

**Universidade Federal Fluminense**

**LUIZA DOS SANTOS**

**Avaliação de Fontes de Energia Renováveis no Sudeste  
Brasileiro: Uma Abordagem F-PROMÉTHÉE GDSS**

**VOLTA REDONDA**

**2019**

LUIZA DOS SANTOS

# Avaliação de Fontes de Energia Renováveis no Sudeste Brasileiro: Uma Abordagem F-PROMÉTHÉE GDSS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia. Área de Concentração: Modelagem Computacional.

Orientador:

Prof. D.Sc. Tiago Araújo Neves

Coorientador:

Prof. D.Sc. Luís Alberto Duncan Rangel

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

VOLTA REDONDA

2019

Ficha catalográfica automática - SDC/BEM  
Gerada com informações fornecidas pelo autor

S237a Santos, Luiza dos  
Avaliação de Fontes de Energia Renováveis no Sudeste Brasileiro: Uma Abordagem F-PROMÉTHÉE GDSS / Luiza dos Santos ; Tiago Araújo Neves, orientador ; Luís Alberto Duncan Rangel, coorientador. Volta Redonda, 2019.  
125 f. : il.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, 2019.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPG-MCCT.2019.m.13686296799>


1. Apoio multicritério à decisão. 2. Energia renovável. 3. Pesquisa operacional. 4. Produção intelectual. I. Neves, Tiago Araújo, orientador. II. Rangel, Luís Alberto Duncan, coorientador. III. Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia Industrial e Metalúrgica de Volta Redonda. IV. Título.

CDD -

Avaliação de Fontes de Energia Renováveis no Sudeste Brasileiro: Uma  
Abordagem F-PROMÉTHÉE GDSS

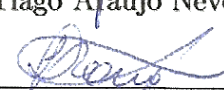
Luiza dos Santos

Aprovado por:



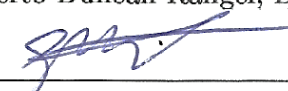
---

Prof. Tiago Araújo Neves, D.Sc. / UFF



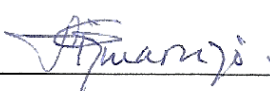
---

Prof. Luís Alberto Duncan Rangel, D.Sc. / UFF



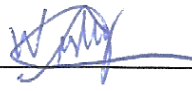
---

Prof. Gustavo Benitez Alvarez, D.Sc. / UFF



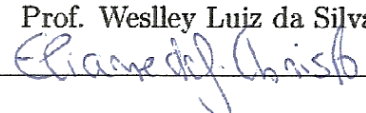
---

Prof. Lino Guimarães Marujo, D.Sc. / UFRJ



---

Prof. Wesley Luiz da Silva Assis, D.Sc. / UFF



---

Profª. Eliane da Silva Christo, D.Sc. / UFF

Volta Redonda, 15 de abril de 2019.

*Para meus pais, Terezinha e José.*

# Agradecimentos

Agradeço, primeiramente à Deus, por ter me dado forças e me sustentado durante todos esses anos.

Agradeço também aos meus pais, José e Terezinha, pelo incentivo constante e o apoio incondicional em todos os momentos.

Também dirijo os meus agradecimentos à UFF – EEIMVR e a todos os seus docentes e funcionários, que permitiram meu desenvolvimento acadêmico e pessoal ao longo desses anos.

Agradeço os meus amigos, aqueles que conheci na universidade e aqueles de longa data, que tornaram esta caminhada mais leve e divertida.

Agradeço também os meus orientadores, Luís Alberto Duncan Rangel e Tiago Araújo Neves, que tanto auxiliaram na realização deste trabalho e que desde cedo contribuíram para o meu desenvolvimento acadêmico.

Deixo também meus agradecimentos a todos os profissionais consultados que demonstraram disponibilidade e generosidade, compartilhando seus conhecimentos e experiências e contribuindo para o desenvolvimento desta pesquisa.

Por fim, dirijo o meu muito obrigada a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a a realização deste trabalho.

# Resumo

A energia é uma componente fundamental para o desenvolvimento industrial e social. Portanto, assegurar uma matriz energética eficiente é assegurar a manutenção desse desenvolvimento. Nas últimas décadas, o planejamento energético mudou de uma visão focada em custos e começou a levar em consideração múltiplos critérios, tornando o Apoio Multicritério à Decisão adequado para o tratamento desse tipo de problema. Desse modo, essa pesquisa, por meio de um estudo de caso, tem como objetivo avaliar diferentes formas de energia renovável na Região Sudeste do Brasil. Para esta avaliação, será utilizado o Método PROMÉTHÉE GDSS, com a incorporação de números *fuzzy*, como uma forma de tratar as incertezas. Os resultados demonstraram que quando considera-se a existência de incertezas nos dados em determinado nível ou quando admite-se um nível aceitável de diferença entre duas alternativas, a geração Solar Fotovoltaica mostrou-se como a melhor alternativa para o grupo de especialistas consultados.

# Abstract

Energy is a fundamental component to industrial and social development. Therefore, an efficient energy matrix is a guarantee of this development. In the last decades, energy planning changed from a vision focused on costs and began to take into account multiple criteria, making Multi-criteria Decision Aid suitable for the treatment of this type of problem. Thus, this research, through a case study, aims to evaluate types of renewable energy in the Southeast Region of Brazil. In this evaluation, the PROMÉTHÉE GDSS method was used with the incorporation of fuzzy numbers as a way to deal with the uncertainties. The results showed that when considering the presence of uncertainties in the data - at a certain level - or when accepting a certain degree of difference between two alternatives, photovoltaic solar energy was the best alternative for the group of experts consulted.

# Palavras-chave

1. Apoio Multicritério à Decisão
2. Decisão em Grupo
3. Geração de eletricidade
4. Números Fuzzy
5. PROMÉTHÉE II

# Glossário

AHP	:	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
AMD	:	Apoio Multicritério à Decisão
ANEEL	:	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	:	<i>Analytic Network Process</i>
BIG	:	Banco de Informação de Geração
ELECTRE	:	<i>Elimination et Choix Traduisant la Réalité</i>
GAIA	:	<i>Graphical Analysis for Interactive Aid</i>
GDSS	:	<i>Group Decision Support System</i>
M&O	:	Manutenção e Operação
MACBETH	:	<i>Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique</i>
MATLAB <sup>®</sup>	:	<i>Matrix Laboratory</i>
MAUT	:	<i>Multi-attribute Utility Theory</i>
PNE	:	Plano Nacional de Energia
PROINFA	:	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas
PROMÉTHÉE	:	<i>Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations</i>
TODIM	:	Tomada de Decisão Interativa Multicritério
TOPSIS	:	<i>Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution</i>
UTA	:	<i>Utilité Additive</i>
WSI	:	<i>Weight Stability Interval</i>

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>x</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>15</b>
1.1 Justificativa . . . . .	16
1.2 Objetivos . . . . .	17
1.2.1 Objetivo Geral . . . . .	17
1.2.2 Objetivos Específicos . . . . .	17
1.3 Delimitações do Estudo . . . . .	17
1.4 Metodologia . . . . .	17
1.5 Estrutura da Dissertação . . . . .	20
<b>2 Energia</b>	<b>21</b>
2.1 Matriz Elétrica Brasileira . . . . .	24
2.1.1 Matriz Elétrica do Sudeste Brasileiro . . . . .	28
2.2 Energia Solar Fotovoltaica . . . . .	29
2.2.1 Geração de Energia Fotovoltaica . . . . .	32
2.3 Energia Hidrelétrica . . . . .	33
2.3.1 Geração de Hidroeletricidade . . . . .	35
2.4 Biomassa . . . . .	36
2.4.1 Geração de Energia a partir da Biomassa . . . . .	38
2.5 Energia Eólica . . . . .	38

---

2.5.1	Geração de Energia Eólica . . . . .	40
2.6	Outras Formas de Geração . . . . .	40
2.6.1	Energia Geotérmica . . . . .	41
2.6.2	Energia das Ondas . . . . .	41
2.6.3	Energia Termal Oceânica . . . . .	42
2.6.4	Energia das Marés . . . . .	42
2.6.5	Energia das Correntes de Marés . . . . .	43
2.6.6	Energia Eólica <i>Offshore</i> . . . . .	43
<b>3</b>	<b>Números Fuzzy</b>	<b>45</b>
3.1	Número <i>LR Fuzzy</i> . . . . .	46
3.1.1	Operações com números <i>LR Fuzzy</i> . . . . .	48
3.2	Defuzzificação . . . . .	49
<b>4</b>	<b>Apoio Multicritério à Decisão</b>	<b>51</b>
4.1	Conceitos do Apoio Multicritério à Decisão . . . . .	53
4.1.1	Relações de Preferência . . . . .	54
4.2	Apoio Multicritério à Decisão no Contexto da Decisão em Grupo . . . . .	54
4.3	Métodos de Apoio Multicritério à Decisão . . . . .	56
4.4	Método PROMÉTHÉE II . . . . .	59
4.5	PROMÉTHÉE GDSS ( <i>Group Decision Support System</i> ) . . . . .	62
4.6	F-PROMÉTHÉE GDSS . . . . .	64
4.7	Apoio Multicritério à Decisão no Setor Energético . . . . .	67
<b>5</b>	<b>Estudo de Caso</b>	<b>72</b>
5.1	Definição do Método . . . . .	72
5.2	Definição das Alternativas . . . . .	74
5.3	Definição dos Critérios . . . . .	74

---

5.4	Coleta de Dados . . . . .	76
5.5	Desenvolvimento de Algoritmo . . . . .	77
<b>6</b>	<b>Resultados e Discussão</b>	<b>81</b>
6.1	Primeiro Cenário: Função de Preferência Pseudocritério com Preferência Linear . . . . .	83
6.2	Segundo Cenário: Função de Preferência Linear com Área de Indiferença .	87
<b>7</b>	<b>Conclusão</b>	<b>98</b>
7.1	Sugestões de Trabalhos Futuros . . . . .	99
	<b>Referências</b>	<b>101</b>
	<b>Apêndice A - Questionário</b>	<b>110</b>
	<b>Apêndice B - Códigos</b>	<b>115</b>

# Lista de Figuras

1.1	Classificação da Pesquisa. Fonte: [86, 41] . . . . .	18
2.1	Geração Mundial de Eletricidade Eólica, Fotovoltaica e Biomassa em GWh. Fonte: [54] . . . . .	23
2.2	Participação de Energias Renováveis na Geração Mundial em 2017. Fonte: Adaptado de [90] . . . . .	23
2.3	Potência instalada por fonte. Fonte: [11] . . . . .	25
2.4	Emissão de CO <sub>2</sub> na geração de eletricidade. Fonte: [35] . . . . .	26
2.5	Fluxo Elétrico. Fonte: Adaptado de [34] . . . . .	27
2.6	Matriz Elétrica da Região Sudeste. Fonte: [36] . . . . .	30
3.1	Representação de um Número <i>Fuzzy</i> Triangular. Fonte: [73] . . . . .	47
4.1	Funções de Preferência do Método PROMÉTHÉE. Fonte: Adaptado de [42]	61
4.2	Processo Implementação PROMÉTHÉE GDSS. Fonte: Adaptado de [74] .	63
4.3	Critérios Utilizados em Problemas do Setor Energético. Fonte: Adaptado de [5] . . . . .	69
5.1	Representação da Escala Utilizada. Fonte: Autora . . . . .	77
5.2	Tela Entrada do Arquivo com os Dados. Fonte: Autora . . . . .	78
5.3	Processo Execução PROMÉTHÉE GDSS. Fonte: Autora . . . . .	79
5.4	Processo Execução PROMÉTHÉE II. Fonte: Autora . . . . .	79
5.5	Processo Execução Função de Preferência. Fonte: Autora . . . . .	79
6.1	<i>Ranking</i> Função de Preferência Pseudocritério com Preferência Linear. Fonte: Autora . . . . .	83
6.2	Análise de Sensibilidade Decisor 1. Função de Preferência Pseudocritério com Preferência Linear. Fonte: Autora . . . . .	85

---

6.3	Análise de Sensibilidade Decisor 2. Função de Preferência Pseudocritério com Preferência Linear. Fonte: Autora . . . . .	85
6.4	Análise de Sensibilidade Decisor 3. Função de Preferência Pseudocritério com Preferência Linear. Fonte: Autora . . . . .	86
6.5	Análise de Sensibilidade Decisor 4. Função de Preferência Pseudocritério com Preferência Linear. Fonte: Autora . . . . .	86
6.6	<i>Ranking</i> PROMÉTHÉE GDSS - Função de Preferência Linear com Área de Indiferença. Fonte: Autora . . . . .	88
6.7	Análise de Sensibilidade Decisor 1. PROMÉTHÉE GDSS - Função de Preferência Linear com Área de Indiferença. Fonte: Autora . . . . .	89
6.8	Análise de Sensibilidade Decisor 2. PROMÉTHÉE GDSS - Função de Preferência Linear com Área de Indiferença. Fonte: Autora . . . . .	89
6.9	Análise de Sensibilidade Decisor 3. PROMÉTHÉE GDSS - Função de Preferência Linear com Área de Indiferença. Fonte: Autora . . . . .	90
6.10	Análise de Sensibilidade Decisor 4. PROMÉTHÉE GDSS - Função de Preferência Linear com Área de Indiferença. Fonte: Autora . . . . .	90
6.11	Análise de Sensibilidade Decisor 1. F-PROMÉTHÉE GDSS - Função de Preferência Linear com Área de Indiferença. Fonte: Autora . . . . .	92
6.12	Análise de Sensibilidade Decisor 2. F-PROMÉTHÉE GDSS - Função de Preferência Linear com Área de Indiferença. Fonte: Autora . . . . .	92
6.13	Análise de Sensibilidade Decisor 3. F-PROMÉTHÉE GDSS - Função de Preferência Linear com Área de Indiferença. Fonte: Autora . . . . .	93
6.14	Análise de Sensibilidade Decisor 4. F-PROMÉTHÉE GDSS - Função de Preferência Linear com Área de Indiferença. Fonte: Autora . . . . .	93
6.15	<i>Ranking</i> F-PROMÉTHÉE GDSS - Função de Preferência Pseudocritério com Preferência Linear com $\alpha = \beta = 0,6$ . Fonte: Autora . . . . .	95
6.16	Análise de Sensibilidade Decisor 1. F-PROMÉTHÉE GDSS - Função de Preferência Pseudocritério com Preferência Linear com $\alpha = \beta = 0,6$ . Fonte: Autora . . . . .	96

- 
- 6.17 Análise de Sensibilidade Decisor 2. F-PROMÉTHÉE GDSS - Função de Preferência Pseudocritério com Preferência Linear com  $\alpha = \beta = 0,6$ .  
Fonte: Autora . . . . . 96
- 6.18 Análise de Sensibilidade Decisor 3. F-PROMÉTHÉE GDSS - Função de Preferência Pseudocritério com Preferência Linear com  $\alpha = \beta = 0,6$ .  
Fonte: Autora . . . . . 97
- 6.19 Análise de Sensibilidade Decisor 4. F-PROMÉTHÉE GDSS - Função de Preferência Pseudocritério com Preferência Linear com  $\alpha = \beta = 0,6$ .  
Fonte: Autora . . . . . 97

# Lista de Tabelas

2.1	Fontes de Energia Utilizadas no Brasil – Fase de Operação. Fonte:[11] . . .	25
5.1	Escala de Julgamentos Proposta. Fonte: Autora . . . . .	76
5.2	Modelo Tabela de Entrada de Dados. Fonte: Autora . . . . .	78
6.1	Perfil dos Decisores . . . . .	81
6.2	Dados Coletados - Decisor 1 . . . . .	82
6.3	Dados Coletados - Decisor 2 . . . . .	82
6.4	Dados Coletados - Decisor 3 . . . . .	82
6.5	Dados Coletados - Decisor 4 . . . . .	82
6.6	Resultado Função de Preferência Pseudocritério com Preferência Linear. Fonte: Autora . . . . .	83
6.7	Resultados Função de Preferência Pseudocritério com Preferência Linear. Fonte: Autora . . . . .	83
6.8	Intervalos Estabilidade - Função de Preferência Pseudocritério com Prefe- rência Linear. Fonte: Autora . . . . .	84
6.9	Resultados Função de Preferência Linear com Área de Indiferença. Fonte: Autora . . . . .	87
6.10	Resultados PROMÉTHÉE GDSS - Função de Preferência Linear com Área de Indiferença. Fonte: Autora . . . . .	87
6.11	Intervalos Estabilidade PROMÉTHÉE GDSS - Função de Preferência Li- near com Área de Indiferença. Fonte: Autora . . . . .	88
6.12	Resultados F-PROMÉTHÉE GDSS - Função de Preferência Linear com Área de Indiferença. Fonte: Autora . . . . .	91
6.13	Intervalos Estabilidade F-PROMÉTHÉE GDSS - Função de Preferência Linear com Área de Indiferença. Fonte: Autora . . . . .	91

---

6.14	Resultado Função de Preferência Pseudocritério com Preferência Linear com $\alpha = \beta = 0,6$ . Fonte: Autora . . . . .	94
6.15	Resultados F-PROMÉTHÉE GDSS - Função de Preferência Pseudocritério com Preferência Linear com $\alpha = \beta = 0,6$ . Fonte: Autora . . . . .	94
6.16	Intervalos Estabilidade F-PROMÉTHÉE GDSS - Função de Preferência Pseudocritério com Preferência Linear com $\alpha = \beta = 0,6$ . Fonte: Autora . .	95

# Capítulo 1

## Introdução

A energia é um dos mais importantes elementos na vida das pessoas, em termos bioquímicos, é através de processos de conversão de energia que os seres humanos se mantêm vivos. Analisando-se em termos econômico-industriais, é por meio do uso da energia que se obtém os bens e serviços consumidos. Portanto, a energia é um pilar da sociedade fundamental ao seu desenvolvimento e, assim, assegurar uma matriz energética sólida e confiável é também assegurar a manutenção do desenvolvimento dessa e das próximas gerações.

Tecnicamente a energia pode ser definida como a capacidade de um sistema realizar trabalho e pode ter várias formas: potencial, mecânica, química, elétrica, entre outras [51, 60]. As diferentes formas de energia podem ser transformadas umas nas outras através dos processos de conversão de energia. A energia elétrica é um exemplo de energia resultante de um processo de conversão, onde estão envolvidas cargas elétricas [51].

A energia elétrica pode ter sua origem em fontes renováveis de energia ou não renováveis de energia. Acredita-se que as fontes renováveis de energia terão um papel cada vez mais importante na matriz energética mundial nos próximos anos. O aumento da conscientização sobre as questões ambientais tem estimulado novas pesquisas e desenvolvimentos tecnológicos na área energética, melhorando a eficiência e reduzindo os custos dos processos de geração de energia [60, 101].

O Brasil possui destaque na utilização de fontes renováveis para a produção de eletricidade, a maior parte da potência instalada – 82,05% segundo o Banco de Informações de Geração da ANEEL – tem como base fontes renováveis, principalmente de origem hídrica (63,86% do total)[11].

Em 2015, o Brasil, especialmente a região Sudeste, enfrentou uma das piores secas

dos últimos tempos. Os reservatórios das usinas hidrelétricas passaram a operar com volumes muito abaixo do normal e a população se viu diante do desafio de lidar com a escassez de água que por si só já seria um grande problema, porém outro problema surgiu em decorrência deste, a geração de energia elétrica, devido à grande dependência dos recursos hídricos para geração de eletricidade, como explicitado anteriormente. Como consequência, a população passou a lidar com as bandeiras tarifárias de energia, que representaram um significativo aumento nas contas de luz devido ao uso de termelétricas para suprir a demanda energética. Considerando esse e outros episódios, faz-se necessário pensar em diversificação da matriz energética brasileira, procurando-se investir em meios de geração de energia que sejam capazes de suprir a demanda sem altos custos para o consumidor. Essa, portanto, é uma decisão com critérios conflitantes entre as diversas formas de energia existentes no mercado. Torna-se possível então a aplicação de métodos de Apoio Multicritério à Decisão nesse problema, conforme apresentado em [102] e [103].

O Apoio Multicritério à Decisão permite a análise de problemas complexos, envolvendo aspectos (critérios) qualitativos e quantitativos que, na maioria dos casos, são conflitantes [44]. Os métodos de apoio multicritério visam auxiliar nesse tipo de situação, na qual se deseja atender múltiplos objetivos da melhor forma. Os métodos do Apoio Multicritério à Decisão têm um caráter científico e são capazes de lidar com os aspectos subjetivos da decisão [42]. Esses métodos dependem diretamente do decisor, ou do grupo de decisores, pois este avaliará a importância de cada critério de acordo com seus objetivos, dessa forma não há uma solução única para um problema de multicritério e, sim, uma solução que se ajuste melhor as necessidades do decisor.

## 1.1 Justificativa

A demanda crescente de energia e os recentes episódios de dificuldade para suprir essa demanda, faz com que se torne importante o desenvolvimento de pesquisas sobre as diferentes formas de energia – especialmente, as renováveis – visando atender ao grande aumento de demanda, que se espera para os próximos anos.

Existem diversas forma de energia renováveis disponíveis, esta pesquisa busca avaliar estas diferentes fontes de energia segundo diferentes critérios.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar fontes de energia renováveis no sudeste brasileiro utilizando um modelo de Apoio Multicritério à Decisão em Grupo com a incorporação de números *fuzzy* para o tratamento das incertezas.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

1. Compreender sobre fontes renováveis de energia, a geração de eletricidade a partir dessas, e seus usos na Região Sudeste do Brasil;
2. Identificar Métodos de Apoio Multicritério à Decisão tradicionais e em grupo, bem como a incorporação da Teoria dos Conjuntos *Fuzzy* no AMD;
3. Identificar critérios relevantes para a avaliação de Fontes Renováveis de Energia;
4. Desenvolver um algoritmo para implementação do modelo elaborado;
5. Obter um *ranking* das alternativas avaliadas e analisar os resultados obtidos com as avaliações individuais e em grupo e, também, comparar os resultados dos modelos com e sem consideração de incertezas.

## 1.3 Delimitações do Estudo

O presente trabalho propõe a utilização do Apoio Multicritério à Decisão na avaliação de fontes renováveis de energia. Esclarece-se que este se limita a avaliar as tecnologias de geração no contexto do sudeste brasileiro. Optou-se também por considerar somente aquelas fontes que já estão inseridas na matriz elétrica do país, com uma participação minimamente significativa, essas são: Hidrelétrica, Biomassa, Eólica e Solar Fotovoltaica.

## 1.4 Metodologia

A pesquisa pode ser definida como um procedimento sistemático e formal que objetiva gerar respostas para os problemas propostos. Para tal, requiere-se um tratamento científico e um pensamento reflexivo sobre o problema a ser estudado, fazendo-se uso de técnicas,

métodos e procedimentos científicos ao longo de diferentes fases que vão desde a proposição do problema até a apresentação de resultados [75, 41]. As pesquisas podem ser classificadas de diferentes formas de acordo com diversos aspectos, os mais relevantes são: natureza, objetivos, abordagem e método. Segundo essas características elas podem ser classificadas conforme Figura 1.1.

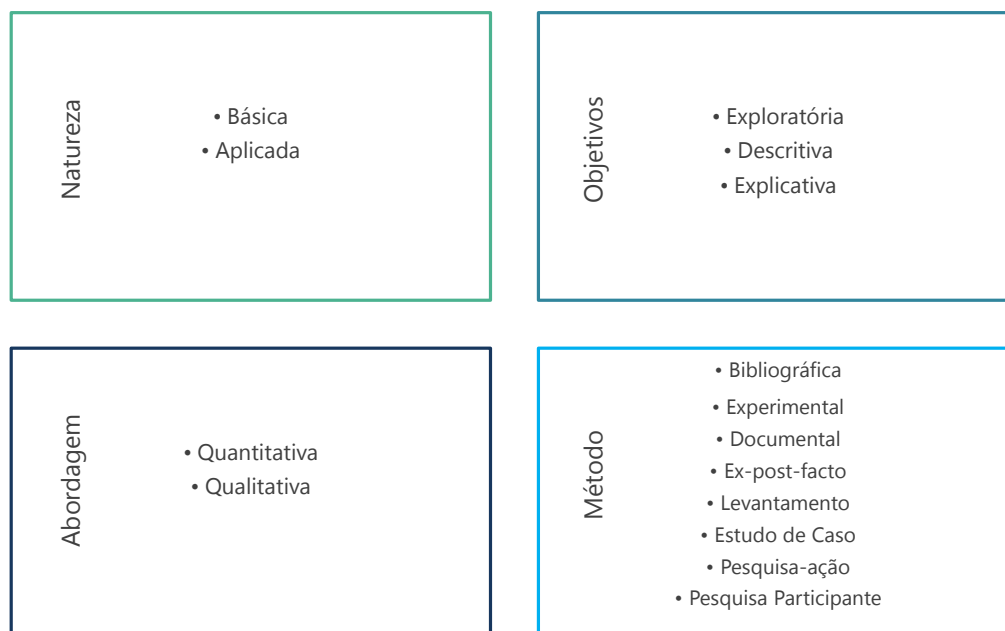


Figura 1.1: Classificação da Pesquisa. Fonte: [86, 41]

De acordo com essas classificações, esta pesquisa pode ser definida como aplicada, pois se relaciona a um problema prático específico; com objetivo exploratório, ou seja, busca explorar um problema de modo a torná-lo mais explícito e construir hipóteses [41]. Em relação à abordagem, o presente trabalho pode ser classificado como qualitativo, pois não utiliza o tratamento de dados através de técnicas estatísticas. E, por último, utiliza-se o método de estudo de caso, onde faz-se a avaliação de uma situação particular, buscando-se a solução para essa. O método de estudo de caso mostra-se apropriado para o estudo de problemas contemporâneos dentro do contexto no qual se insere. No estudo de caso tem-se uma visão global do problema tratado e a identificação de fatores que influenciam e são influenciados por esse [41, 115].

Como anteriormente dito, a pesquisa se caracteriza como um procedimento sistemático e formal, portanto, durante a sua realização passa-se por diferentes etapas que contribuem para a construção do resultado final [75]. No caso desta pesquisa, serão percorridas as seguintes fases:

- Identificação de um problema;
- Definição dos objetivos e justificativa da pesquisa;
- Pesquisa bibliográfica para constituição do referencial teórico: nessa etapa, buscou-se compreender melhor a utilização da energia elétrica no Brasil; as tecnologias de geração por meio de fontes renováveis; os números *fuzzy*; e os métodos de Apoio Multicritério à Decisão.
- Escolha do método a ser utilizado: a seleção do método a ser utilizado relaciona-se diretamente com o problema tratado e também com o modo como a pesquisa está sendo conduzida [75]. Dessa forma, por se tratar de um problema de decisão envolvendo múltiplos critérios e incertezas, optou-se por um método de Apoio Multicritério à Decisão incorporando números *fuzzy*.
- Construção do algoritmo: fazendo-se uso do *software* MATLAB<sup>®</sup> realizou-se a construção dos algoritmos para a implementação do método;
- Pré-definição dos critérios: por meio de uma revisão bibliográfica identificou-se os critérios comumente utilizados em pesquisas similares.
- Validação dos critérios e coleta de dados para as alternativas a serem avaliadas: existem diversos procedimentos para coleta de dados, que devem ser escolhidos de acordo com a pesquisa que está sendo realizada; entrevista, formulário e testes são exemplos de instrumentos de coleta. Neste trabalho, realizou-se a coleta de dados por meio de um questionário de perguntas de múltipla escolha de avaliação, ou seja, foi fornecido um conjunto de possíveis respostas, por meio das quais os decisores poderiam expressar seus julgamentos numa escala com diferentes graus de intensidade [75]. Também foi solicitado dos decisores a inserção de novos critérios, caso julgassem necessário;
- Aplicação do método e obtenção dos resultados: por meio dos algoritmos desenvolvidos e utilizando os dados coletados, implementou-se o método escolhido;
- Análise dos resultados: após a aplicação do método de escolha para a pesquisa e a obtenção dos resultados, tem-se uma das fases mais importantes de uma pesquisa científica: a análise de resultados. Nesse momento, é realizada a interpretação e, conseqüentemente, a extração de informação dos resultados obtidos de modo a proporcionar respostas [75]. Nessa fase, serão feitas as análises necessárias para

entender o significado dos resultados obtidos. Realizar-se-á a comparação dos resultados individuais de cada método - PROMÉTHÉE II, PROMÉTHÉE GDSS e *Fuzzy* PROMÉTHÉE GDSS - para entender as contribuições de cada;

- Conclusão e proposta de trabalhos futuros: nesse momento, será feita a confrontação final dos objetivos e dos resultados esperados com aqueles encontrados.

## 1.5 Estrutura da Dissertação

Além deste capítulo introdutório, este trabalho está estruturado em mais cinco capítulos que descrevem pesquisa realizada. São estes:

O Capítulo 2 traz uma breve revisão sobre o tema energia, no Brasil e no mundo, e também descreve algumas formas de energia renovável.

No Capítulo 3 tem-se uma apresentação dos números *fuzzy*.

O Capítulo 4 apresenta uma revisão sobre Apoio Multicritério à Decisão e sobre o a aplicação dos métodos do AMD no setor energético. Nesse capítulo também são descritos os métodos utilizados neste trabalho.

O Capítulo 5 apresenta o problema que está sendo tratado, o modelo adotado e a implementação computacional.

No Capítulo 6 são apresentados e discutidos os resultados obtidos nessa pesquisa.

Por último, no Capítulo 7, descreve-se as conclusões deste estudo, bem como as sugestões de trabalhos futuros.

Ao final, encontram-se as referências que serviram de embasamento para esta pesquisa.

# Capítulo 2

## Energia

Tecnicamente, a energia pode ser definida como a habilidade/capacidade de realização de trabalho. Essa pode assumir diferentes formas: mecânica, térmica, elétrica, química, nuclear e solar. Mas em termos práticos pode ser observada pela força, luz e pelo calor [60].

O uso da energia está diretamente ligado à manutenção da vida, todos os seres dependem de processos de utilização/conversão de energia para garantir a sobrevivência. Durante milhares de anos o homem explora os recursos naturais como fonte energética: radiação solar, calor ambiente, biomassa (alimentação, lenha, etc), moinhos, rodas d'água, entre outras [101].

As diferentes fontes de energia podem ser divididas em dois grandes grupos: não-renováveis e renováveis. O primeiro tem como grande representante os combustíveis fósseis, resultantes de processos biológicos e geológicos ocorridos durante milhares de anos. O último, que vem cada vez mais despertando o interesse do setor energético, é formado pelas fontes de energia consideradas inesgotáveis, pois possuem uma taxa de utilização inferior a de renovação [60, 101]. Conhecidas formas de energias renováveis que podem ser citadas são: solar fotovoltaica, eólica, hidrelétrica, entre outras. Ressalta-se que todas essas são manifestações de três grandes fontes primárias de energia: movimento e gravitação dos planetas, calor geotérmico e radiação solar. Essas podem ser convertidas em energia útil por meio de diferentes tipos de tecnologia, porém, nem todas as opções são viáveis para todo lugar e projeto. A geração de energia útil a partir de fontes renováveis depende diretamente da disponibilidade dessas no local [60, 101].

Considerando a história humana, as fontes de energia renováveis têm sido a base da sociedade até recentemente. O uso de combustíveis fósseis começou a crescer rapidamente

a partir da metade do século XIX, ganhando cada vez mais força [101].

Atualmente, os combustíveis fósseis ainda têm papel de destaque na matriz energética mundial, mas pouco a pouco as fontes renováveis começam a ganhar espaço. Em 2017, por exemplo, o consumo de carvão apresentou um crescimento de 1%, o primeiro aumento desde 2013, impulsionado pelos mercados chinês e indiano [19]. Apesar desse aumento, a participação do carvão nas energias primárias caiu para 27,6%, o mais baixo nível desde 2004 [19]. Com relação ao consumo total de energia primária, esse teve um crescimento de cerca de 2,2% em 2017, sendo o gás natural responsável pela maior parte desse aumento, seguido pelas fontes renováveis [19].

O crescimento da utilização das fontes renováveis está diretamente relacionado ao aumento da consciência ambiental e do entendimento dos efeitos da exploração dos combustíveis fósseis. Sendo assim, o setor elétrico mostra-se de extrema importância, uma vez que, em 2017, consumiu mais de 40% da energia primária [19]. Além disso, em 2015, esse foi responsável por 25% das emissões de gases de efeito estufa, seguido pela indústria (21%) e o setor de transporte (14%) [111].

Em 2017, a geração de eletricidade cresceu 2,8%, sendo 94% desse crescimento proveniente de economias emergentes [19]. Energias renováveis foram responsáveis por 49% desse aumento, com destaque para energias eólica e solar [19].

Apesar do progressivo crescimento ao longo dos últimos anos, conforme observado na Figura 2.1, o ano de 2017 foi particularmente significativo para as energias renováveis, a geração a partir dessas fontes teve um aumento de 6,3%, tornando as fontes renováveis de energia responsáveis por cerca de 25% da geração mundial de energia elétrica. O grande destaque fica com a energia de origem eólica e solar fotovoltaica que em 2017 cresceram 36% e 27%, respectivamente. China e Estados Unidos são responsáveis por metade desse aumento, seguidos pela União Européia, Japão e Índia [53]. A geração a partir de fontes renováveis foi superada apenas pelo carvão, ficando a frente da geração a partir de gás pelo terceiro ano seguido. Apesar do aumento da participação das energias eólica e solar, a hidroeletricidade mantém seu local de destaque na geração mundial [53]. Na Figura 2.2 pode-se observar melhor a participação das fontes renováveis na geração mundial em 2017.

Com relação a energia nuclear, essa chama a atenção pelo fato de ser considerada limpa e possuir uma tecnologia eficiente. Entretanto, a possibilidade de acidentes nucleares sempre criam receio em relação a utilização dessa. O recente incidente de Fukushima (Japão, 2011), por exemplo, levantou preocupação com impactos sociais e econômicos, e

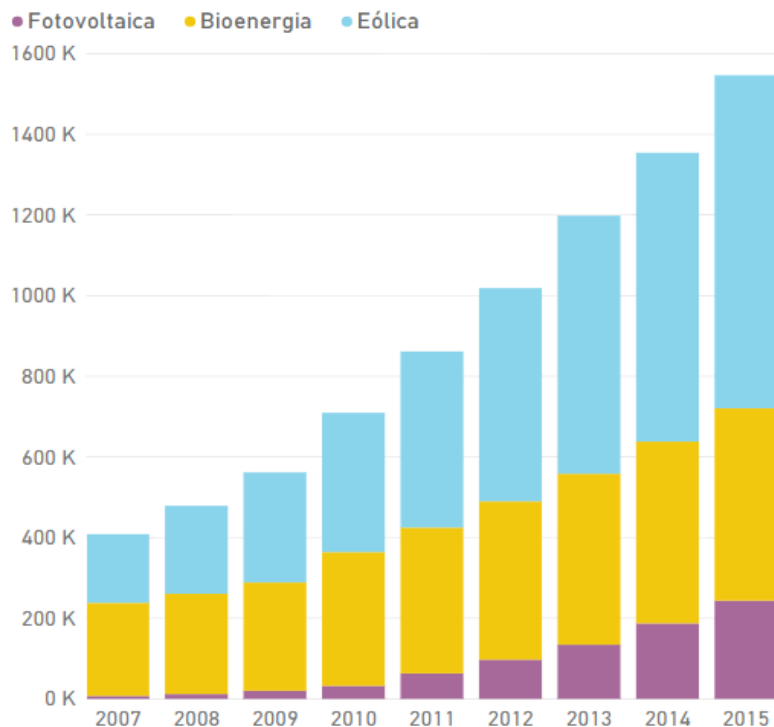


Figura 2.1: Geração Mundial de Eletricidade Eólica, Fotovoltaica e Biomassa em GWh. Fonte: [54]

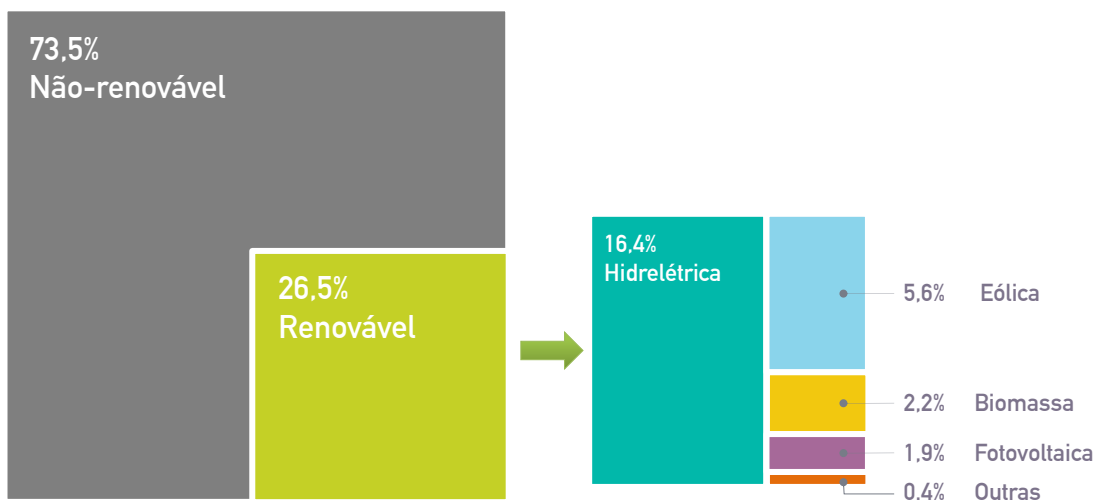


Figura 2.2: Participação de Energias Renováveis na Geração Mundial em 2017. Fonte: Adaptado de [90]

causou uma retração no desenvolvimento nuclear em alguns países. Em 2015, a energia nuclear foi responsável por cerca de 11% da geração de eletricidade mundial [111].

Apesar do crescimento das energias renováveis recentemente, e dos esforços para en-

corajar uma transição de uma economia baseada em combustíveis fósseis para uma mais limpa, de baixo carbono, não aconteceu nenhuma grande alteração na matriz elétrica mundial nos últimos 20 anos, quando a participação de carvão no setor elétrico era de 38% - o mesmo que em 2017. Fato esse extremamente preocupante, pois o setor elétrico é mais importante fonte de emissões de carbono, gerando cerca de um terço das emissões em 2017 [19].

Pela primeira vez em três anos as emissões de carbono ligadas ao consumo energético apresentaram crescimento, 1,6%, depois de três anos de estabilidade [19]. Esse aumento de emissões não foi global, alguns países tiveram diminuição no nível de emissões como Estados Unidos, Reino Unido, México e Japão. A maior redução veio dos Estados Unidos, principalmente por causa do desenvolvimento das fontes renováveis [53].

O crescimento nas emissões é um alerta, e mostra que os esforços e progressos atuais são insuficientes e lentos para atingir os objetivos do Acordo de Paris e resolver o Trilema Energético – balancear a segurança e equidade energética e a sustentabilidade ambiental [53, 112, 111].

Faz-se necessário pensar em novas políticas como precificação de emissões, regulamentação da produção e do consumo de energia, financiamento de pesquisas energéticas, entre outras [111]. Basicamente, faz-se necessário repensar todo modo como se produz e utiliza-se energia.

## 2.1 Matriz Elétrica Brasileira

Segundo o Banco de Informações de Geração (BIG) da ANEEL [11], em julho de 2018, o Brasil possuía um total de 7.109 empreendimentos em operação, totalizando uma potência instalada de aproximadamente 160 GW. Ainda de acordo com [11], há previsão da instalação de mais 18.560.165 kW na capacidade de geração brasileira. Essa potência será provida pelos 603 empreendimentos que se encontram em fase de construção ou com construção não iniciada, atualmente. Na Tabela 2.1, tem-se a composição da matriz de produção de energia elétrica brasileira, por origem das fontes.

Os valores de porcentagem são referentes a potência fiscalizada. Entende-se por potência outorgada aquela considerada no Ato de Outorga, enquanto a potência fiscalizada corresponde a considerada a partir da operação comercial da primeira unidade geradora [11]. A Figura 2.3 apresenta as porcentagens de capacidade produtiva por origem.

Origem	Quantidade	Potência Fiscalizada (kW)	%
Fóssil	2.449	26.722.787	16,71
Biomassa	556	14.651.202	9,16
Nuclear	2	1.990.000	1,24
Hídrica	1.332	102.153.341	63,86
Eólica	536	13.133.143	8,21
Solar	2.233	1.306.510	0,82
Undi-elétrica	1	50	0,00
<b>Total</b>	<b>7.109</b>	<b>159.957.032</b>	<b>100,00</b>

Tabela 2.1: Fontes de Energia Utilizadas no Brasil – Fase de Operação. Fonte:[11]

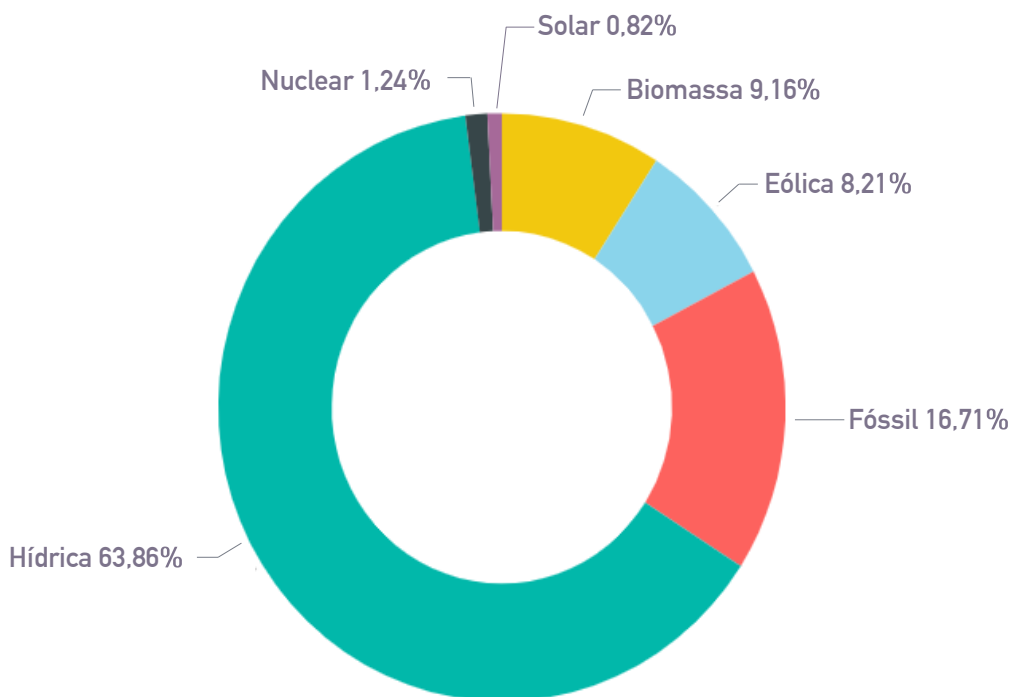


Figura 2.3: Potência instalada por fonte. Fonte: [11]

Observa-se que a maior parte da matriz elétrica do Brasil é de origem renovável, 82,05%, com destaque para a hidroeletricidade, que corresponde a 63,86% de toda potência instalada no país e que apresentou um crescimento de geração de 5,9%, em 2016 [34, 11]. Fontes de energia como a solar ou eólica, ainda ocupam pouco espaço no país, porém, essa situação vem se revertendo nos últimos anos, sendo 2017 um ano marco para a energia renovável no país, com o início das operações dos dois maiores parques solares da América Latina, Nova Olinda e Ituverava, localizados nos estados do Piauí e da Bahia, respectivamente. Quando em operação plena, ambos terão capacidade de produzir mais de 1150 GWh anualmente, o suficiente para atender ao consumo de cerca de 568 mil domicílios e evitando a emissão de aproximadamente 668 mil toneladas de dióxido de carbono [38, 37]. A produção de eletricidade a partir da fonte eólica também tem ganhado

espaço na matriz brasileira, apresentando um aumento de 54,9% em 2016 em relação ao ano anterior. No mesmo ano, potência instalada para geração eólica teve um crescimento de 33% [34]. Essa tendência de aumento deve continuar nos próximos anos, entre os empreendimentos em fase de construção e construção não iniciada listados pelo Banco de Informação de Geração, 229 são eólicos e 61 solares, e esses representarão um incremento de cerca de 40% e 130% na potência instalada para produção de eletricidade de origem eólica e solar, respectivamente [11]. Isso permitirá que a matriz elétrica do país se torne cada vez mais renovável e limpa – em 2016, o setor elétrico do país emitiu, em média, 101,3 kg de CO<sub>2</sub> para produzir 1 MWh, índice considerado baixo quando comparado com países da União Europeia, EUA e China. Em 2014, esse valor era de aproximadamente 160 Kg de CO<sub>2</sub> para 1 MWh, 2,3 vezes menos emissões que o setor elétrico europeu, 3 vezes menos que o americano e 4,8 vezes menos do que o chinês [35], conforme Figura 2.4.

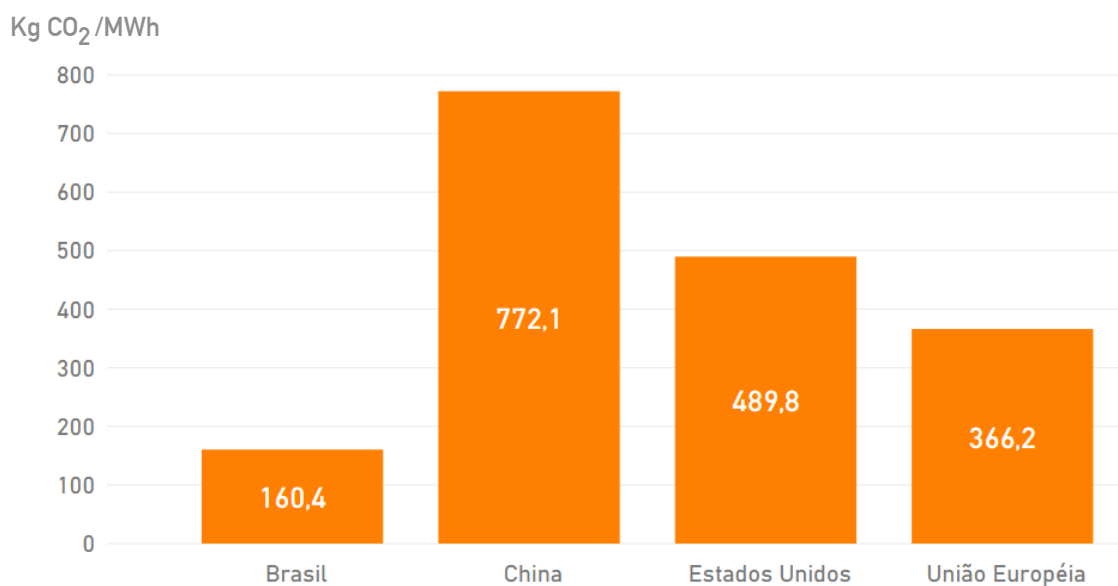
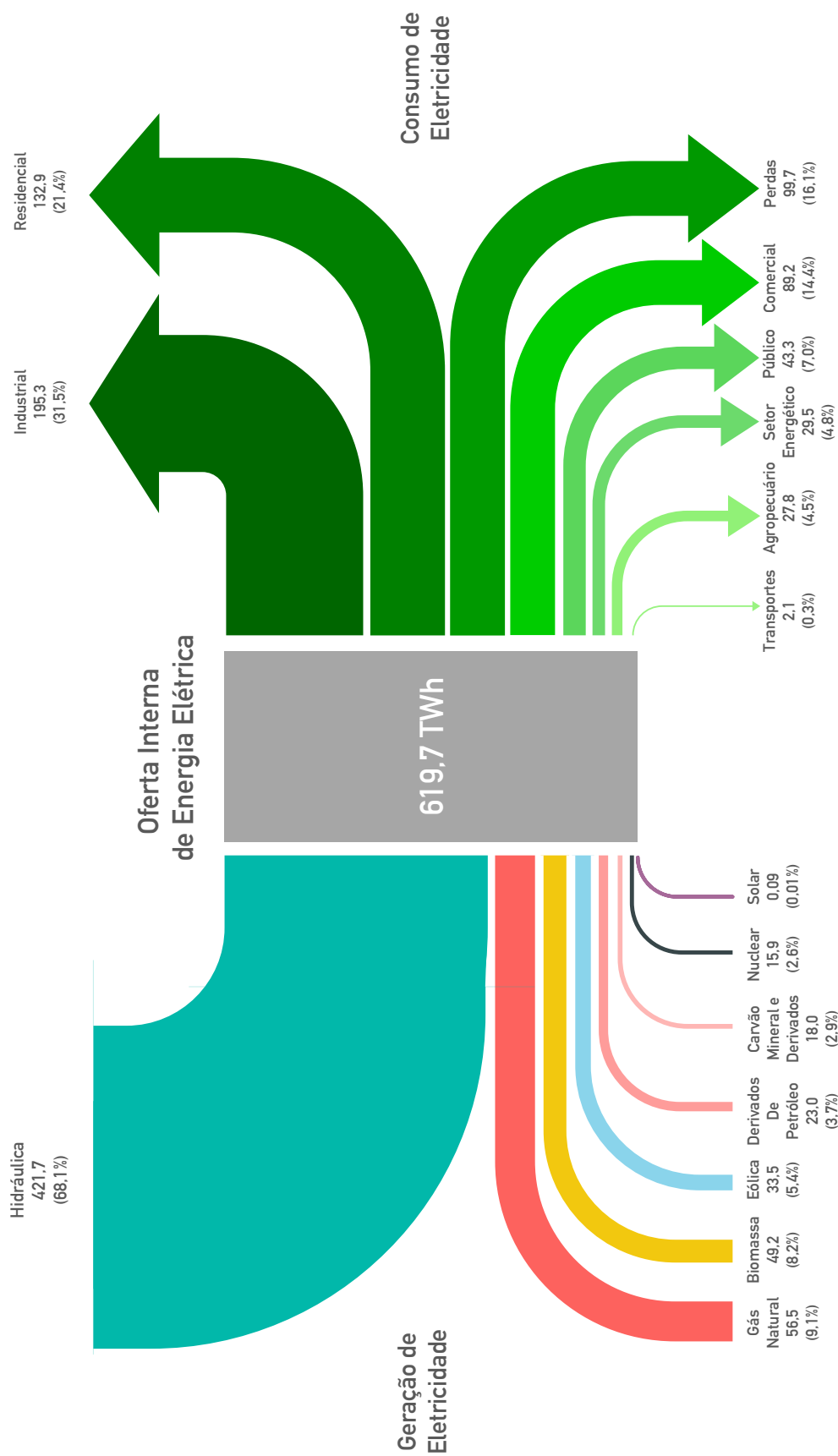


Figura 2.4: Emissão de CO<sub>2</sub> na geração de eletricidade. Fonte: [35]

Com relação ao consumo, de toda a geração no Brasil, 17% pertence à autoprodução, dos quais aproximadamente 56% não é injetado na rede, sendo consumido pelos próprios produtores, geralmente indústrias nos setores de papel e celulose, álcool-açucareiro, siderúrgico, etc [34]. Os dois grandes consumidores da eletricidade produzida no país são os setores industrial e residencial, tendo o primeiro apresentado uma queda de 1,3%, e o último um aumento de 1,4% no consumo, em 2016 [34]. O fluxo da energia elétrica no país pode melhor ser observado na Figura 2.5.

No Brasil, a fim de fomentar o uso de energias renováveis, o governo criou o Programa



\*Inclui importação e autoprodução  
 \*\*Valores em TWh

Figura 2.5: Fluxo Elétrico. Fonte: Adaptado de [34]

de Incentivo às Fontes Alternativas (PROINFA) pela Lei nº 10.438 de 26 de abril de 2002, por meio do qual objetiva aumentar a participação de pequenas centrais hidrelétricas, usinas eólicas e empreendimentos termelétricos a biomassa na produção de energia elétrica, favorecendo empreendedores que não tenham vínculos societários com concessionárias de geração, transmissão ou distribuição (Produtores Independentes Autônomos)[18].

### 2.1.1 Matriz Elétrica do Sudeste Brasileiro

De acordo com os dados do Banco de Geração da ANEEL [10], acessado em julho de 2018, tem-se:

- Rio de Janeiro: o estado possui um total de 194 empreendimentos em operação, gerando 8.467.205 kW de potência. Para os próximos anos está prevista uma adição de 3.595.951 kW na capacidade de geração do estado, que será fornecida pelos 6 empreendimentos em construção e 5 com construção não iniciada. No estado, 61,27% da potência gerada tem origem nas usinas termelétricas que, em sua grande maioria operam a base de óleo diesel e gás natural. Em todo o estado, há somente um empreendimento de origem eólica, no município de São Francisco de Itabapoana, no norte fluminense, que representa apenas 0,33% da potência gerada no estado. Dentre os empreendimentos em construção e com construção não iniciada, todos têm origem hídrica ou térmica (nuclear, gás natural, diesel, biogás e licor negro).
- São Paulo: O estado de São Paulo possui no total 1062 empreendimentos em operação, gerando 23.295.806 kW de potência. Está prevista para os próximos anos uma adição de 555.315 kW na capacidade de geração do estado, proveniente dos 7 empreendimentos atualmente em construção e mais 20 em construção não iniciada. Há somente 1 empreendimento eólico e 11 fotovoltaicos, que possuem uma participação pouco significativa na geração do estado. Porém, entre os empreendimentos em fase de construção e com construção não iniciada está prevista a adição de 275.000 kW através da geração fotovoltaica, além de empreendimentos termelétricos com a utilização de bagaço de cana-de-açúcar.
- Minas Gerais: o estado mineiro possui ao todo 736 empreendimentos em operação, gerando 16.284.117 kW de potência, sendo grande parte de origem hídrica (82,45%). Está prevista para os próximos anos uma adição de 731.419 kW na capacidade de geração, proveniente dos 11 empreendimentos atualmente em construção e mais 23

em construção não iniciada. A matriz elétrica de Minas Gerais possui 1 empreendimento eólico e 18 fotovoltaicos em operação, ambos com pequena participação. Existe uma previsão de instalação de 251.880 kW provenientes de energia solar, além de termelétricas a base de bagaço de cana-de-açúcar e resíduos florestais.

- Espírito Santo: o Espírito Santo é o estado com menor expressão na geração energética da região, possuindo no total 57 empreendimentos em operação, gerando 1.564.667 kW de potência, sendo grande parte (66,27%) com origem em termelétricas à base de diesel, bagaço de cana-de-açúcar, entre outros. O restante da energia gerada possui origem hidrelétrica. Está prevista para os próximos anos uma adição de 22.012 kW na capacidade de geração, proveniente de 1 empreendimento em construção e 2 em fase de construção não iniciada, todos de origem hídrica.

Na Figura 2.6 observa-se a matriz elétrica dos estados da região em termos de geração, no ano de 2017.

Com base nos dados citados e na Figura 2.6, nota-se que a matriz elétrica da região é um reflexo da situação energética do país: grande participação da hidroeletricidade e de combustíveis de origem fóssil e pouca utilização de fontes de energia renováveis como solar e eólica.

## 2.2 Energia Solar Fotovoltaica

Entende-se por energia solar aquela proveniente do Sol e que chega à Terra sob a forma de energia térmica e luminosa, sendo a última possível de ser captada e convertida em energia térmica ou elétrica [1]. O aproveitamento térmico da energia solar é amplamente utilizado nos sistemas de aquecimento de água. Já a produção de eletricidade se dá de duas diferentes formas: através dos sistemas heliotérmicos e dos fotovoltaicos.

Basicamente, nos sistemas heliotérmicos, transforma-se a radiação solar em calor que então é utilizado em termelétricas para se obter eletricidade.

Diferentemente dos sistemas heliotérmicos, acima descritos, nos sistemas fotovoltaicos a energia solar é convertida diretamente em elétrica. Essa conversão acontece através de dispositivos denominados células fotovoltaicas.

De acordo com o Plano Nacional de Energia 2030 [33] a irradiação solar – quantidade de energia solar incidente por unidade de superfície durante um período definido de tempo [4] – incidente por ano na superfície terrestre é suficiente para atender milhares de vezes

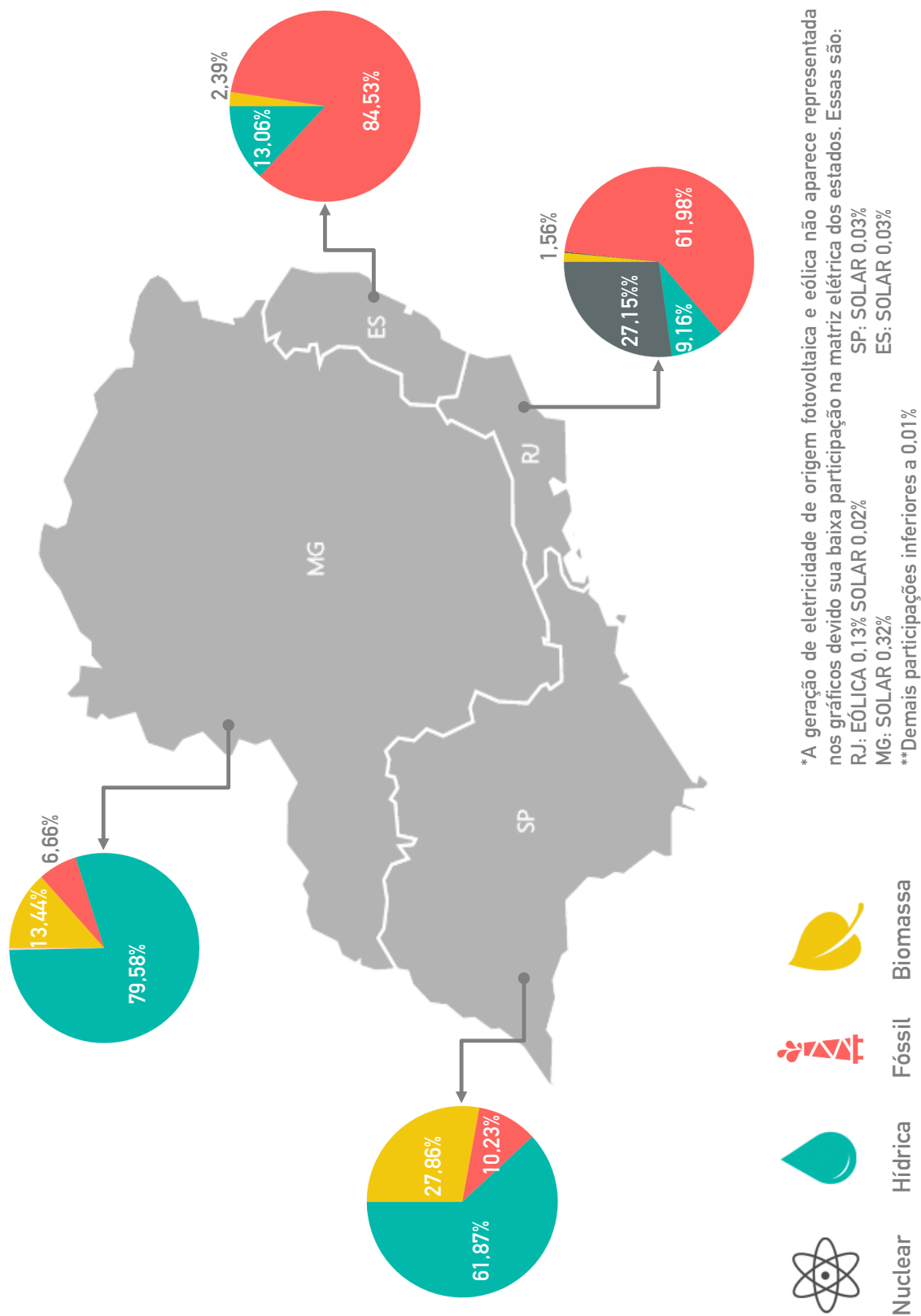


Figura 2.6: Matriz Elétrica da Região Sudeste. Fonte: [36]

o consumo anual de energia do mundo. Entretanto, essa irradiação varia de acordo com a latitude, umidade do ar, estação do ano, entre outros. Tornando algumas localidades mais ou menos favoráveis à implementação da energia fotovoltaica [60, 101]. Ainda assim, a participação dessa fonte de energia é pouco expressiva na matriz energética mundial, apesar de apresentar um grande crescimento nos últimos anos [1].

As inovações tecnológicas, bem como o crescimento da capacidade global de fabricação, os programas de fomento de alguns países, entre outros fatores, contribuíram nos últimos anos para redução dos custos dos sistemas fotovoltaicos e para um crescimento da utilização desses sistemas. Há fortes indícios de que esse crescimento será contínuo, de modo que daqui a alguns anos, essa fonte de energia poderá competir com fontes mais tradicionais [4].

O Brasil, por se localizar em uma zona intertropical, mostra-se um país privilegiado em termos de radiação solar, possuindo grande potencial de aproveitamento durante todo o ano [84].

Segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar [84], os valores máximos de irradiação ocorrem no norte da Bahia, enquanto os menores valores são encontrados no litoral norte catarinense. De um modo geral, os valores médios de irradiação solar encontrados no país são significativamente superiores aos da maioria dos países europeus, como Alemanha, Itália e Grécia, onde a utilização de energia solar é amplamente difundida e recebe amplos incentivos governamentais [84] – nesses países a participação da energia solar corresponde a 6,4%, 7,8% e 6,5% da demanda por eletricidade dos mesmos, respectivamente [89]. Grandes instalações solares têm sido feitas em regiões com baixo potencial solar (Europa e China), enquanto regiões de alto potencial (África e Oriente Médio) ainda permanecem inexploradas. Alemanha, China, Japão, Itália e Estados Unidos são líderes em produção fotovoltaica, por exemplo [111].

Os custos da energia fotovoltaica têm caído rapidamente, já atingindo níveis competitivos em alguns países. Além disso, melhorias nas tecnologias atuais e novas têm surgido, aumentando a eficiência de conversão, tornando a energia fotovoltaica cada vez mais atrativa. Apesar de ter um processo limpo de geração, faz-se necessário analisar e regulamentar todo ciclo de vida dessa tecnologia, a fim de evitar danos ambientais, associados aos processos de fabricação e descarte e, também, assegurar a saúde e segurança dos trabalhadores expostos a produtos químicos nocivos durante o processo de manufatura. [111, 32].

### 2.2.1 Geração de Energia Fotovoltaica

As células fotovoltaicas são constituídas de materiais semicondutores que permitem o fluxo de cargas a partir da incidência da radiação solar. O princípio de obtenção da energia elétrica fotovoltaica está no Efeito Fotoelétrico, descoberto por Becquerel em 1839. Mas somente, mais de cem anos depois, em 1954, foi produzida a primeira célula fotovoltaica com uma eficiência de conversão aceitável [51, 4].

Em determinados materiais semicondutores, os fótons da radiação solar são capazes de transmitir sua energia aos elétrons de valência do semicondutor, tornando possível romper suas ligações de modo que fiquem livres e possam movimentar-se no material. A ausência de um elétron devido ao rompimento de uma ligação se chama lacuna, e também pode mover-se através do semicondutor. Portanto, as propriedades de condução elétrica de um semicondutor devem-se tanto ao movimento dos elétrons, quanto ao movimento das lacunas, denominando-se ambos, de maneira genérica, portadores de carga [51, 4].

Uma célula solar tradicional é composta por silício (semicondutor) dopado com materiais que apresentam excesso ou defeito de elétrons com relação ao silício. Assim, se em um dos lados da célula forem introduzidos átomos doadores, isso é, com excesso de elétrons, como o fósforo, obtém-se a chamada capa  $n$  da célula, ou seja, uma área com densidade de elétrons maior. Se em outro lado forem introduzidos átomos receptores, isso é, com defeito de elétrons, como o boro, obtém-se uma área com densidade de lacunas maior do que o resto do dispositivo. A diferença de concentrações entre elétrons e a lacuna cria um campo elétrico, e o conjunto assim formado se denomina união  $p-n$ . A maioria das células solares estão formadas a partir de uma união  $p-n$ , a qual se adicionam contatos metálicos para poder extrair a corrente até o exterior.

Existem vários tipos de células fotovoltaicas, que variam em função do material de composição e da estrutura cristalina da célula. Dentre os diversos tipos, pode-se citar [4]:

- Células de Si monocristalino (Si-m);
- Células de Si Policristalinas (Si-p) e/ou multicristalino;
- Células de Si Amorfo (Si-a);
- Células compostos binários: a célula está constituída por um composto binário, como o GaAs, CdTe, InP, etc;
- Células compostos ternários: as mais utilizadas são CuInSe<sub>2</sub>, CuInSs AlAsGa.

A fim de obter os valores de tensão e corrente desejados, as células fotovoltaicas são associadas, formando os módulos fotovoltaicos. Os módulos são encapsulados de modo a terem proteção e a garantir o bom funcionamento dos mesmos. Os módulos de silício mono e multicristalinos são os mais comuns no mercado, tendo esses uma eficiência entre 13% e 15% – entende-se como eficiência a relação entre a energia obtida e a energia incidente no módulo.

Com o intuito de aumentar o rendimento dos sistemas de geração fotovoltaicos, tem-se a utilização dos sistemas de concentração, que são células associadas a dispositivos óticos de modo a concentrar a radiação solar incidente na célula menor. Os sistemas de concentração têm uma produção elétrica igual ou superior a que seria obtida com a célula tradicional, porém com menor custo de manufatura. Esses sistemas de concentração, geralmente, possuem rastreamento solar, que ajustam o posicionamento dos módulos, obtendo-se um melhor ângulo de incidência da radiação e, conseqüentemente, aumentando o aproveitamento da energia. Por último, os sistemas de geração fotovoltaicos necessitam de inversores. Os inversores são os componentes que irão converter a corrente contínua, gerada pelos módulos, em corrente alternada, absorvida pela rede elétrica [4].

## 2.3 Energia Hidrelétrica

Chama-se energia hidrelétrica aquela originária do aproveitamento do fluxo das águas para a geração de eletricidade. A primeira usina hidrelétrica do mundo foi construída ainda no final do século XIX e até os dias atuais o princípio básico de funcionamento se mantém inalterado [1].

Pode-se identificar dois tipos de hidrelétrica: com reservatório de acumulação e a fio d'água. As hidrelétricas com reservatório são aquelas que permitem o acúmulo de grande quantidade de água e funcionam como estoques a serem utilizados em períodos de estiagem. As unidades a fio d'água geram energia com o fluxo de água do rio, ou seja, com pouco ou nenhum acúmulo do recurso hídrico [1].

A água é o recurso natural mais abundante na Terra: com um volume estimado de 1,36 bilhão de quilômetros cúbicos ( $\text{km}^3$ ) recobre 2/3 da superfície do planeta sob a forma de oceanos, calotas polares, rios e lagos. Além disso, pode ser encontrada em aquíferos subterrâneos, como o Guarani, no sudeste brasileiro. A água também é uma das poucas fontes para produção de energia que não contribui para o aquecimento global – o principal problema ambiental da atualidade. E, ainda, é renovável; uma vez que está

em constante processo de circulação e renovação, em um ciclo possibilitado pela radiação solar incidente que causa a evaporação das águas e, posteriormente, a condensação dessas, gerando precipitações que darão origem aos cursos de água [60, 101].

Além disso, embora desde a Antiguidade a energia hidráulica tenha sido usada para gerar energia mecânica – nas instalações de moagem de grãos, por exemplo – no século XX passou a ser aplicada, quase integralmente, como matéria-prima da eletricidade.

O principal argumento contrário à construção das hidrelétricas é o impacto provocado sobre o modo de vida da população, flora e fauna locais, pela formação de grandes lagos ou reservatórios, aumento do nível dos rios ou alterações em seu curso após o represamento [101]. A usina de Três Gargantas na China, por exemplo, deslocou cerca de 1,2 milhões de camponeses e colocou em risco muitos outros residentes, causando deslizamentos de terra, aumento de doenças transmitidas pela água e uma redução da biodiversidade [32].

Outra grande perturbação que as barragens causam está ligada aos peixes que migram rio acima para o período de desova. Em alguns casos, a fim de mitigar esse problema, *fish-friendly* turbinas são instaladas ou “escadas” que permitem os peixes contornar as represas [32].

Outro impacto negativo de grandes reservatórios é a emissão de gases estufa resultante do processo de decomposição. Apesar da existência desse impacto, comparando com outras formas de energia (fóssil) esse é baixo [32].

Outro impacto importante de ressaltar é o caso do colapso de uma represa. Esse não ocorre somente devido à má construção ou tempo, mas também há possibilidade de ataques e sabotagens [32].

Segundo o Plano Nacional de Energia 2030 [33], nos últimos 30 anos, a oferta primária mundial de energia hidráulica teve sua evolução concentrada em duas regiões: Ásia, com destaque para a China, e América Latina, com destaque para o Brasil.

Ainda de acordo com o PNE 2030 [33], essa evolução esteve concentrada no início da década de 1980, quando o mundo ainda lidava com as consequências das variações no preço do petróleo ocorridos na década anterior.

No passado, o parque hidrelétrico brasileiro chegou a representar cerca de 90% da capacidade instalada no país. Entretanto, devido a algumas razões, este sofreu uma brusca redução. Entre essas razões pode-se destacar: a necessidade da diversificação da matriz elétrica prevista no planejamento do setor elétrico; a dificuldade em ofertar novos empreendimentos hidráulicos pela ausência da oferta de estudos e inventários; e,

por último, o aumento de entraves jurídicos que dificultam o licenciamento ambiental de usinas de fonte hídrica [1].

O Brasil possui um potencial hidrelétrico significativo, estimado em cerca de 260 GW, destes, pouco mais de 30% já se transformaram em usinas construídas ou outorgadas. Destaca-se que grande parte desse potencial está localizado na região Norte do país, seguida pela região Sudeste [1].

### 2.3.1 Geração de Hidroeletricidade

Como citado anteriormente, a hidroeletricidade é a energia elétrica proveniente do aproveitamento do fluxo das águas. Para tanto, faz-se necessário o uso das usinas hidrelétricas que, basicamente, são compostas por: uma barragem, sistema de captação e adução de água, casa de força e vertedouro [1].

A barragem tem por objetivo interromper o curso normal do rio e permitir a formação do reservatório. Além de estocar a água, esses reservatórios têm outras funções: permitem a formação do desnível necessário para a configuração da energia hidráulica, a captação da água em volume adequado e a regularização da vazão dos rios em períodos de chuva ou estiagem [101]. Os tipos de barragem variam de acordo com a geografia do local onde irá ser construída a usina, os tipos mais comuns são as de terra, com núcleo de argila, e as de concreto. Algumas usinas hidroelétricas são chamadas “a fio d’água”, ou seja, próximas à superfície e utilizam turbinas que aproveitam a velocidade do rio para gerar energia. Essas usinas fio d’água reduzem as áreas de alagamento e não formam reservatórios para estocar a água. Essa ausência de reservatório diminui a capacidade de armazenamento de água, única maneira de poupar energia elétrica para os períodos de seca [51, 1, 33].

Os sistemas de captação e adução são formados por túneis, canais ou condutos metálicos que têm a função de levar a água até a casa de força. A casa de força abriga as turbinas, que convertem a energia cinética em mecânica, e os geradores, que convertem a energia mecânica em eletricidade. A água conduzida à turbina faz com que esta gire juntamente com um gerador a ela mecanicamente acoplado, realizando as transformações das diversas formas de energia. Depois de passar pela turbina, a água é restituída ao leito natural do rio pelo canal de fuga. Os principais tipos de turbinas hidráulicas são: Pelton, Kaplan, Francis e Bulbo. Cada turbina é adaptada para funcionar em usinas com determinada faixa de altura de queda e vazão [51, 1, 33].

Por último, há o vertedouro. Sua função é permitir a saída da água sempre que os

níveis do reservatório ultrapassam os limites recomendados. Uma das razões para a sua abertura é o excesso de vazão ou de chuva. Outra é a existência de água em quantidade maior que a necessária para o armazenamento ou a geração de energia.

## 2.4 Biomassa

Denomina-se biomassa qualquer matéria orgânica que possa ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica; seja coletada da natureza ou desenvolvida com esse propósito [1, 111]. De acordo com a sua origem, pode ser: florestal (madeira, principalmente), agrícola (soja, arroz e cana-de-açúcar, entre outras) e rejeitos urbanos e industriais (sólidos ou líquidos, como o lixo) [1].

A biomassa é uma das fontes para produção de energia com maior potencial de crescimento nos próximos anos. Tanto no mercado externo quanto no interno, ela é considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética. Dela é possível obter energia elétrica e biocombustíveis, como o biodiesel e o etanol, cujo consumo é crescente em substituição a derivados de petróleo como o óleo diesel e a gasolina.

A quantidade estimada de biomassa existente na Terra é da ordem de 1,8 trilhão de toneladas. Este volume, quando confrontado com o grau de eficiência das usinas em operação no mundo no ano de 2005, aponta para uma capacidade de geração de 11 mil TWh por ano no longo prazo [1].

Nas regiões menos desenvolvidas, a biomassa mais utilizada é a de origem florestal. Além disso, os processos para a obtenção de energia se caracterizam pela baixa eficiência. Uma exceção a essa regra é a utilização da biomassa florestal em processos de cogeração industrial. Do processamento da madeira no processo de extração da celulose é possível, por exemplo, extrair o licor negro usado como combustível em usinas de cogeração da própria indústria de celulose. Já a produção em larga escala da energia elétrica e dos biocombustíveis está relacionada à biomassa agrícola e à utilização de tecnologias eficientes. A condição básica para a sua produção é a existência de uma agroindústria forte e com grandes plantações, sejam elas de soja, arroz, milho ou cana-de-açúcar. A biomassa é obtida pelo processamento dos resíduos dessas culturas. Assim, do milho é possível utilizar, como matéria-prima para energéticos, sabugo, colmo, folha e palha. Da soja e arroz, os resíduos que permanecem no campo, tratados como palha. Na cana-de-açúcar, o bagaço, a palha e o vinhoto [1, 101].

Dada a necessidade de escala na produção de resíduos agrícolas para a produção de

biocombustíveis e energia elétrica, os maiores fornecedores potenciais da matéria-prima desses produtos são os países com agroindústria ativa e grandes dimensões de terras cultivadas ou cultiváveis, com condições climáticas e solo favoráveis ao cultivo [60, 101].

O Brasil, além da grande quantidade de terra agriculturável, apresenta solo e condições climáticas favoráveis a agricultura. A utilização da biomassa como fonte de energia elétrica tem sido crescente no Brasil, principalmente em sistemas de cogeração.

Uma das características desses empreendimentos é o pequeno porte com potência instalada de até 60 MW, o que favorece a instalação nas proximidades dos centros de consumo e suprimento.

A cana-de-açúcar é um recurso com grande potencial, dentre as fontes de biomassa, para geração de eletricidade existente no país, por meio da utilização do bagaço e da palha. A participação é importante não só para a diversificação da matriz elétrica, mas também porque a safra coincide com o período de estiagem na região Sudeste/Centro-Oeste, onde está concentrada a maior potência instalada em hidrelétricas do país [1].

Segundo o Plano Nacional de Energia 2030 [33], o maior potencial de produção de eletricidade encontra-se na região Sudeste, particularmente no estado de São Paulo, e é estimado em 609,4 milhões GJ (gigajoules) por ano. Na sequência estão Paraná e Minas Gerais [1].

Se utilizada para produção de energia pelos meios tradicionais, como cocção e combustão, a biomassa se apresenta como fonte energética de baixa eficiência e alto potencial de emissão de gases. Entretanto, na utilização sustentável do bagaço da cana para a produção de eletricidade por meio de usinas termelétricas, o balanço de emissões de CO<sub>2</sub> é praticamente nulo, pois as emissões resultantes da atividade são absorvidas e fixadas pela planta durante o seu crescimento.

Os principais aspectos negativos são a interferência no tipo natural do solo e a possibilidade da formação de monoculturas em grande extensão de terras – o que competiria com a produção de alimentos. Então, faz-se importante levar em consideração a utilização das fontes bioenergéticas em outros papéis: alimentação, prevenção de erosão, balanço ecológico, entre outros [101, 32].

### 2.4.1 Geração de Energia a partir da Biomassa

Existem diferentes métodos para obtenção da energia elétrica a partir da biomassa. Todas consistem a conversão da matéria-prima em um produto intermediário que será utilizado como combustível. Este será utilizado para produzir a energia mecânica que acionará o gerador de energia elétrica. Os principais métodos de conversão são descritos no Plano Nacional de Energia 2030 [33] e no Atlas Brasileiro de Energia Elétrica [1], são estes:

- Ciclo a vapor com turbinas de contrapressão: é empregado de forma integrada a processos produtivos por meio da cogeração. Nele, a biomassa é queimada diretamente em caldeiras e a energia térmica resultante é utilizada na produção do vapor. Este vapor pode acionar as turbinas usadas no trabalho mecânico requerido nas unidades de produção e as turbinas para geração de energia elétrica. Este processo é o mais disseminado atualmente.
- Ciclo a vapor com turbinas de condensação e extração: nesse processo, o vapor ao final da realização do trabalho na turbina é, total ou parcialmente, condensado e a parcela de vapor necessária ao atendimento dos requisitos mecânicos e térmicos do processo produtivo – quando integrado em cogeração – é fornecida por extração de vapor em um ponto intermediário da expansão na turbina.
- Ciclo combinado integrado a gaseificação da biomassa: o ciclo combinado aproveita a energia térmica dos gases de exaustão da turbina a gás para gerar vapor e utilizá-lo em uma turbina a vapor, elevando a potência e a eficiência global do ciclo. Já gaseificação é a conversão de qualquer combustível líquido ou sólido, como a biomassa, em gás energético por meio da oxidação parcial em temperatura elevada. Esta conversão, realizada em gaseificadores, produz um gás combustível que pode ser utilizado em usinas térmicas movidas a gás para a produção de energia elétrica. Esta tecnologia, no caso da biomassa, ainda não é uma tecnologia competitiva do ponto de vista comercial.

## 2.5 Energia Eólica

Os ventos são gerados pelo deslocamento de massas de ar de zonas de alta pressão para áreas de baixa pressão atmosférica. Essas diferenças de pressão são resultantes das variações na temperatura da atmosfera [60, 101]. Desse modo, define-se por energia eólica

aquela gerada a partir do aproveitamento da energia cinética gerada pela movimentação das massas de ar [1, 60, 101].

A história do aproveitamento das forças dos ventos pelo homem remete à Antiguidade, entretanto, foi entre as décadas de 1980 e 1990, em países como Dinamarca e Alemanha e no estado da Califórnia, que o aproveitamento eólico atingiu uma escala de contribuição mais significativa ao sistema elétrico [27].

A evolução da tecnologia permitiu o desenvolvimento de equipamentos mais potentes e mais eficientes. Na década de 1980, por exemplo, o diâmetro das turbinas era de 20 metros, o que gerava uma potência média de 50 kW. Atualmente, esses diâmetros superam os 100 metros, o que permite a obtenção, em uma única turbina, de 5 mil kW [1].

O principal problema ambiental associado às turbinas, a mortandade de aves, praticamente desapareceu com as turbinas de grande porte e menores velocidades angulares dos rotores. Além disso, considerando todas as causas de mortandade de pássaros, turbinas eólicas são responsáveis por menos de 0,01% delas, sendo a principal causa a colisão com prédios. Ressalta-se também que a geração a partir de combustíveis fósseis causa 20 vezes mais morte de pássaros por kWh produzido devido à poluição [32].

A situação dos morcegos é um pouco mais preocupante que a dos pássaros, especialmente em períodos migratórios. Entretanto as migrações tendem a ocorrer em períodos de baixa velocidade dos ventos, com baixa geração, dessa forma as turbinas poderiam ser desaceleradas sem grandes impactos [32].

Já com relação à poluição auditiva, as turbinas eólicas satisfazem todos os requisitos ambientais. Além disso, melhorias no *design* das turbinas têm possibilitado o aumento da eficiência e a diminuição dos ruídos. Esses aspectos contribuem para que a tecnologia eólio-elétrica apresente o mínimo impacto ambiental [27, 32].

A mitigação da pobre utilização do solo é algo que a energia eólica permite melhor que a solar e a geotérmica, pois permite que a terra seja utilizada para outros propósitos, geralmente agricultura [32].

O Brasil, devido sua grande extensão territorial, é favorecido em termos de ventos, que se caracterizam por uma presença duas vezes superior à média mundial. Além disso, como a velocidade costuma ser maior em períodos de estiagem, é possível operar as usinas eólicas em sistema complementar com as usinas hidrelétricas, de forma a preservar a água dos reservatórios em períodos de poucas chuvas [1, 33]. Estima-se, segundo o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro [27], que o país tenha um potencial de geração de energia eólica

de 143 GW.

Dentre as áreas de maior potencial gerador no Brasil, encontram-se o litoral do Nordeste; o Vale do Jequitinhonha no Sudeste e a região Sul como um todo, região onde se encontra instalado o segundo maior parque eólico do país, o de Osório, no Rio Grande do Sul [1]. Regiões costeiras em geral favorecem a produção eólica, devido às características planas da área que permitem que os ventos fluam naturalmente, sem interferências [101].

Os grandes argumentos favoráveis à fonte eólica são, além de ser uma fonte de energia renovável, perenidade, grande disponibilidade, independência de importações e custo zero para obtenção de suprimento. O principal argumento contrário é o custo que, embora seja decrescente, ainda é elevado na comparação com outras fontes [1].

### 2.5.1 Geração de Energia Eólica

A geração eólica ocorre pelo contato do vento com as pás da turbina, elementos integrantes da usina. Ao girar, essas pás dão origem à energia mecânica que aciona o rotor do aerogerador, que produz a eletricidade. A quantidade de energia mecânica transferida – e, portanto, o potencial de energia elétrica a ser produzida – está diretamente relacionada à densidade do ar, à área coberta pela rotação das pás e à velocidade do vento. A potência elétrica gerada por uma turbina é função do cubo da velocidade de vento [60, 101].

A absorção de energia cinética pela turbina, reduz a velocidade do vento a jusante do disco do rotor; porém, gradualmente, essa velocidade recupera-se ao misturar-se com as massas de ar predominantes do escoamento livre. Após determinada distância a jusante da turbina, o escoamento do vento consegue recuperar as condições de velocidade originais e, desse modo, turbinas adicionais podem ser instaladas, sem grandes interferências no desempenho causadas pela interferência da turbina anterior [27].

As turbinas eólicas apresentam sistemas de controle inteiramente automático, por meio de atuadores rápidos, *software* e microprocessadores alimentados por sensores que captam todos os parâmetros relevantes para o funcionamento do sistema de geração.

## 2.6 Outras Formas de Geração

Nas seções anteriores foram discutidas algumas formas de geração de energia que estão presentes na matriz elétrica brasileira e que são de particular interesse nessa pesquisa. Porém existem diversas outras fontes de energia renováveis que são utilizadas no mundo

e que merecem ser citadas. Essas serão brevemente discutidas a seguir.

### 2.6.1 Energia Geotérmica

A exploração do calor geotérmico para a produção de eletricidade começou no início do século XX e desde então seu uso cresceu significativamente, especialmente a partir dos anos 2000 devido ao aumento da busca por energias renováveis e os recentes avanços tecnológicos. Ao final de 2017, os países com maior capacidade de geração geotérmica eram: Estados Unidos, Filipinas, Indonésia, Turquia, Nova Zelândia, México, Itália, Islândia, Quênia e Japão [90].

A produção de energia geotérmica depende de questões geográficas, uma vez que as fontes estão mais presentes e mais facilmente acessíveis em regiões próximas das fronteiras de placas tectônicas ou com alta atividade vulcânica. Entretanto, tem-se buscado novos métodos de exploração, que estão permitindo a expansão para áreas antes não consideradas adequadas [90].

A energia geotérmica tem a grande vantagem de não ser intermitente como a eólica e solar. Em locais com condições favoráveis, pode ser produzida a um custo competitivo comparado com outras fontes renováveis e mesmo não-renováveis [32].

A baixa eficiência ainda é um grande problema a ser superado. Outros problemas associados à geração geotérmica são os gases nocivos emitidos durante a operação e a instabilidade gerada no terreno. Na Suíça, por exemplo, uma planta foi desativada após pequenos tremores de terra serem observados. Essa forma de geração também apresenta altos custos iniciais devido ao processo de perfuração [32]. Nos últimos anos, cresceu-se a busca por tecnologias que reduzam os custos e também os impactos ambientais desse tipo de geração [90].

### 2.6.2 Energia das Ondas

Ondas oceânicas podem ser encontradas em todo lugar e são formadas a partir da interação do vento com a superfície da água [32].

A quantidade de energia contida nas ondas é gigantesca, mas poucos sistemas de aproveitamento dessa energia encontram-se instalados, pois a tecnologia ainda não tem um bom grau de maturidade [32]. Além disso, a geração depende de variações sazonais [101].

Muitos dispositivos foram desenvolvidos ao longo dos anos para aproveitamento da energia contida nas ondas, alguns datando do século XVIII [32]. Mas o crescimento no interesse dessa exploração surgiu no início da década de 1970 [32].

Uma das principais desvantagens dos dispositivos para exploração da energia das ondas encontra-se no fato desses estarem vulneráveis a serem destruídos por tempestades severas. Diferentemente das turbinas eólicas que podem resistir a furacões, por exemplo [32]. Além disso, pouco se sabe sobre o impacto da extração dessa energia em larga escala, que pode atrapalhar a formação das ondas e o completo desenvolvimento destas [101, 90].

### 2.6.3 Energia Termal Oceânica

A conversão da energia térmica oceânica consiste no aproveitamento da diferença de temperatura entre a superfície do oceano e as águas mais profundas para operar um motor térmico e gerar eletricidade. Essa forma de energia encontra-se em grande abundância no mundo, mas tem sido pouco explorada devido à baixa maturidade da tecnologia [32, 101].

A primeira proposta para aproveitamento dessa fonte de energia foi feita pelo físico francês Jacques Arsene em 1881 [32]. Nesse tipo de sistema a eficiência máxima está relacionada à diferença de temperatura, quanto menor essa, menor a eficiência. Em temperaturas típicas, essa gira em torno de 6 a 7% [32].

O grande problema de plantas para esse tipo de geração é o custo; o investimento é alto e o custo de operação também [32]. Além disso, extração da energia dos oceanos pode causar impactos climáticos e ecológicos devido as mudanças de temperaturas [101, 90].

### 2.6.4 Energia das Marés

Em alguns locais da Terra, a variação diária das marés tem sido aproveitada para a geração de eletricidade. Entretanto esse tipo de geração ainda é pouco explorada, essa se mostra bem cara quando comparada com outras energias renováveis, como eólica. Entretanto, com os recentes avanços tecnológicos essa situação pode mudar e, nos locais onde as condições são propícias, essa forma de energia oferece algumas vantagens quando comparada com outras formas de energia renováveis [32].

A energia das marés, bem como a energia das ondas, é considerada promissora, apesar dos desafios tecnológicos e econômicos. Se questões como disponibilidade e custos puderem ser superadas, essa pode ser uma boa forma de geração de eletricidade [32].

### 2.6.5 Energia das Correntes de Marés

As mares diárias produzem correntes oscilatórias conhecidas como correntes de maré. Essas são formadas sob a superfície da água podem ser aproveitadas para a geração elétrica através de turbinas [32].

Essas unidades de geração possuem baixo custo e podem ser facilmente colocadas em operação, e relativo baixo impacto ambiental. A primeira planta comercial foi construída em 2012 no golfo do Maine (EUA) [32].

Com relação aos impactos, essa pode afetar o ambiente no qual é instalada durante as fases de construção e operação como, por exemplo, pode gerar a mortandade de peixes. Além disso, o movimento das turbinas pode causar o fenômeno de siltação (aumento da concentração das partículas em suspensão) [32, 101].

### 2.6.6 Energia Eólica *Offshore*

A Dinamarca foi pioneira na utilização de energia eólica *offshore*, tendo instalado a primeira planta em 1991 [32].

A energia eólica *offshore* se mostra promissora uma vez que os ventos *offshore* são mais rápidos e uniformes, além de não haver necessidade de aquisição de terras, e ausência de reclamações relacionadas à poluição sonora e visual [32]. Apesar da energia eólica *onshore* ser a grande responsável pela capacidade instalada desse tipo de energia, em 2017, a capacidade de produção *offshore* cresceu em 30%. Os principais países responsáveis por esse crescimento foram Reino Unido, Alemanha, China e Bélgica [90].

Atualmente, a Europa abriga cerca de 84% da capacidade global de geração *offshore*, com a Ásia sendo responsável praticamente todo restante da produção mundial [90].

Um dos grandes problemas com a produção eólica *offshore* está relacionado à dificuldade de instalação e manutenção das torres, além da transmissão da eletricidade gerada. A instalação também depende do piso oceânico do local e de condições hidrológicas como a força das correntes e a possibilidade de congelamento das águas [101]. A produção *offshore* tem menor grau de maturidade e, conseqüentemente, maior custo que a *onshore*. De qualquer forma, tem-se expectativas de crescimento nessa forma de geração, especialmente nos EUA e China [32]. A grande promessa para a geração *offshore* são as turbinas flutuantes, que permitiriam a expansão para áreas até então consideradas não adequadas para esse tipo de exploração, pois essas poderão ser implantadas em lugares onde os

---

ventos são mais fortes e consistentes, independentemente da topografia do piso oceânico [90]. Além disso, os aspectos econômicos dessa forma de geração têm melhorado de forma rápida, tornando a energia eólica *offshore* já economicamente competitiva na Europa [90].

# Capítulo 3

## Números Fuzzy

O conjunto de números *fuzzy* foi proposto por Zadeh [118], e tem sido amplamente utilizado no tratamento de dados que possuem a característica da imprecisão.

No Apoio Multicritério à Decisão, existem diversos trabalhos que descrevem a integração de números *fuzzy* com métodos tradicionais do AMD para lidar com as incertezas associadas aos julgamentos dos decisores, principalmente quando há a utilização de variáveis linguísticas, que traduzem uma caracterização aproximada de fenômenos que são muito complexos ou difíceis de definir, de modo que não podem ser descritos de forma quantitativa [117]. Pode-se citar, por exemplo, o estudo apresentado em [31], no qual o autor faz uso de dos métodos *fuzzy* AHP e *fuzzy* TOPSIS para a seleção de *softwares*, em um contexto de decisão em grupo. O uso de números *fuzzy* é citado como uma forma de tratar as imprecisões presentes no processo decisório. O resultado, comparado com outras metodologias, é descrito como robusto e com menor índice de incerteza e perda de informação. Em [8] é proposto a utilização de um método *fuzzy* AHP-VIKOR para a seleção de fornecedores, buscando o desenvolvimento de uma cadeia de produção mais sustentável. Outra abordagem *fuzzy* VIKOR e AHP é utilizada em [61] para avaliar alternativas de energia renováveis em Istambul. É citado que em problemas do setor energético, geralmente, os julgamentos dos decisores possuem um certo grau de imprecisão. Desse modo, os números *fuzzy* se mostram uma ferramenta útil, aplicada com sucesso.

Esse conjunto de números se mostra extremamente útil no AMD, pois caracteriza pela idéia de grau de pertinência a uma classe. Em conjuntos clássicos, um elemento pertence ou não a este conjunto, ou seja, a pertinência assume valores binários. Entretanto, nem sempre é possível interpretar a pertinência de um conjunto de forma tão simples; nesse momento surgem os números *fuzzy* [118].

Um conjunto *fuzzy* é aquele onde não há uma definição clara dos elementos que pertencem ou não ao conjunto. Nesse caso, um elemento pode ter um grau de pertinência a uma determinada classe.

Matematicamente, para os conjuntos clássicos pode-se escrever as Equações 3.1 e 3.2 [73].

$$\mu_A : U \rightarrow \{0, 1\} \quad (3.1)$$

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x \in A \\ 0, & \text{se } x \notin A \end{cases} \quad (3.2)$$

em que  $U$  é o conjunto universo,  $A$  e  $x$  são subconjunto e elemento de  $U$ , respectivamente.

Enquanto para os conjuntos *fuzzy*, sendo  $A$  um subconjunto *fuzzy* em um conjunto universo  $U$ , tem-se as Equações 3.3 e 3.4 [73].

$$A = \{(x, \mu_A(x))\} \quad x \in U \quad (3.3)$$

$$\mu_A : U \rightarrow [0, 1] \quad (3.4)$$

sendo a função  $\mu_A$  denominada grau de pertinência.

Dessa forma, a pertinência pode assumir diferentes valores no intervalo  $[0,1]$ , ao invés de assumir somente os valores 0 ou 1. No conjunto de números *fuzzy*, 0 e 1 representam a não-pertinência e a pertinência máxima de um elemento ao conjunto, respectivamente.

### 3.1 Número *LR Fuzzy*

Uma função, geralmente representada por  $L$  ou  $R$ , é dita uma função de referência de números *fuzzy* se e somente se [29, 30]:

- $L(x) = L(-x)$
- $L(0) = 1$
- $L$  é não crescente no intervalo  $[0, +\infty)$

Um número *fuzzy* do tipo *LR*, é representado da forma  $M = (m, \alpha, \beta)_{LR}$ , e é construído com uma função de referência  $L$  aplicada a todo  $x \leq m$  e uma função de referência  $R$  aplicada a todo  $x > m$ , conforme Equação 3.5.

$$\mu_M(x) = \begin{cases} L\left(\frac{m-x}{\alpha}\right), & \text{se } x \leq m, \alpha > 0 \\ R\left(\frac{x-m}{\beta}\right), & \text{se } x > m, \beta > 0 \end{cases} \quad (3.5)$$

em que  $m$  é o valor principal do número *fuzzy* e,  $\alpha$  e  $\beta$  são os comprimentos dos intervalos esquerdo e direito, respectivamente [30, 29].

Um número *fuzzy* pode ter diferentes representações, que transmitem diferentes idéias: trapezoidal, triangular, retangular, gaussiana, entre outras. As formas triangulares e trapezoidal são as mais encontradas na literatura. No caso deste estudo, será explorada a utilização de números *fuzzy* triangulares.

A função de pertinência de um número *fuzzy* triangular é dada pela Equação 3.6.

$$\mu_M(x) = \begin{cases} 1 - \frac{m-x}{\alpha}, & \text{se } (m - \alpha) \leq x \leq m \\ 1 - \frac{x-m}{\beta}, & \text{se } m < x \leq (m + \beta) \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (3.6)$$

A sua representação gráfica é apresentada na Figura 3.1.

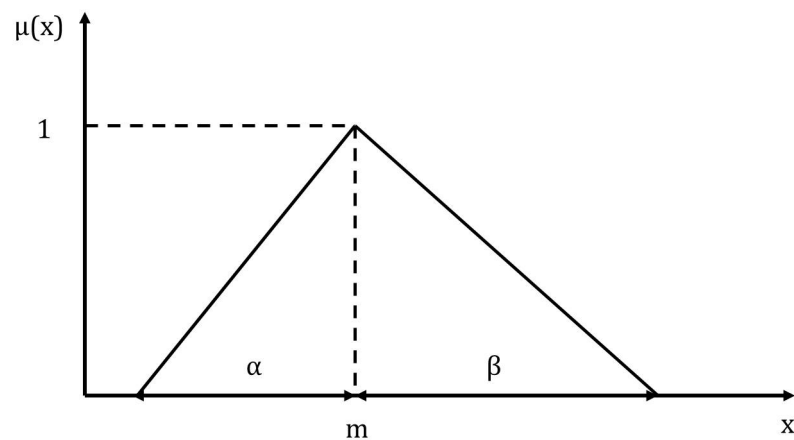


Figura 3.1: Representação de um Número *Fuzzy* Triangular. Fonte: [73]

No caso específico no qual  $\alpha = \beta$ , tem-se:

$$\mu_M(x) = \begin{cases} 1 - \left| \frac{m-x}{\alpha} \right|, & \text{se } (m - \alpha) < x < m + \alpha \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (3.7)$$

Quando  $\alpha = \beta = 0$ ,  $x$  é um número clássico representado por  $x = (m, 0, 0)$ .

### 3.1.1 Operações com números *LR Fuzzy*

Sendo  $(m, a, b)$  e  $(n, c, d)$  dois números *fuzzy* representados na forma *LR*, e  $\lambda$  um escalar, tem-se definidas operações apresentadas nas Equações 3.8 a 3.16 [73, 47, 29].

- Adição

$$(m, a, b)_{LR} \oplus (n, c, d)_{LR} = (m + n, a + c, b + d)_{LR} \quad (3.8)$$

- Elemento Oposto

$$-(m, a, b)_{LR} = (-m, b, a)_{RL} \quad (3.9)$$

- Subtração

$$(m, a, b)_{LR} \ominus (n, c, d)_{RL} = (m - n, a + d, b + c)_{LR} \quad (3.10)$$

- Multiplicação por Escalar

$$(m, a, b)_{LR} \times (\lambda, 0, 0) = (m\lambda, a\lambda, b\lambda)_{LR} \quad (3.11)$$

- Inverso (para  $m > 0$ )

$$(m, a, b)_{LR}^{-1} \approx (m^{-1}, bm^{-2}, am^{-2})_{RL} \quad (3.12)$$

- Multiplicação por *fuzzy*

– Para  $m > 0$  e  $n > 0$

$$(m, a, b)_{LR} \otimes (n, c, d)_{LR} \approx (mn, cm + an, dm + bn)_{LR} \quad (3.13)$$

– Para  $m > 0$  e  $n < 0$

$$(m, a, b)_{RL} \otimes (n, c, d)_{RL} \approx (mn, ma - nd, mb - nc)_{RL} \quad (3.14)$$

– Para  $m < 0$  e  $n > 0$

$$(m, a, b)_{RL} \otimes (n, c, d)_{LR} \approx (mn, an - dm, bn - cm)_{RL} \quad (3.15)$$

– Para  $m < 0$  e  $n < 0$

$$(m, a, b)_{LR} \otimes (n, c, d)_{LR} \approx (mn, -bn - dm, -an - cm)_{RL} \quad (3.16)$$

Observa-se que as fórmulas da multiplicação são definidas através de aproximações e levam em consideração que os intervalos em relação ao valor principal do número difuso são pequenos [73].

## 3.2 Defuzzificação

O processo de defuzzificação é a transformação de um número *fuzzy* em um único número que represente esse. Existem diferentes métodos de defuzzificação e, no caso deste trabalho, tem-se interesse em um método em particular: o Índice de Yager ou defuzzificação pelo cálculo do centroide [47].

Esse método foi proposto por Yager [113] e define que um número *fuzzy* pode ser representado pelo centroide da área da figura formada sob a função de pertinência. Dessa forma, pode-se escrever a Equação 3.17.

$$x_{defuzz} = \frac{\int_C x\mu(x)dx}{\int_C \mu(x)dx} \quad \text{sendo } C = [m - \alpha, m + \beta] \quad (3.17)$$

sendo  $x = (m, \alpha, \beta)$  um número *fuzzy* triangular, tem-se a Equação 3.18.

$$x_{defuzz} = \frac{\int_{m-\alpha}^m x(1 - \frac{m-x}{\alpha})dx + \int_m^{m+\beta} x(1 - \frac{x-m}{\beta})dx}{\int_{m-\alpha}^m (1 - \frac{m-x}{\alpha})dx + \int_m^{m+\beta} (1 - \frac{x-m}{\beta})dx} \quad (3.18)$$

resolvendo as integrais, encontra-se a Equação 3.19 [73, 47].

$$x_{defuzz} = \frac{1}{3}(3m - \alpha + \beta) \quad (3.19)$$

A Equação 3.19 corresponde ao índice de Yager [113].

Dessa forma, através do processo de defuzzificação, torna-se possível a comparação e ordenação dos números *fuzzy*, etapa essa fundamental para a pesquisa proposta.

# Capítulo 4

## Apoio Multicritério à Decisão

O ato de decidir é algo inerente à condição humana, toda a vida humana está pautada em decisões, desde as mais simples – nas quais nem se sente o peso da palavra decisão – até as mais complexas, que demandam uma análise mais crítica e sofisticada para serem tomadas.

Geralmente, os problemas de decisão mais complexos são aqueles que precisam ser resolvidos considerando-se diferentes perspectivas a serem atendidas. A esses problemas, dá-se o nome de problema de decisão multicritério. Em [23] o autor descreve um problema de decisão multicritério como uma situação de escolha com duas ou mais alternativas, onde busca-se atender objetivos de caráter conflitante entre si.

De acordo com [42], os problemas de decisão, de um modo geral, apresentam uma das seguintes características, que refletem a complexidade da resolução dos mesmos:

- Critérios conflitantes;
- Critérios ou alternativas não claramente definidos;
- Critérios ou alternativas podem estar interligados;
- Decisores com pontos de vista conflitantes;
- Restrições não definidas claramente;
- Critérios quantificáveis e não-quantificáveis (julgados de acordo com uma determinada escala);
- Escala cardinal, verbal ou ordinal para determinado critério.

Até meados do século XX, problemas de decisão eram resolvidos através da utilização de esperança matemática, somente após o fim da Segunda Guerra Mundial, com a Pesquisa Operacional, começaram a surgir pesquisas dedicadas ao processo decisório [42].

Os primeiros métodos de Apoio Multicritério à Decisão surgiram apenas na década de 1970, objetivando fornecer suporte para decisões nas quais deseja-se alcançar múltiplos objetivos ao mesmo tempo. Desse modo, pode-se dizer que o Apoio Multicritério à Decisão tenta realizar a otimização de problema com várias funções objetivo [42, 23].

Segundo [42], o processo de decisão pode ser dividido em quatro etapas:

- Identificação do problema a ser resolvido;
- Formulação do problema e identificação dos objetivos;
- Elaboração do modelo do problema;
- Análise das alternativas em relação aos critérios e implementação da solução.

Os métodos de Apoio Multicritério à Decisão podem ser classificados de diferentes formas, mas uma forma clássica de divisão é em duas grandes famílias [23, 94]:

- Métodos de Subordinação: esses métodos, tradicionalmente reconhecidos como de origem da Escola Francesa, buscam a construção de uma relação de subordinação, representando as preferências estabelecidas pelo decisor, auxiliando o mesmo na resolução do problema. Os métodos da família PROMÉTHÉE e ELECTRE são os grandes representantes desse grupo. Esses métodos baseiam-se nas preferências do decisor, permitindo que este contribua com as informações como a importância de cada critério de avaliação, os limites de preferência e indiferença.
- Métodos de Critério Único de Síntese: denominada de Escola Americana, são os métodos fundamentados na Teoria de Utilidade Multiatributo que buscam agregar os diferentes critérios numa única função que deverá ser otimizada. Normalmente, utiliza-se uma função que especifique pesos para cada critério, tendo, como resultado, uma soma ponderada dos mesmos. Estas funções são utilizadas em um grande número de métodos, dentre os quais a MAUT e o método AHP.

## 4.1 Conceitos do Apoio Multicritério à Decisão

Existem alguns conceitos básicos dentro do ambiente de tomada de decisão, são eles [42]:

- Decisor: é um indivíduo ou um grupo de indivíduos que fornece o juízo de valor a ser usado para avaliar as alternativas.
- Analista: é o indivíduo ou grupo de indivíduos responsável por modelar o problema com base nas opiniões do decisor.
- Conjunto de alternativas: é um conjunto finito (Decisão Multicritério Discreta) ou infinito (Programação Multi-objetivo ou Otimização Vetorial) de possibilidades que serão avaliadas.
- Critérios: representam os atributos a serem avaliados de acordo com a preferência do decisor, podem ser quantitativos ou qualitativos.
- Pesos: determina a importância de um critério para o decisor.
- Tipos de problema: um problema de decisão pode ser classificado em:
  - Problema tipo  $\alpha$  ( $P\alpha$ ): obter a melhor alternativa ou as melhores alternativas.
  - Problema tipo  $\beta$  ( $P\beta$ ): realizar uma classificação das alternativas, aceitar as boas e descartar as ruins.
  - Problema tipo  $\gamma$  ( $P\gamma$ ): criar uma ordenação das alternativas.
  - Problema tipo  $\delta$  ( $P\delta$ ): gerar uma descrição das alternativas.

Apesar dessa classificação com relação ao objetivo dos problemas de decisão, os métodos de AMD não podem ser divididos de maneira tão clara, uma vez que na busca de um objetivo, outro também pode ser alcançado. Por exemplo, no processo de identificação da melhor alternativa ( $P\alpha$ ), pode-se realizar uma ordenação do conjunto das alternativas ( $P\gamma$ ).

### 4.1.1 Relações de Preferência

Durante o processo decisório, ao se comparar duas alternativas pode-se encontrar uma das relações de preferência descritas abaixo [42, 23]:

- Indiferença (I): ocorre quando duas alternativas,  $x_1$  e  $x_2$ , são equivalentes para o decisor e existem razões claras que justifiquem a indiferença.
- Preferência Estrita (P): o decisor prefere estritamente  $x_1$  a  $x_2$ .
- Preferência Fraca (Q): quando o decisor não consegue definir se prefere estritamente  $x_1$  a  $x_2$  ou se ambas são indiferentes.
- Incomparabilidade (R): ocorre quando não há razões que justifiquem a escolha da indiferença, preferência estrita ou fraca.
- Não-preferência ( $\sim$ ): o decisor não consegue diferenciar entre indiferença e incomparabilidade.
- Preferência (em sentido amplo) ( $>$ ): o decisor não consegue diferenciar entre preferência estrita e preferência fraca.
- Presunção de Preferência (J): quando não há possibilidade de diferenciar entre preferência fraca e indiferença.
- K-preferência (K): quando não há possibilidade de diferenciar entre preferência estrita e incomparabilidade.
- Superação (S): combina a preferência estrita, fraca e indiferença, sem possibilidade de diferenciar.

## 4.2 Apoio Multicritério à Decisão no Contexto da Decisão em Grupo

Importantes decisões raramente são tomadas de maneira individual. Os problemas sobre os quais se tomam decisões estão se tornando cada vez mais complexos, o que implica que cada vez mais pessoas têm que ser envolvidas nas decisões, uma vez que dificilmente somente uma pessoa teria conhecimento suficiente para abordar as multidimensionalidades desses problemas [69]. Entretanto, métodos tradicionais de apoio multicritério à decisão

assumem a existência de um decisor ou então um grupo de decisores que têm um consenso sobre os julgamentos feitos no processo decisório. Para lidar com esse tipo de problema surge então A Decisão em Grupo e Negociação, uma área que busca ajudar grupos na tomada de uma decisão coletiva, combinando técnicas de diferentes áreas como Teoria dos Jogos, Psicologia, Análise Multicritério de Apoio à Decisão, entre outras [64, 69, 24].

A decisão em grupo se caracteriza por um problema de decisão envolvendo duas ou mais partes que devem realizar uma escolha, de modo a satisfazer minimamente todo o grupo, a partir da agregação das preferências individuais dos decisores envolvidos no processo [98, 24]. Decisões em grupo geralmente são tomadas por um grupo que possui algo em comum, havendo um interesse na qualidade final da decisão [64, 110].

A Análise Multicritério em Grupo pode ser vista como uma extensão da tradicional e amplamente utilizada Análise Multicritério, com a inclusão da perspectiva e dos objetivos dos diferentes *stakeholders*/decisores envolvidos no processo decisório [107, 98]. O melhor grupo de decisão seria então aquele formado por pessoas com o interesse na melhor decisão, mas com diferentes conhecimentos e perspectivas sobre a decisão a ser tomada [64].

Em [98] é ressaltada a importância da identificação do grupo de decisores, ou seja, como esses se relacionam com a avaliação que está sendo feita e que contribuições trazem para o processo. Os mesmos autores também afirmam que deve-se clarificar para os membros do grupo de decisão os objetivos do processo que está sendo realizado, nesse momento, assim como no emprego das metodologias adequadas, o facilitador tem um papel importante.

Com os Métodos de Apoio à Decisão em Grupo torna-se possível que cada decisor inclua seus critérios, pesos e estruturas de preferência, permitindo uma avaliação individual e global das alternativas [74]. Esses métodos mostram grande potencial de aplicação, pois tendem a aumentar a qualidade dos processos decisórios, dessa forma, atende-se a demanda por mais transparência, coerência e consistência nos resultados. Em [72], por exemplo, busca-se avaliar possíveis intervenções em instalações públicas de modo a torná-las mais energeticamente eficientes. Para tal, os autores propõem uma combinação entre o método AHP, o algoritmo K – média, problema da mochila e decisão em grupo, tendo como objetivo classificar as alternativas em classes ordenadas por importância e, então selecioná-las de acordo com as restrições orçamentárias. A pesquisa cita a decisão em grupo como uma forma de incorporar a opinião de múltiplos decisores, minimizando a subjetividade do modelo. Já em [109] tem-se um modelo de decisão multicritério em grupo para avaliação de programas de reciclagem de lixo eletrônico. A decisão em grupo

é citada como uma forma de garantir que todos os interesses individuais dos decisores estão sendo considerados na avaliação.

### 4.3 Métodos de Apoio Multicritério à Decisão

- MAUT (*Multi-attribute Utility Theory*): Desenvolvida por [63], a MAUT ou Teoria da Utilidade Multiatributo é derivada da Teoria da Utilidade e tem como base a ideia que todos os problemas de decisão possuem uma função de valor real sobre o conjunto de alternativas que o decisor quer examinar. Sendo que essa função agrega os atributos (critérios) de modo a representar as preferências dos decisores. Essa teoria também se baseia na ideia de estruturação e hierarquização dos critérios para a avaliação das alternativas [42, 23].

A MAUT é considerada uma das técnicas mais conhecidas dentro do Apoio Multicritério e tem uma aplicação crescente desde o seu desenvolvimento [23]. Essa teoria pode ser vista implementada em diferentes áreas de conhecimento. O autor em [59], por exemplo, faz a utilização da MAUT para a decisão sobre planos de evacuação em situações de desastres causadas por chuvas. Já em [80], os autores propõem a aplicação da teoria para a seleção entre diferentes opções de *design* para uma construção, considerando a resistência e a sustentabilidade desta.

- Método MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*): Desenvolvido por [9], o método MACBETH propõe a avaliação qualitativa sobre a diferença de atratividade entre as alternativas. Essa avaliação é feita por meio de uma escala de seis níveis e permite a construção de uma escala numérica. Dessa forma o decisor não é forçado a representar numericamente as preferências [23].

Em [26] um modelo *fuzzy* MACBETH é implementado na avaliação de alternativas de logística reversa para pneus usados. É declarado pelo autor que esse problema envolve critérios conflitantes, ambiguidade e informações imprecisas, justificando o emprego do AMD em combinação com conjunto de números *fuzzy*. É citado ainda o fato de o MACBETH ser um método consolidado e com uma história de sucesso em suas aplicações, como explicação para a utilização desse.

Em uma outra aplicação, também com um foco na sustentabilidade ambiental, [67], é feita a aplicação do método MACBETH para a avaliação do valor ecológico de zonas úmidas na cidade de Quebec, no Canadá. Dessa forma, torna-se possível

melhor entender a contribuição dessas zonas para a sociedade e, assim, melhor desenvolver estratégias, normas e programas de conservação. Os autores expressam que o método se mostrou apto a prover resultados convincentes e que expressavam com acurácia as percepções dos *experts* envolvidos no processo decisório.

- TODIM (Tomada de Decisão Interativa Multicritério): Proposto por Gomes e Lima [43], o método TODIM apresenta a ordenação das alternativas avaliadas, e tem como base a Teoria da Perspectiva [57], que trata sobre o comportamento humano em situações de decisão que envolvem risco. As principais conclusões dessa teoria estão no fato que o modo como uma pessoa toma uma decisão, depende do contexto dessa; e nas situações de ganho as pessoas tendem a adotar um perfil mais conservador, enquanto que em uma situação que envolve perda, as pessoas mostram uma maior propensão ao risco [42].

Em [87] e [22] é citado como uma vantagem do método a incorporação do risco sobre as decisões. Os autores em [87] também declaram que a formulação do método tornou mais fácil a resolução de conflitos entre os critérios, permitindo a obtenção de uma ordenação satisfatória, em conformidade com as expectativas dos especialistas.

- UTA (*Utilité Additive*): Desenvolvido por [55] o método UTA se baseia na MAUT e faz uso da programação linear para determinar as funções de utilidade dos critérios, considerano as preferências dos decisores [88]. Pelo método UTA, obtêm-se as funções de utilidade a partir de uma pré-ordenação das alternativas, realizada pelos decisores. Essa é então utilizada como restrição de um problema de programação linear, que tem por objetivo minimizar o somatório dos erros associados à ordenação das alternativas proposta inicialmente [12, 45, 88].
- TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*): O método TOPSIS [52] parte do conceito de distância de um ponto ideal, denominado PIS (Positive Ideal Solution) ou de um ponto anti-ideal, também conhecido como NIS (Negative Ideal Solution). Entende-se por ponto ideal a alternativa que hipoteticamente, considerando os critérios adotados, teria o melhor impacto positivo na decisão. Analogamente, o ponto anti-ideal corresponde àquele com as piores consequências dentro dos critérios utilizados [23].

O TOPSIS busca a alternativa que possui, de modo simultâneo, a menor distância do ponto ideal e a maior do NIS, maximizando o benefício final obtido.

- AHP (*Analytic Hierarchy Process*): O método AHP (Analytic Hierarchy Process)

é um método de apoio multicritério à decisão da Escola Americana amplamente utilizado, sendo o seu criador Thomas L. Saaty [97]. A principal característica do método é a divisão do problema em níveis hierárquicos, facilitando o entendimento das relações e permitindo uma melhor compreensão do problema estudado.

Com esta divisão em níveis, é necessário existir uma homogeneidade entre os critérios do mesmo nível, ou seja, os critérios devem possuir o mesmo nível de importância, possibilitando que sejam comparados entre si [42]. O primeiro nível da hierarquia representa o objetivo do problema, depois seguem os critérios e as alternativas.

O método propõe uma comparação par a par entre os elementos, onde a preferência do decisor é expressa a partir de uma escala definida pelo método, denominada de Escala Fundamental de Saaty - escala numérica de 1 a 9 que representa a importância relativa entre duas alternativas. O método ainda determina a avaliação da consistência dos resultados, ou seja, a coerência dos mesmos. Validando, assim, a solução encontrada [42].

- Família de Métodos ELECTRE (*Elimination et Choix Traduisant la Réalité*): Os métodos da família ELECTRE estão entre os métodos de sobreclassificação mais difundidos e utilizados. Essa metodologia baseia-se na construção de uma sobreclassificação, estabelecendo-se uma comparação par a par entre as alternativas [23]. São os métodos da família ELECTRE:

- ELECTRE I: utilizado em uma problemática de escolha, com o uso de verdadeiro critério [91].
- ELECTRE IS: aplicado em problemáticas de escolha, com o uso de pseudocritério [96].
- ELECTRE II: envolve uma problemática de ordenação, com o uso de verdadeiro critério [93].
- ELECTRE III: utilizado em uma problemática de ordenação, com o uso de pseudocritério [92].
- ELECTRE IV: aplica-se em uma problemática de ordenação, com o uso de pseudocritério, mas sem a utilização de pesos para os critérios [95].
- ELECTRE TRI: utilizado em uma problemática de classificação, com o uso de pseudocritério [116].

- Família de Métodos PROMÉTHÉE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*): Os métodos da família PROMÉTHÉE têm como objetivo de tratar problemas multicritério discretos, neste método as alternativas são analisadas par a par para cada critério, até que a ordem seja definida [42]. A família PROMÉTHÉE compreende os seguintes métodos:
  - PROMÉTHÉE I: estabelece uma pré-ordem parcial [13].
  - PROMÉTHÉE II: estabelece uma pré-ordem completa, não permite incomparabilidades [13].
  - PROMÉTHÉE III: fornece uma ordem por intervalos [78].
  - PROMÉTHÉE IV: é uma extensão do PROMÉTHÉE II para um conjunto infinito de alternativas [78].
  - PROMÉTHÉE V: seleciona um subconjunto de alternativas [15].
  - PROMÉTHÉE VI: auxilia o decisor na determinação dos pesos dos critérios que melhor expressam sua preferência [16].
  - PROMÉTHÉE-GAIA: suporte de análise gráfica para a metodologia PROMÉTHÉE [77].
  - PROMÉTHÉE GDSS: auxilia na tomada de decisão que envolve um grupo de decisores [74].

## 4.4 Método PROMÉTHÉE II

O método PROMÉTHÉE II [13] é um método da escola francesa de Apoio Multicritério à Decisão, desenvolvido para tratar de problemas discretos. O objetivo da metodologia é ser facilmente compreendida pelo decisor, sendo esta baseada numa extensão da noção de critério. Existem duas formas para se obter o ranking final: através do PROMÉTHÉE I que fornece uma ordenação parcial e do PROMÉTHÉE II que gera uma ordenação total das alternativas [17].

Neste método utiliza-se uma das funções de preferência propostas pelos autores do método PROMETHÉE - Figura 4.1 - para classificar uma alternativa  $a$  como preferível à  $b$  em relação a determinado critério ( $aPb$ ), quando é possível dizer que  $a$  é estritamente melhor do que  $b$  nesse critério, ou para classificar  $a$  como indiferente à  $b$  ( $aIb$ ), quando

não há diferenças significativas entre ambas. Observa-se na Figura 4.1 que  $q$  se refere ao limite de indiferença: se  $\delta_{ik} < q$ , as alternativas  $x_i$  e  $x_k$  são indiferentes em relação a este critério. Enquanto  $p$  corresponde ao limite de preferência: se  $\delta_{ik} > p$ , há uma preferência estrita por  $x_i$ , em relação a este critério. Dessa forma, logicamente, tem-se sempre  $p > q$  [14, 42].

Para a utilização do método, inicialmente, determina-se qual função de preferência relativa será utilizada para comparar cada critério  $j$ . Então, calcula-se a função de preferência de cada critério  $j$ , para cada par de alternativas  $x_i$  e  $x_k$ , através da Equação 4.1 [14, 42].

$$P_j(x_i, x_k) = P_j(u_j(x_i) - u_j(x_k)) = P_j(\delta_{ik}) \quad (4.1)$$

em que:

$P_j$  representa a função de preferência escolhida para comparar o critério  $j$ ;

$u_j(x_i)$  e  $u_j(x_k)$  correspondem aos valores do critério  $j$  para as alternativas  $i$  e  $k$ , respectivamente;

$$\delta_{ik} = u_j(x_i) - u_j(x_k).$$

A segunda etapa é calcular o índice de preferência,  $s_{ik}$ , da alternativa  $x_i$  comparada à alternativa  $x_k$ , isto é, fazer uma soma das  $P_j$ 's nas quais  $x_i$  é preferível à  $x_k$ . Essa soma é ponderada pelos pesos de cada critério,  $w_j$ . O índice de preferência é dado pela Equação 4.2.

$$s_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^n w_j P_j(x_i, x_k)}{\sum_{j=1}^n w_j} = \frac{\sum_{j=1}^n w_j P_j(\delta_{ik})}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad (4.2)$$

na qual  $n$  representa o número total de critérios.

Por último, calculam-se os fluxos de superação positivos e negativos de cada alternativa  $x_i$ . O fluxo de superação positivo, denotado por  $\phi_i^+$ , se refere a como  $x_i$  supera as demais alternativas, desse modo representa a média de todos os graus de sobreclassificação de  $x_i$  com respeito a todas as outras alternativas; de modo que quanto maior esse fluxo, melhor será a alternativa. Já o fluxo de superação negativo,  $\phi_i^-$ , está associado a como a alternativa  $x_i$  é superado pelas demais, logo é representado pela média de todos os graus

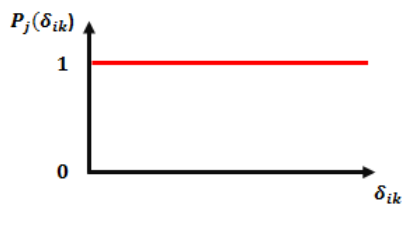
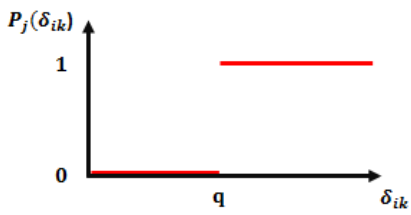
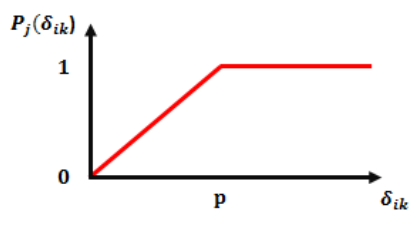
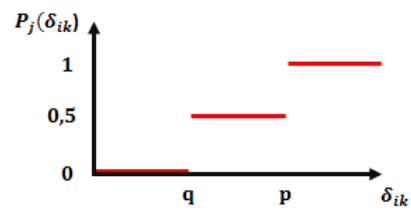

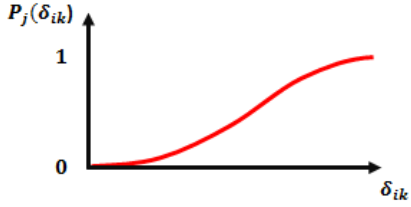
<p><b>Verdadeiro Critério (I)</b></p>		$P_j(\delta_{ik}) = \begin{cases} 0 & \text{se } \delta_{ik} = 0 \\ 1 & \text{se } \delta_{ik} > 0 \end{cases}$
<p><b>Quase-Critério (II)</b></p>		$P_j(\delta_{ik}) = \begin{cases} 0 & \text{se } \delta_{ik} \leq q \\ 1 & \text{se } \delta_{ik} > q \end{cases}$
<p><b>Pseudocritério com Preferência Linear (III)</b></p>		$P_j(\delta_{ik}) = \begin{cases} \frac{\delta_{ik}}{p} & \text{se } \delta_{ik} \leq p \\ 1 & \text{se } \delta_{ik} > p \end{cases}$
<p><b>Critério de Nível (IV)</b></p>		$P_j(\delta_{ik}) = \begin{cases} 0 & \text{se } \delta_{ik} \leq q \\ \frac{1}{2} & \text{se } q < \delta_{ik} \leq p \\ 1 & \text{se } \delta_{ik} > p \end{cases}$
<p><b>Critério de Preferência Linear e Área de Indiferença (V)</b></p>		$P_j(\delta_{ik}) = \begin{cases} 0 & \text{se } \delta_{ik} \leq q \\ \frac{\delta_{ik} - q}{p - q} & \text{se } q < \delta_{ik} \leq p \\ 1 & \text{se } \delta_{ik} > p \end{cases}$
<p><b>Critério Gaussiano (VI)</b></p>		$P_j(\delta_{ik}) = 1 - e^{-\frac{\delta_{ik}^2}{2\sigma^2}}$

Figura 4.1: Funções de Preferência do Método PROMÉTHÉE. Fonte: Adaptado de [42]

de sobreclassificação das outras alternativas sobre  $x_i$  [17, 14].

Através do fluxo de superação pode-se obter a pré-ordem parcial das alternativas (PROMÉTHÉE I), onde cada relação, para existir, deve respeitar, no mínimo, uma das condições citadas. As relações de fluxo positivo e negativo são descritas das seguintes formas [42].

- $x_i$  supera  $x_k$  se:

$$\begin{aligned}\phi_i^+ &> \phi_k^+ \text{ e } \phi_i^- < \phi_k^- \\ \phi_i^+ &> \phi_k^+ \text{ e } \phi_i^- = \phi_k^- \\ \phi_i^+ &= \phi_k^+ \text{ e } \phi_i^- < \phi_k^-\end{aligned}$$

- $x_i$  é indiferente a  $x_k$  se:

$$\phi_i^+ = \phi_k^+ \text{ e } \phi_i^- = \phi_k^-$$

- $x_i$  é incomparável a  $x_k$  se:

$$\begin{aligned}\phi_i^+ &> \phi_k^+ \text{ e } \phi_i^- > \phi_k^- \\ \phi_i^+ &< \phi_k^+ \text{ e } \phi_i^- < \phi_k^-\end{aligned}$$

Por último, pode-se ainda calcular o fluxo total ou fluxo líquido para cada alternativa  $x_i$ , conforme Equação 4.3.

$$\phi_i = \phi_i^+ - \phi_i^- \quad (4.3)$$

O fluxo total é utilizado na obtenção da pré-ordem total das alternativas no método PROMÉTHÉE II.

## 4.5 PROMÉTHÉE GDSS (*Group Decision Support System*)

O PROMÉTHÉE GDSS foi desenvolvido para auxiliar nos processos decisórios que envolvem um grupo de decisores. Esse método pode ser dividido em três fases [14, 74]:

- Fase 1 - definição de alternativas e critérios: Nessa fase, cada decisor apresenta possíveis alternativas de forma individual e após, realiza-se um *brainstorming*, onde as alternativas podem ser excluídas, mescladas ou incluídas. De forma análoga, o conjunto de critérios é definido.
- Fase 2 - avaliação individual: Nesse momento do processo decisório, cada decisor realiza suas avaliações das alternativas de acordo com os critérios estabelecidos. Ressalta-se que, nessa fase, caso algum critério não seja de interesse do decisor, pode-se alocar peso zero para esse. Além disso, algumas avaliações podem ser feitas de forma prévia, dependendo do critério (preço, orçamento, etc), caso haja consenso. É gerado então, os *rankings* individuais e, também, podem ser feitas a análise GAIA [77] para cada decisor.
- Fase 3 - avaliação global: Nessa última fase, os fluxos individuais são coletados e inseridos na matriz de avaliação global. Os resultados individuais são então agregados por meio de média ponderada, de acordo com o peso atribuído a cada decisor.

A Figura 4.2 representa o processo de implementação do PROMÉTHÉE GDSS.

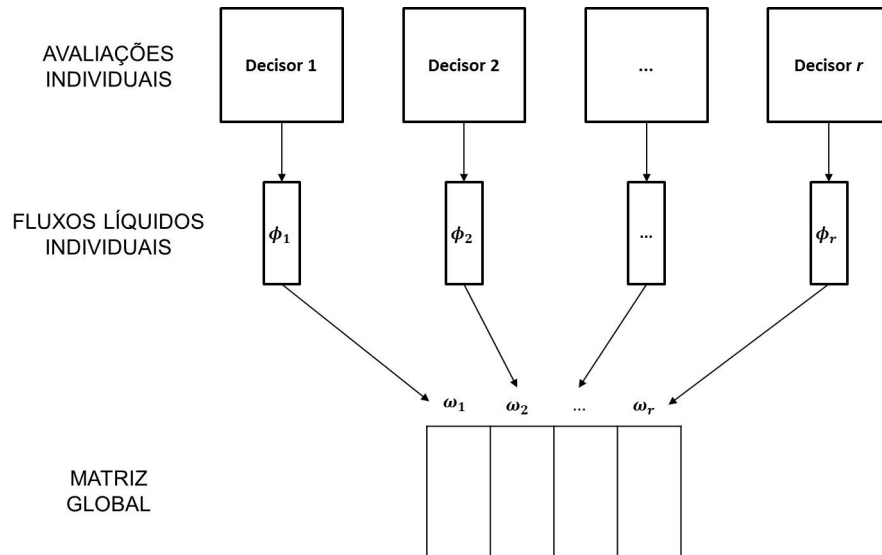


Figura 4.2: Processo Implementação PROMÉTHÉE GDSS. Fonte: Adaptado de [74]

Observa-se na Figura 4.2 que  $\phi_i$  e  $\omega_i$  representam o vetor de fluxos totais e os pesos de cada um dos  $r$  decisores envolvidos no processo decisório, respectivamente. Sendo  $i = 1, 2, \dots, r$ .

Ainda existem relativamente poucos trabalhos envolvendo o PROMÉTHÉE GDSS na literatura, sendo esse aplicado nas mais diferentes áreas. Os autores em [39] propõem a

aplicação de um método multicritério híbrido com múltiplos decisores de modo a facilitar a tomada de decisão sobre políticas na área de transporte marítimo. Os autores fazem a utilização combinada dos métodos AHP (definição dos pesos) e PROMÉTHÉE GDSS (avaliação das alternativas) objetivando melhorar os resultados obtidos com os métodos de forma individual, reduzindo suas deficiências e concedendo mais transparência ao processo decisório, através da participação de diferentes *stakeholders*.

Em [107] os autores conduzem um estudo aplicando o PROMÉTHÉE GDSS de modo a analisar e incorporar a perspectiva de diferentes *stakeholders*, para avaliar a possível mudança de entregas para horários não-comerciais de um varejista na área de alimentos.

Já em [99] o método PROMÉTHÉE GDSS é aplicado de forma conjunta com os métodos Delphi, Swing e PROMÉTHÉE V, para a avaliação de projetos de renovação em construções de modo a torná-las mais energeticamente eficientes. Segundo os autores, a melhor solução não foi aquela com melhor performance nos critérios com maior peso, mas sim, aquela que representava um “consenso” entre as avaliações individuais, conforme esperado com a utilização da metodologia para decisão em grupo. Através de uma análise de sensibilidade, ainda constatou-se a estabilidade da solução encontrada, sendo esta não influenciada pela preferências dos decisores de forma individual.

## 4.6 F-PROMÉTHÉE GDSS

O Apoio Multicritério à Decisão fornece ferramentas poderosas para a resolução de problemas envolvendo múltiplos critérios conflitantes, e a família de métodos PROMÉTHÉE está entre os métodos mais utilizados. Entretanto, em alguns problemas é difícil expressar a avaliação das alternativas e, para esses casos, pode-se fazer a integração entre os métodos PROMÉTHÉE e a Teoria dos Conjuntos *Fuzzy* [21].

Uma das primeiras utilizações dos números *fuzzy* juntamente com o método PROMÉTHÉE encontradas na literatura foi proposta por [47], e foi aplicada no setor energético. Nesse trabalho, os autores descrevem a metodologia *fuzzy* PROMÉTHÉE e a aplicação dessa para avaliação de alternativas de exploração de campos geotérmicos. Os autores ainda declaram que essa abordagem se mostra mais realista e que produz resultados mais confiáveis, uma vez que os dados não são claros.

Outro trabalho de integração dos números com o método PROMÉTHÉE que é visto como uma referência na literatura foi proposto por [40]. Nesse, tem-se o tratamento das avaliações e pesos como números *fuzzy* para avaliação de técnicas de sinterização.

Em outra aplicação, por exemplo, os autores em [114] propõem a utilização do F-PROMÉTHÉE e da programação por metas para a seleção de equipamentos. É citada a utilização de números *fuzzy* como uma forma de lidar com as incertezas dos julgamentos realizados por meio de variáveis linguísticas e, também é ressaltada a obtenção de resultados mais coerentes com as preferências dos decisores, sendo os resultados descritos como mais adequados e lógicos para o problema.

Existem alguns outros trabalhos com a metodologia F-PROMÉTHÉE que podem ser encontrados, porém uma quantidade bem menor que a encontrada da integração dos números *fuzzy* com outros métodos do AMD, como o AHP, por exemplo.

Com relação ao modelo completo proposto nesse estudo, F-PROMÉTHÉE GDSS, é possível citar três trabalhos semelhantes. Em [49] os autores realizam a integração entre o PROMÉTHÉE GDSS e números *fuzzy* na avaliação de empresas de serviço logístico para uma companhia cimentícia. É citado que esse método permite a incorporação das incertezas típicas dos processos decisórios dessa área e, também, permite a melhor exploração das experiências e qualificações dos decisores. Os autores declaram que a metodologia permite a tomada de decisão de uma maneira mais eficiente. Nessa pesquisa, o método F-AHP também é previamente utilizado para a determinação dos pesos dos critérios. Similarmente a [49], em [50] tem-se a utilização do método F-AHP para a definição dos pesos dos critérios e, posteriormente tem-se o uso do F-PROMÉTHÉE GDSS; nesse caso para a avaliação de fornecedores de uma empresa de laticínios. O emprego desse método é justificado pela dispersão geográfica dos decisores e o uso de variáveis linguísticas dotadas de imprecisões. Os autores citam que essa abordagem permite o tratamento de cada decisor de forma única em termos de preferência e, juntamente com a utilização de números *fuzzy*, apresenta grandes chances de sucesso nos resultados. Em [81] esse modelo é aplicado para ordenar requerimentos técnicos para a construção da casa de qualidade no design de produtos. Os autores declaram usar essa abordagem por ter um grupo de designers localizados em diferentes regiões geográficas e pelas informações fornecidas serem imprecisas. É explicado que a utilização de números *fuzzy* permite a superação da dificuldade de lidar com variáveis linguísticas.

Para esta pesquisa explorar-se-á a utilização de números *fuzzy* para a representação das incertezas associadas a expressão dos julgamentos por meio de variáveis linguísticas. Dessa forma, no lugar de realizar uma substituição da escala verbal por uma escala numérica simples, essa será substituída por números *fuzzy* nos cálculos; inserindo uma espécie de “margem de erro” aos julgamentos dos decisores.

Para implementação do método F-PROMÉTHÉE, serão analisadas duas funções de preferência: função de preferência do tipo V (Preferência Linear e Área de Indiferença) e função de preferência tipo III (Pseudocritério com Preferência Linear). Em ambos os casos,  $p$ ,  $q$  e os pesos são representados como números clássicos.

Nesses casos,  $\delta_{ik}$  será um número *fuzzy*, representado da forma  $(m, \alpha, \beta)_{LR}$ , então a função de preferência para um número *fuzzy*,  $\bar{P}_j(x_i, x_k)$  será dada pela Equação 4.4, para a função Pseudocritério com Preferência Linear; e pela Equação 4.5, para a função Preferência Linear e Área de Indiferença.

$$\bar{P}_j(x_i, x_k) = \begin{cases} \frac{(m, \alpha, \beta)}{p}, & \text{se } m - \alpha \geq 0 \text{ e } m + \beta \leq p \\ 1, & \text{se } m + \beta > p \end{cases} \quad (4.4)$$

$$\bar{P}_j(x_i, x_k) = \begin{cases} 0, & \text{se } m - \alpha \leq q \\ \frac{(m, \alpha, \beta) - q}{p - q}, & \text{se } q < m - \alpha \text{ e } m + \beta \leq p \\ 1, & \text{se } m + \beta > p \end{cases} \quad (4.5)$$

Todos os cálculos seguirão normalmente, somente substituindo as operações clássicas por operações *fuzzy*. Dessa forma, o novo índice de preferência será calculado pela Equação 4.6.

$$\bar{s}_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^n w_j \bar{P}_j(x_i, x_k)}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad (4.6)$$

Fazendo substituições análogas, ter-se-á os fluxos positivos, negativos e líquidos.

Os fluxos líquidos individuais serão então agregados conforme preconizado pelo método PROMÉTHÉE GDSS. O resultado de todo esse processo serão números *fuzzy*, então, para realizar o ordenamento das alternativas faz-se necessário proceder com a defuzzificação dos números, por meio do Índice de Yager.

## 4.7 Apoio Multicritério à Decisão no Setor Energético

A energia tem um papel fundamental para o desenvolvimento socioeconômico de um país e assegurar um suprimento de energia que atenda as demandas da sociedade tem sido um dos grandes desafios dos últimos tempos. Até durante a década de 1970, o planejamento energético era praticamente definido somente por modelos de minimização de custos, sujeito ao atendimento da demanda e às restrições tecnológicas. Entretanto, percebeu-se – devido a crise energética e o crescimento da preocupação com as questões ambientais – que a abordagem tradicional focada na dimensão econômica não se mostrava mais apta a tratar esse tipo de problema, promovendo, durante a década 1980, a busca por novas metodologias, capazes de representar as novas necessidades que surgiam no setor [5, 79, 85, 108].

Desse modo, a Análise Multicritério começou a ganhar relevância na avaliação de problemas ligados ao setor energético (avaliação de tecnologias, políticas, etc) em diferentes níveis (estratégico, tático, operacional), uma vez que essa permite a considerar diferentes aspectos da decisão (técnicos, sociais, ambientais e econômicos). Os métodos de apoio multicritério à decisão fornecem um suporte científico e permitem incorporar as preferências de múltiplos atores, levando em consideração os aspectos subjetivos da decisão, fornecendo resultados mais sólidos e tornando a Análise Multicritério uma ferramenta poderosa [5, 79, 85].

Dado que a exploração de fontes de energia deve ser balanceada com as ameaças ao clima, a mitigação de impactos ambientais e sociais, etc, a Análise Multicritério se mostra fundamental nos problemas do setor energético, provendo resultados que equilibram múltiplos e conflitantes aspectos da avaliação. Os autores em [5] ressaltam que a Análise de Decisão Multicritério, assim como a Otimização Multiobjetivo possuem ferramentas poderosas para os decisores no setor energético, e que esse é uma importante área de aplicação desses modelos e métodos.

Existem diferentes tipos de problemas no setor energético que podem ser abordados com a utilização da Análise Multicritério, de acordo com [5] esses podem ser divididos em:

- Comparação de tecnologias de geração: avaliação de fontes primárias de energia para a geração de eletricidade. Exemplos desse tipo de aplicação são encontrados em [104], [62] e [2].

- Planejamento energético e políticas no setor energético: estes problemas tratam da identificação/escolha de estratégias, políticas no setor e cenários futuros. Os autores em [68], [106] e [82] abordam essa categoria de problema.
- Seleção de projetos energéticos: trata-se da identificação do melhor projeto energético entre as opções apresentadas. São representação desse tipo de problema os estudos apresentados em [20], [48] e [6].
- Seleção de local: esse problema trata da definição da localização de empreendimentos energéticos, como apresentado em [3], [7] e [66].
- Eficiência energética: consiste na avaliação e seleção de medidas e programas que visem melhorar a eficiência energética em diferentes contextos. Os estudos apresentados em [83] e [25] exemplificam esse tipo de problema.

Outros aspecto importante a ser considerado quando discute-se a aplicação da Análise Multicritério no setor energético, são os critérios utilizados nos diferentes tipos de estudo. Diversos critérios podem ser utilizados para a identificação das melhores soluções energéticas para os problemas descritos anteriormente. Deve-se considerar critérios que representem os aspectos sociológicos, econômicos, tecnológicos e ambientais dos sistemas energéticos [5, 79, 108]. Os principais critérios utilizados em aplicações do AMD no setor energético encontrados na literatura encontram-se na Figura 4.3.

Segundo [5] entre os critérios técnicos, o mais utilizado é a Eficiência, especialmente em estudos de geração de energia. Outros critérios técnicos que também apresentam destaque na literatura são maturidade tecnológica e segurança. Os autores em [5] ainda citam que entre os critérios econômicos o Custo de Investimento é o mais usado, seguido pelo Custo de Operação e Manutenção e pelo Custo do Combustível, que apresenta grande relevância nos estudos de avaliação de tecnologias de geração. Com relação aos critérios ambientais, o de maior presença entre os estudos é a Emissão de CO<sub>2</sub>, seguido pelo Efeitos no Ambiente Natural. Já entre os critérios sociais recebe destaque a Geração de Empregos, outros critérios sociais que se destacam são Aceitabilidade Social e Impactos Sociais.

Em [85] os autores apresentam uma revisão de mais de noventa artigos sobre a aplicação de decisão multicritério no planejamento energético. É destacado o ganho de popularidade dessas metodologias durante a década de 1990, mostrando uma mudança na abordagem do planejamento no setor energético. Nessa pesquisa, o método AHP é citado como o mais utilizado, seguido pelo PROMÉTHÉE e ELECTRE. Também é ressaltada

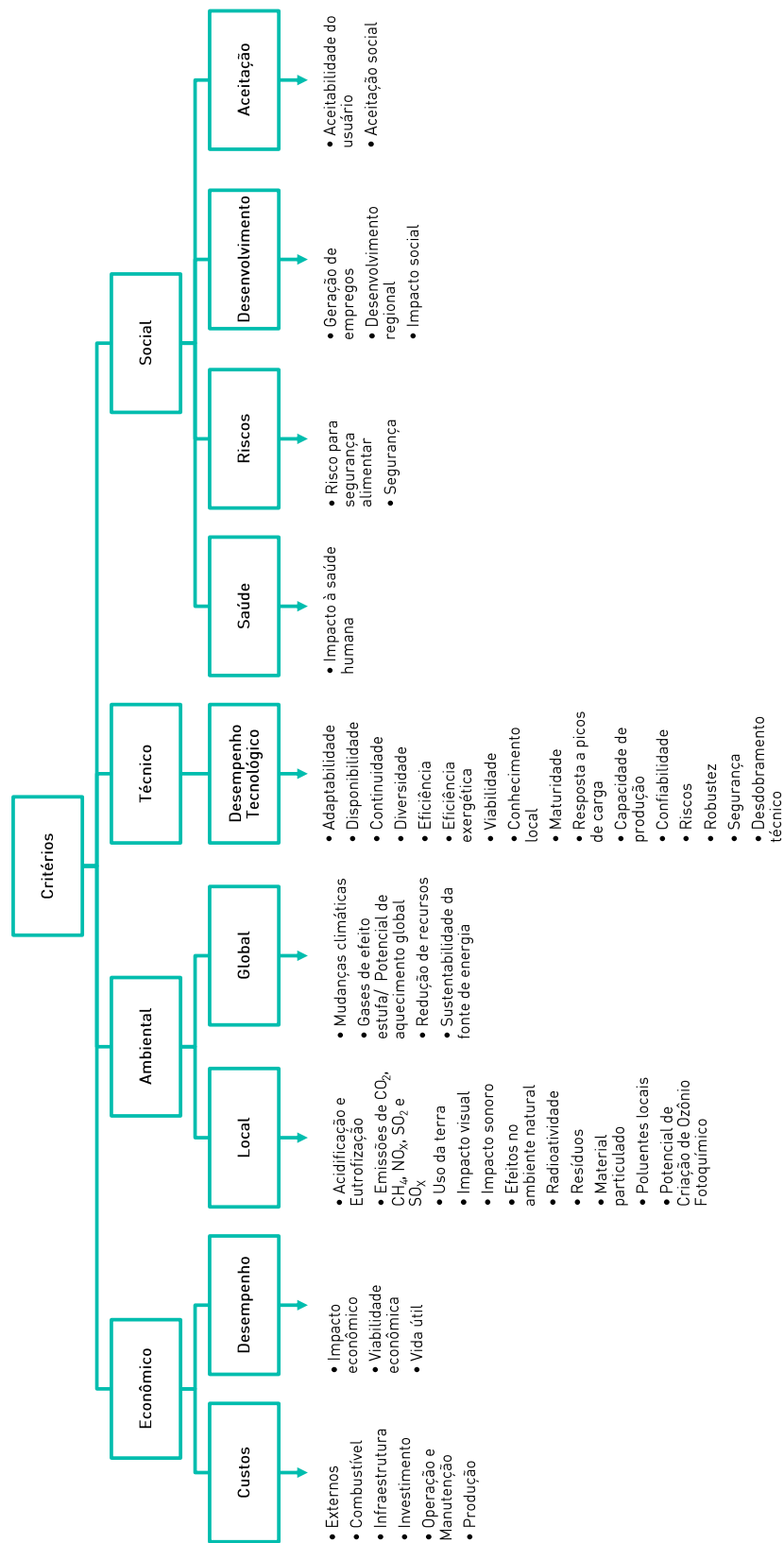


Figura 4.3: Critérios Utilizados em Problemas do Setor Energético. Fonte: Adaptado de [5]

a importância dos diferentes atores envolvidos no processo decisório e, portanto, os métodos de decisão em grupo se tornam particularmente interessantes, não somente para problemas no setor energético. É também evidenciada a utilização de múltiplos métodos, sistemas de apoio à decisão interativos e a aplicação de métodos *fuzzy*, como uma forma de validação dos resultados.

O autor em [71] explica que diferentes tipos de Métodos de Apoio à Decisão Multicritério são utilizados para problemas de planejamento energético e que esses métodos se mostram adequados aos problemas do setor de energia. Porém, explicita que uma vez que todos eles apresentam vantagens e desvantagens, a escolha de um método se mostra como um problema de decisão multicritério por si mesma; não sendo possível, portanto, falar que um método é melhor que outro. O autor ainda destaca a utilização da MAUT, do método AHP e, entre os métodos de sobreclassificação, cita o PROMÉTHÉE II e o ELECTRE III como os mais utilizados. Também é citada a implementação de métodos de forma combinada, como AHP e PROMÉTHÉE II, AHP e TOPSIS, entre outras.

Em uma revisão sobre a aplicação de Análise Multicritério à Decisão em problemas relacionados à formas de energia renováveis, os autores [108] explicam que esses métodos se tornaram popular nessa área, devido à multidimensionalidade da ideia de sustentabilidade. Os autores também declaram que o Apoio Multicritério à Decisão fornece métodos que auxiliam a eliminar a dificuldade dos problemas que envolvem alto grau de incerteza, objetivos conflitantes, diferentes formas de dados e informação, perspectivas e interesses múltiplos, etc. Custo de investimento, emissão de CO<sub>2</sub>, eficiência e geração de empregos figuram como os critérios mais utilizados nas avaliações. Os autores também ressaltam um importante aspecto dos resultados obtidos pela utilização dos métodos: esses estão subjugados aos pesos dos critérios, bem como a outros parâmetros variáveis. Desse modo, a maioria dos trabalhos analisados opta pela utilização de pesos iguais. Assim como observado em outras revisões, o método AHP é o mais usado, devido à facilidade de compreensão e implementação deste. Observa-se ainda o crescimento da utilização de números *fuzzy*, como forma de lidar com a imprecisão associada aos dados de entrada.

Em uma vasta e mais recente revisão, os autores em [65] analisaram a aplicação do Apoio Multicritério à Decisão em problemas relacionados à energias renováveis. É enfatizado o aumento da complexidade do planejamento energético ao longo dos anos, especialmente nos sistemas de energia renováveis, uma vez que esses também envolvem limitações topográficas. Desse modo, o AMD tem se tornado cada vez mais popular e se mostrando uma das melhores ferramentas para um planejamento energético eficiente,

---

pois permite a consideração e o desenvolvimetro de uma sinergia dos aspectos políticos, sociais, econômicos, tecnológicos e ambientais envolvidos na decisão. Assim como [108] e [71], os autores em [65] também destacam que todos os métodos possuem vantagens e desvantagens em suas aplicações e que pode-se obter diferentes resultados para a mesma problemática dependendo de como essa é abordada; metodologias híbridas surgem para lidar com essa questão. AHP, ELECTRE III e PROMÉTHÉE são citados como métodos amplamente aplicados.

# Capítulo 5

## Estudo de Caso

Como já abordado no Capítulo 4 deste trabalho, existem diversos estudos que mostram a aplicação do Apoio Multicritério no setor energético, incluindo para a avaliação de fontes de energia. Tem-se [100], por exemplo, onde os autores aplicam os métodos AHP e ARAS (*Additive Ratio Assessment Method*) para a avaliação/priorização de tecnologias de geração de energia na Lituânia. Já em [56] é proposto um modelo híbrido baseado no método ANP e na análise BOCR (Benefícios, Oportunidades, Custos e Riscos) para a avaliação de fontes renováveis de energia na Turquia, assim como em [58] onde é aplicado um modelo híbrido do método AHP com lógica *fuzzy* para avaliação de tecnologias de produção de energia no mesmo país. Ou ainda [105], onde se tem a utilização do método PROMÉTHÉE e da Simulação de Monte Carlo para avaliação de tecnologias de produção de energia renovável na Escócia. Nota-se que nesses trabalhos uma avaliação em escala nacional é utilizada pelos autores. Entretanto, uma vez que o Brasil é um país de dimensões continentais, apresentado os mais diversos tipos de características geográficas, uma avaliação local mostra-se mais apropriada. Dessa forma, pode-se melhor explorar as peculiaridades de cada localidade que podem, ou não, favorecer a geração de eletricidade a partir de uma determinada fonte de energia. Estudo semelhante ao proposto neste trabalho pode ser observado em [28], no qual tem-se uma avaliação de fontes renováveis também no sudeste brasileiro, mas baseada em dados de revisão bibliográfica e utilizando o PROMÉTHÉE II.

### 5.1 Definição do Método

Na presente pesquisa, busca-se uma ordenação das diferentes fontes de energia renováveis na região Sudeste do Brasil, ou seja, objetiva-se criar um *ranking* das fontes, de

acordo com o desempenho dessas em diferentes critérios. Por se tratar de um problema que engloba múltiplos aspectos a serem considerados, o uso de métodos do Apoio Multi-critério à Decisão se mostra pertinente. Além disso, o AMD fornece um suporte científico para problemas que estão sujeitos à subjetividade das preferências daqueles envolvidos na decisão.

Como visto no Capítulo 4, existem diferentes métodos de AMD, cada um com características bem distintas. Dentre esses, optou-se pela utilização do método PROMÉTHÉE GDSS.

A família de métodos PROMÉTHÉE fornece uma metodologia amplamente utilizada e com inúmeras aplicações bem sucedidas em diferentes áreas. Os métodos da família PROMÉTHÉE geram uma ordenação das alternativas avaliadas e permitem a expressão da preferência dos decisores de diferentes formas, por meio das diferentes funções de preferência descritas [14].

Outra característica relevante para a escolha do método está relacionada a esse pertencer à chamada Escola Francesa do Apoio Multicritério à Decisão, cujos métodos são não compensatórios. Desse modo, o seu baixo desempenho em um critério não é compensado/balanceado pelo bom desempenho em outro.

Uma vez que os problemas do setor energético precisam ser avaliados sob várias perspectivas, a decisão em grupo se mostra uma ferramenta importante, pois possibilita a agregação das preferências individuais de decisores que possuem diferentes olhares sobre um mesmo tema, explorando melhor o conhecimento de cada um. Assim sendo, o PROMÉTHÉE GDSS apresenta-se como um método adequado ao tratamento do problema proposto.

Por último, faz-se importante lembrar que os julgamentos dos decisores contêm imprecisões/incertezas, principalmente quando expressos por meio de variáveis linguísticas. A fim de tornar os resultados mais realistas, necessita-se reconhecer a existência dessas incertezas e incorporá-las nos cálculos. Para tal, tem-se uso dos números *fuzzy*, já amplamente utilizados em estudos similares.

Faz-se importante também ressaltar que, conforme descrito por [74] e já explicado no Capítulo 4, no método PROMÉTHÉE GDSS, os decisores podem ter participação já nas primeiras fases do método, como definição das alternativas e dos critérios, nessa pesquisa, optou-se pela participação dos decisores somente na avaliação das alternativas e dos critérios.

## 5.2 Definição das Alternativas

Como já explicitado no Capítulo 2 deste trabalho, existem diversas fontes renováveis de energia, entretanto, este estudo se ateve somente àquelas que já possuem um uso extensivo e figuram com uma participação minimamente significativa na matriz elétrica do país. Dessa forma, as fontes a serem avaliadas e que, portanto, servem como alternativas na implementação do método proposto são:

- A1: Solar Fotovoltaica;
- A2: Eólica;
- A3: Biomassa;
- A4: Hidrelétrica.

Essas alternativas serão avaliadas por meio da implementação do F-PROMÉTHÉE GDSS. Para tal avaliação, serão utilizados os critérios pré-definidos apresentados na seção seguinte e, além destes critérios pré-definidos, será permitido aos decisores a inclusão de novos, caso julguem necessário.

## 5.3 Definição dos Critérios

No Capítulo 4 foi discutida a utilização do Apoio Multicritério à Decisão para problemas no setor energético, incluindo avaliação de fontes de geração. Foram apresentados os principais critérios utilizados nesses estudos. Para escolha dos critérios utilizados neste estudo realizou-se uma revisão bibliográfica sobre energia e a análise de estudos similares a este, selecionando-se sete critérios que fossem capazes de mensurar e descrever diferentes aspectos e dimensões relacionados às diferentes tecnologias de geração e à produção energética na região. São estes:

C1 - Disponibilidade: este critério avalia se uma fonte de energia está disponível no momento que se deseja. Está relacionada à intermitência de alguns recursos naturais e, portanto, à estabilidade da produção energética. Sistemas de produção de energia fotovoltaica e eólica, por exemplo, tendem a ter um menor índice de disponibilidade, dado a alta variabilidade das fontes primárias de energia e a impossibilidade de armazenamento dessas [5]. Critério de Maximização.

C2 - Eficiência: representa o quanto de energia útil pode ser obtida de uma fonte. É a relação entre energia de entrada e saída. Altos índices de eficiência se relacionam a uma maior confiabilidade do sistema e a menores custos de produção [108]. Critério de Maximização.

C3 - Maturidade tecnológica: representa o grau de maturidade da tecnologia de geração. Sistemas hidrelétricos, por exemplo, possuem uma tecnologia consolidada e altamente utilizada por muitos anos, representando um alto grau de maturidade. Já a produção de eletricidade, em larga escala, a partir de outras fontes como a solar e eólica, ainda são consideradas tecnologias em desenvolvimento e ascensão [5, 108]. Critério de Maximização.

C4 - Adequação ao Local: avalia o quanto uma determinada fonte de energia se mostra adequada ao local de implantação. Logicamente, a produção de hidroeletricidade demandaria um local com alto potencial hidráulico, bem como sistemas fotovoltaicos teriam a prioridade em regiões com altos índices de radiação solar. A utilização de sistemas eólicos também pede condições específicas de vento, e o uso de biomassa seria pertinente em regiões de fácil obtenção da fonte primária de energia utilizada. Critério de Maximização.

C5 - Investimento: esse critério econômico inclui os custos de compra de equipamentos mecânicos, construção de linhas de transmissão, desenvolvimento de toda a infraestrutura necessária em geral para o início do funcionamento de empreendimento energético [5, 108]. Critério de Minimização.

C6 - Custos de Manutenção e Operação: representa todos os gastos feitos com produtos, serviços e programas de manutenção preventiva e corretiva, de modo a assegurar o devido funcionamento de um empreendimento energético [5]. Critério de Minimização.

C7 - Poluição e Outros Impactos Negativos: engloba todos os tipos de poluição que pode ser gerada por um empreendimento: emissão de poluentes, poluição sonora, poluição visual, etc e outros efeitos negativos causados em uma comunidade pela implementação de um projeto energético. Critério de Minimização.

C8 - Geração de Empregos: avalia o potencial da estimulação do mercado de trabalho provocado por uma determinada tecnologia de geração, direta ou indiretamente [5, 104]. Critério de Maximização.

Ressalta-se que esses critérios são uma pré-seleção. Os avaliadores poderão decidir quais utilizar dentre esses e também poderão inserir novos critérios.

## 5.4 Coleta de Dados

Como já dito anteriormente, para a coleta de dados, fez-se uso de questionário. O questionário se caracteriza por ser um instrumento de coleta de dados que possui perguntas a serem respondidas de forma escrita sem a presença do entrevistador. O questionário possui algumas vantagens como economia de tempo; respostas mais rápidas e precisas; não influência do pesquisador; instrumento de coleta impessoal; maior abrangência geográfica; entre outras [75].

Nesse trabalho, o questionário utilizado (Apêndice A) foi composto de cinco perguntas mistas (múltipla escolha e aberta), no qual era pedido a avaliação dos critérios e, posteriormente, das tecnologias de geração.

Para a definição do peso dos critérios fez-se uso do método *direct rating* ou valoração direta, no qual pede-se ao decisor para atribuir o valor de 100 pontos ao critério de maior importância, e aos demais, são designados valores sempre menores, pensando na importância relativa ao primeiro e no poder discriminatório da escala do critério avaliado. Esses valores são então normalizados para serem utilizados na implementação do método [42, 46].

Fazendo uso de uma escala do tipo Likert – escala psicométrica utilizada para representar a atitude/opinião do entrevistado em relação a um item – com cinco pontos [70], conforme Tabela 5.1, solicitou-se que o decisor emitisse seu julgamento das alternativas com relação aos critérios. Nesse mesmo questionário, também foi permitido ao decisor inserir novos critérios e/ou excluir alguns dos propostos, caso julgasse necessário, caracterizando a parte aberta do questionário.

Escala Verbal	Correspondência Numérica	Correspondência <i>Fuzzy</i>
MB - Muito Baixo (a)	1	$(1 ; 0,5 ; 0,5)_{LR}$
B - Baixo (a)	2	$(2 ; 0,5 ; 0,5)_{LR}$
Me - Médio (a)	3	$(3 ; 0,5 ; 0,5)_{LR}$
A - Alto(a)	4	$(4 ; 0,5 ; 0,5)_{LR}$
MA - Muito Alto (a)	5	$(5 ; 0,5 ; 0,5)_{LR}$

Tabela 5.1: Escala de Julgamentos Proposta. Fonte: Autora

Essa combinação de perguntas de múltipla escolha com respostas abertas permite a coleta de mais informações sobre o assunto, em um mesmo instrumento de coleta [75].

A escala *fuzzy* descrita pode ser representada pela Figura 5.1. Nota-se que essa é formada acrescentando-se um intervalo *fuzzy* esquerdo e direito de valor 0,5 para os julgamentos realizados. Dessa forma, sendo  $(m ; \alpha ; \beta)_{LR}$  um número *fuzzy* que represente o julgamento do decisor, tem-se  $\alpha = \beta = 0,5$ ,  $(m ; 0,5 ; 0,5)_{LR}$ .

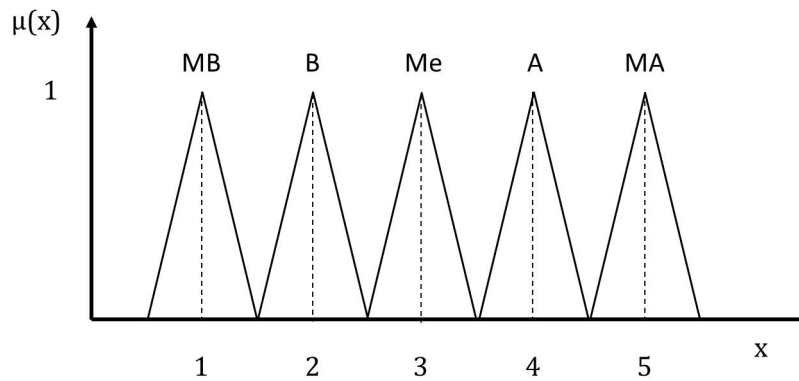


Figura 5.1: Representação da Escala Utilizada. Fonte: Autora

Com relação aos pesos dos decisores, optou-se por considerar todos com o mesmo peso e, posteriormente, avaliar o impacto da alteração destes por meio de uma análise de sensibilidade. Para tal, adotou-se os procedimentos descritos por Mareschal em [76].

O questionário descrito foi enviado para um conjunto de profissionais com envolvimento no setor energético. Esses profissionais foram selecionados com base nas suas experiências na área, de modo a fornecerem uma contribuição significativa e coerente para a presente pesquisa.

## 5.5 Desenvolvimento de Algoritmo

Para a implementação do método utilizado nesse trabalho, F-PROMÉTHÉE GDSS, desenvolveu-se um algoritmo com o auxílio do *software* MATLAB<sup>®</sup> (Apêndice B). Objetivando comparar os resultados com e sem a utilização de números *fuzzy*, foram construídos dois algoritmos. Nessa seção será descrito o algoritmo de implementação do PROMÉTHÉE GDSS e posteriormente, serão discutidas as modificações realizadas para a incorporação das incertezas.

Além de executar a aplicação do PROMÉTHÉE GDSS, o algoritmo criado também realiza a execução do método PROMÉTHÉE II, como uma etapa intermediária. Desse modo, o algoritmo pode ser dividido em três principais partes: PROMÉTHÉE GDSS, PROMÉTHÉE II, Funções de preferências.

- PROMÉTHÉE GDSS: Essa parte corresponde ao código principal, no qual é realizada a leitura dos dados a partir de um arquivo na forma de planilha eletrônica. Nesse, cada planilha contém uma tabela resumizando os dados correspondentes a

avaliação de um decisor, conforme Tabela 5.2.

	Critério 1	Critério 2	Critério 3	...	Critério $n$
Tipo de Critério					
Peso do Critério					
MAX/MIN					
Limite de Preferência ( $p$ )/ $DP$					
Limite de Indiferença ( $q$ )					
Alternativa 1					
Alternativa 2					
Alternativa 3					
⋮					
Alternativa $m$					
<b>PESO DO DECISOR</b>					

Tabela 5.2: Modelo Tabela de Entrada de Dados. Fonte: Autora

Dessa forma, cada planilha é interpretada pelo código como um decisor, determinando, assim, a quantidade de vezes que o código para o PROMÉTHÉE II será executado. O comando de entrada de dados e execução do algoritmo é feito por meio de uma tela, conforme Figura 5.2.

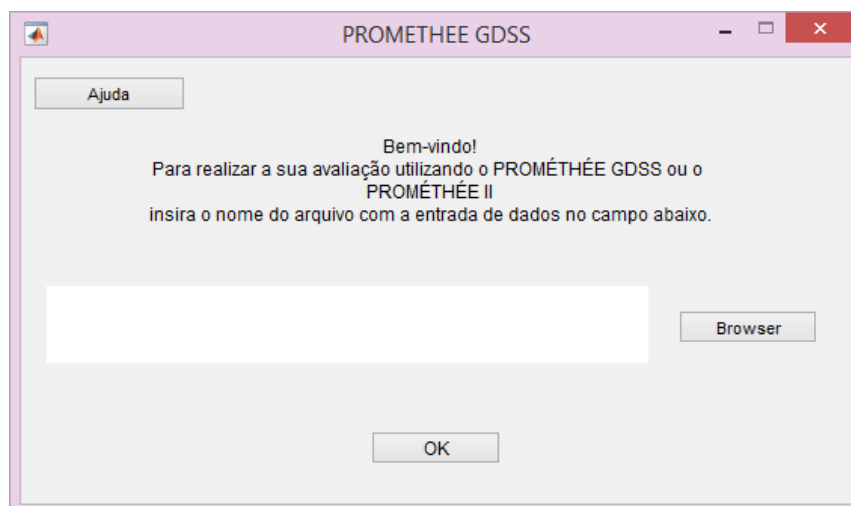


Figura 5.2: Tela Entrada do Arquivo com os Dados. Fonte: Autora

Após a execução do PROMÉTHÉE II, os valores dos fluxos líquidos encontrados por este são enviados para o código principal, onde serão agrupados por média ponderada, conforme propõe o método. Os fluxos são então ordenados por meio de algoritmo simples de ordenação, e os resultados são escritos no arquivo de dados. Todo esse processo é sumarizado pela Figura 5.3.

- PROMÉTHÉE II: Nessa parte do algoritmo, os dados lidos no código principal são separados e devidamente armazenados como os parâmetros do modelo (limites de preferência e indiferença, tipo de critério, pesos e julgamentos dos decisores). É

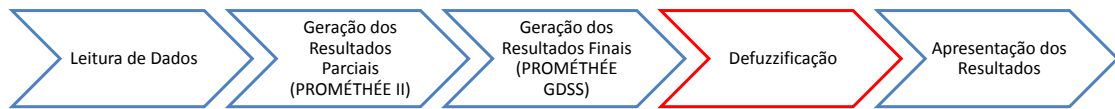


Figura 5.3: Processo Execução PROMÉTHÉE GDSS. Fonte: Autora

então analisado o tipo de critério e chamado o arquivo correspondente a cada tipo de função de preferência. Após, são calculados os índices de preferências e os fluxos. Nesse momento, caso haja somente um decisor, o código ordenará as alternativas e escreverá os resultados; caso contrário, o valor dos fluxos será enviado para o código principal (PROMÉTHÉE GDSS), e a decisão em grupo será executada, de acordo com o representado pela Figura 5.4.

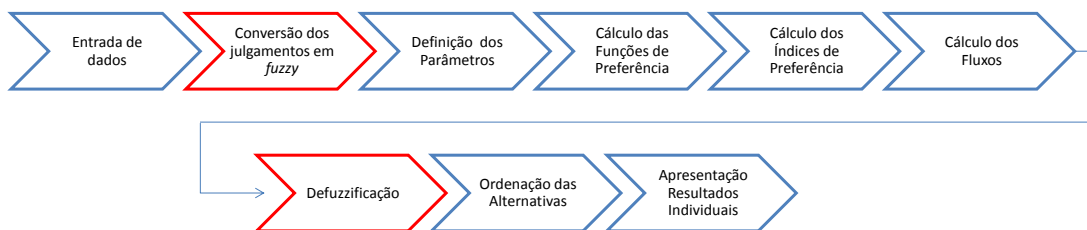


Figura 5.4: Processo Execução PROMÉTHÉE II. Fonte: Autora

- **Funções de Preferência:** As funções de preferência, apesar de distintas, possuem um algoritmo de cálculo similar. O código irá avaliar o objetivo do critério (maximização ou minimização), calcular a diferença entre duas alternativas e, então, determinar o valor da função de preferência e associá-lo a uma das alternativas comparadas. Ao final de todas as iterações, ter-se-á a matriz com os valores da função de preferência para um determinado critério que será retornada ao código PROMÉTHÉE II para prosseguimento dos cálculos. Esse processo está representado na Figura 5.5.



Figura 5.5: Processo Execução Função de Preferência. Fonte: Autora

Para inserir os números *fuzzy* nos cálculos foram feitas pequenas alterações no algoritmo descrito. Entre as mais relevantes estão:

- a conversão dos julgamentos em números *fuzzy* realizada dentro do código PROMÉTHÉE II, após a etapa de entrada de dados;
- a substituição das operações clássicas pelas operações *fuzzy*, descritas no Capítulo 3;
- processo de defuzzificação dos fluxos totais pelo Índice de Yager, realizado após a agregação desses no código PROMÉTHÉE GDSS.

Através dos algoritmos descritos, torna-se possível a fácil implementação dos métodos F-PROMÉTHÉE GDSS e PROMÉTHÉE GDSS.

# Capítulo 6

## Resultados e Discussão

De acordo com o descrito no Capítulo 5, fez-se a coleta de dados por meio de um questionário enviado a um conjunto de profissionais com envolvimento na área de energia. Dentre os profissionais pré-selecionados, quatro responderam o questionário, oferecendo suas contruições para essa pesquisa. O perfil dos respondentes é apresentado na Tabela 6.1.

<b>Decisor 1</b>	Engenheiro de produção civil e físico. Mestre e doutorando em Engenharia Ambiental. Atualmente, é Analista em Ciência e Tecnologia da Comissão Nacional de Energia Nuclear.
<b>Decisor 2</b>	Professor de Fundamentos de Engenharia Solar, Fundamentos de Energias Renováveis e Uso da Energia e Máquinas e Processos de Conversão de Energia. Desenvolve projetos de pesquisas com diversas empresas do setor energético como: Eletropaulo, Ipiranga, Vale, Comgas, Shell-BG, Petrobras e Ultragaz.
<b>Decisor 3</b>	Ph.D. em Política Energética. Atua em ensino, pesquisa e extensão nas áreas de planejamento energético e de mudanças climáticas. Foi membro do Painel Metodológico em Linhas de Base e Monitoramento do Mecanismo do Desenvolvimento Limpo das Nações Unidas.
<b>Decisor 4</b>	Possui experiência na área de Planejamento Energético e Ambiental. Atua nos temas: Mudanças Climáticas Globais, Mercado Internacional de Créditos de Carbono, Matriz Energética, Energias Renováveis, Eficiência Energética, Gases de Efeito Estufa, Desenvolvimento Sustentável no Brasil e no Mundo, Universalização do Acesso à Energia Elétrica, Petróleo, Gás Natural e Engenharia Ambiental. Integrante do Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas e do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas.

Tabela 6.1: Perfil dos Decisores

Aos decisores foi dada a opção de adicionar novos critérios caso julgassem necessário, porém nenhum acrescentou novos critérios. Além disso, nenhum dos decisores considerou algum dos critérios descritos como irrelevante, atribuindo peso zero.

As avaliações dos decisores encontram-se sumarizadas nas Tabelas 6.2 a 6.5.

	Peso do Critério	Solar Fotovoltaica	Eólica	Biomassa	Hidrelétrica
Disponibilidade	90	Alto	Médio	Alto	Muito Alto
Eficiência	100	Médio	Médio	Alto	Muito Alto
Maturidade Tecnológica	70	Médio	Médio	Alto	Muito Alto
Adequação ao Local	90	Alto	Médio	Alto	Muito Alto
Investimento	80	Alto	Médio	Médio	Muito Alto
Custo M&O	80	Baixo	Baixo	Médio	Muito Alto
Poluição e Outros Impactos	90	Baixo	Baixo	Médio	Baixo
Geração de Empregos	80	Médio	Baixo	Alto	Muito Alto

Tabela 6.2: Dados Coletados - Decisor 1

	Peso do Critério	Solar Fotovoltaica	Eólica	Biomassa	Hidrelétrica
Disponibilidade	70	Muito Alto	Baixo	Baixo	Baixo
Eficiência	90	Alto	Alto	Alto	Médio
Maturidade Tecnológica	90	Muito Alto	Muito Alto	Médio	Muito Alto
Adequação ao Local	80	Alto	Baixo	Muito Alto	Médio
Investimento	70	Baixo	Alto	Alto	Muito Alto
Custo M&O	35	Baixo	Médio	Alto	Alto
Poluição e Outros Impactos	20	Baixo	Baixo	Muito Baixo	Médio
Geração de Empregos	95	Médio	Médio	Alto	Alto

Tabela 6.3: Dados Coletados - Decisor 2

	Peso do Critério	Solar Fotovoltaica	Eólica	Biomassa	Hidrelétrica
Disponibilidade	80	Médio	Médio	Alto	Muito Alto
Eficiência	30	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Maturidade Tecnológica	40	Médio	Alto	Alto	Muito Alto
Adequação ao Local	60	Médio	Médio	Alto	Médio
Investimento	100	Alto	Baixo	Médio	Médio
Custo M&O	50	Muito Baixo	Muito Baixo	Médio	Muito Baixo
Poluição e Outros Impactos	70	Muito Baixo	Muito Baixo	Médio	Médio
Geração de Empregos	20	Baixo	Baixo	Alto	Baixo

Tabela 6.4: Dados Coletados - Decisor 3

	Peso do Critério	Solar Fotovoltaica	Eólica	Biomassa	Hidrelétrica
Disponibilidade	92	Alto	Muito Alto	Muito Alto	Alto
Eficiência	48	Médio	Alto	Alto	Alto
Maturidade Tecnológica	79	Baixo	Médio	Alto	Alto
Adequação ao Local	40	Médio	Alto	Alto	Médio
Investimento	46	Muito Alto	Médio	Médio	Médio
Custo M&O	48	Baixo	Baixo	Médio	Médio
Poluição e Outros Impactos	83	Baixo	Baixo	Alto	Alto
Geração de Empregos	42	Baixo	Baixo	Médio	Médio

Tabela 6.5: Dados Coletados - Decisor 4

Com base nesses dados realizou-se a implementação do método proposto, utilizando duas funções de preferência: Pseudocritério com Preferência Linear (Tipo III) e Linear com Área de Indiferença (Tipo V), descritas no Capítulo 4. Os dois tipos de funções admitem um aumento linear da preferência do decisor, de acordo com a diferença entre duas alternativas. As duas se diferem pela presença do limite de indiferença, enquanto a primeira admite que qualquer diferença entre duas alternativas é suficiente para dizer que uma alternativa é preferível a outra (em determinado grau), a segunda assume a existência de um valor  $q$  para o qual duas alternativas podem ser consideradas indiferentes. Devido à escala utilizada para coleta de dados e a formulação do problema utilizou-se  $p = 3$  e  $q = 0,99$ .

A seguir encontram-se os resultados obtidos para cada um dos casos analisados.

## 6.1 Primeiro Cenário: Função de Preferência Pseudocritério com Preferência Linear

Com a aplicação dessa função de preferência, utilizando  $p = 3$ , os resultados obtidos com e sem a utilização de números *fuzzy* foram iguais, conforme mostrado na Tabela 6.6. Esses resultados mostram-se alinhados com o conhecimento que se tem, de forma geral, sobre essas formas de geração.

Ranking	Fluxo Total
Hidrelétrica	0,0192
Biomassa	0,0166
Eólica	-0,0135
Solar Fotovoltaica	-0,0223

Tabela 6.6: Resultado Função de Preferência Pseudocritério com Preferência Linear. Fonte: Autora

Na Tabela 6.7 são apresentados os resultados individuais para cada um dos quatro decisores.

Decisor 1		Decisor 2		Decisor 3		Decisor 4	
Ranking	Fluxo Total	Ranking	Fluxo Total	Ranking	Fluxo Total	Ranking	Fluxo Total
Hidrelétrica	0,1797	Solar Fotovoltaica	0,3101	Hidrelétrica	0,1136	Eólica	0,1555
Biomassa	0,0490	Biomassa	-0,0172	Eólica	0,0938	Biomassa	0,0690
Solar Fotovoltaica	-0,0556	Eólica	-0,1303	Biomassa	-0,0346	Hidrelétrica	-0,0537
Eólica	-0,1732	Hidrelétrica	-0,1626	Solar Fotovoltaica	-0,1728	Solar Fotovoltaica	-0,1709

Tabela 6.7: Resultados Função de Preferência Pseudocritério com Preferência Linear. Fonte: Autora

Na Figura 6.1, pode-se observar melhor os *rankings* obtidos.

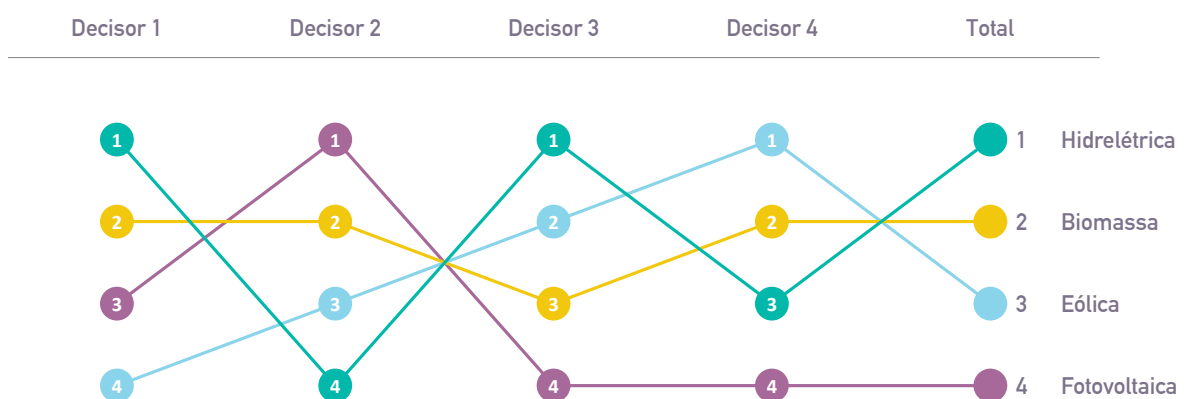


Figura 6.1: *Ranking* Função de Preferência Pseudocritério com Preferência Linear. Fonte: Autora

Observa-se que para dois dos decisores, 1 e 3, a alternativa Hidrelétrica mostra-se como a melhor opção, contribuindo para o seu lugar de destaque no *ranking*. Conforme

pode ser visto na Tabela 6.2, para o Decisor 1 a alternativa Hidrelétrica possui um bom desempenho na maioria dos critérios, apresentando algum grau de superação das demais alternativas em 5 dos 8 critérios considerados, incluindo os de maiores pesos. Para o Decisor 3 a geração Hidrelétrica apresenta um melhor desempenho em alguns critérios em relação às outras, o suficiente para colocá-la à frente das outras alternativas, porém com um valor de fluxo total relativamente próximo ao da segunda colocada no *ranking*, a energia Eólica, diferentemente do caso do Decisor 1.

Nota-se também que o *ranking* final obtido não se iguala a nenhum dos resultados dos decisores, destacando o papel da decisão em grupo na agregação de preferências individuais. Para melhor entender a influência de cada um dos decisores nos resultados, realizou-se uma análise sensibilidade dos pesos dos decisores, de modo a determinar os intervalos de estabilidade total do *ranking* obtido. Os resultados são mostrados na Tabela 6.8. Lembra-se que para os cálculos considerou-se todos os decisores com o mesmo peso.

Decisor	Intervalo de Estabilidade Total (valores normalizados)
Decisor 1	0,2344 – 0,3019
Decisor 2	0,0000 – 0,2635
Decisor 3	0,2362 – 0,2646
Decisor 4	0,2294 – 0,2660

Tabela 6.8: Intervalos Estabilidade - Função de Preferência Pseudocritério com Preferência Linear. Fonte: Autora

Nota-se na Tabela 6.8 e nas Figuras 6.2 a 6.5 que os intervalos de estabilidade para a solução obtida com esse método são, em geral, estreitos; especialmente no caso dos decisores 3 e 4, conforme pode ser observado nas Figuras 6.4 e 6.5, respectivamente. Esse fato indica que pequenas variações nos pesos dos decisores podem alterar o *ranking* obtido. No caso específico desses decisores, um pequeno acréscimo ou redução dos pesos poderia favorecer a geração a partir da Biomassa, por exemplo.

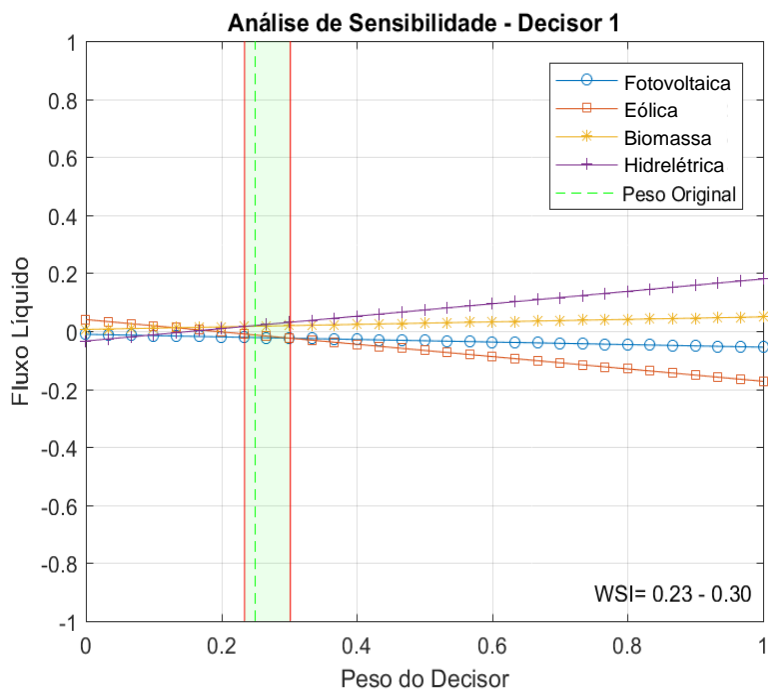


Figura 6.2: Análise de Sensibilidade Decisor 1. Função de Preferência Pseudocritério com Preferência Linear. Fonte: Autora

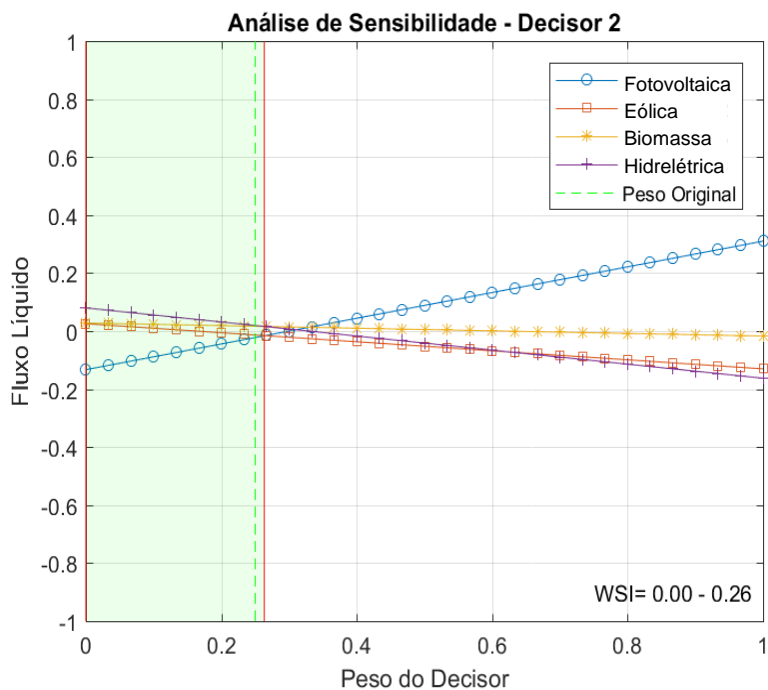


Figura 6.3: Análise de Sensibilidade Decisor 2. Função de Preferência Pseudocritério com Preferência Linear. Fonte: Autora

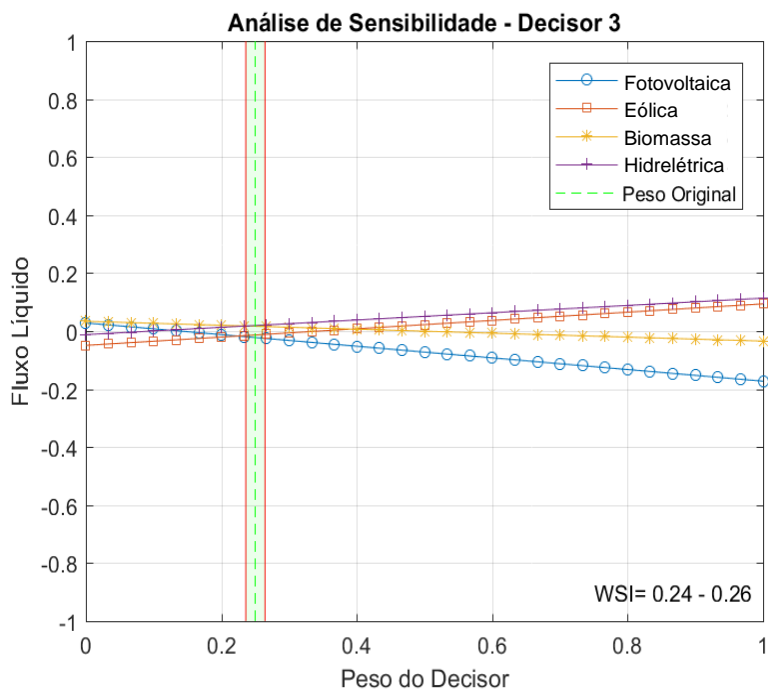


Figura 6.4: Análise de Sensibilidade Decisor 3. Função de Preferência Pseudocritério com Preferência Linear. Fonte: Autora

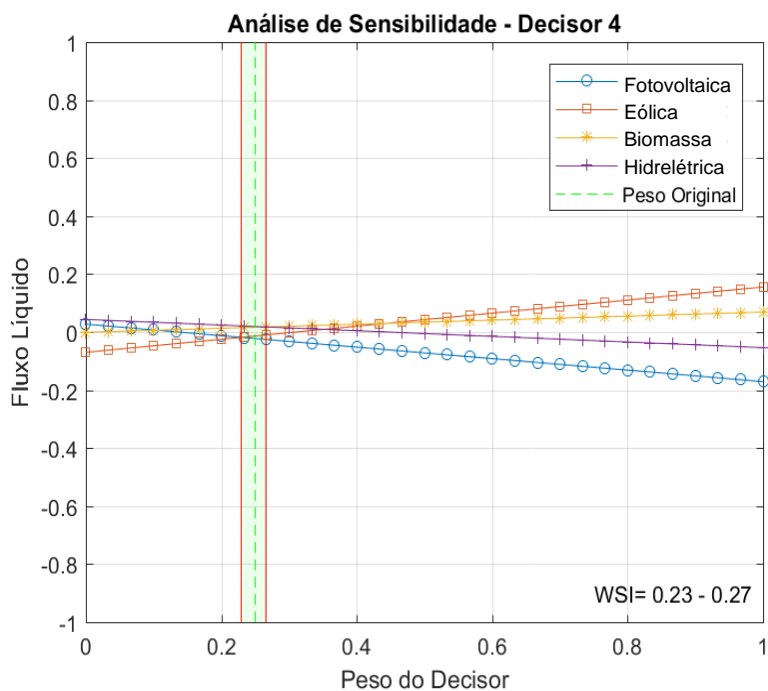


Figura 6.5: Análise de Sensibilidade Decisor 4. Função de Preferência Pseudocritério com Preferência Linear. Fonte: Autora

## 6.2 Segundo Cenário: Função de Preferência Linear com Área de Indiferença

Fazendo uso dessa função, para os parâmetros  $q = 0,99$  e  $p = 3$ , obteve-se os resultados mostrados na Tabela 6.9. Nota-se que, apesar do *ranking* obtido ser o mesmo com ou sem a utilização de números *fuzzy*, os valores dos fluxos totais são levemente diferentes, demonstrando uma influência da consideração das incertezas nos julgamentos. Em ambos os casos pode-se dizer que tem-se duas “boas” alternativas (fluxo total positivo).

F-PROMÉTHÉE GDSS		PROMÉTHÉE GDSS	
Ranking	Fluxo Total	Ranking	Fluxo Total
Solar Fotovoltaica	0,0414	Solar Fotovoltaica	0,0405
Hidrelétrica	0,0009	Hidrelétrica	0,0010
Eólica	-0,0154	Eólica	-0,0154
Biomassa	-0,0268	Biomassa	-0,0261

Tabela 6.9: Resultados Função de Preferência Linear com Área de Indiferença. Fonte: Autora

Focando somente no método PROMÉTHÉE GDSS, tem-se os resultados individuais apresentados na Tabela 6.10.

Realizando uma comparação com o caso anterior, observa-se que uma redução significativa nos fluxos nas primeiras colocadas individuais (com exceção do Decisor 2) devido à inserção de  $q$ , que contribui para tornar as alternativas mais próximas entre elas. Há também um ganho de fluxo da alternativa Fotovoltaica na avaliação do Decisor 3, subindo da quarta para a terceira posição. Observando o *ranking* para o Decisor 2, nota-se que para este, a alternativa Fotovoltaica permanece como a melhor opção e com um fluxo significativamente maior que os das demais alternativas. Esse fluxo mais alto pode ser justificado pelo bom desempenho em critérios como Disponibilidade e Investimento em comparação às outras alternativas, conforme os julgamentos apresentados na Tabela 6.3.

Decisor 1		Decisor 2		Decisor 3		Decisor 4	
Ranking	Fluxo Total	Ranking	Fluxo Total	Ranking	Fluxo Total	Ranking	Fluxo Total
Biomassa	0,0587	Solar Fotovoltaica	0,2852	Hidrelétrica	0,0674	Eólica	0,0751
Hidrelétrica	0,0510	Biomassa	-0,0764	Eólica	0,0598	Biomassa	-0,0131
Solar Fotovoltaica	-0,0226	Hidrelétrica	-0,0994	Solar Fotovoltaica	-0,0537	Hidrelétrica	-0,0149
Eólica	-0,0871	Eólica	-0,1094	Biomassa	-0,0735	Solar Fotovoltaica	-0,0472

Tabela 6.10: Resultados PROMÉTHÉE GDSS - Função de Preferência Linear com Área de Indiferença. Fonte: Autora

Na Figura 6.6 tem-se a ilustração do *ranking* obtido com esse método.

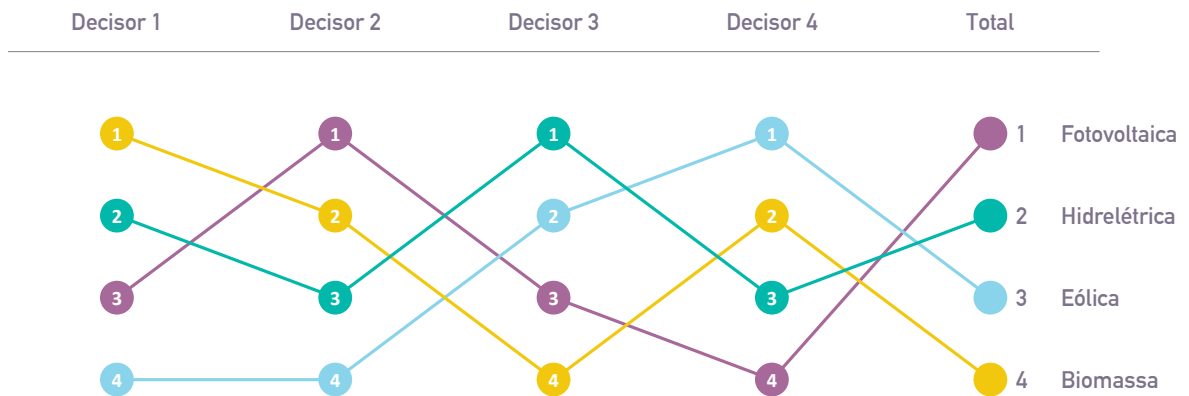


Figura 6.6: *Ranking* PROMÉTHÉE GDSS - Função de Preferência Linear com Área de Indiferença. Fonte: Autora

Realizando novamente uma análise de sensibilidade, observa-se que, nesse caso, os intervalos de estabilidade obtidos são maiores e mais próximos entre si, indicando uma influência mais igualitária entre os decisores e uma maior estabilidade da solução encontrada. Esses intervalos de estabilidade são apresentados na Tabela 6.11.

Decisor	Intervalo de Estabilidade Total (valores normalizados)
Decisor 1	0,1489 – 0,3011
Decisor 2	0,1643 – 0,4330
Decisor 3	0,1848 – 0,4344
Decisor 4	0,1468 – 0,3656

Tabela 6.11: Intervalos Estabilidade PROMÉTHÉE GDSS - Função de Preferência Linear com Área de Indiferença. Fonte: Autora

Destaca-se que esses resultados foram obtidos a partir da análise da estabilidade total do *ranking*, considerando uma estabilidade parcial, focando somente nas primeiras colocações, teriam-se intervalos maiores, conforme pode ser observado nas Figuras 6.7 a 6.10. Através dessa análise de sensibilidade, nota-se mais claramente que o Decisor 2 tem um papel significativo na boa colocação da energia Solar Fotovoltaica no *ranking*, uma vez que pode ser observado que mesmo sem a participação de algum dos demais decisores, essa ainda ocuparia o primeiro lugar, com um fluxo total ainda maior.

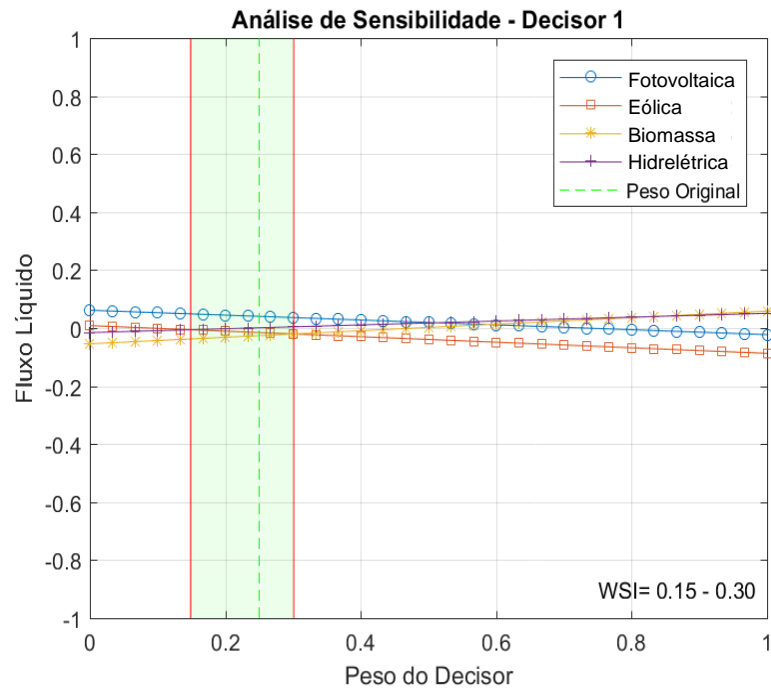


Figura 6.7: Análise de Sensibilidade Decisor 1. PROMÉTHÉE GDSS - Função de Preferência Linear com Área de Indiferença. Fonte: Autora

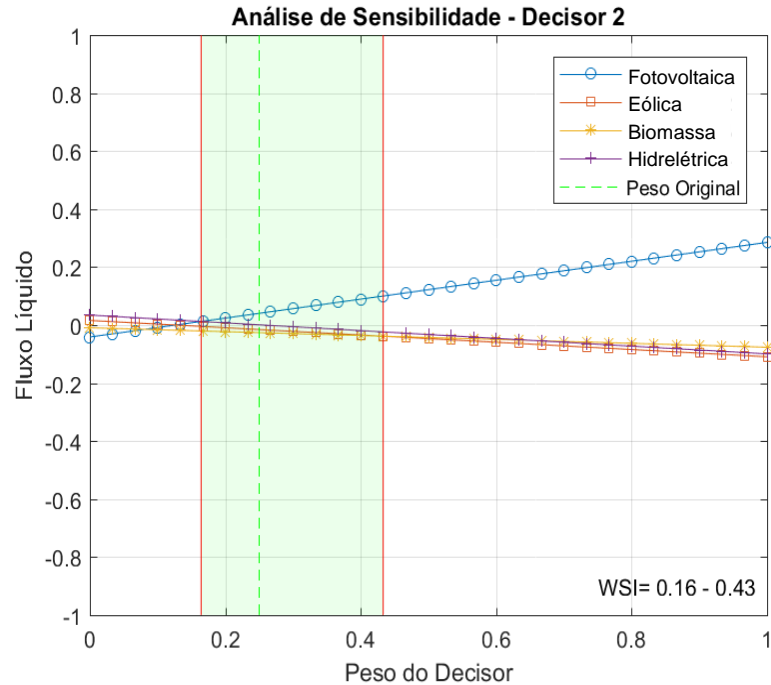


Figura 6.8: Análise de Sensibilidade Decisor 2. PROMÉTHÉE GDSS - Função de Preferência Linear com Área de Indiferença. Fonte: Autora

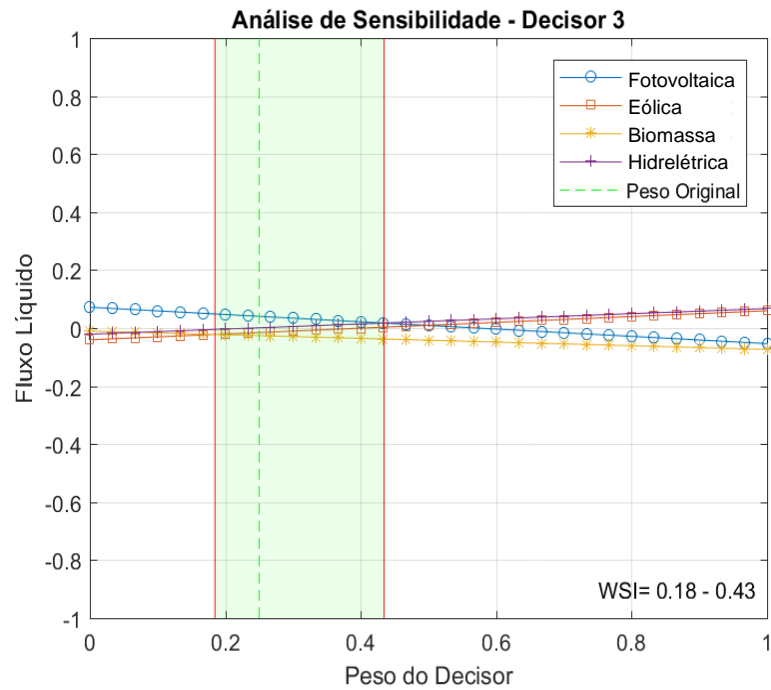


Figura 6.9: Análise de Sensibilidade Decisor 3. PROMÉTHÉE GDSS - Função de Preferência Linear com Área de Indiferença. Fonte: Autora

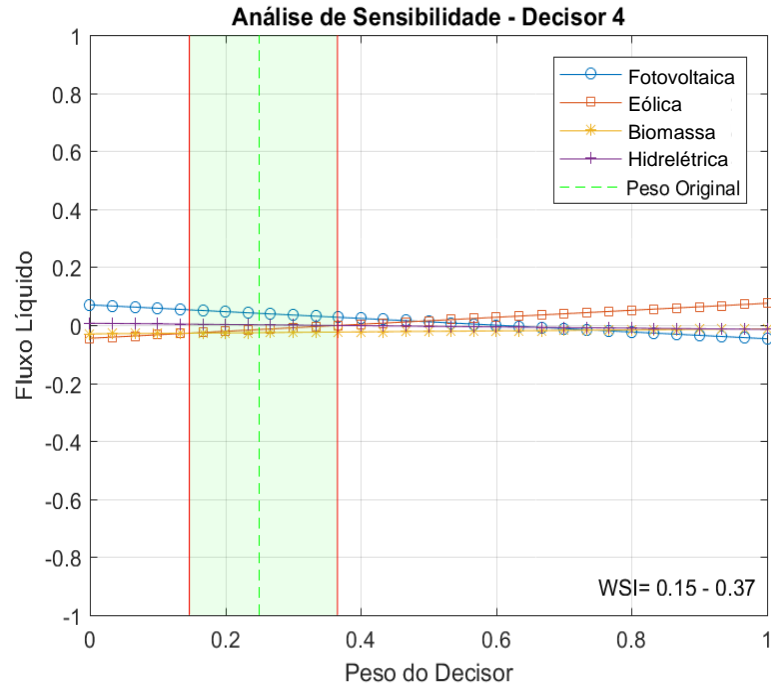


Figura 6.10: Análise de Sensibilidade Decisor 4. PROMÉTHÉE GDSS - Função de Preferência Linear com Área de Indiferença. Fonte: Autora

Os resultados individuais para a aplicação do F-PROMÉTHÉE GDSS são apresentados na Tabela 6.12.

Decisor 1		Decisor 2		Decisor 3		Decisor 4	
Ranking	Fluxo Total	Ranking	Fluxo Total	Ranking	Fluxo Total	Ranking	Fluxo Total
Biomassa	0,0591	Solar Fotovoltaica	0,2854	Hidrelétrica	0,0669	Eólica	0,0743
Hidrelétrica	0,0495	Biomassa	-0,0777	Eólica	0,0596	Biomassa	-0,0144
Solar Fotovoltaica	-0,0224	Hidrelétrica	-0,0986	Solar Fotovoltaica	-0,0520	Hidrelétrica	-0,0144
Eólica	-0,0862	Eólica	-0,1092	Biomassa	-0,0744	Solar Fotovoltaica	-0,0456

Tabela 6.12: Resultados F-PROMÉTHÉE GDSS - Função de Preferência Linear com Área de Indiferença. Fonte: Autora

A ordem individual das alternativas é a mesma encontrada com o método PROMÉTHÉE GDSS, com pequenas variações nos fluxos, similarmente ao observado no *ranking* total, para o grupo de decisores. Essas diferenças também são perceptíveis nos intervalos de estabilidade obtidos para essa solução, conforme Tabela 6.13.

Decisor	Intervalo de Estabilidade Total (valores normalizados)
Decisor 1	0,1480 – 0,3048
Decisor 2	0,1615 – 0,4501
Decisor 3	0,1799 – 0,4406
Decisor 4	0,1387 – 0,3661

Tabela 6.13: Intervalos Estabilidade F-PROMÉTHÉE GDSS - Função de Preferência Linear com Área de Indiferença. Fonte: Autora

Observando os dados da Tabela 6.13 e as Figuras 6.11 a 6.14, nota-se maiores intervalos de estabilidade nesse caso.

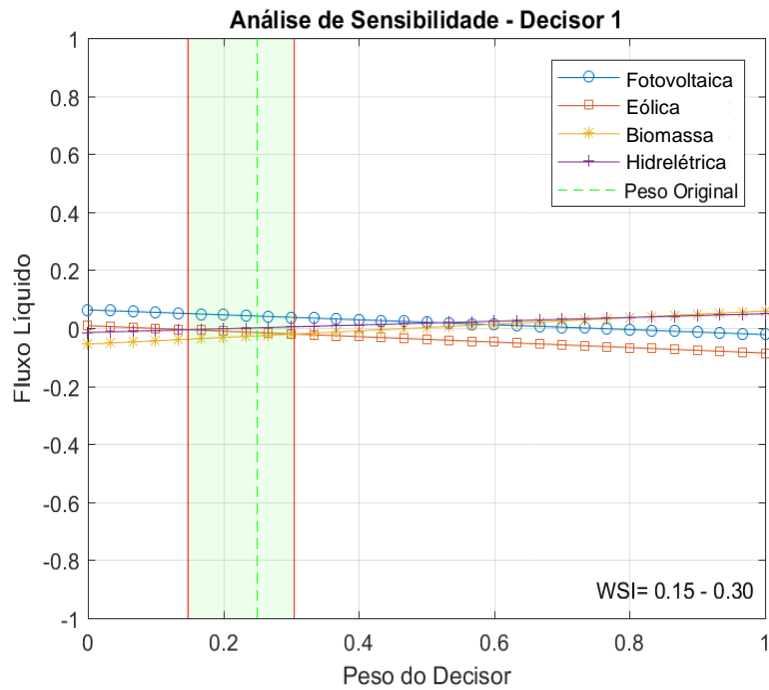


Figura 6.11: Análise de Sensibilidade Decisor 1. F-PROMÉTHÉE GDSS - Função de Preferência Linear com Área de Indiferença. Fonte: Autora

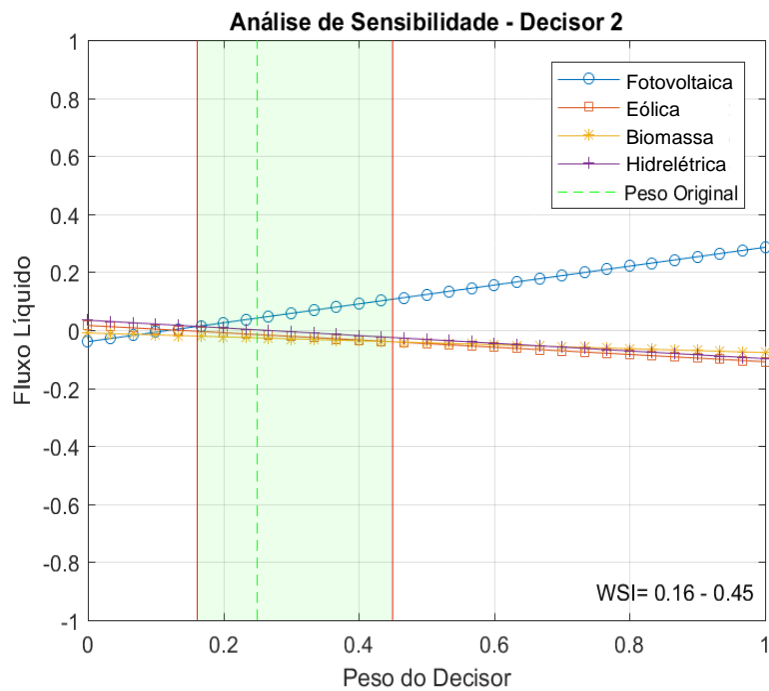


Figura 6.12: Análise de Sensibilidade Decisor 2. F-PROMÉTHÉE GDSS - Função de Preferência Linear com Área de Indiferença. Fonte: Autora

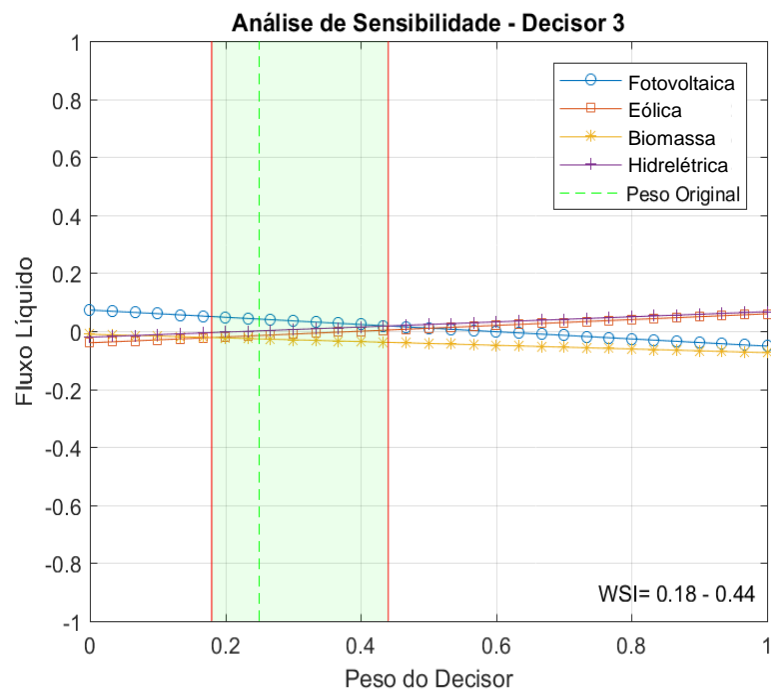


Figura 6.13: Análise de Sensibilidade Decisor 3. F-PROMÉTHÉE GDSS - Função de Preferência Linear com Área de Indiferença. Fonte: Autora

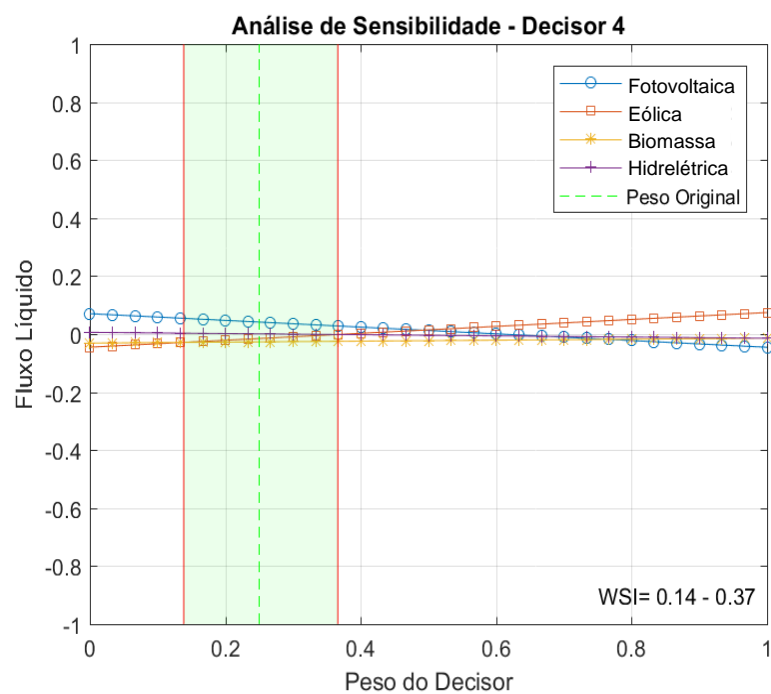


Figura 6.14: Análise de Sensibilidade Decisor 4. F-PROMÉTHÉE GDSS - Função de Preferência Linear com Área de Indiferença. Fonte: Autora

Em uma última consideração, alterou-se levemente os valores de intervalo dos números *fuzzy*, fazendo  $\alpha = \beta = 0,6$  e aplicou-se, novamente, a Função de Preferência Pseudocritério com Preferência Linear. Os resultados são apresentados na Tabela 6.14.

Ranking	Fluxo Total
Solar Fotovoltaica	0,0361
Hidrelétrica	0,0269
Eólica	-0,0081
Biomassa	-0,0549

Tabela 6.14: Resultado Função de Preferência Pseudocritério com Preferência Linear com  $\alpha = \beta = 0,6$ . Fonte: Autora

Nesse caso, em comparação com os resultados da Tabela 6.6, observa-se que essa alteração nos intervalos *fuzzy* provoca uma mudança significativa no *ranking* obtido para a mesma função de preferência. A primeira colocação do *ranking*, anteriormente ocupada pela geração Hidrelétrica, concede lugar à Fotovoltaica. Observa-se também que, para esse caso, a energia Eólica passa à frente da Biomassa. Assim, nota-se que com um maior grau de incerteza inserido nos cálculos, a energia Solar Fotovoltaica também se mostra como uma melhor opção para a Função de Preferência Pseudocritério com Preferência Linear. Observa-se que para esses valores de intervalo *fuzzy*, o *ranking* obtido é similar ao encontrado com a Função de Preferência Linear com Área de Indiferença, conforme mostrado na Tabela 6.9.

Na Tabela 6.15 são apresentados os resultados individuais para cada decisor.

Decisor 1		Decisor 2		Decisor 3		Decisor 4	
Ranking	Fluxo Total	Ranking	Fluxo Total	Ranking	Fluxo Total	Ranking	Fluxo Total
Hidrelétrica	0,1373	Solar Fotovoltaica	0,4000	Eólica	0,1185	Eólica	0,1478
Biomassa	0,1176	Hidrelétrica	-0,1121	Hidrelétrica	0,1111	Biomassa	-0,0286
Solar Fotovoltaica	-0,0833	Eólica	-0,1273	Solar Fotovoltaica	-0,0815	Hidrelétrica	-0,0286
Eólica	-0,1716	Biomassa	-0,1606	Biomassa	-0,1481	Solar Fotovoltaica	-0,0907

Tabela 6.15: Resultados F-PROMÉTHÉE GDSS - Função de Preferência Pseudocritério com Preferência Linear com  $\alpha = \beta = 0,6$ . Fonte: Autora

Na Figura 6.15, pode-se observar melhor o comportamento dos *rankings* obtidos.

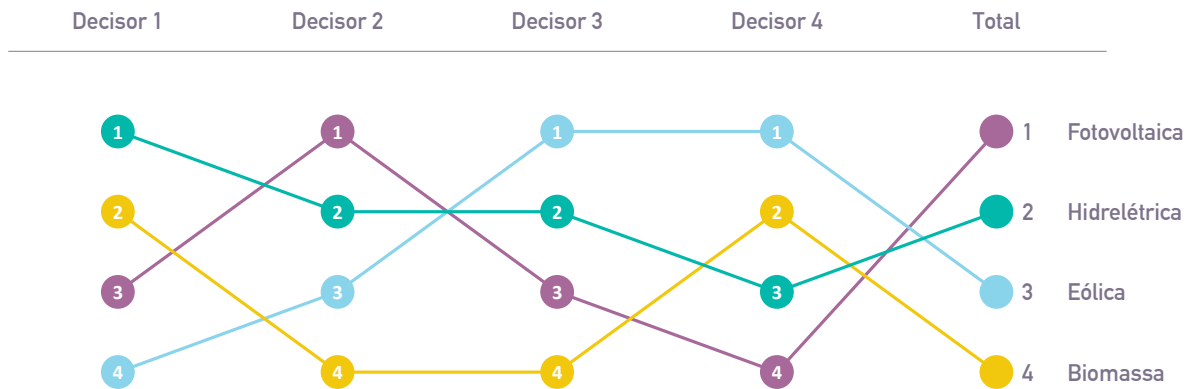


Figura 6.15: *Ranking* F-PROMÉTHÉE GDSS - Função de Preferência Pseudocritério com Preferência Linear com  $\alpha = \beta = 0,6$ . Fonte: Autora

Pode-se notar um aumento do fluxo total da alternativa Fotovoltaica para o Decisor 2, bem como uma redução nos fluxos da alternativa Hidrelétrica para os decisores 1 e 3, contribuindo para a mudança na ordem obtida no primeiro cenário analisado. Nota-se também que, apesar de um *ranking* final igual ao encontrado para a Função de Preferência Linear com Área de Indiferença, os resultados individuais se diferem.

Na Tabela 6.16 encontram-se os intervalos de estabilidade para a solução obtida nesse caso.

Decisor	Intervalo de Estabilidade Total (valores normalizados)
Decisor 1	0,1540 – 0,2801
Decisor 2	0,2363 – 1,0000
Decisor 3	0,0903 – 0,2843
Decisor 4	0,0000 – 0,3470

Tabela 6.16: Intervalos Estabilidade F-PROMÉTHÉE GDSS - Função de Preferência Pseudocritério com Preferência Linear com  $\alpha = \beta = 0,6$ . Fonte: Autora

Observando a Tabela 6.16 e as Figuras 6.16 a 6.19 e fazendo um comparativo com os resultados da Tabela 6.8, nota-se que o *ranking* obtido com  $\alpha = \beta = 0,6$  tem maiores intervalos de estabilidade, indicando uma solução mais estável e, portanto, menos susceptíveis às variações nos pesos dos decisores.

Dessa forma, pode-se argumentar que a presença de um grau de aceitação (limite de indiferença) ou a consideração da existência de incertezas nos dados (números *fuzzy*), em determinado grau, tornam as alternativas mais “próximas”, nesse caso, favorecendo formas de geração que poderiam não serem consideradas como a melhor opção. Ressalta-se que o uso de números *fuzzy* se mostra coerente e pertinente, uma vez que existem diversas fontes de incerteza presentes no processo decisório.

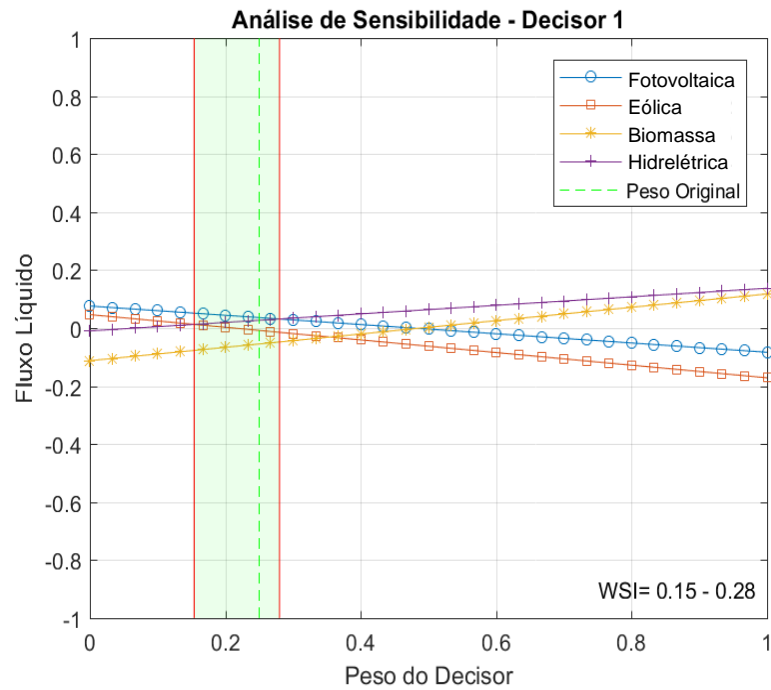


Figura 6.16: Análise de Sensibilidade Decisor 1. F-PROMÉTHÉE GDSS - Função de Preferência Pseudocritério com Preferência Linear com  $\alpha = \beta = 0,6$ . Fonte: Autora

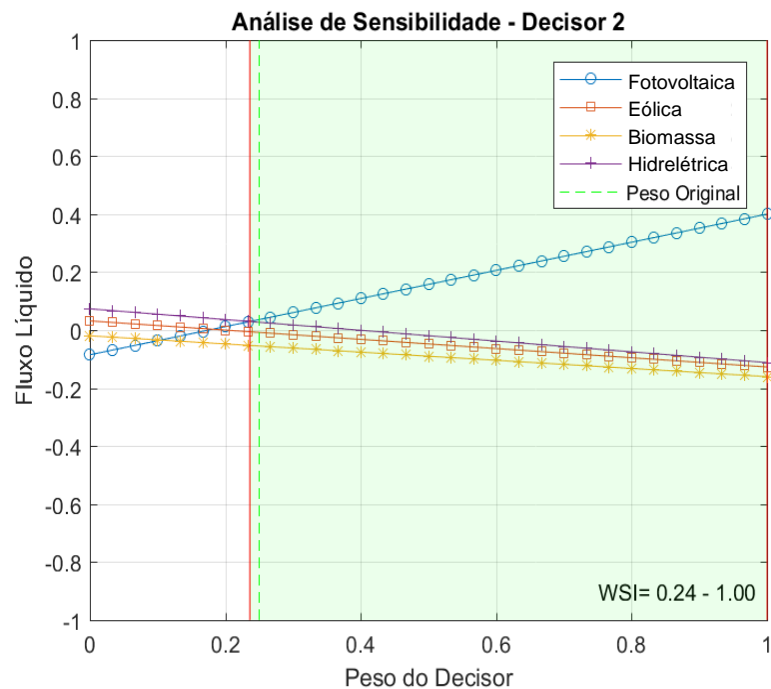


Figura 6.17: Análise de Sensibilidade Decisor 2. F-PROMÉTHÉE GDSS - Função de Preferência Pseudocritério com Preferência Linear com  $\alpha = \beta = 0,6$ . Fonte: Autora

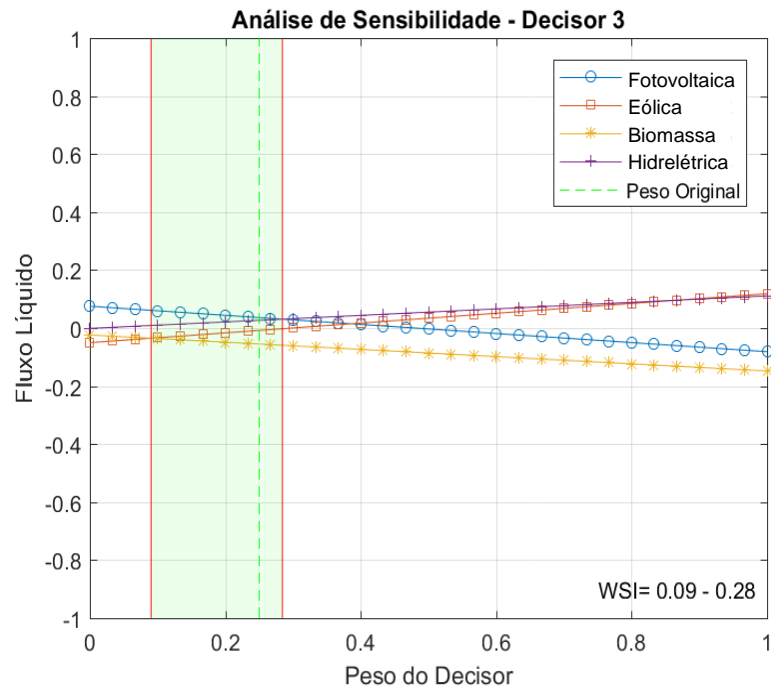


Figura 6.18: Análise de Sensibilidade Decisor 3. F-PROMÉTHÉE GDSS - Função de Preferência Pseudocritério com Preferência Linear com  $\alpha = \beta = 0,6$ . Fonte: Autora

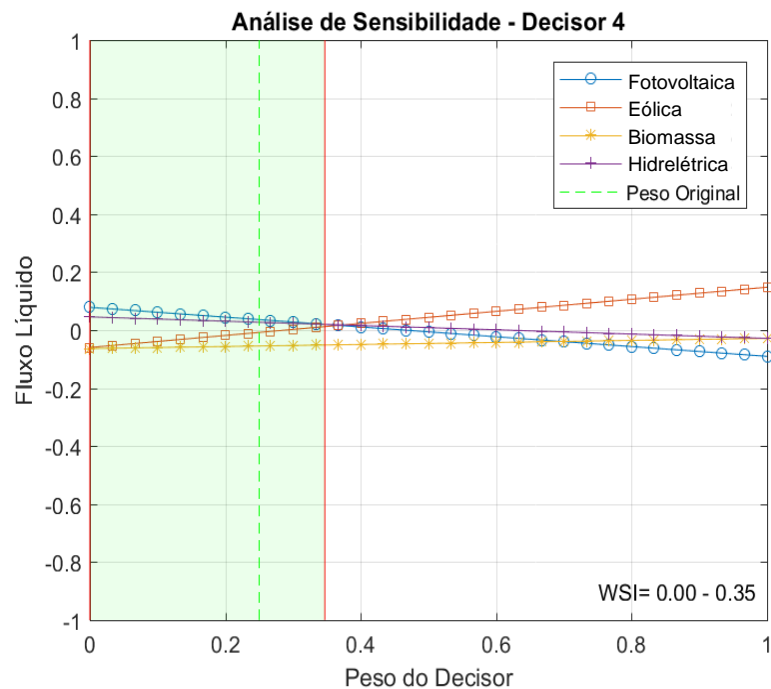


Figura 6.19: Análise de Sensibilidade Decisor 4. F-PROMÉTHÉE GDSS - Função de Preferência Pseudocritério com Preferência Linear com  $\alpha = \beta = 0,6$ . Fonte: Autora

# Capítulo 7

## Conclusão

Sabe-se que a energia é um tema recorrente em muitas pesquisas, devido a sua grande importância, pois a energia é base do desenvolvimento industrial e social. Em um cenário de avaliação de diferentes fontes de energia renováveis muitos são os critérios conflitantes de avaliação dessas, assim, a necessidade de uma metodologia que possibilite a incorporação em seu modelo matemático desses diferentes critérios justifica o emprego do Apoio Multicritério à Decisão. O Apoio Multicritério à Decisão é amplamente utilizado nos mais variados tipos de problemas, fornecendo um suporte científico para a tomada de decisão que, por diversas vezes, envolve critérios conflitantes, dados imprecisos e difíceis de quantificar. A complexidade do problema e a característica de incerteza/imprecisão dos dados coletados demandam uma abordagem que busque tratar esses fatores, como a decisão em grupo e o conjunto de números *fuzzy*.

Ao longo dessa pesquisa identificaram-se as principais formas de geração de energia a partir de fontes renováveis presentes no mercado e suas características, bem como suas participações na matriz elétrica nacional e no sudeste brasileiro. Buscou-se também pesquisar sobre o Apoio Multicritério à Decisão, seus métodos e suas contribuições no setor energético e, por meio de uma revisão de literatura elegeu-se o método PROMÉTHÉE como base para esse estudo. O método PROMÉTHÉE é apontado como um dos métodos de apoio multicritério à decisão mais utilizados em pesquisas do setor energético. Dessa forma, buscou-se construir um modelo capaz de lidar com todas as peculiaridades do problema apresentado, capaz de incorporar as incertezas inerentes ao processo decisório, bem como, hábil para lidar com as diferentes perspectivas sobre um mesmo tema. Os cálculos foram implementados por meio de algoritmo desenvolvido com auxílio do *software* MATLAB®.

Com as implementações realizadas e os cenários avaliados, obtiveram-se resultados

contraintuitivos, ao menos a princípio, considerando o conhecimento que se tem sobre as diferentes formas de geração. Em três das cinco situações analisadas a primeira colocação do *ranking* gerado foi ocupada pela energia Solar Fotovoltaica, seguida pela Hidrelétrica. Observa-se que enquanto a última parece uma solução natural para o problema, a primeira ganha destaque quando são considerados no método a existência de incertezas e/ou a admissão de uma certa tolerância para a diferença entre as alternativas. Esse resultado indica que a geração Fotovoltaica, apesar de pouco explorada no sudeste brasileiro, pode ser uma alternativa interessante de investimento no setor energético da região.

Esses resultados, diferentes daquilo que poderia ser esperado, ressaltam a importância de um modelo que considere imprecisões e que agregue diferentes observações sobre o mesmo problema, bem como auxilia a mostrar a importância do uso de métodos que fornecem um suporte à decisão.

Dessa forma, conclui-se que os objetivos dessa pesquisa foram atingidos, uma vez que se propôs um modelo de Apoio Multicritério à Decisão adequado ao problema apresentado, no qual foi possível observar os impactos e as variações nos resultados obtidos conforme as premissas que foram feitas.

Assim, nota-se a complexidade e, portanto, a importância do desenvolvimento de pesquisas na área de energia, de modo a propor soluções para os problemas típicos dessa área, lidando com as peculiaridades e dificuldades associadas a estas. Também se faz interessante citar que apesar da presente pesquisa se tratar de um problema dentro do setor energético, os métodos de AMD têm sido aplicados nas mais diferentes áreas e as considerações aqui feitas podem ser aplicadas e estendidas para essas, buscando-se modelos cada vez mais robustos.

Por último, ressalta-se que os resultados dessa pesquisa estão sujeitos aos parâmetros e características do método utilizado e, também, aos dados coletados.

## 7.1 Sugestões de Trabalhos Futuros

O trabalho desenvolvido considerou somente como fonte de incerteza os julgamentos fornecidos pelos decisores, tornando esses números *fuzzy*. Entretanto, existem outras fontes de incerteza que podem surgir no processo decisório como, por exemplo, os pesos atribuídos aos critérios e, no caso específico, nos parâmetros do método PROMÉTHÉE ( $p$  e  $q$ ). Dessa forma, poderiam ser desenvolvidas novas pesquisas considerando essas fontes de imprecisão, bem como outros métodos para a consideração dessas.

Sugere-se também a implementação de outros métodos AMD de sobreclassificação, avaliando o impacto de diferentes abordagens nos resultados obtidos.

# Referências

- [1] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Atlas de Energia Elétrica do Brasil. Relatório Técnico 2, ANEEL, Brasília, 2005.
- [2] AL GARNI, H., KASSEM, A., AWASTHI, A., KOMLJENOVIC, D., AL-HADDAD, K. A multicriteria decision making approach for evaluating renewable power generation sources in Saudi Arabia. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 16 (2016), 137–150.
- [3] AL GARNI, H. Z., AWASTHI, A. Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia. *Applied Energy* 206, September (2017), 1225–1240.
- [4] ALONSO, M., GARCIA, F., SILVA, J. *Energia Solar Fotovoltaica*. ONUDI - Programa de Capacitação em Energias Renováveis, 2013.
- [5] ANTUNES, C. H., HENRIQUES, C. O. *Multi-Objective Optimization and Multi-Criteria Analysis Models and Methods for Problems in the Energy Sector*. Springer New York, New York, NY, 2016, p. 1067–1165.
- [6] ARAGONÉS-BELTRÁN, P., CHAPARRO-GONZÁLEZ, F., PASTOR-FERRANDO, J. P., PLA-RUBIO, A. An AHP (Analytic Hierarchy Process)/ANP (Analytic Network Process)-based multi-criteria decision approach for the selection of solar-thermal power plant investment projects. *Energy* 66 (2014), 222–238.
- [7] ASAKEREH, A., SOLEYMANI, M., SHEIKHDAVOODI, M. J. A GIS-based Fuzzy-AHP method for the evaluation of solar farms locations: Case study in Khuzestan province, Iran. *Solar Energy* 155 (2017), 342–353.
- [8] AWASTHI, A., GOVINDAN, K., GOLD, S. Multi-tier sustainable global supplier selection using a fuzzy AHP-VIKOR based approach. *International Journal of Production Economics* 195 (jan 2018), 106–117.
- [9] BANA E COSTA, C. A., VANSNICK, J.-C. MACBETH — An interactive path towards the construction of cardinal value functions. *International Transactions in Operational Research* 1, 4 (1994), 489–500.
- [10] BANCO DE INFORMAÇÕES DE GERAÇÃO DA ANEEL. Capacidade Instalada por Estado. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/ResumoEstadual/resumoestadual.cfm>. Acesso em: 11 julho 2018.
- [11] BANCO DE INFORMAÇÕES DE GERAÇÃO DA ANEEL. Fontes de Energia. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/Combustivel.cfm>. Acesso em: 11 julho 2018.

- [12] BEUTHE, M., SCANNELLA, G. Comparative analysis of UTA multicriteria methods. *European Journal of Operational Research* 130, 2 (2001), 246–262.
- [13] BRANS, J.-P. L'ingénierie de la décision; Elaboration d'instruments d'aide à la décision. La méthode PROMETHEE. Em *L'aide à la décision: Nature, Instruments et Perspectives d'Avenir* (Québec, 1982), Presses de l'Université Laval.
- [14] BRANS, J.-P., DE SMET, Y. *PROMETHEE Methods*. Springer New York, New York, NY, 2016, p. 187–219.
- [15] BRANS, J. P., MARESCHAL, B. Promethee V: Mcdm Problems With Segmentation Constraints. *INFOR: Information Systems and Operational Research* 30, 2 (may 1992), 85–96.
- [16] BRANS, J.-P., MARESCHAL, B. The PROMETHEE VI procedure: how to differentiate hard from soft multicriteria problems. *Journal of Decision Systems* 4, 3 (jan 1995), 213–223.
- [17] BRANS, J. P., VINCKE, P. A Preference Ranking Organisation Method (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making). *Management Science* 31, 6 (1985), 647–656.
- [18] BRASIL. Lei nº 10.438 de 26 de abril de 2002, 2002.
- [19] BRITISH PETROLEUM. BP Statistical Review of World Energy. Relatório Técnico, BP, London, 2018.
- [20] BÜYÜKÖZKAN, G., KARABULUT, Y. Energy project performance evaluation with sustainability perspective. *Energy* 119 (2017), 549–560.
- [21] CAMPOS, A. C. S. M., MARESCHAL, B., DE ALMEIDA, A. T. Fuzzy FlowSort: An integration of the FlowSort method and Fuzzy Set Theory for decision making on the basis of inaccurate quantitative data. *Information Sciences* 293 (2015), 115–124.
- [22] DA SILVA, C. A., RANGEL, L. A. D., NEVES, T. A., GOMES, L. F. A. M. Utilização do Método TODIM-FSE para Classificação de Base Logística de Brigada. Em *Anais do XVII Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha* (São Paulo, aug 2014), Editora Edgard Blücher, p. 419–430.
- [23] DE ALMEIDA, A. T. *Processo de Decisão nas Organizações: Construindo Modelos de Decisão Multicritério*, 1 ed. Atlas, São Paulo, 2013.
- [24] DE ALMEIDA, A. T., MORAIS, D. C., COSTA, A. P. C. S., ALENCAR, L. H., DAHER, S. D. F. D. *Decisão Em Grupo e Negociação: Métodos e Aplicações*, 1 ed. Atlas, São Paulo, 2012.
- [25] DE MACEDO, P. P., MOTA, C. M. D. 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* 41, June (2018), 822–832.

- [26] DHOUB, D. Fuzzy Macbeth method to analyze alternatives in automobile tire wastes reverse logistics. Em *2013 International Conference on Advanced Logistics and Transport* (may 2013), vol. 42, IEEE, p. 321–326.
- [27] DO AMARANTE, O. A. C., ZACK, J., BROWER, M., DE SÁ, A. L. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. Relatório Técnico, Ministério de Minas e Energia, Brasília, 2001.
- [28] DOS SANTOS, L., RIBEIRO, L. G. M., RANGEL, L. A. D. Avaliação de fontes renováveis de energia utilizando o Apoio Multicritério à Decisão. Em *Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia* (Resende, 2017).
- [29] DUBOIS, D., PRADE, H. Fuzzy real algebra: some results. *Fuzzy Sets and Systems* 2, 4 (1979), 327–348.
- [30] DUBOIS, D., PRADE, H. *Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications*. Academic Press, New York, 1980.
- [31] EFE, B. An integrated fuzzy multi criteria group decision making approach for ERP system selection. *Applied Soft Computing Journal* 38 (2016), 106–117.
- [32] EHRLICH, R., GELLER, H. A. *Renewable Energy: A First Course*, 2 ed. CRC Press, 2017.
- [33] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Plano Nacional de Energia 2030. Relatório Técnico, Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, 2007.
- [34] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional 2017: Ano base 2016. Relatório Técnico, Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, 2017.
- [35] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético nacional 2017: Ano base 2016, Relatório Síntese. Relatório Técnico, Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, 2017.
- [36] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. BEN - Séries Históricas Completas. Relatório Técnico, EPE, Rio de Janeiro, 2018.
- [37] ENEL. Enel inicia construção no Brasil da maior usina de energia solar da América Latina. Disponível em: <https://www.enel.com.br/pr/midia/press/d201703-enel-inicia-construo-no-brasil-da-maior-usina-de-energia-solar-da-amrica-latina.html>. Acesso em: 23 abril 2018.
- [38] ENEL. Enel inicia operação no Brasil dos dois maiores parques solares da América do Sul. Disponível em: <https://www.enel.com.br/pr/midia/press/d201709-enel-inicia-operacao-no-brasil-dos-dois-maiores-parques-solares-da-america-do-sul.html>. Acesso em: 23 abril 2018.
- [39] GAGATSI, E., GIANNOPOULOS, G., AIFANTOPOULOU, G., CHARALAMPOUS, G. Stakeholders-based multi-criteria policy analysis in maritime transport: From theory to practice. *Transportation Research Procedia* 22 (2017), 655–664.

- [40] GELDERMANN, J., SPENGLER, T., RENTZ, O. Fuzzy outranking for environmental assessment. Case study: iron and steel making industry. *Fuzzy Sets and Systems* 115, 1 (2000), 45–65.
- [41] GIL, A. C. *Como Elaborar Projetos de Pesquisa*, 4 ed. Atlas, São Paulo, 2002.
- [42] GOMES, L. F. A. M., ARAYA, M. C. G., CARIGNANO, C. *Tomada de Decisões em Cenários Complexos: Introdução aos Métodos Discretos do Apoio Multicritério à Decisão*. Cengage Learning, São Paulo, 2011.
- [43] GOMES, L. F. A. M., LIMA, M. M. P. P. TODIM: Basics and application to multicriteria ranking of projects with environmental impacts. *Foundations of Computing and Decision Sciences* 16 (1991), 113–127.
- [44] GOMES, L. F. A. M., RANGEL, L. A. D. An application of the TODIM method to the multicriteria rental evaluation of residential properties. *European Journal of Operational Research* 193, 1 (2009), 204–211.
- [45] GOMES, L. F. A. M., RANGEL, L. A. D. Determining the utility functions of criteria used in the evaluation of real estate. *International Journal of Production Economics* 117, 2 (2009), 420–426.
- [46] GOODWIN, P., WRIGHT, G. *Decision Analysis for Management Judgment*, 3 ed., vol. 49. John Wiley & Sons, 2004.
- [47] GOUMAS, M., LYGEROU, V. An extension of the PROMETHEE method for decision making in fuzzy environment: Ranking of alternative energy exploitation projects. *European Journal of Operational Research* 123 (2000), 606–613.
- [48] GRÁGEDA, M., ESCUDERO, M., ALAVIA, W., USHAK, S., FTHENAKIS, V. Review and multi-criteria assessment of solar energy projects in Chile. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 59 (2016), 583–596.
- [49] GUPTA, R., SACHDEVA, A., BHARDWAJ, A. Selection of logistic service provider using fuzzy PROMETHEE for a cement industry. *Journal of Manufacturing Technology Management* 23, 7 (sep 2012), 899–921.
- [50] HASHEMIAN, S. M., BEHZADIAN, M., SAMIZADEH, R., IGNATIUS, J. A fuzzy hybrid group decision support system approach for the supplier evaluation process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 73, 5-8 (jul 2014), 1105–1117.
- [51] HINRICHS, R. A., KLEINBACH, M., DOS REIS, L. B. *Energia e Meio Ambiente*, 5 ed. Cengage Learning, São Paulo, 2015.
- [52] HWANG, C.-L., YOON, K. *Multiple Attribute Decision Making*, vol. 186 em *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1981.
- [53] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Global Energy and CO2 Status Report - 2017. Relatório Técnico, IEA, 2018.

- [54] INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Renewable Energy Statistics 2017. Relatório Técnico, IRENA, Abu Dhabi, 2017.
- [55] JACQUET-LAGREZE, E., SISKOS, J. Assessing a set of additive utility functions for multicriteria decision-making, the UTA method. *European Journal of Operational Research* 10, 2 (jun 1982), 151–164.
- [56] KABAK, M., DAĞDEVIREN, M. Prioritization of renewable energy sources for Turkey by using a hybrid MCDM methodology. *Energy Conversion and Management* 79 (mar 2014), 25–33.
- [57] KAHNEMAN, D., TVERSKY, A. Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk. *Econometrica* 47, 2 (mar 1979).
- [58] KAHRAMAN, C., KAYA, H. A fuzzy multicriteria methodology for selection among energy alternatives. *Expert Systems with Applications* 37, 9 (sep 2010), 6270–6281.
- [59] KAILIPONI, P. Analyzing evacuation decisions using multi-attribute utility theory (MAUT). *Procedia Engineering* 3 (2010), 163–174.
- [60] KALTSCHMITT, M., STREICHER, W., WIESE, A. *Renewable Energy*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [61] KAYA, T., KAHRAMAN, C. Multicriteria renewable energy planning using an integrated fuzzy VIKOR & AHP methodology: The case of Istanbul. *Energy* 35, 6 (jun 2010), 2517–2527.
- [62] KAYA, T., KAHRAMAN, C. Multicriteria decision making in energy planning using a modified fuzzy TOPSIS methodology. *Expert Systems with Applications* 38, 6 (2011), 6577–6585.
- [63] KEENEY, R. L., RAIFFA, H. *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs*. Cambridge University Press, 1993.
- [64] KILGOUR, D. M., CHEN, Y., HIPEL, K. W. *Multiple Criteria Approaches to Group Decision and Negotiation*. Springer US, Boston, MA, 2010, cap. 11, p. 317–338.
- [65] KUMAR, A., SAH, B., SINGH, A. R., DENG, Y., HE, X., KUMAR, P., BANSAL, R. C. A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 69, June 2016 (2017), 596–609.
- [66] ŁASKA, G. Wind Energy and Multi-criteria Analysis in Making Decisions on the Location of Wind Farms. *Procedia Engineering* 182 (2017), 418–424.
- [67] LAVOIE, R., DESLANDES, J., PROULX, F. Assessing the ecological value of wetlands using the MACBETH approach in Quebec City. *Journal for Nature Conservation* 30 (2016), 67–75.
- [68] LEE, N. C., LEAL, V., DIAS, L. C. Identification of objectives for national energy planning in developing countries. *Energy Strategy Reviews* 21, in print (2018), 218–232.

- [69] LEWIS, L. F. *Group Support Systems: Overview and Guided Tour*. Springer Netherlands, Dordrecht, 2010, p. 249–268.
- [70] LIKERT, R. A technique for the measurement of attitudes. *Archives of Psychology* 140 (1932), 1–55.
- [71] LØKEN, E. Use of multicriteria decision analysis methods for energy planning problems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11, 7 (2007), 1584–1595.
- [72] LOLLI, F., ISHIZAKA, A., GAMBERINI, R., RIMINI, B., BALUGANI, E., PRANDINI, L. Requalifying public buildings and utilities using a group decision support system. *Journal of Cleaner Production* 164 (2017), 1081–1092.
- [73] LOPES, M. R. C. M. *Uso Das Metodologias Promethee E F-Promethee Na Avaliação De Clientes*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2005.
- [74] MACHARIS, C., BRANS, J., MARESCHAL, B. The GDSS PROMETHEE procedure - A PROMETHEE-GAIA based procedure for group decision support. *Journal of Decision Systems* 7 (1998), 283–307.
- [75] MARCONI, M. D. A., LAKATOS, E. M. *Fundamentos de metodologia científica*, 5 ed. Atlas, São Paulo, 2003.
- [76] MARESCHAL, B. Weight stability intervals in multicriteria decision aid. *European Journal of Operational Research* 33 (1988), 54–64.
- [77] MARESCHAL, B., BRANS, J. P. Geometrical representations for MCDA. *European Journal of Operational Research* 34, 1 (1988), 69–77.
- [78] MARESCHAL, B., BRANS, J.-P., VINCKE, P. PROMETHEE: a new family of outranking methods in multicriteria analysis. *Operational Research, IFORS* 84 84 (1984), 477–490.
- [79] MATEO, J. R. S. C. *The Renewable Energy Industry and the Need for a Multi-Criteria Analysis*. Springer London, London, 2012, p. 1–5.
- [80] MOSALAM, K. M., ALIBRANDI, U., LEE, H., ARMENGOU, J. Performance-based engineering and multi-criteria decision analysis for sustainable and resilient building design. *Structural Safety* 74, March (2018), 1–13.
- [81] MOTLAGH, S. M. H., BEHZADIAN, M., IGNATIUS, J., GOH, M., SEPEHRI, M. M., HUA, T. K. Fuzzy PROMETHEE GDSS for technical requirements ranking in HOQ. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 76, 9-12 (feb 2015), 1993–2002.
- [82] NEVES, A. R., LEAL, V., LOURENCO, J. C. A methodology for sustainable and inclusive local energy planning. *Sustainable Cities and Society* 17, 17 (2015), 110–121.
- [83] NEVES, L. P., MARTINS, A. G., ANTUNES, C. H., DIAS, L. C. A multi-criteria decision approach to sorting actions for promoting energy efficiency. *Energy Policy* 36, 7 (2008), 2351–2363.

- [84] PEREIRA, E. B., MARTINS, F. R., DE ABREU, S. L., RÜTHER, R. Atlas Brasileiro De Energia Solar. Relatório Técnico 1, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006.
- [85] POHEKAR, S. D., RAMACHANDRAN, M. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 8, 4 (2004), 365–381.
- [86] PROVDANOV, C. C., FREITAS, E. C. D. *Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico*, 2 ed. Feevale, Novo Hamburgo, 2013.
- [87] RANGEL, L. A. D., DA SILVA, S. S., SILVÉRIO, L. B. Avaliação de Imóveis Empregando o Método Todim. Em *Anais do IX Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha* (Rio de Janeiro, 2006), p. 146–156.
- [88] RANGEL, L. A. D., GOMES, L. F. A. M. O Apoio Multicritério à Decisão na avaliação de candidatos. *Production* 20, 1 (apr 2010), 92–101.
- [89] REN21. Renewables 2017 Global Status Report. Relatório Técnico, REN21 Secretariat, Paris, 2017.
- [90] REN21. Renewables 2018 Global Status Report. Relatório Técnico, REN21 Secretariat, Paris, 2018.
- [91] ROY, B. Classement et choix en présence de points de vue multiples. *Revue française d'informatique et de recherche opérationnelle* 2, 8 (1968), 57–75.
- [92] ROY, B. ELECTRE III: Un algorithme de classements fondé sur une représentation floue des préférences en présence de critères multiples. *Cahiers du Centre d'Etudes de Recherche Opérationnelle* 20 (1978), 3–24.
- [93] ROY, B., BERTIER, P. La méthode ELECTRE II: Une méthode de classement en présence de critères multiples. *SEMA (Metra International)* (1971).
- [94] ROY, B., BOUYSSOU, D. *Aide Multicritère à la Décision: Méthodes et Cas*. Economica, Paris, 1993.
- [95] ROY, B., HUGONNARD, J. C. Ranking of suburban line extension projects on the Paris metro system by a multicriteria method. *Transportation Research Part A: General* 16, 4 (1982), 301–312.
- [96] ROY, B., SKALKA, J. ELECTRE IS: Aspéctos metodológicos et guide d'utilisation. *Cahier du LAMSADE* (1985).
- [97] SAATY, T. *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill, New York, 1980.
- [98] SALO, A., HÄMÄLÄINEN, R. P. *Multicriteria Decision Analysis in Group Decision Processes*. Springer Netherlands, Dordrecht, 2010, p. 269–283.
- [99] SEDDIKI, M., ANOUCHE, K., BENNADJI, A., BOATENG, P. A multi-criteria group decision-making method for the thermal renovation of masonry buildings: The case of Algeria. *Energy and Buildings* 129 (2016), 471–483.

- [100] SLOGERIENE, J., TURSKIS, Z., STREIMIKIENE, D. Analysis and Choice of Energy Generation Technologies: The Multiple Criteria Assessment on the Case Study of Lithuania. *Energy Procedia* 32 (2013), 11–20.
- [101] SØRENSEN, B. *Renewable Energy: Its physics, engineering, environmental impacts, economics & planning*, 3 ed. Academic Press, 2004.
- [102] STEIN, E. W. A comprehensive multi-criteria model to rank electric energy production technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 22 (2013), 640–654.
- [103] STREIMIKIENE, D., BALEZENTIS, T., KRISCIUKAITIEN, I. Prioritizing sustainable electricity production technologies : MCDM approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012), 3302–3311.
- [104] TASRI, A., SUSILAWATI, A. Selection among renewable energy alternatives based on a fuzzy analytic hierarchy process in Indonesia. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 7 (2014), 34–44.
- [105] TROLDORG, M., HESLOP, S., HOUGH, R. L. Assessing the sustainability of renewable energy technologies using multi-criteria analysis: Suitability of approach for national-scale assessments and associated uncertainties. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39 (nov 2014), 1173–1184.
- [106] TSOUTSOS, T., DRANDAKI, M., FRANTZESKAKI, N., IOSIFIDIS, E., KIOSSES, I. Sustainable energy planning by using multi-criteria analysis application in the island of Crete. *Energy Policy* 37, 5 (2009), 1587–1600.
- [107] VERLINDE, S., MACHARIS, C. Who is in Favor of off-hour Deliveries to Brussels Supermarkets? Applying Multi Actor Multi Criteria Analysis (MAMCA) to Measure Stakeholder Support. *Transportation Research Procedia* 12, June 2015 (2016), 522–532.
- [108] WANG, J. J., JING, Y. Y., ZHANG, C. F., ZHAO, J. H. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, 9 (2009), 2263–2278.
- [109] WIBOWO, S., DENG, H. Multi-criteria group decision making for evaluating the performance of e-waste recycling programs under uncertainty. *Waste Management* 40 (jun 2015), 127–135.
- [110] WIERZBICKI, A. P. *Group Decisions and Negotiations in the Knowledge Civilization Era*. Springer Netherlands, Dordrecht, 2010, p. 11–24.
- [111] WORLD ENERGY COUNCIL. World Energy Resources. Relatório Técnico, World Energy Council, London, 2016.
- [112] WORLD ENERGY COUNCIL. World Energy Trilemma Index | 2017 MONITORING THE SUSTAINABILITY OF NATIONAL ENERGY SYSTEMS. Relatório Técnico, WEC, London, 2017.
- [113] YAGER, R. R. A procedure for ordering fuzzy subsets of the unit interval. *Information Sciences* 24, 2 (1981), 143–161.

- 
- [114] YILMAZ, B., DAĞDEVİREN, M. A combined approach for equipment selection: F-PROMETHEE method and zero-one goal programming. *Expert Systems with Applications* 38, 9 (sep 2011), 11641–11650.
- [115] YIN, R. K. *Estudo de caso: planejamento e métodos*, 2 ed. Bookman, Porto Alegre, 2001.
- [116] YU, W. *ELECTRE TRI: Aspects méthodologiques et manuel d'utilisation*. PhD thesis, Université de Paris–Dauphine, 1992.
- [117] ZADEH, L. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I. *Information Sciences* 8, 3 (jan 1975), 199–249.
- [118] ZADEH, L. A. Fuzzy Sets \*. *Information and Control* 8 (1965), 338–353.

## APÊNDICE A - Questionário

## **Questionário para Avaliação de Fontes de Energia Renováveis no Sudeste Brasileiro**

Esse questionário visa auxiliar em uma pesquisa sobre a avaliação de fontes de energia renováveis para geração de eletricidade no sudeste brasileiro utilizando o Apoio Multicritério à Decisão. As fontes de energia consideradas nessa pesquisa serão: Solar Fotovoltaica, Eólica, Hidráulica e Biomassa, que já figuram na matriz elétrica do país. Para tal avaliação serão considerados alguns critérios.

### ***Descrição dos Critérios***

C1 - Disponibilidade: este critério avalia se uma fonte de energia está disponível no momento que se deseja. Está relacionada à intermitência de alguns recursos naturais e, portanto, à estabilidade da produção energética.

C2 - Eficiência: representa o quanto de energia útil pode ser obtida de uma fonte. É a relação entre energia de entrada e saída. Altos índices de eficiência se relacionam a uma maior confiabilidade do sistema e a menores custos de produção.

C3 - Maturidade tecnológica: representa o grau de maturidade/desenvolvimento da tecnologia de geração.

C4 - Adequação ao Local: avalia o quanto uma determinada fonte de energia se mostra adequada ao local de implantação. No caso dessa pesquisa a Região Sudeste do Brasil.

C5 - Investimento: esse critério econômico inclui os custos de compra de equipamentos mecânicos, construção de linhas de transmissão, desenvolvimento de toda a infraestrutura necessária em geral para o início do funcionamento do empreendimento energético.

C6 - Custos de Manutenção e Operação: representa todos os gastos feitos com produtos, serviços e programas de manutenção preventiva e corretiva, de modo a assegurar o devido funcionamento de um empreendimento energético.

C7 - Poluição e Outros Impactos Negativos: engloba todos os tipos de poluição que pode ser gerada por um empreendimento: emissão de poluentes, poluição sonora, poluição visual, etc e outros e outros efeitos negativos causados em uma comunidade pela implementação de um projeto energético.

C8 - Geração de Empregos: avalia o potencial da estimulação do mercado de trabalho provocado por uma determinada tecnologia de geração, direta ou indiretamente.

### **Pesos dos Critérios**

1. Com base na descrição dos critérios e em seus conhecimentos, algum deles não se mostra relevante para a avaliação? Caso positivo atribua valor 0 (zero).
2. Existe algum critério que você considere relevante para esse tipo de avaliação e que não se encontra listado? Caso positivo, inserir no campo "Outros".
3. Qual o critério de maior importância? Para esse atribua o valor 100. Dentre os restantes, qual tem mais importância? Para esse atribua um valor menor que 100, pensando na importância relativa ao primeiro e o poder discriminatório da escala do critério avaliado.  
Siga esse procedimento até que todos os critérios tenham valores atribuídos, com exceção daqueles que já receberam o valor 0, conforme o primeiro item.

<b>Critério</b>	<b>Valor (0 - 100)</b>
Disponibilidade	
Eficiência	
Maturidade Tecnológica	
Adequação ao Local	
Investimento	
Custo de Manutenção e Operação	
Poluição e Outros Impactos Negativos	
Geração de Empregos	
Outro 1:	
Outro 2:	

## **Avaliação das Alternativas**

Avalie o desempenho das alternativas de geração nos critérios descritos. Caso não tenha preenchido o campo outros, favor deixar em branco.

### **1. Energia Solar Fotovoltaica**

	<b>Muito Baixo (a)</b>	<b>Baixo (a)</b>	<b>Médio (a)</b>	<b>Alto (a)</b>	<b>Muito Alto (a)</b>
Disponibilidade	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Eficiência	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Maturidade Tecnológica	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Adequação ao Local	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Investimento	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Custo de Manutenção e Operação	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Poluição e Outros Impactos Negativos	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Geração de Empregos	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Outro 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Outro 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

### **2. Energia Eólica**

	<b>Muito Baixo (a)</b>	<b>Baixo (a)</b>	<b>Médio (a)</b>	<b>Alto (a)</b>	<b>Muito Alto (a)</b>
Disponibilidade	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Eficiência	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Maturidade Tecnológica	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Adequação ao Local	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Investimento	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Custo de Manutenção e Operação	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Poluição e Outros Impactos Negativos	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Geração de Empregos	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Outro 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Outro 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

### 3. Energia de Biomassa

	Muito Baixo (a)	Baixo (a)	Médio (a)	Alto (a)	Muito Alto (a)
Disponibilidade	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Eficiência	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Maturidade Tecnológica	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Adequação ao Local	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Investimento	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Custo de Manutenção e Operação	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Poluição e Outros Impactos Negativos	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Geração de Empregos	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Outro 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Outro 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

### 4. Energia Hidrelétrica

	Muito Baixo (a)	Baixo (a)	Médio (a)	Alto (a)	Muito Alto (a)
Disponibilidade	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Eficiência	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Maturidade Tecnológica	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Adequação ao Local	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Investimento	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Custo de Manutenção e Operação	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Poluição e Outros Impactos Negativos	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Geração de Empregos	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Outro 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Outro 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## APÊNDICE B - Códigos

## Algoritmo principal F-PROMÉTHÉE GDSS:

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda-UFF (EEMVR)   %
%   Mestrado em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia (MCCT)       %
%   Código em MATLAB® R2017a                                               %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear all; close all; clc;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  IMPORTAR DADOS DO EXCEL  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

arquivo='DADOS_PESQUISA.xlsx';

n=1;

%ler nome e o número de planilhas

[~,planilhas]=xlsinfo(arquivo);
nd=length(planilhas); %definindo o número de decisores

%importar dados

for i=1:nd
    nome=planilhas{i};
    entrada_dados=readtable(arquivo, 'Sheet', nome);
    T(i).dados=entrada_dados;
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  GERAR RESULTADO INDIVIDUAL  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for i=1:nd
    [resultado_parcial(:,i),na,pd]=F_PROMETHEE_II(T(i).dados,nd,n,arquivo);
    PD(i)=pd;
    n=n+1;
end

PD=PD/sum(PD);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  GERAR RESULTADO FINAL  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for i=1:na
    RESULTADO_FINAL{i,1}=[0 0 0];
end

for i=1:na
    for j=1:nd
        RESULTADO_FINAL{i,1}=somasf(RESULTADO_FINAL{i,1},(multescf(resultado_parcial{i,j},PD
(j)))));
    end
end
```

```
RESULTADO_AS=[resultado_parcial, RESULTADO_FINAL]; %armazenar os resultados p/  
enviar p/ AS
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% DEFUZZIFICAÇÃO %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
for i=1:na  
    aux=RESULTADO_FINAL{i,1};  
    phi_def(i)=(1/3)*(3*aux(1)-aux(2)+aux(3));  
end
```

```
phi_def=phi_def';
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% ORDENAÇÃO DAS ALTERNATIVAS %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
x='Alternativa %d';
```

```
for i=1:na  
    y(i)=string(x);  
    alternativas(i)=sprintf(y(i),i);  
end
```

```
for i=1:na  
    ranking(i)=i; %vetor controle do ranking  
end
```

```
for i=1:(na-1)  
    for j=1:(na-1)  
        if phi_def(j)<phi_def(j+1)  
            aux_resultado_final=phi_def(j+1);  
            aux_alternativa=alternativas(j+1);  
            aux_ranking=ranking(j+1);  
  
            phi_def(j+1)=phi_def(j);  
            alternativas(j+1)=alternativas(j);  
            ranking(j+1)=ranking(j);  
  
            phi_def(j)=aux_resultado_final;  
            alternativas(j)=aux_alternativa;  
            ranking(j)=aux_ranking;  
        end  
    end  
end
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% APRESENTAÇÃO RESULTADO FINAL %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
if nd~=1  
    RESULTADOS=table(alternativas',phi_def);  
    RESULTADOS.Properties.VariableNames={'Ranking' 'Fluxo_Total_Final'};  
  
    writetable(RESULTADOS,arquivo,'Sheet','RESULTADO_FINAL');  
  
    F_AS(RESULTADO_AS,PD,nd,na,ranking); %chamar analise de sensibilidade  
end
```

## Algoritmo F-PROMÉTHÉE II:

```
function [phi_total, na, PD]=F_PROMETHEE_II (A, nd, n, arquivo)

A(:,1)=[];

B=table2array(A);

%tipo do critério: 1-usual 2-quase 3-pseudo 4-nivel 5-linear 6-gauss
%MAX/MIN(mm): 1-maximizar 2-minimizar

alfa=0.5; %parâmetros fuzzy
beta=0.5;

lin=size(B,1);

PD=B(lin,1); %peso dos decisores

dados=B(6:(lin-1),:); %valores das alternativas para os criterios
nc=size(dados,2); %numero de criterios
na=size(dados,1); %numero de alternativas

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% CONVERSÃO FUZZY JULGAMENTOS %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

DADOSF=cell(na,nc);

for i=1:na
    for j=1:nc
        DADOSF{i,j}=[dados(i,j) alfa beta];
    end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

parametros=struct('tipo',B(1,:), 'peso',B(2,:), 'mm',B(3,:), 'p',B(4,:), 'q',B(5,:)); %a
rmazenamento dos parametros da aplicação do método

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% "CONVERSÃO FUZZY" P e Q %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for i=1:nc
    IP{i}=[parametros.p(i) 0 0]; %indices de preferência
    II{i}=[parametros.q(i) 0 0]; %indices de indiferença
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% APLICAÇÃO DAS FUNÇÕES DE PREFERÊNCIA %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

P=cell(na,na,nc); %cria matriz de preferencias

for i=1:nc
    if parametros.tipo(i)==1
        P(:, :, i)=usual(DADOSF(:, i), parametros.mm(i), na);
    elseif parametros.tipo(i)==2
        P(:, :, i)=quase(DADOSF(:, i), II{i}, parametros.mm(i), na);
    end
end
```

```

elseif parametros.tipo(i)==3
    P(:, :, i)=pseudo(DADOSF(:, i), IP{i}, parametros.mm(i), na);
elseif parametros.tipo(i)==4
    P(:, :, i)=nivel(DADOSF(:, i), IP{i}, II{i}, parametros.mm(i), na);
elseif parametros.tipo(i)==5
    P(:, :, i)=linear(DADOSF(:, i), IP{i}, II{i}, parametros.mm(i), na);
else
    P(:, :, i)=gauss(DADOSF(:, i), IP{i}, parametros.mm(i), na);
end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% CÁLCULO ÍNDICES DE PREFERÊNCIA %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

S=cell(na, na);

for i=1:na
    for j=1:na
        S{i, j}=[0 0 0];
    end
end

for i=1:na
    for j=1:na
        for k=1:nc
            S{i, j}=somaf(S{i, j}, multescf(P{i, j, k}, (parametros.peso(k)/sum(parametros.peso))));
        end
    end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% CÁLCULO FLUXOS %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for i=1:na
    phi_p{i, 1}=[0 0 0];
    phi_n{i, 1}=[0 0 0];
end

for i=1:na
    for j=1:na
        phi_p{i, 1}=somaf(phi_p{i, 1}, S{i, j});
        phi_n{i, 1}=somaf(phi_n{i, 1}, S{j, i});
    end
    phi_p{i, 1}=multescf(phi_p{i, 1}, (1/(na-1)));
    phi_n{i, 1}=multescf(phi_n{i, 1}, (1/(na-1)));
end

phi_total=cell(na, 1);

for i=1:na
    phi_total{i, 1}=subf(phi_p{i, 1}, phi_n{i, 1});
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% DEFUZZIFICAÇÃO %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for i=1:na
    aux=phi_total{i, 1};

```

```

    phi_def(i)=(1/3)*(3*aux(1)-aux(2)+aux(3));
end

phi_def=phi_def';

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% ORDENAÇÃO DAS ALTERNATIVAS %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

x='Alternativa %d';

for i=1:na
    y(i)=string(x);
    alternativas(i)=sprintf(y(i),i);
end

for i=1:(na-1)
    for j=1:(na-1)
        if phi_def(j)<phi_def(j+1)
            aux_phi_total=phi_def(j+1);
            aux_alternativa=alternativas(j+1);

            phi_def(j+1)=phi_def(j);
            alternativas(j+1)=alternativas(j);

            phi_def(j)=aux_phi_total;
            alternativas(j)=aux_alternativa;
        end
    end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% APRESENTAÇÃO RESULTADOS INDIVIDUAIS %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if nd~=1
    RESULTADOS=table(alternativas',phi_def);
    RESULTADOS.Properties.VariableNames={'Ranking' 'Fluxo_Total'};

    p='RESULTADO_DECISOR_%d';

    writetable(RESULTADOS,arquivo,'Sheet',sprintf(p,n));
else
    RESULTADOS=table(alternativas',phi_def);
    RESULTADOS.Properties.VariableNames={'Ranking' 'Fluxo_Total'};
    writetable(RESULTADOS,arquivo,'Sheet','RESULTADO_FINAL');
end

```

Algoritmo Função de Preferência Pseudocritério com Preferência Linear:

```

function[FP]= pseudo(dados,p,mm,na)

FP=cell(na,na);

for i=1:na
    for j=1:na
        if mm==1 %verifica se é CRITÉRIO DE MAXIMIZAÇÃO

```

```

    delta=subf(dados{i,1},dados{j,1});
    if (delta(1)-delta(2))>=0 && (delta(1)+delta(3))<=p(1)
        FP{i,j}=multescf(delta,(1/p(1)));
    elseif (delta(1)+delta(3))>p(1)
        FP{i,j}=[1 0 0];
    else
        FP{i,j}=[0 0 0];
    end
else %caso seja CRITÉRIO DE MINIMIZAÇÃO
    delta=opostof(subf(dados{i,1},dados{j,1}));
    if (delta(1)-delta(2))>=0 && (delta(1)+delta(3))<=p(1)
        FP{i,j}=multescf(delta,(1/p(1)));
    elseif (delta(1)+delta(3))>p(1)
        FP{i,j}=[1 0 0];
    else
        FP{i,j}=[0 0 0];
    end
end
end
end
end

```

#### Algoritmo Função de Preferência Linear com Área de Indiferença:

```

function[FP]= linear(dados,p,q,mm,na)

FP=cell(na,na);

for i=1:na
    for j=1:na
        if mm==1 %verifica se é CRITÉRIO DE MAXIMIZAÇÃO
            delta=subf(dados{i,1},dados{j,1});
            if (delta(1)-delta(2))>q(1) && (delta(1)+delta(3))<=p(1)
                FP{i,j}=multescf((subf(delta,q)),(1/(p(1)-q(1))));
            elseif (delta(1)+delta(3))>p(1)
                FP{i,j}=[1 0 0];
            else
                FP{i,j}=[0 0 0];
            end
        else %caso seja CRITÉRIO DE MINIMIZAÇÃO
            delta=opostof(subf(dados{i,1},dados{j,1}));
            if (delta(1)-delta(2))>q(1) && (delta(1)+delta(3))<=p(1)
                FP{i,j}=multescf((subf(delta,q)),(1/(p(1)-q(1))));
            elseif (delta(1)+delta(3))>p(1)
                FP{i,j}=[1 0 0];
            else
                FP{i,j}=[0 0 0];
            end
        end
    end
end
end
end

```