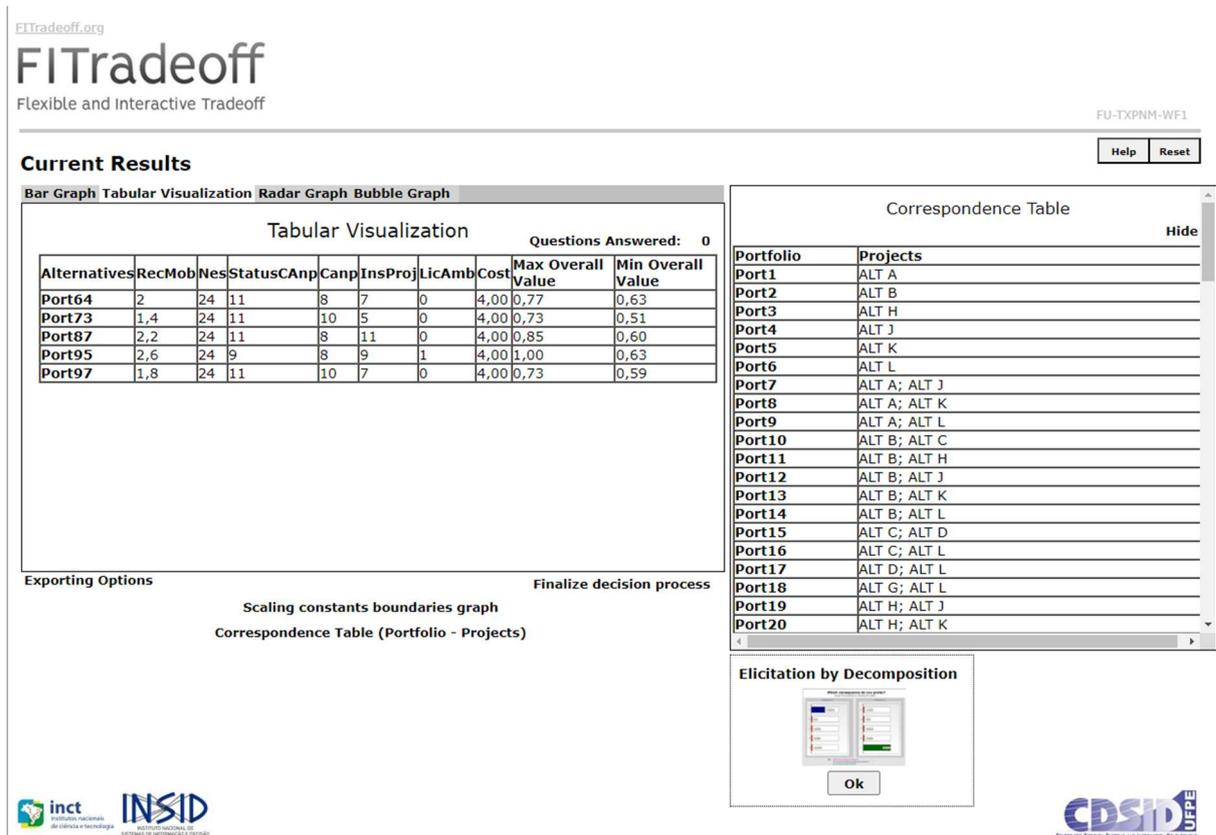
5.4 Análise e exportação dos resultados

Durante o decorrer do processo de elicitación, é disponibilizado ao decisor a possibilidade de acessar a tela de resultados parciais. Nessa seção, os resultados alcançados são apresentados

por meio de uma representação tabular. Adicionalmente, são disponibilizadas representações gráficas, incluindo gráficos de barras, bolhas e radar (Figura 22).

Ao examinar os resultados, o tomador de decisões tem a opção de concluir o processo caso os resultados até aquele ponto sejam considerados satisfatórios, ou, alternativamente, pode optar por dar continuidade à elicitação.

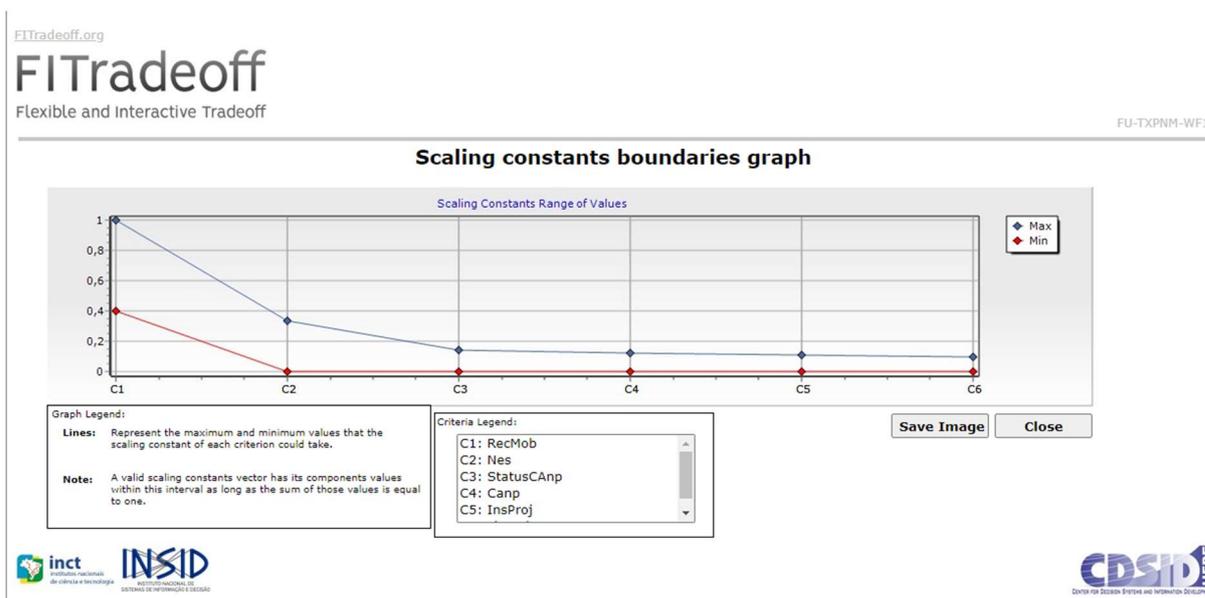
Figura 22 - Tela dos resultados do SAD.



Fonte: A Autora (2024).

O sistema disponibiliza para os usuários o gráfico que exhibe o intervalo de valores aceitáveis para as constantes de escala de cada critério (Figura 23). Esse gráfico é atualizado a cada resposta fornecida, proporcionando uma visão do comportamento do espaço de pesos ao longo do processo decisório e é possível a sua exportação em formato de imagem a cada iteração.

Figura 23 - Tela com gráfico dos limites das constantes de escala.



Fonte: A Autora (2024).

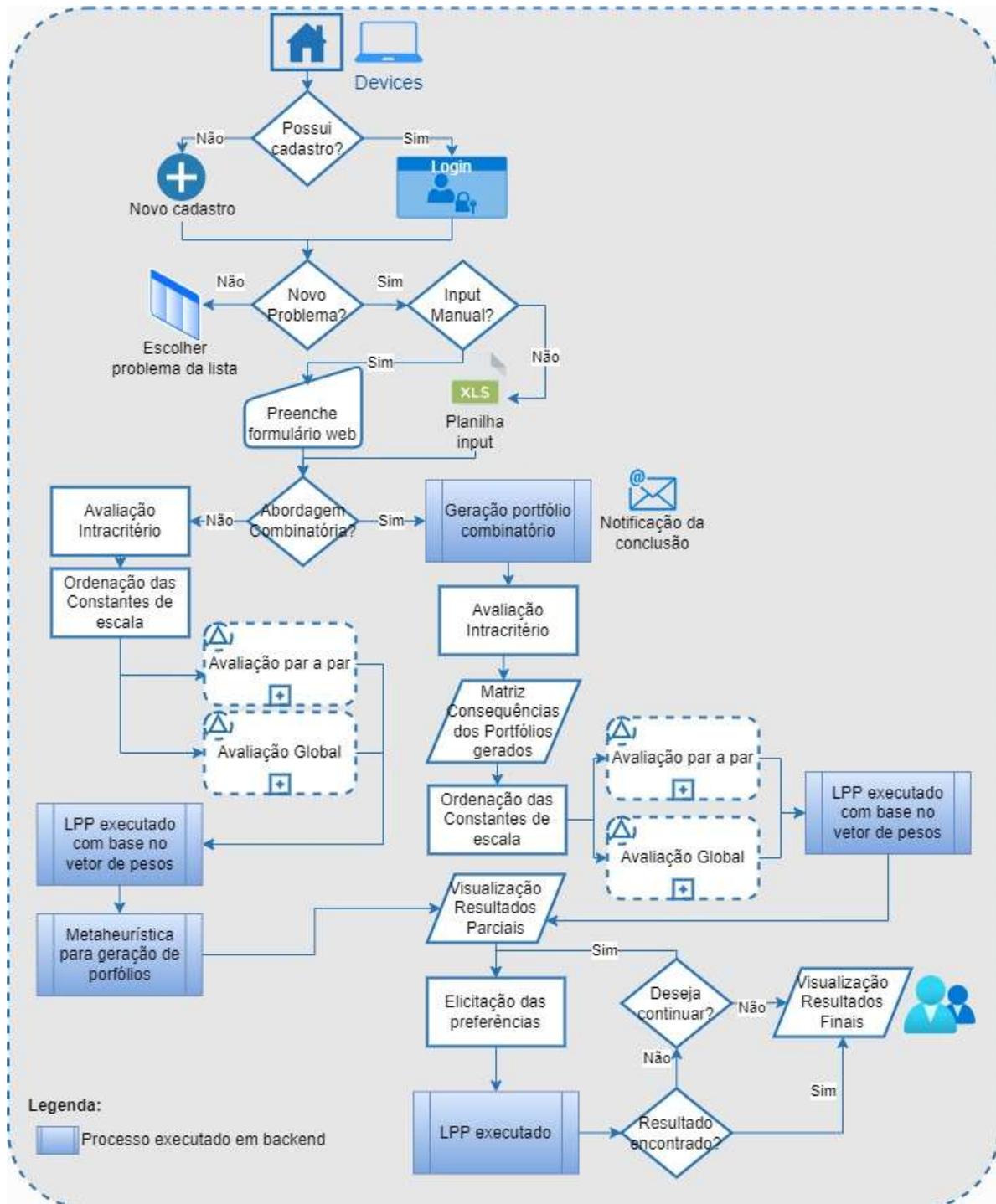
As mesmas modalidades de apresentação dos resultados parciais estão disponíveis ao se alcançar uma solução para o problema ou quando o decisor decide concluir o processo. Por fim, é possível gerar um relatório abrangente que inclui o portfólio de projetos recomendado pelo *software*, juntamente com as consequências reais em cada critério de avaliação, os intervalos de valores do espaço de pesos e os dados fornecidos pelo usuário na introdução do problema. Também é incluído do relatório a ser exportado a matriz de equivalências dos portfólios criados com os respectivos projetos que os compõem.

O resumo da elicitação, por sua vez, compreende informações relativas a cada ciclo conduzido, exibindo as consequências associadas a cada critério comparado, além das respostas fornecidas em cada iteração. Por fim, são apresentadas as alternativas potencialmente ótimas após cada ação.

5.5 Integração com metaheurísticas

Como avanço no sistema apresentado, destaca-se a iniciativa de implementação de um segundo módulo no SAD. Este novo módulo oferece ao usuário a opção de escolher entre dois procedimentos distintos para a geração de portfólios: a enumeração explícita, por meio de uma árvore de busca, proposto no capítulo 03 desta tese, e o uso de metaheurísticas, proposto no capítulo 04, como ilustra a Figura 24. Atualmente, o segundo módulo encontra-se em fase de projeto piloto.

Figura 24 - Fluxograma com as funcionalidades do sistema com a inclusão do módulo de geração de portfólios através de metaheurística.



Fonte: A Autora (2024).

Ao optar pela opção de utilizar metaheurísticas para o processo de geração de portfólios de projetos, o usuário deve proceder para as seguintes etapas. Primeiramente, inicia-se o com a inserção dos dados dos projetos pelo usuário, seguido da realização de avaliação intracritério e, por fim, a ordenação das constantes de escala, considerando a escala dos próprios projetos.

Neste momento, o sistema obtém a matriz de comparação par a par dos projetos e aplica a metaheurística proposta para a geração dos portfólios. Este processo continua até que não haja melhores opções na vizinhança ou que o critério de parada seja alcançado.

Posteriormente, o usuário verifica os portfólios gerados e segue para o procedimento de elicitação flexível. Nessa etapa, o objetivo é avaliar comparativamente os portfólios de projetos, levando em consideração a escala dos mesmos. Ao concluir o procedimento da elicitação flexível, por encontrar uma solução ou por decisão do usuário, os resultados são retornados ao decisor.

A visualização dos resultados pode ser feita através de tabelas ou do diagrama de Hasse (ver Figura 13). As demais funcionalidades do sistema, incluindo a exportação de resultados e os procedimentos de elicitação intracritério e intercritério, permanecem inalteradas. Esse avanço no SAD representa um passo significativo em direção à melhoria da eficiência na tomada de decisões estratégicas em projetos complexos de engenharia.

Um diferencial deste módulo reside na capacidade do *software* de proporcionar uma visão hierárquica e ordenada dos portfólios, o que vai além da identificação do melhor portfólio. Essa forma de apresentação dos resultados pode fornecer uma compreensão mais detalhada da distribuição relativa de valor entre os diferentes portfólios, permitindo ao decisor avaliar as nuances que não tenham sido incorporadas nos critérios avaliados.

6 CONCLUSÕES E DIRECIONAMENTOS PARA TRABALHOS FUTUROS

Este capítulo tem como objetivo retomar aos objetivos do trabalho sintetizando as principais conclusões obtidas a partir deste trabalho e, por fim, propor sugestões para trabalhos futuros que possam dar continuidade a esta pesquisa.

6.1 Considerações finais

A análise de decisão de portfólios de projetos representa uma questão crucial no contexto gerencial contemporâneo, com implicações significativas para a eficácia organizacional e, por extensão, para a sociedade como um todo. A problemática de portfólio de projetos emerge da necessidade de escolher, entre uma infinidade de opções, o conjunto ideal de projetos a serem implementados, levando em consideração restrições orçamentárias, limitações de recursos e a busca por maximizar os benefícios.

O desafio central reside na complexidade inerente à geração de portfólio de projetos, uma vez que a variedade de opções disponíveis e as restrições associadas tornam difícil a busca por uma solução ótima. A gestão eficiente desses portfólios não apenas impacta a performance organizacional, mas também influencia diretamente o alcance dos objetivos estratégicos.

As limitações para a resolução do problema são notáveis, especialmente no que diz respeito à otimização combinatória. A explosão de possibilidades e a complexidade envolvida na consideração de todos os cenários possíveis tornam a abordagem direta uma tarefa computacionalmente desafiadora. Essa dificuldade é escalonada ao se verificar a presença de incertezas inerente aos valores e benefícios associados a cada projeto.

Para abordar essa problemática, diversos métodos multicritério tem sido aplicados. A teoria de valor multiatributo, métodos de ordenação, ponderação e outranking são apenas alguns exemplos, cada um oferecendo uma perspectiva única para a tomada de decisão de portfólio.

Neste sentido, este trabalho propôs uma extensão do método FITradeoff já consolidado para o problema de seleção de portfólio focado na estruturação dos portfólios com novos projetos. Para o procedimento de geração de portfólios de projetos foi proposto duas metodologias, uma primeira através da enumeração completa dos portfólios utilizando estratégias de viabilidade e eficiência por meio da árvore de busca, e uma segunda metodologia caracterizada pelo uso de uma metaheurística proposta.

Os modelos propostos visam abordar as incertezas e complexidade do âmbito da estruturação de portfólio de projetos ao permitir a incorporação de critérios que capturam os riscos associados aos problemas e a natureza dinâmica dos projetos e ambientes os quais estão

inseridos. Além disso, oferecendo a flexibilidade aos decisores com a possibilidade de utilização de informações incompletas ou parciais.

Referente a primeira abordagem, os portfólios são gerados em um processo explícito de geração, e os benefícios e custos dos projetos são agregados em cada critério que comporá os portfólios. Durante o processo completo de geração, estratégias de viabilidade e eficiência são utilizadas para reduzir a complexidade computacional e minimizar os portfólios gerados. Finalmente, para selecionar o melhor portfólio, informações parciais/incompletas sobre os valores das constantes de escala são usadas em um processo de elicitação bem estruturado.

Este trabalho apresenta um experimento com simulações numéricas para a metodologia proposta e foca a análise em alguns aspectos considerados de maior importância para o desempenho do método. É possível concluir, com os resultados, que a aplicação da metodologia proposta resulta em um método que requer um esforço computacional razoável mesmo com a geração explícita de portfólios. Além disso, a proposição requer um menor esforço cognitivo por parte dos tomadores de decisão ao usar um método que respeita a estrutura axiomática sólida de um método já consolidado, o FITradeoff, permitindo o fornecimento de informações parciais pelos tomadores de decisão.

O modelo proposto é dividido em uma fase de preparação, que demanda o maior esforço computacional e não há interação com o tomador de decisão, e a fase de elicitação com a participação do tomador de decisão. Assim, mesmo em problemas maiores que exigem mais tempo computacional, o tempo dispendido para etapa de geração dos portfólios refere-se à fase de preparação. Dessa forma, sugere-se que o analista prepare o problema no sistema e apenas no final desse procedimento que se deve incluir a participação do tomador de decisão.

Uma lacuna existente na literatura foi a da exploração de estratégias para mitigação do problema combinatório no processo de geração de portfólio. Neste sentido, a presente tese supre essa lacuna ao propor as estratégias que superam a natureza combinatória do problema. As estratégias usadas para verificar a viabilidade e eficiência dos portfólios, por meio da análise de dominação par a par, mostraram-se muito eficazes na redução do número de portfólios de projetos gerados e, conseqüentemente, na minimização da complexidade do problema combinatório, alcançando uma taxa média de redução de 53% e 87%, respectivamente. Além disso, apenas com as informações sobre o ranking dos critérios fornecidas pelos tomadores de decisão, é possível reduzir o problema para até 16 portfólios potencialmente ótimos, com uma taxa média de redução de 89%.

Referente a segunda abordagem proposta, para a geração de portfólios por meio de metaheurísticas, primeiramente, o tomador de decisão avalia os múltiplos atributos e ordena as

constantes de escala associadas. Uma matriz de dominância par a par entre os projetos é obtida e usada no processo de geração de portfólios aplicando o algoritmo da metaheurística proposta. Esta é composta por uma extensão do algoritmo de Clark e Wright, utilizado como heurística construtiva, e pela heurística de aprimoramento *Variable Neighborhood Descent* com dois operadores de movimento (2-opt e swap). Uma restrição de recurso foi adicionada à heurística para permitir apenas a geração de portfólios viáveis.

A metaheurística proposta otimiza o processo de geração de portfólios, que é um problema de otimização combinatória e demandaria esforço computacional excessivo em instâncias maiores se a geração explícita completa fosse usada. Além disso, a aplicação das metaheurísticas propostas no problema de portfólio de projetos oferece três vantagens distintas: (1) pode considerar as relações entre os projetos, (2) retorna resultados satisfatórios em um tempo computacional viável, e (3) mais de uma restrição pode ser usada, por exemplo, orçamento financeiro, recursos humanos disponíveis.

Sinergias positivas e negativas são questões importantes na seleção de portfólio de projetos e podem ser incluídas no modelo proposto adicionando uma restrição no problema de programação linear. Por exemplo, no algoritmo modificado de Clarke & Wright, o decisor poderia usar a matriz de distância para incluir sinergias entre projetos que serão consideradas na combinação de projetos formando os portfólios. Além disso, é importante destacar que o método proposto é flexível e pode ser usado em qualquer problema de seleção ou ordenação de portfólio que tenha um maior número de restrições, se o DM estiver disponível para fornecer informações sobre suas preferências.

Como o foco da proposição desta segunda abordagem foi de obter resultados considerando a integração da metaheurística com as informações de preferência dos decisores, então testes de simulação com diferentes instâncias não foram realizados. Por outro lado, uma aplicação prática foi conduzida em um caso real de priorização de portfólio de projetos, no qual gestores e engenheiros da indústria foram entrevistados.

Além disso, o método proposto nesta tese considera o uso de informações de preferência parciais/incompletas no problema de decisão de múltiplos critérios para seleção e priorização de portfólios. Assim, o processo de decisão exige menos esforço cognitivo do DM e consome menos do seu tempo.

Neste contexto, os tomadores de decisão têm a opção de interromper o processo de respostas a perguntas relacionadas às suas declarações de preferência a qualquer momento, para que não precisem fornecer mais informações do que se sentem confiantes. O uso de informações parciais ou incompletas proporciona o benefício aos problemas de seleção de portfólio, nos

quais não é desejável gastar muito tempo dos tomadores de decisão no processo para alcançar uma solução. Além disso, os tomadores de decisão podem visualizar as soluções parciais, também em visualização gráfica, durante todo o processo de elicitación de preferências, caracterizando o método como interativo.

Vale ressaltar que pode surgir a dúvida sobre a necessidade de reelicitar preferências em nossa abordagem quando novas alternativas são adicionadas ao problema de decisão. Na verdade, a possibilidade de introduzir novas alternativas no problema de decisão levaria necessariamente à necessidade de rerodar o modelo, mesmo nos métodos tradicionais de MAVT, se os intervalos de consequências também mudarem. Os pesos dos critérios em um modelo aditivo têm um significado de constante de escala, e mudanças no espaço de consequências levam à necessidade de reavaliar os pesos dos critérios (KEENEY & RAIFFA, 1976). Além disso, situações de tomada de decisão da vida real geralmente são dinâmicas e sujeitas a aspectos conjunturais do problema, que podem mudar ao longo do tempo. Portanto, as preferências dos decisores em relação à relevância dos critérios também podem mudar ao longo do tempo, no sentido de que podem precisar ser reavaliadas. Portanto, não é considerada a necessidade de rerodar o modelo uma questão negativa; pelo contrário, pode ser vista como uma oportunidade de revisar todo o problema considerando o novo cenário atual sendo tratado.

Para trabalhos aplicados, o Sistema de Apoio à Decisão é importante, pois fornece suporte para o FITradeoff proposto para a seleção de portfólios e possibilita o desenvolvimento de futuras simulações ou estudos de caso baseados na metodologia proposta.

Neste sentido, a segunda abordagem proposta foi aplicada para resolver o problema de priorização de portfólio de projetos de uma grande empresa de petróleo e gás do Brasil, em que doze projetos foram avaliados em seis atributos por um comitê de engenheiros, gerentes e consultores. Os decisores responderam a sete perguntas para obter uma ordem final dos portfólios, mostrando assim que o modelo pode chegar a uma solução com menos informações do decisor do que outros modelos exigiriam. Com o sistema de apoio à decisão proposto, a visualização gráfica dos resultados por meio de um Diagrama de Hasse pode ser obtida ao final do processo de elicitación flexível e interativo de preferências.

Adicionalmente, o método proposto visa otimizar problemas NP-completos, de otimização combinatória, e focar no processo de tomada de decisão e avaliação de preferências. Ao comparar as duas abordagens propostas de geração de portfólio de projetos com uso de informações de preferência incompletas e elicitación flexível, pode-se observar que a estratégia de geração de portfólios por meio dessas técnicas de filtragem com elicitación flexível e interativa são eficazes na resolução dos problemas em tempos razoáveis.

No entanto, a abordagem que se baseia na enumeração completa muitas vezes pode se tornar inviável de ser aplicada na prática devido ao esforço computacional significativo exigido durante a análise combinatorial. Entretanto, esse procedimento apresenta como diferencial a vantagem de examinar todas as combinações possíveis, garantindo a identificação da solução ótima se ela existir no espaço de busca.

Por outro lado, o procedimento de geração de portfólio de projetos através da metaheurística é projetado para lidar com problemas complexos em um tempo razoável, tornando-se eficientes para problemas de grande escala. Sendo, assim, capazes de explorar eficientemente o espaço de soluções em busca de soluções de boa qualidade, mesmo em espaços de busca enormes, contudo, podem perder detalhes importantes e não garante a otimalidade da solução.

Para a definição de qual procedimento a ser utilizado no contexto do problema em análise, é importante levar em consideração alguns fatores como o tamanho do problema, restrições computacionais, objetivos do portfólio, no caso de garantia de solução ótima, a natureza do problema, como a heterogeneidade dos projetos. Em resumo, a escolha entre enumeração completa e metaheurísticas depende de características específicas do problema, das restrições de recursos e dos objetivos estratégicos da empresa.

Uma contribuição significativa da presente tese para a sociedade e organizações reside no desenvolvimento de um software, um Sistema de Apoio à Decisão, que se destaca pela capacidade de lidar com a complexidade inerente à gestão de portfólios de projetos. É imperativo reconhecer que as empresas muitas vezes se veem limitadas pela ausência de ferramentas que ofereçam suporte adequado para as tomadas de decisão, especialmente quando se trata de modelagens intrincadas como a seleção de portfólio de projetos. Atualmente, a disponibilidade de tais ferramentas é escassa, com poucas opções no mercado, entre as quais se destacam o RPM-Decisions (LIESIÖ et al., 2007), PROMETHEE c-ótimo (VETSCHERA & DE ALMEIDA, 2012), o PROBE (LOURENÇO et al., 2017) e o FITradeoff Custo-Benefício (FREJ et al., 2021). Portanto, a criação deste software representa não apenas um avanço tecnológico, mas também uma solução tangível para suprir essa lacuna e proporcionar às organizações uma ferramenta eficaz e abrangente para aprimorar suas práticas de gestão de portfólios de projetos.

Por fim, o principal objetivo do trabalho e os objetivos específicos foram alcançados ao resolver o problema de portfólio de projetos por meio de uma abordagem estruturada de tomada de decisão, que é crucial para o sucesso e sustentabilidade a longo prazo. Os métodos propostos, o FITradeoff para problema combinatorio utilizando para o processo de geração de portfólios

metodologias baseadas em enumeração completa e metaheurística baseado em informações parciais e elicitação flexível, pode trazer ganhos significativos para as empresas, melhorando seu processo de tomada de decisão de investimento e reduzindo seus riscos e custos. Além disso, contribui para a literatura avançando no campo da seleção de portfólio e fornecendo novas perspectivas sobre como os modelos de tomada de decisão podem ser aprimorados.

A partir do trabalho desenvolvido é possível verificar os impactos deste em termos econômico, social, ambiental e financeiro. Economicamente, destaca-se que a habilidade de avaliar portfólios de maneira eficiente não apenas possibilita uma alocação mais otimizada de recursos financeiros em projetos, mas também atua como catalisador para a maximização do retorno sobre investimentos. A alocação cuidadosa de recursos implica na não escolha por projetos menos vantajosos, resultando em redução de custos operacionais e permitindo um direcionamento mais focado para as iniciativas estratégicas. Os impactos sociais decorrem da melhoria substancial na tomada de decisões, que é facilitada pela participação efetiva dos decisores e stakeholders. Esse engajamento promove uma transparência aprimorada no processo decisório, gerando benefícios tangíveis para todas as partes envolvidas. No âmbito ambiental, destaca-se a capacidade da abordagem proposta na tese de incorporar critérios de avaliação ambiental e de responsabilidade social. Esta inclusão possibilita a seleção de projetos mais sustentáveis, contribuindo significativamente para a redução dos impactos negativos no meio ambiente. Por fim, ao otimizar a alocação de recursos financeiros, as organizações experimentam uma melhoria geral em sua eficiência financeira. Essa otimização reflete em uma gestão mais eficaz dos recursos disponíveis, e pode influenciar positivamente o desempenho financeiro global das organizações.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Para pesquisas futuras na área de análise de decisão de portfólios de projetos, diversas sugestões se apresentam como potenciais direcionadores para aprimorar e expandir o conhecimento. Uma abordagem promissora é a exploração de métodos híbridos, integrando técnicas já estabelecidas. A combinação de diferentes abordagens pode proporcionar sinergias valiosas, buscando otimizar as vantagens distintas de cada técnica.

Neste sentido, uma consideração importante é o aprimoramento do SAD de modo a se tornar mais adaptativo e capaz de direcionar os usuários para um dos dois módulos específicos, propostos nesta tese, com base no tamanho e na complexidade do problema a ser analisado. Para isso, é necessária uma avaliação e estabelecimento de premissas que possibilitarão delimitar as características objetivas que serão avaliadas nesse ponto de decisão. Essa

abordagem personalizada pode melhorar significativamente a eficiência e a eficácia do processo decisório, adequando-se melhor às demandas específicas de cada situação. Além disso, ressalta-se a possibilidade de incorporar no SAD as avaliações holísticas no processo de modelagem de preferências (DE ALMEIDA et al., 2021).

No contexto de gerenciamento de portfólio de projetos, é possível ampliar o escopo da avaliação dos métodos propostos, incorporando a análise dos projetos em seu desenvolvimento e os impactos destes na alocação dos recursos, ou seja, uma avaliação não estática que permita ajustes no portfólio durante seu gerenciamento. Adicionalmente, sugere-se a extensão dos modelos propostos para abranger a tomada de decisões em grupo, dado que, na prática, o gerenciamento de projetos e portfólios frequentemente ocorre de forma coletiva.

Uma área de pesquisa que merece atenção é a avaliação comparativa de diferentes heurísticas. A realização de estudos abrangentes, aplicando diversas heurísticas e comparando os resultados em termos de qualidade das soluções obtidas a partir do processo de geração de portfólio de projetos, pode fornecer insights valiosos sobre a eficácia relativa dessas abordagens em diferentes contextos e tipos de problemas.

Além disso, é recomendável a análise da distância para a solução ótima ao empregar a metaheurística proposta. Avaliar o desempenho em relação à solução ideal pode fornecer informações cruciais sobre a eficiência da metaheurística em diferentes cenários e sua capacidade de se aproximar da solução mais ótima possível.

Explorar outros domínios relevantes no contexto da seleção de portfólio de projetos, como a Transformação Digital e a Indústria 4.0 (I4.0), é sugerido devido ao seu potencial significativo. Esses domínios estão impulsionando mudanças substanciais na forma como as organizações operam e gerenciam seus projetos, aproveitando tecnologias avançadas como Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA) e Computação em Nuvem. Ao examinar a interseção entre esses domínios e a análise de decisão de portfólio de projetos, é possível identificar novas oportunidades de otimização e inovação, visando alcançar maior eficiência e competitividade organizacional.

Em síntese, ressalta-se importância e as contribuições significativas alcançadas na resolução da problemática da análise de decisão de portfólios de projetos. As contribuições detalhadas apresentadas ao longo da tese têm o potencial de apoiar outras decisões relacionadas ao desenvolvimento de trabalhos futuros, de modo a não apenas superar as limitações existentes, mas também de aprimorar significativamente a tomada de decisões estratégicas em ambientes dinâmicos e desafiadores.

REFERÊNCIAS

- ADEWUMI, A.; MOOLEY, A. Comparative Results of Heuristics for Portfolio Selection Problem. **IEEE Conference on Computational Intelligence for Financial Engineering & Economics (CIFER)**, March, New York, USA, 2012.
- ANGELIS, A.; KANAVOS, P. Value-Based Assessment of New Medical Technologies: Towards a Robust Methodological Framework for the Application of Multiple Criteria Decision Analysis in the Context of Health Technology Assessment. **Pharmaco Economics** v. 34, p. 435–446, 2016. <https://doi.org/10.1007/s40273-015-0370-z>
- AOUNI, B.; DOUMPOS, M.; PÉREZ-GLADISH, B.; STEUER, R.E. On the increasing importance of multiple criteria decision aid methods for portfolio selection. **J. Oper. Res. Soc.**, v. 69, n. 10, p. 1525–1542, 2018.
- BAKER, N.R. R&D project selection models: an assessment. **IEEE Transactions on Engineering Management**, v. 21, n. 4, p. 165–171, 1974.
- BALDEIRAS, F.; GOMEZ-SANTILLAN, C.; CRUZ-REYES, L.; RANGEL-VALDEZ, N.; MORALES-RODRIGUEZ, M. A Grey Mathematics Approach for Evolutionary Multi-objective Metaheuristic of Project Portfolio Selection. **Studies in Computational Intelligence**, v. 749, p. 379-388, 2018.
- BARBATI, M.; GRECO, S.; KADZIŃSKI, M.; SŁOWIŃSKI, R. Optimization of multiple satisfaction levels in portfolio decision analysis. **Omega**, v. 78, p. 192–204, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2017.06.013>.
- BORCHERDING, K.; EPPEL, T.; VON WINTERFELDT, D. Comparison of weighting judgments in multiattribute utility measurement. **Management science**, v. 37, n. 12, p. 1603-1619, 1991.
- BRANS, J.P. (1982). L'ingénierie de la décision: l'élaboration d'instruments d'aide a la décision. methode PROMETHEE. *In*: NADEAU, R., LANDRY, M. (Eds.), **L'Aide a La Decision: Nature, Instruments et Perspectives d'Avenir**. Presses de l'Universite Laval, Quebec, Canada, p. 183–214, 1982.
- BUEDE, D. M.; BRESNICK, T. A. Applications of decision analysis to the military systems acquisition process, *In*: EDWARDS, W.; MILES, R. F.; VON WINTERFELDT, D. (Eds.). **Advances in Decision Analysis: from Foundations to Applications**. Cambridge University Press, p. 539–563, 2007.
- CAMILO, D. G. G.; DE SOUZA, R. P.; FRAZÃO, T. D. C.; DA COSTA JUNIOR, J. F. Multi-criteria analysis in the health area: selection of the most appropriate triage system for the emergency care units in Natal. **BMC Medical Informatics and Decision Making**, v. 20, n. 1, p. 38, 2020. <https://doi.org/10.1186/s12911-020-1054-y>
- CARAZO, A.; GOMEZ, T.; MOLINA, J.; HERNANDEZ-DIAZ, A.; GUERRERO, F. Solving a comprehensive model for multiobjective project portfolio selection. **Computers & Operations Research**, v.37, p. 630 – 639, 2010.

CARRILLO, P. A. A.; ROSELLI, L. R. P.; FREJ, E. A.; DE ALMEIDA, A. T. Selecting an agricultural technology package based on the flexible and interactive tradeoff method. **Annals of Operations Research**, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10479-018-3020-y>

CHEN, Y.; MABU, S.; HIRASAWA, K. A model of portfolio optimization using time adapting genetic network programming. **Computers and Operations Research**, v. 37, n. 10, p. 1697–1707, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2009.12.003>

CLARKE, G.; WRIGHT, J. W. Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. **Operations Research**, v. 12, n. 4, p. 568–581, 1964. <https://doi.org/10.1287/opre.12.4.568>

COOPER, R.; EDGETT, S.; KLEINSCHMIDT, E. New product management: practices and performance. **Journal of Product Innovation Management**, v. 16, n. 4, p. 333–351, 1999.

CRAMA, Y.; SCHYNS, M. Simulated annealing for complex portfolio selection problems. **European Journal of Operational Research**, v. 150, p. 546–571, 2003.

DA SILVA, L. B. L.; FREJ, E. A.; DE ALMEIDA, A. T.; FERREIRA, R. J. P.; MORAIS, D. C. A review of partial information in additive multicriteria methods. **IMA Journal of Management Mathematics**, v. 34, n. 1, p. 1–37, 2023.

DE ALMEIDA, A. T. Processo de decisão nas organizações: construindo modelos de decisão multicritério. *In: São Paulo, Atlas*, p. 231, 2013.

DE ALMEIDA, A. T.; DE ALMEIDA, J. A.; COSTA, A. P. C. S.; DE ALMEIDA-FILHO, A. T. A new method for elicitation of criteria weights in additive models: Flexible and interactive tradeoff. **European Journal of Operational Research**, v. 250, n. 1, p. 179–191, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.08.058>

DE ALMEIDA, A. T.; DUARTE, M. D. O. A multi-criteria decision model for selecting project portfolio with consideration being given to a new concept for synergies. **Pesquisa Operacional**, v. 31, n. 2, p. 301–318, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0101-74382011000200006>

DE ALMEIDA, A. T.; VETSCHERA, R.; DE ALMEIDA, J. A. Scaling Issues in Additive Multicriteria Portfolio Analysis. *In: Lecture Notes in Business Information Processing*, v. 184 LNBIP, p. 131–140, 2014. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-11364-7>

DE ALMEIDA, A.T., FREJ, E.A.; ROSELLI, L.R.P. Combining Holistic and Decomposition Paradigms in Preference Modeling with the Flexibility of FITradeoff. **Central European Journal of Operations Research**, v. 29, p. 7–47, 2021.

DE ALMEIDA, A.T.; CAVALCANTE, C.A.; ALENCAR, M.H.; FERREIRA, R.J.P.; DE ALMEIDA-FILHO, A.T.; GARCEZ, T.V. Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Reliability and Maintenance Decision Analysis. **International Series in Operations Research & Management Science**, v. 231, 2015. DOI 10.1007/978-3-319-17969-8_2

DE ALMEIDA, A.T.; FREJ, E.A.; ROSELLI, L.R.P. Combining holistic and decomposition paradigms in preference modeling with the flexibility of FITradeoff. **Cent Eur J Oper Res**, v.

29, p. 7–47, 2021.

DE ALMEIDA, A.T.; FREJ, E.A.; ROSELLI, L.R.P.; COSTA, A.P.C.S. A summary on FITradeoff method with methodological and practical developments and future perspectives. **Pesquisa Operacional**, v. 43, p. e268356, 2023. doi: 10.1590/0101-7438.2023.043spe1.00268356.

DE MACEDO, P. P.; MOTA, C. M. DE M.; SOLA, A. V. H. Meeting the Brazilian Energy Efficiency Law: A flexible and interactive multicriteria proposal to replace non-efficient motors. **Sustainable Cities and Society**, v. 41, p. 822–832, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.06.020>

DOERNER, K; GUTJAHR, W.; HARTL, R.; STRAUSS, C.; STUMMER, C. Pareto Ant Colony Optimization: A Metaheuristic Approach to Multiobjective Portfolio Selection. **Annals of Operational Research**, v. 131, p. 79–99, 2004.

DUARTE, A.; MLADENOVIĆ, N.; SÁNCHEZ-ORO, J.; TODOSIJEVIĆ, R. Variable neighborhood descent. **Handbook of Heuristics**; v. 1–2, p. 341–367, 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-319-07124-4_9

EDWARDS, W. How to use multiattribute utility measurement for social decisionmaking, **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, v. 7, n. 5, p. 326–340, 1977. <http://dx.doi.org/10.1109/TSMC.1977.4309720>

EFFATPANA, S.K.; AHMADI, M.H.; AUNGKULANON, P.; MALEKI, A.; SADEGHZADEH, M.; SHARIFPUR, M.; CHEN, L. Comparative Analysis of Five Widely-Used Multi-Criteria Decision-Making Methods to Evaluate Clean Energy Technologies: A Case Study. **Sustainability**, v. 14, p. 1403, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14031403>

EHRGOTT, M; GANDIBLEUX, X. **Multiple Criteria Optimization - State of the Art Annotated Bibliographic Surveys**, volume 52 of International Series in Operations Research & Management Science, chapter 8 Multiobjective combinatorial optimization - Theory, Methodology and Applications; pages 369-444. Kluwer Academic Publishers, Boston, MA, 2002.

EILAT, H. et al. Constructing and evaluating balanced portfolios of R&D projects with interactions: A DEA based methodology. **European Journal of Operational Research**, v. 172, p. 1018-1039, 2006.

FERNANDEZ, E.; GOMEZ, C.; RIVERA, G.; CRUZ-REYES, L. Hybrid Metaheuristic approach for handling many objectives and decisions on partial support in project portfolio optimization. **Information Sciences**, v. 315, p. 102-122, 2015.

FERNANDEZ, E.; LOPEZ, E.; MAZCORRO, G.; OLMEDO, R.; COELLO COELLO, C.A. Application of the non-outranked sorting genetic algorithm to public project portfolio selection. **Inf. Sci.**, v. 228, p. 131–149, 2013.

FLIEDNER, T.; LIESIO, J. Adjustable robustness for multi-attribute project portfolio selection. **European Journal of Operational Research**, v. 252, n. 3, p. 931–946, 2016. doi:10.1016/j.ejor.2016.01.058.

FOSSILE, D. K.; FREJ, E. A.; GOUVEA DA COSTA, S. E.; PINHEIRO DE LIMA, E.; DE ALMEIDA, A. T. Selecting the most viable renewable energy source for Brazilian ports using the FITradeoff method. **Journal of Cleaner Production**, v. 260, p. 121107, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121107>

FREJ, E. A.; DE ALMEIDA, A. T.; COSTA, A. P. C. S. Using data visualization for ranking alternatives with partial information and interactive tradeoff elicitation. **Operational Research**, v. 19, n. 4, p. 909–931, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12351-018-00444-2>

FREJ, E. A.; EKEL, P.; DE ALMEIDA, A. T. A benefit-to-cost ratio based approach for portfolio selection under multiple criteria with incomplete preference information. **Information Sciences**, v. 545, p. 487–498, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2020.08.119>

FREJ, E. A.; ROSELLI, L. R. P.; ARAÚJO DE ALMEIDA, J.; DE ALMEIDA, A. T. A Multicriteria Decision Model for Supplier Selection in a Food Industry Based on FITradeoff Method. **Mathematical Problems in Engineering**, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/4541914>

GUSMÃO, A. P. H. DE; MEDEIROS, C. P. A Model for Selecting a Strategic Information System Using the FITradeoff. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 7, 2016.

HAKANEN, J.; MIETTINEN, K.; SAHLSTEDT, K. Wastewater treatment: new insight provided by interactive multiobjective optimization. **Decis. Support Syst.**, v. 51, n. 2, p. 328–337, 2011.

HASSANZADEH, F.; NEMATI, H.; SUN, M. Robust optimization for interactive multiobjective programming with imprecise information applied to R&D project portfolio selection. **European Journal of Operational Research**, v. 238, p. 41-53, 2014.

HEIDENBERGER, K.; STUMMER, C. Research and development project selection and resource allocation: a review of quantitative modelling approaches. **Int. J. Manage. Rev.**, v. 1, n. 2, p. 197–224, 1999.

HUANG, C.; CHU, P.; CHIANG, Y. A fuzzy AHP application in government-sponsored R&D project selection. **Omega**, v. 36, p. 1038-1052, 2008.

HWANG, C.L.; YOON, K. Methods for multiple attribute decision making. *In*: BECKMANN, M.; KÜNZI, H.P., (Eds), **Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems**, Springer, Berlin, Heidelberg, v. 186, p. 58–191, 1981.

JATO-ESPINO, D.; CASTILLO-LOPEZ, E.; RODRIGUEZ-HERNANDEZ, J.; CANTERAS-JORDANA J.C. A review of application of multi-criteria decision making methods in construction. **Automation in Construction**, v. 45, p. 151-162, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.05.013>.

KAISER, M. G.; EL ARBI, F.; AHLEMANN, F. Successful project portfolio management beyond project selection techniques: Understanding the role of structural alignment. **International Journal of Project Management**, v. 33, n. 1, p. 126-139, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2014.03.002>

KANG, T. H. A.; FREJ, E. A.; DE ALMEIDA, A. T. Flexible and Interactive Tradeoff Elicitation for Multicriteria Sorting Problems. **Asia-Pacific Journal of Operational Research**, v. 37, n. 05, p. 2050020, 2020.

KANG, T. H.A.; DA COSTA SOARES JÚNIOR, A. M.; DE ALMEIDA, A. T. Evaluating electric power generation technologies: A multicriteria analysis based on the FITradeoff method. **Energy**, v. 165, p. 10–20, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.165>

KEENEY, R. L.; RAIFFA, H. **Decision making with multiple objectives, preferences and value tradeoffs**. New York: Wiley, 1976.

KHALILI-DAMGHANI, Kaveh et al. Solving multi-period project selection problems with fuzzy goal programming based on TOPSIS and a fuzzy preference relation. **Information Sciences**, v. 252, p. 42-51, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2013.05.005>

KHAN, I.; PINTELON, L.; MARTIN, H. The Application of Multicriteria Decision Analysis Methods in Health Care: A Literature Review. **Medical Decision Making**, v. 42, n. 2, p. 262-274, 2002. doi:10.1177/0272989X211019040

KIKER, G.A.; BRIDGES, T.S.; VARGHESE, A.; SEAGER, T.P.; LINKOV, I. Application of multicriteria decision analysis in environmental decision making. **Integr Environ Assess Manag**, v. 1, p. 95-108, 2005. https://doi.org/10.1897/IEAM_2004a-015.1

KILLEN, C.P. Managing portfolio interdependencies: The effects of visual data representations on project portfolio decision making. **International Journal of Managing Projects in Business**, v. 10, n. 4, p. 856–879, 2017. <https://doi.org/10.1108/IJMPB-01-2017-0003>

KIRKWOOD, C.W.; SARIN, R.K. Ranking with partial information: a method and an application. **Operations Research**, v. 33, n. 1, p. 38–48, 1985.

LEAO, H. A. T.; CANEDO, E. D.; COSTA, P. H. T.; OKIMOTO, M. V.; SANTOS, G. A. Use of AHP and Promethee for Research Project Portfolio Selection. **Lecture Notes in Computer Science**, v. 11619, p. 504-517, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-030-24289-3_37

LIBERATORE, M.J. An extension of the analytic hierarchy process for industrial R&D project selection and resource allocation. **IEEE Transaction on Engineering Management**, v. 34, n. 1, 1987.

LIESIÖ, J.; MILD, P.; SALO, A. Preference programming for robust portfolio modeling and project selection. **Eur J Oper Res**, v. 181, n. 3, p.1488–505, 2007. doi:10.1016/j.ejor.2005.12.041

LIESIÖ, J.; MILD, P.; SALO, A. Robust portfolio modeling with incomplete cost information and project interdependencies. **European Journal of Operational Research**, v. 190, n. 3, p. 679–695, 2008. doi:10.1016/j.ejor.2007.06.049.

LIESIÖ, J.; SALO, A.; KEISLER, J. M.; MORTON, A. Portfolio decision analysis: Recent developments and future prospects. **European Journal of Operational Research**, v. 293, n.3, p. 811–825, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.12.015>

LITVINCHEV, I.S.; LOPEZ, F.; ALVAREZ, A.; FERNANDEZ, E. Large-scale public R & D portfolio selection by maximizing a biobjective impact measure. **IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part A: Syst. Humans**, v. 40, n. 3, p. 572–582, 2010.

LOPES, Y. G.; DE ALMEIDA, A. T. A multicriteria decision model for selecting a portfolio of oil and gas exploration projects. **Pesquisa Operacional**, v. 33, n. 3, p. 417-441, 2013.

LOURENÇO, J. C.; MORTON, A.; BANA E COSTA, C. A. PROBE - A multicriteria decision support system for portfolio robustness evaluation. **Decision Support Systems**, v. 54, n. 1, p. 534–550, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2012.08.001>

LOURENÇO, J. C.; SOARES, J. O.; BANA E COSTA, C. A. Portfolio robustness evaluation: a case study in the electricity sector. **Technological and Economic Development of Economy**, v. 23, n. 1, p. 59–80, 2017. <https://doi.org/10.3846/20294913.2014.989422>

MÁRMOL, A. M.; PUERTO, J.; FERNÁNDEZ, F. R. Sequential incorporation of imprecise information in multiple criteria decision processes. **European Journal of Operational Research**, v. 137, n. 1, p. 123–133, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00082-0](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00082-0)

MARQUES, A. C.; FREJ, E. A.; DE ALMEIDA, A. T. FITradeoff based approach for portfolio selection problems. *In: INnovation for Systems Information and Decision meeting 2020, Virtual meeting. INnovation for Systems Information and Decision: Models and Applications, 2020a.*

MARQUES, A. C.; FREJ, E. A.; DE ALMEIDA, A. T. Metaheuristics Approach with Partial Information for Multicriteria Portfolio Selection Problem. *In: INFORMS Annual Meeting 2021, Virtual meeting. INFORMS Annual Meeting, 2021.*

MARQUES, A. C.; FREJ, E. A.; DE ALMEIDA, A. T. Multicriteria decision support for project portfolio selection with the FITradeoff method. **Omega**; v. 111, p. 102661, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2022.102661>

MARQUES, A. C.; FREJ, E. A.; DE ALMEIDA, A. T. Multicriteria Portfolio Decision Analysis Method with Partial Information. *In: INFORMS Annual Meeting 2020, Virtual meeting. INFORMS Annual Meeting, 2020b.*

MAVROTAS, G.; DIAKOULAKI, D.; CALOGHIROU, Y. Project prioritization under policy restrictions. A combination of MCDA with 0-1 programming. **European Journal of Operational Research**, v. 171, n. 1, p. 296–308, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.07.069>

MENDES, J. A. J.; FREJ, E. A.; DE ALMEIDA, A. T.; DE ALMEIDA, J. A. Evaluation of flexible and interactive tradeoff method based on numerical simulation experiments. **Pesquisa Operacional**, v. 40, p. 1–25, 2020. <https://doi.org/10.1590/0101-7438.2020.040.00231191>

MOHAGHEGHI, V.; MOUSAVI, S.M.; ANTUCHEVIC`IENE`, J. ; MOJTAHEDI, M. Project portfolio selection problems: a review of models, uncertainty approaches, solution techniques, and case studies. **Technol. Econ. Dev. Econ.**, v. 25, n. 6, p. 1380–1412, 2019.

MONTE, M. B. DA S.; MORAIS, D. C. A Decision Model for Identifying and Solving Problems in an Urban Water Supply System. **Water Resources Management**, v. 33, n. 14, p. 4835–4848, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02401-w>

MONTIBELLER, G.; ALBERTO FRANCO, L. Resource allocation in local government with facilitated portfolio decision analysis. In: SALO, A.; KEISLER, J.; MORTON, A. (eds.) **Portfolio Decision Analysis**, p. 259–281. New York: Springer, 2011.

MORTON, A. Measurement issues in the evaluation of projects in a Project portfolio. **European Journal of Operational Research**, v. 245, p. 789–796, 2015.

MORTON, A.; KEISLER, J. M.; SALO, A. Multiple Criteria Decision Analysis. **Operations Research & Management Science**, v. 233, p. 1269–1298, 2016. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4>

ÖZPEYNIRCI, S.; ÖZPEYNIRCI, Ö.; MOUSSEAU, V. Portfolio decision analysis with a generalized balance approach. **Computers and Operations Research**, v. 142, p. 105705, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.105705>

PARK, K. S.; KIM, S. H. Tools for interactive multiattribute decisionmaking with incompletely identified information. **European Journal of Operational Research**, v. 98, n. 1, p. 111–123, 1997. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(95\)00121-2](https://doi.org/10.1016/0377-2217(95)00121-2)

PERGHER, I.; FREJ, E. A.; ROSELLI, L. R. P.; DE ALMEIDA, A. T. Integrating simulation and FITradeoff method for scheduling rules selection in job-shop production systems. **International Journal of Production Economics**, v. 227, p. 107669, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107669>

PESSÔA FILHO, P.A.; SILVA SANTOS, F. L.; MANSOORI, G. A. An update on the developments in petroleum production research in Brazil. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 51, n. 1–2, p. 1–5, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2005.11.015>

PHILLIPS, L. D.; BANA E COSTA, C. A. Transparent prioritisation, budgeting and resource allocation with multi-criteria decision analysis and decision conferencing. **Annals of Operations Research**, v. 154, n. 1, p.51–68, 2007. <http://dx.doi.org/10.1007/s10479-007-0183-3>

POLETO, T.; CLEMENTE, T. R. N.; DE GUSMÃO, A. P. H.; SILVA, M. M.; COSTA, A. P. C. S. Integrating value-focused thinking and FITradeoff to support information technology outsourcing decisions. **Management Decision**, 2020. <https://doi.org/10.1108/MD-09-2019-1293>

RIVERA, G.; GOMEZ, C.; FERNANDEZ, E.; CRUZ, L.; CASTILLO, O.; BASTIANI, S. Handling of Synergy into an Algorithm for Project Portfolio Selection. **Studies in Computational Intelligence**; v. 1, p. 418-430, 2013.

RODRIGUES, L. V. S.; CASADO, R. S. G. R.; DE CARVALHO, E. N.; SILVA, M. M.; E SILVA, L. C. Using FITradeoff in a ranking problem for supplier selection under TBL performance evaluation: An application in the textile sector. **Producao**, v. 30, p. 1–14, 2020. <https://doi.org/10.1590/0103-6513.20190032>

RODRIGUES, T.; OLIVEIRA, M. D.; DE SÁ, A. B. Multicriteria model to allocate human resources in community care programmes. **1st Portuguese Meeting in Biomedical Engineering, ENBENG 2011**. <https://doi.org/10.1109/ENBENG.2011.6026087>

ROSELLI, L. R. P.; DE ALMEIDA, A. T.; FREJ, E. A. Decision neuroscience for improving data visualization of decision support in the FITradeoff method. **Operational Research**, v. 19, n. 4, p. 933–953, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12351-018-00445-1>

ROSELLI, L. R. P.; PEREIRA, L. DE S.; DA SILVA, A. L. C. DE L.; DE ALMEIDA, A. T.; MORAIS, D. C.; COSTA, A. P. C. S. Neuroscience experiment applied to investigate decision-maker behavior in the tradeoff elicitation procedure. **Annals of Operations Research**, v. 289, n. 1, p. 67–84, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10479-019-03394-w>

ROY, B. Classement et choix en présence de points de vue multiples (la méthode ELECTRE). **Revue française d'automatique, d'informatique et de recherche opérationnelle**, v. 8, p. 57–75, 1968. <https://doi.org/10.1051/ro/196802V100571>

ROY, B. **Multicriteria methodology for decision aiding**. Kluwer Academic Publishers, 1996.

SALEHI, K. A hybrid fuzzy MCDM approach for project selection problem. **Decision Science Letters**, v. 4, p. 109–116, 2015.

SALO, A.; HÄMÄLÄINEN, R. P. Preference assessment by imprecise ratio statements. **Operations Research**, v. 40, p. 1053–1061, 1992.

SALO, A.; HÄMÄLÄINEN, R. Preference ratios in multiattribute evaluation (PRIME)–elicitation and decision procedures under incomplete information. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans**, v. 31, p. 533–545, 2001.

SALO, A.; KEISLER, J.; MORTON, A. **Portfolio Decision Analysis: Improved Methods for Resource Allocation**. New York: Springer, 2011.

SCHMIDT, R.L.; FREELAND, J.R. Recent progress in modeling R&D project selection process. **IEEE Transactions on Engineering Management**, v. 39, n. 2, p. 189–201, 1992.

SHARPE, P.; KEELIN, T. How Smithkline Beecham makes better resource-allocation decisions. **Harvard Business Review**, v. 76, n. 2, p. 45–57, 1998.

STUMMER, C.; HEIDENBERGER, K. Interactive R & D portfolio analysis with project interdependencies and time profiles of multiple objectives. **IEEE Trans. Eng. Manage**, v. 50, n. 2, p. 175–183, 2003.

TERVONEN, T.; LIESIÖ, J.; SALO, A. Modeling project preferences in multiattribute portfolio decision analysis. **European Journal of Operational Research**, v. 263, n. 1, p. 225–239, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.04.051>

URLI, B.; TERRIEN, F. Project portfolio selection model, a realistic approach. **Internation. Transactions in Operational. Research**, v.17, p. 809–826, 2010.

VETSCHERA, R. Composite alternatives in group decision support. **Annals of Operations Research**, v. 51, p. 197–215, 1994. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF02078896>

VETSCHERA, R.; DE ALMEIDA, A. T. A PROMETHEE-based approach to portfolio selection problems. **Computers and Operations Research**, v. 39, n. 5, p. 1010–1020, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.06.019>

VON WINTERFELDT, D.; EDWARDS, W. **Decision analysis and behavioral research**. Cambridge University Press, Cambridge, 1986.

WANG, K.; WANG, C.K.; HU, C. Analytic hierarchy process with fuzzy scoring in evaluating multidisciplinary R&D projects in China. **IEEE Transactions on Engineering Management**, v. 52, n.1, 2005.

WĄTRÓBSKI, J.; JANKOWSKI, J.; ZIEMBA, P.; KARCZMARCZYK, A.; ZIOŁO, M. Generalised framework for multi-criteria method selection. **Omega**, v. 86, p. 107-124, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.07.004>.

WEBER, M. Decision-making with incomplete information. **European Journal of Operational Research**, v. 28, p. 44–57, 1987. https://doi.org/10.1007/3-540-54945-5_42

YALCIN, A. S.; KILIC, H. S.; DELEN, D. The use of multi-criteria decision-making methods in business analytics: A comprehensive literature review. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 174, p. 121193, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121193>

YANASSE, H. H.; SOMA, N. Y.; MACULAN, N. An algorithm for determining the K-best solutions of the one-dimensional Knapsack problem. **Pesquisa Operacional**, v. 20, n. 1, p. 117-134, 2000. <https://doi.org/10.1590/s0101-74382000000100011>

ZHANG, X.; YAN, Y.; WANG, L.; WNAG, Y. A ranking approach for robust portfolio decision analysis based on multilinear portfolio utility functions and incomplete preference information. **Omega**, v. 122, p. 102943, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2023.102943>

APÊNDICE A – NOTAÇÕES MATEMÁTICAS

A lista a seguir sintetiza a nomenclatura utilizada como notação matemática nos modelos propostos na tese.

| Notação | Descrição |
|--------------------------------|---|
| a_i | Alternativas |
| $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ | Conjunto de n alternativas |
| c_j | CrITÉRIOS de avaliação |
| k_j | Constante de escala para cada critÉrio j |
| $C = \{c_1, c_2, \dots, c_p\}$ | Conjunto de p critÉrios |
| v_j | Função valor do critÉrio j |
| Y_j' e Y_j'' | Pontos intermediÁrios entre duas consequÊncias em um critÉrio |
| φ | Espaço de peso viÁvel |
| ε | VariÁvel como artifício para evitar a desigualdade estrita |
| x_{ij} | ConsequÊncia da alternativa i no critÉrio j |
| c | Número fixo de projetos c-Ótimo |
| $D = \{d: d = 1, \dots, l\}$ | Conjunto de l projetos |
| $S \subseteq D$ | Subconjunto com vÁrios projetos que formam um portfólio |
| t_d | VariÁvel binÁria indicando se o projeto compõe o portfólio |
| r_{dq} | Consumo do recurso q pelo projeto d |
| e_{dp} | Benefício p do projeto d |
| $R_q(S)$ | Consumo de recursos de um portfólio S |
| $x_j(S)$ | Benefício do portfólio S no critÉrio j |
| B_q | Budget para cada recurso q |
| R_{mq} | consumo do recurso q pelo portfólio m |
| x_{mj} | valor agregado do portfólio m no critÉrio j |