

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

ANTÔNIO MARQUES DA COSTA SOARES JÚNIOR

**PROPOSIÇÃO DE UM MODELO DE DECISÃO MULTICRITÉRIO COMO
AUXÍLIO À ESCOLHA, ANÁLISE E AVALIAÇÃO DE TECNOLOGIAS DE
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Recife

2018

ANTÔNIO MARQUES DA COSTA SOARES JÚNIOR

**PROPOSIÇÃO DE UM MODELO DE DECISÃO MULTICRITÉRIO COMO
AUXÍLIO À ESCOLHA, ANÁLISE E AVALIAÇÃO DE TECNOLOGIAS DE
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Tese submetida ao Programa de Pós Graduação em
Engenharia Mecânica da Universidade Federal de
Pernambuco como requisito para a obtenção do título de
Doutor em Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia

Orientador: Prof. Dr. Alex Maurício Araújo

Recife

2018

Catálogo na fonte

Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

S676p Soares Júnior, Antônio Marques da Costa.

Proposição de um modelo de decisão multicritério como auxílio à escolha, análise e avaliação de tecnologias de geração de energia elétrica / Antônio Marques da Costa Soares Júnior - 2018.

228folhas, II: Tab. e Abrev. e Sigla.

Orientador: Prof. Dr. Alex Maurício Araújo.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós- Graduação de Engenharia Mecânica, 2018.

Inclui Referências e Anexos.

1 Engenharia Mecânica. 2. Geração de Energia Elétrica.
3. Resolução normativa ANNEL nº 482. 4. Sustentabilidade.
4. Decisão Multicritério. 6. Uso de Informação Parcial. I. Araújo, Alex Maurício. (Orientador). II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-01

ANTÔNIO MARQUES DA COSTA SOARES JUNIOR

**PROPOSIÇÃO DE UM MODELO DE DECISÃO MULTICRITÉRIO COMO
AUXÍLIO À ESCOLHA, ANÁLISE E AVALIAÇÃO DE TECNOLOGIAS DE
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de doutor em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 21/12/018

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alex Maurício Araújo (Orientador)

Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. José Carlos Charamba Dutra (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Cristiano Alexandre Virgílio Cavalcante (Examinador Externo)

Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Jônatas Araújo De Almeida (Examinador Externo)

Universidade Federal de Pernambuco

Dr. Oyama Douglas Queiroz De Oliveira Filho (Examinador Externo)

Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

A minha família.

Ao professor e orientador Alex Maurício pela colaboração e conhecimento.

Ao professor Adiel de Almeida pelo conhecimento e coorientação informal

Aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica: Severino Urtiga, Maurílio José, Ivan Vieira, Janardan Rohatgi, Ricardo Sanguinetti, Jose Carlos Charamba e Oscar Olimpio, do Departamento de Engenharia de Produção: Cristiano Alexandre e Jonatas de Almeida e do Departamento de Engenharia Civil Fernando Jucá por fazerem parte da evolução deste trabalho.

A amiga Takanni Kang pelo apoio e conhecimento

Aos amigos Oyama Douglas e Gilberto Martins pelo conhecimento e ideias.

Meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Avaliar quais tecnologias de geração de energia elétrica deveriam compor a matriz elétrica de um país tornou-se uma questão mundial. Múltiplos fatores devem ser levados em conta e questões como as relacionadas a aspectos sociais, econômicos e ambientais devem ser consideradas no processo de decisão. Neste trabalho, um modelo de decisão baseado no método FITradeoff é proposto para auxiliar a tomada de decisão multicritério no contexto do planejamento energético. A originalidade do trabalho vem de acomodar, no modelo proposto, situações em que a informação disponível é incompleta, ao se avaliar tecnologias de geração de energia elétrica. Para ilustrar a aplicabilidade do modelo, dois estudos de caso foram considerados. No primeiro, oito diferentes tecnologias de geração energia elétrica de grande porte e que compõem a atual matriz elétrica brasileira, são avaliadas em quatro dimensões da sustentabilidade: financeira, técnica, ambiental e socioeconômica. Com base nas mesmas dimensões, numa segunda aplicação, foram analisadas quatro tecnologias renováveis de geração elétrica distribuída, de pequeno porte, no âmbito da Resolução Normativa ANNEL, nº 482. Neste caso, a predominância absoluta da energia solar fotovoltaica, quando da aplicação prática da resolução mencionada, foi avaliada com base na dimensão comportamental, no que diz respeito a percepção das pessoas quanto as vantagens daquela tecnologia. A aplicação do modelo proposto fornece informações que podem ser utilizadas na elaboração de políticas de energia, mostrando o potencial de uso do método para solucionar problemas relacionados.

Palavras Chave: Geração de energia elétrica. Resolução normativa ANNEL nº 482.

Sustentabilidade. Decisão multicritério. Uso de informação parcial.

ABSTRACT

Assessing which electricity generation technologies should compose a country's electrical matrix has become a global issue. Multiple factors must be taken into account and issues such as those related to social, economic and environmental aspects should be considered in the decision process. In this work, a decision model based on the FITradeoff method is proposed to help multicriteria decision making in the context of energy planning. The originality of the work comes from accommodating, in the proposed model, situations in which the available information is incomplete, when evaluating electricity generation technologies. To illustrate the applicability of the model, two case studies were considered. In the first, eight different technologies of large electric power generation and that compose the current Brazilian electrical matrix, are evaluated in four dimensions of sustainability: financial, technical, environmental and socioeconomic. Based on the same dimensions, in a second application, four small-scale distributed electric generation technologies were analyzed under ANNEL Normative Resolution No. 482. In this case, the absolute predominance of photovoltaic solar energy, when applied to the aforementioned resolution, was evaluated on the basis of the behavioral dimension, with respect to people's perception of the advantages of this technology. The application of the proposed model provides information that can be used in the elaboration of energy policies, showing the potential of using the method to solve related problems.

Keywords: Electric power generation. ANNEL Normative resolution nº 482. Sustainability. Multicriteria decision-making. Use of partial information

LISTA DE ILUSTRACOES

Figura 1 Matriz elétrica brasileira. Fonte: adaptada de (ANEEL, 2018)	35
Figura 2 Conexões e consumidores que recebem os créditos de	50
Figura 3 Conexão por tipo de fonte até 23/05/17. Fonte: (ANEEL, 2017)	51
Figura 4 Potência instalada por fonte até 23/05/17. Fonte: (ANEEL, 2017).....	51
Figura 5 Evolução da potência instalada (MW) até 23/05/17. Fonte: (ANEEL, 2017)	52
Figura 6 Classes de consumo dos consumidores até 23/05/17. Fonte: (ANEEL, 2017).....	52
Figura 7 Faixas de potência dos geradores até 23/05/17. Fonte: (ANEEL, 2017).....	53
Figura 8 Número de conexões por Estado até 23/05/17. Fonte: (ANEEL, 2017)	53
Figura 9 Modalidades de geração distribuída até 23/05/17. Fonte: (ANEEL, 2017).....	54
Figura 10 Projeção de unidades consumidoras que receberiam os créditos.	55
Figura 11 Função de densidade de probabilidade Weibull para diferentes valores de k. Fonte: Extraído de (MATHEW, 2006)	57
Figura 12 Função de distribuição cumulativa de Weibull para diferentes valores de k. Fonte: Extraído de (MATHEW, 2006)	58
Figura 13 Rosas de vento mostrando a distribuição de frequência (a) de velocidade (b) em diferentes direções. Fonte: Extraído de (MATHEW, 2006)	59
Figura 14 Desenho esquemático de um aerogerador. Extraído de (CASES, 2005).....	61
Figura 15 Curva da potência calculada e do coeficiente de potência do aerogerador ENERCON modelo E-48 / 800 kW (ENERCON, 2017)	62
Figura 16 Esquema ilustrativo da aplicação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede.....	68
Figura 17 Sistema conectado a rede (on grid). Fonte: (SOUZA, s.d.)	69
Figura 18 Relações geométrica sol-terra-painel solar. Fonte: (SOUZA, s.d.).....	71
Figura 19 Representação esquemática de uma PCH. Fonte: (CERPCH, 2018)).....	80
Figura 20 Disposições de arranjo das estruturas mais comuns para uma microcentral hidrelétrica. Fonte: (CERPCH, 2018).....	81
Figura 21 Cálculo da potência hidráulica. Fonte: (CERPCH, 2018)	82
Figura 22 Produção de Biogás por tipo de substrato. Fonte: (PERES e PALHA, 2016)	86
Figura 23 Interação entre os aspectos social, econômico e ecológico – Fonte: modificado de (NEATS, 2011)	87
Figura 24 Disco de Egan para comunidades sustentáveis.	91
Figura 25 Estrutura de objetivos em FVT. Fonte: (DE ALMEIDA, 2013).....	94
Figura 26 Procedimento para resolução de um problema de decisão.	97
Figura 27 Situação determinística. Extraída de (KEENEY, 1981).....	99

Figura 28 Modelo de escala desenvolvido por Likert. Fonte: (LIKERT, 1932).....	105
Figura 29 Modelagem de preferências. Fonte: extraído de (DE ALMEIDA, 2013).....	107
Figura 30 Consequências com informação flexível para o critério 1 (a) e para o critério 2 (b).	116
Figura 31 Fluxograma do processo iterativo do método FITradeoff. Fonte: (FREJ, 2017)	120
Figura 32 Esquema para construir o modelo MCDM/A proposto.	125
Figura 33 Resultados apresentados por meio do FITradeoff após 5 perguntas respondidas no processo de elicitación do perfil de decisão D: (a) Gráfico de barras e (b) Gráfico radar.	135
Figura 34 Intervalos de valores dos pesos viáveis para o espaço de pesos quando a solução foi encontrada para cada perfil de decisão: (a) A; (b) B; (c) C; d) D	137
Figura 35 Modelo para a seleção inicial das alternativas tecnológicas de geração de energia elétrica, no âmbito da REN ANEEL nº 687	144
Figura 36 Estrutura do modelo MCDA/M.	145
Figura 37 Estrutura de objetivos para a análise das tecnologias de geração de energia distribuída. (a) Em VFT Fonte: Adaptada de (KEENEY RL, 1976) e (b) elaborada pelo autor.....	146
Figura 38 Área considerada para a localização dos sistemas de geração renovável de energia elétrica	151
Figura 39 Níveis lógicos de influência para o critério manutenção. Fonte: elaborada pelo autor.	155
Figura 40 Critérios referentes às externalidades, além da emissão de poluentes.....	161
Figura 41 Resultados do FITradeoff durante a elicitación para o cenário C.	174
Figura 42 Resultados do FITradeoff durante a elicitación para o cenário C.	175
Figura 43 Intervalos de valores dos pesos viáveis para o espaço de pesos quando a solução foi encontrada: Perfis de decisão (a) A- Geração de Energia; (b) B- Socioeconômico; (c) C- Financeiro; (d) D- Socioambiental. Fonte: gerado por meio do FITradeoff SAD	177
Figura 44 Informação parcial disponível após 4 (quatro) perguntas para o(s) decisor(es) com perfil de decisão tipo A. Imagem gerada pelo FITradeoff SAD.	181
Figura 45 Informação parcial disponível após 15 (quinze) perguntas para o(s) decisor(es) com perfil de decisão tipo A. Imagem gerada pelo FITradeoff SAD.	181
Figura 46 Ordem completa para as tecnologias de geração de energia elétrica após 25 (vinte e cinco) perguntas para o(s) decisor(es) com perfil de decisão tipo A.	182
Figura 47 Informações disponíveis após o ranqueamento (ranking) de critérios para o(s) decisor(es) com perfil de decisão tipo B. Imagem gerada pelo FITradeoff SAD.	183
Figura 48 Informação parcial disponível depois de quatorze perguntas para o(s) decisor(es) com perfil de decisão tipo B. Imagem gerada pelo FITradeoff SAD.....	183
Figura 49 Ordem completa para as tecnologias de geração de energia elétrica após 45 (quarenta e cinco) perguntas para o(s) decisor(es) com perfil de decisão tipo B. Imagem gerada pelo FITradeoff SAD.	184
Figura 50 Informações disponíveis após o ranqueamento (ranking) de critérios para o(s) decisor(es) com perfil de decisão tipo C. Imagem gerada pelo FITradeoff SAD.	185

Figura 51 Informação parcial disponível depois de 4 quatro perguntas para o(s) decisor(es) com perfil de decisão tipo C. Imagem gerada pelo FITradeoff SAD.....	185
Figura 52 Ordem completa para as tecnologias de geração de energia elétrica após 14 (quatorze) perguntas para o(s) decisor(es) com perfil de decisão tipo C.	186
Figura 53 Informação parcial disponível após 6 (seis) perguntas ao(s) decisor(es) com perfil de decisão tipo D. Imagem gerada pelo FITradeoff SAD	187
Figura 54 Informação parcial disponível após 14 (catorze) perguntas ao(s) decisor(es) com perfil de decisão tipo D. Imagem gerada pelo FITradeoff SAD.	187
Figura 55 Ordem completa para as tecnologias de geração de energia elétrica após 24 (vinte e quatro) perguntas para o(s) decisor(es) com perfil de decisão tipo D.	188
Figura 56 Comparação entre as classificações das alternativas para cada um dos perfis de decisão. Fonte: elaborada pelo autor.	190
Figura 57 Perfil de decisão do grupo A – Geração de energia elétrica.	192
Figura 58 Perfil de decisão do grupo B – Impacto socioeconômico.....	193
Figura 59 Perfil de decisão do grupo C – Retorno do investimento.	194
Figura 60 Perfil de decisão do grupo D – Impacto socioambiental.	195
Figura 61 Critérios referentes a percepção do(s) decisor(es)	197
Figura 62 Resultados do FITradeoff durante a elicitação para o Perfil de decisão E.	201
Figura 63 Resultados do FITradeoff durante a elicitação para o Perfil de decisão E.	201
Figura 64 Informações disponíveis após o ranqueamento (ranking) dos critérios para o(s) decisor(es) com perfil de decisão tipo E. Imagem gerada por meio do FITradeoff SAD.	202
Figura 65 Informação parcial disponível após 2 (duas) perguntas ao(s) decisor(es) com perfil de decisão tipo E. Imagem gerada pelo FITradeoff SAD.	203
Figura 66 Informação parcial disponível após 3 (três) perguntas ao(s) decisor(es) com perfil de decisão tipo E. Imagem gerada pelo FITradeoff SAD.....	203
Figura 67 Ordem completa para as tecnologias de geração de energia elétrica após 26 (vinte e seis) perguntas ao(s) decisor(es) com perfil de decisão tipo E.	204
Figura 68 Perfil de decisão do grupo E – Impacto perceptivo sobre a tecnologia.	205
Figura 69 Consequências resultantes da utilização da REN ANEEL nº 482 como incremento ao Programa Luz para Todos. Fonte: elaborada pelo autor.....	227

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Células fotovoltaicas. Fonte (FADIGAS, s.d.).....	67
Tabela 2 Classificação das PCH's . Fonte: (ELETROBRAS, 1999).....	76
Tabela 3 Matriz de decisão para um problema multicritério. Fonte: (DE ALMEIDA, 2013).....	109
Tabela 4. Dimensões e objetivos a serem alcançados.	127
Tabela 5 Conjunto de critérios.....	128
Tabela 6 Critérios e fontes de dados.	130
Tabela 7 Matriz de Consequências.	131
Tabela 8 Processo de elicitação do FITradeoff para o perfil de decisão A.	133
Tabela 9 Resultados encontrados pelo FITradeoff para cada perfil de decisão.	136
Tabela 10 Resultados da Análise de Sensibilidade	138
Tabela 11 Critérios para a avaliação das tecnologias de geração de energia elétrica no âmbito da REN ANEEL 482/687. Fonte: elaborada pelo autor.	149
Tabela 12 Parâmetros referentes ao critério custo médio do investimento.	153
Tabela 13 Parâmetros referentes aos critérios da dimensão financeira.	153
Tabela 14 Escala de avaliação, tipo Likert, para o critério manutenção.	156
Tabela 15 Parâmetros referentes aos critérios da dimensão técnica.	156
Tabela 16 Escala de avaliação, tipo Likert, para o critério Risco de Acidentes.	165
Tabela 17 Escala de avaliação, tipo Likert, para o critério bem estar social.	167
Tabela 18 Parâmetros referentes aos critérios da dimensão ambiental.	168
Tabela 19 Parâmetros referentes aos critérios da dimensão socioeconômica.....	169
Tabela 20 Matriz de consequências para o problema de escolha de tecnologia de geração de energia eólica no âmbito da REN ANEEL, nº687 (ANEEL, 2015).....	170
Tabela 21 Processo de elicitação do FITradeoff para o cenário A.	173
Tabela 22 Resultados encontrados para cada perfil de decisão com o auxílio do método FITradeoff – módulo escolha.....	176
Tabela 23 Resultados da análise de sensibilidade.....	178
Tabela 24 Resultados encontrados para cada perfil de decisão com o auxílio do método FITradeoff – módulo ordenação.....	189
Tabela 25 Escala de avaliação, tipo Likert, para o critério Praticidade da Tecnologia.	198
Tabela 26 Níveis de avaliação para o critério Praticidade da Tecnologia.	198
Tabela 27 Número de empresas envolvidas com as tecnologias de geração de energia elétrica no Brasil.....	199

Tabela 28 Matriz de consequências para o problema de escolha de tecnologia de geração de energia eólica no âmbito da REN ANNEL, nº687 (ANNEL, 2015). Fonte: elaborada pelo autor.199

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CELPE	Companhia de Eletricidade do Estado de Pernambuco
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CHESF	Companhia Hidroelétrica do São Francisco
DSS	Sistema de Suporte a Decisão (do inglês <i>Decision Support System</i>)
ELETROBRAS	Centrais Elétricas Brasileiras S.A.
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FERNC	Fontes de Energia Renováveis Não Convencionais
FV	Solar Fotovoltaica
GREED	Geração Renovável de Energia Elétrica Distribuída
GEE	Gases de Efeito estufa
LPT	Programa Luz para Todos
MAVT	Teoria do Valor Multiatributo (do inglês <i>Multi-Attribute Value Theory</i>)
MCDM/A	Método multicritério de apoio à decisão (do inglês <i>Multiple Criteria Decision Making/Analysis</i>)
MME	Ministério de Minas e Energia
O&M	Operação e Manutenção
PAE	Produção Anual de Energia (do inglês, AEP <i>Annual Energy Production</i>)
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PIB	Produto Interno Bruto
PPL	Problema de Programação Linear
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PRODEEM	Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios
PRC-PRODEEM	Plano de Revitalização e Capacitação do PRODEM
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
REN	Resolução Normativa
RGR	Reserva Global de Reversão

SAD	Sistema de Apoio a Decisão
SFCR	Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede
SIGFI	Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes
SIN	Sistema Interligado Nacional
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
VFT	Pensamento Focado no Valor (do inglês <i>Value - Focused Thinking</i>)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	JUSTIFICATIVA	23
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO	28
1.2.1	Objetivo geral	28
1.2.2	Objetivos específicos	28
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	29
2	METODOLOGIA	31
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	33
3.1	MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA.....	33
3.2	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA ELÉTRICA	35
3.3	POLITICAS REGULATÓRIAS	38
3.3.1	Tarifa premio (<i>Feed-in Tariff – FIT</i>)	38
3.3.2	Compensação de energia (<i>Net Metering</i>)	39
3.3.3	Panorama mundial	41
3.4	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL	41
3.4.1	A resolução normativa ANEEL N° 482/2012	43
3.4.2	Geração distribuída de energia elétrica no Brasil no âmbito das resoluções normativas ANEEL N° 482 e 687	45
3.4.3	Situação da resolução normativa ANEEL N° 482/687	50
3.4.3.1	<i>Projeções para o horizonte 2017-2024</i>	54
3.5	FONTES DE GERAÇÃO RENOVÁVEL DE ENERGIA ELÉTRICA DISTRIBUIDA.....	55
3.5.1	Energia eólica	55
3.5.1.1	<i>Análise do vento</i>	56
3.5.1.2	<i>Extração da potência do vento</i>	60

3.5.1.3	<i>Estimativa da energia gerada</i>	63
3.5.1.3.1	Dados do vento	63
3.5.1.3.2	Ajuste da velocidade do vento	64
3.5.1.3.3	Tratamento dos dados do vento	65
3.5.1.3.4	Energia extraída por meio do aerogerador	65
3.5.2	Energia solar	66
3.5.2.1	<i>Sistemas fotovoltaicos (FV) conectados a rede (on grid)</i>	68
3.5.2.2	<i>Conceitos básicos para o projeto básico de um sistema fotovoltaico (on grid)</i>	70
3.5.2.3	<i>Potencial do recurso solar no Brasil</i>	74
3.5.3	Energia hidráulica	75
3.5.3.1	<i>Componentes de uma PCH</i>	78
3.5.3.2	<i>Formato de uma microcentral hidrelétrica</i>	80
3.5.3.3	<i>Energia gerada</i>	82
3.5.3.4	<i>Capacidade instalada no Brasil</i>	84
3.5.4	Bioenergia	84
3.6	SUSTENTABILIDADE	86
3.6.1	Conceituação	87
3.6.2	Dimensões da sustentabilidade	89
3.6.3	Comunidades mais sustentáveis	91
3.7	ABORDAGEM VFT (<i>Value - Focused Thinking</i>).....	92
3.7.1	Aplicações da abordagem VFT (<i>Value - Focused Thinking</i>)	92
3.7.2	Conceituação de objetivo em VFT (<i>Value-Focused Thinking</i>)	93
3.8	DECISÃO MULTICRITÉRIO	95
3.8.1	Construção de um modelo multicritério	97
3.8.2	Critérios ou atributos	97
3.8.2.1	<i>Seleção de critérios</i>	99
3.8.2.2	<i>Critérios construídos</i>	100

3.8.2.3	<i>Crêterios proxy</i>	102
3.8.2.4	<i>Medi�o dos cr�terios - escalas</i>	102
3.8.3	Estrutura de preferencia	106
3.8.4	Métodos multicr�terios	108
3.8.3.1	<i>Aplica�o dos métodos multicr�terios</i>	110
3.8.3.2	<i>Teoria do valor multiatributo</i>	112
3.8.3.3	<i>O método FITradeoff</i>	115
3.8.3.4	<i>Suposi�es como base do método FITradeoff</i>	121
4	APLICA�O DO MODELO - ESTUDOS DE CASO	124
4.1	ESTUDO DE CASO 1 – MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA	124
4.1.1	Análise de contexto	124
4.1.2	Dimensões e conjunto de cr�terios	126
4.1.3	Defini�o dos Parâmetros	129
4.1.4	Espaço de a�es	130
4.1.5	Perfis de decisão e aplica�o do FITradeoff	131
4.1.5.1	<i>Perfil de decisão A: Produ�o de energia</i>	132
4.1.5.2	<i>Perfil de decisão B: Retorno do investimento</i>	133
4.1.5.3	<i>Perfil de decisão C: impacto ambiental</i>	134
4.1.5.4	<i>Perfil de decisão D: impacto socioecon�mico</i>	134
4.1.6	Recomenda�es e análise de sensibilidade	136
4.1.7	Discussão dos resultados	139
4.2.	ESTUDO DE CASO 2 – GREED NO ÂMBITO DA REN ANEEL N�482	140
4.2.1	Análise de contexto	141
4.2.2	Zona de aplica�o	142
4.2.3	Caracteriza�o dos decisores e outros atores	145
4.2.4	Identifica�o dos objetivos	146
4.2.5	Propriedades dos objetivos	148

4.2.6	Estabelecimento dos critérios	148
4.2.7	Parametrização dos critérios	151
4.2.7.1	<i>Dimensão financeira</i>	152
4.2.7.1.1	Custo médio do investimento	152
4.2.7.1.2	Custos de operação e manutenção (O&M)	153
4.2.7.2	<i>Dimensão técnica</i>	154
4.2.7.2.1	Eficiência de geração	154
4.2.7.2.2	Fator de capacidade	154
4.2.7.2.3	Manutenção	155
4.2.7.2.4	Controlabilidade da fonte de energia	156
4.2.7.3	<i>Dimensão ambiental</i>	156
4.2.7.3.1	Emissão de CO₂	157
4.2.7.3.2	Externalidades	160
4.2.7.4	<i>Dimensão socioeconômica</i>	168
4.2.7.4.1	Vida útil	168
4.2.7.4.2	Ganho secundário	168
4.2.7.4.3	Geração de empregos na fase de fabricação	169
4.2.7.4.4	Geração de empregos na fase de construção e instalação	169
4.2.7.4.5	Geração de empregos durante a fase de operação e manutenção	169
4.2.8	Alternativas - tecnologias de geração elétrica	170
4.2.9	Fatores não controlados	170
4.2.10	GREED - Situação hipotética	171
4.2.11	Aplicação do método FITradeoff – módulo escolha	171
4.2.11.1	<i>Elicitação - Perfis de decisão</i>	171
4.2.11.1.1	Perfil de decisão A: Geração de energia elétrica	172
4.2.11.1.2	Perfil de decisão B: Impacto socioeconomico	173
4.2.11.1.3	Perfil de decisão C: Desempenho financeiro	174

4.2.11.1.4	Perfil de decisão D: Impacto socioambiental	175
4.2.11.2	<i>Recomendações e análise de sensibilidade</i>	175
4.2.11.2.1	Resultados	175
4.2.11.2.2	Análise de sensibilidade	178
4.2.12	Aplicação do método FITradeoff – módulo ordenação	179
4.2.12.1	<i>Elicitação</i>	179
4.2.12.1.1	Perfil de decisão A: Geração de energia elétrica	180
4.2.12.1.2	Perfil de decisão B: Impacto socioeconómico	182
4.2.12.1.3	Perfil de decisão C: Desempenho financeiro	184
4.2.12.1.4	Perfil de decisão D: Impacto socioambiental	186
4.2.13	Recomendações	188
4.2.14	Discussão dos resultados	189
4.2.15	Percepção sobre a tecnologia (FV)	196
4.2.15.1	<i>Praticidade da tecnologia</i>	197
4.2.15.2	<i>Difusão da tecnologia</i>	198
4.2.16	Aplicação do método FITradeoff – módulo escolha	200
4.2.16.1	<i>Perfil de decisão E: Impacto perceptivo sobre a tecnologia</i>	200
4.2.17	Aplicação do método FITradeoff – módulo ordenação	202
4.2.17.1	<i>Perfil de decisão E: Impacto perceptivo sobre a tecnologia</i>	202
4.2.18	Discussão dos resultados	204
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	206
5.1	CONCLUSÕES.....	206
5.2	RECOMENDAÇÕES.....	209
5.2.1	Extensão do modelo MCDM/A desenvolvido	209
5.2.2	Verificação dos critérios referentes a percepção do(s) decisor(es)	209
5.2.3	Energia solar (FV) no longo prazo	209
5.2.4	Proposta para um programa governamental	210

REFERÊNCIAS	211
ANEXO - AUTOPRODUÇÃO DE ENERGIA ELETRICA	226

1 INTRODUÇÃO

A matriz elétrica de um país precisa ser periodicamente avaliada como uma tentativa contínua de encontrar a solução mais adequada frente às mudanças enfrentadas nas dimensões política, socioeconômica, técnica e ambiental. Como decidir quais tecnologias de geração de energia elétrica devem compor essa matriz, tornou-se uma questão mundial (AL GARNI, KASSEM, *et al.*, 2016). Além disso, a introdução de fontes de energia renováveis levou os tomador(es) de decisão ou decisor(es) (do inglês DM - *Decision Makers*) a buscar políticas energéticas ideais para uma região ou mesmo um país (STRANTZALI E, 2016).

A diversificação das fontes de energia é vital, particularmente para países dependentes do petróleo, a fim de que eles possam alcançar opções de fornecimento mais seguras, criar mais empregos e contribuir para a energia sustentável e o desenvolvimento (AL GARNI, KASSEM, *et al.*, 2016). Tomar decisões sobre quais tecnologias devem ser expandidas requer múltiplos fatores a serem avaliados (SAN CRISTÓBAL, 2011), uma vez que não é apenas a produção e o consumo de energia que são importantes para a garantia da sustentabilidade de uma planta energética, mas também questões como aspectos sociais, econômicos e ambientais devem ser considerados no processo (ZOGRAFIDOU, PETRIDIS, *et al.*, 2016). Assim, o(s) decisor(es) têm a tarefa complicada de considerar muitas nuances (STRANTZALI E, 2016), pois precisam garantir um equilíbrio entre os diversos aspectos (BALEŽENTIS e STREIMIKIENE, 2017) e às vezes precisam fazer compensações (do inglês *trade-off*) entre eles (ZOGRAFIDOU, PETRIDIS, *et al.*, 2016).

Para ilustrar as deliberações que o(s) decisor(es) precisa(m) tomar, poder-se-ia, por exemplo, considerar fontes de energia não renováveis. Elas apresentam as vantagens de ter usinas de energia altamente eficientes e produzir energia a uma taxa constante. No entanto, surgem implicações do ponto de vista ambiental, e há um esforço mundial para reduzir seu uso (SILVA, DE MARCHI e SEIFERT, 2016). Por outro lado, a energia renovável - a energia gerada a partir do uso de elementos naturais - está sendo promovida para uma ampla variedade de aplicações em todo o mundo (DE MELO, DE MARTINO e BAJAY, 2016). As fontes renováveis de energia estão livres da poluição e aumentam a economia do país (SILVA, DE MARCHI e SEIFERT, 2016) e (POHEKAR e RAMACHANDRAN, 2004). Mas novas tecnologias energeticamente eficientes, até o momento, também são mais caras quando comparadas às convencionais (BALEŽENTIS e STREIMIKIENE, 2017).

No Brasil, até pouquíssimo tempo, quase toda a energia consumida em residências, locais de trabalho ou fábricas era produzidas unicamente em grandes centrais elétricas, segundo um sistema hidro-termo-eólico, caracterizando um modelo de distribuição de energia elétrica totalmente controlada pelas concessionárias de energia, dentro do SIN - Sistema Interligado Nacional (ONS, 2004). Portanto, o modelo organizacional adotado pelo sistema elétrico e obedecido ao longo de sua história consistiu em grandes centrais de geração e uma extensa rede de linhas de transmissão e distribuição, conhecido como geração centralizada de energia. Segundo este modelo, quando a demanda de energia aumenta, a resposta é um aumento da geração, porém quando a demanda excede os limites da capacidade do sistema, a solução adotada é sempre a construção de novas unidades de geração e, por derivação, o aumento do transporte e distribuição dessa maior energia comercializada, além dos novos impactos socioambientais. O questionamento quanto a essa forma de planejar a expansão da oferta de eletricidade do setor elétrico, aliada a introdução no mercado de novas tecnologias, principalmente as renováveis, que reduzem significativamente o custo da energia produzida e são localizadas próximas aos centros de carga, traduz e justifica o conceito de geração renovável de energia elétrica distribuída (GREED).

A partir de 17 de abril de 2012, quando entrou em vigor a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012 (ANNEEL, 2012), posteriormente aprimorada pela Resolução Normativa ANEEL nº 687/2015 (ANNEEL, 2015), o consumidor brasileiro passou a poder gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis e inclusive fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade. Trata-se da formalização da mini e da microgeração distribuídas de energia elétrica. As fontes de geração precisam ser renováveis ou com elevada eficiência energética, isto é, com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada (ANEEL, 2014).

Mundialmente, o acesso universal à energia moderna, erradicação da pobreza, mudança climática e a evolução das tecnologias para a GREED, entre outros aspectos, podem estar causando mudanças no planejamento da energia descentralizada. Estas mudanças podem ser caracterizadas pela inclusão de mais critérios ou objetivos com o intuito de garantir uma avaliação holística do problema, ou seja, "avaliação multidimensional" (ROJAS e YUSTA, 2014).

No contexto da matriz energética brasileira, a mini e microgeração distribuídas de energia elétrica possui um papel relevante e necessita ser analisada, continuamente, quanto ao seu desempenho e desenvolvimento. Trata-se de uma questão energética de elevada complexidade e de múltiplas dimensões. A análise ou decisão sobre sua implantação e/ou

avaliação, não pode ser tratada como uma questão empírica, ou como um problema de otimização que considera um único critério, normalmente o critério econômico, mas deve-se analisar a problemática como um todo, levando em consideração diversos critérios, muitas vezes conflitantes entre si, o que caracteriza um problema de decisão multicritério (do inglês MCDM/A - *Multicriteria Decision - Making/Aiding*).

Um dos desafios dos problemas de decisão multicritério é que o conjunto de soluções consideradas "aceitáveis" depende dos valores e interesses das partes interessadas. Na área de energia, existem inúmeras partes interessadas e cada uma traz uma perspectiva única e conjunto de valores referentes à geração de energia, ou seja, o que é preferida para uma parte interessada pode não ser para outra. Por exemplo, uma empresa de serviços públicos pode estar mais preocupada com desempenho da planta e retorno sobre o capital (uma ponderação para fatores técnicos e financeiros), enquanto um grupo comunitário pode estar mais preocupado com os impactos sociais, econômicos e ambientais. Estas suposições seriam refletidas nos pesos atribuídos aos grupos de critérios relacionados, diretamente, a cada grupo de interesse considerado (STEIN, 2013).

Um problema de decisão multicritério consiste numa situação em que há pelo menos duas alternativas de ação para se escolher, e essa escolha é conduzida pelo desejo de atender a múltiplos objetivos, muitas vezes conflitantes entre si (DE ALMEIDA, 2013). A esses objetivos são associadas variáveis, chamadas critérios ou atributos, que os representam e permitem a avaliação de cada alternativa, com base em cada objetivo. Uma importante questão associada a um problema de decisão multicritério é a presença de um decisor que estabelece suas preferências sobre as consequências envolvidas no problema. Isso envolve julgamento de valor pelo(s) decisor(es) (DE ALMEIDA, 2013). A tomada de decisão pode ser considerada uma das principais atividades em níveis hierárquicos mais altos das organizações, visto que suas consequências impactam diretamente no seu desempenho. A presença de diferentes objetivos é inerente à grande maioria dos problemas de decisão. Assim, métodos multicritério de apoio à decisão podem ser aplicados para solucionar problemas onde múltiplos objetivos, muitas vezes conflitantes, estão presentes e quando diversos critérios (com poucos ou sem dados) devem ser considerados na avaliação das alternativas existentes.

Os métodos multicritério que fazem parte do universo da informação completa ou exata exigem de um ou mais decisor(es) uma estrutura de preferências bem definida e estável, porém, muitas vezes, o(s) decisor(es) não é (são) capaz(es) de especificar suas preferências de forma tão detalhada quanto é requerido pela maioria dos métodos (WEBER, 1987). Esta foi e

ainda é a principal motivação para o surgimento de métodos que utilizam informação parcial, incompleta ou imprecisa a respeito das preferências do(s) decisor(es).

O método FITradeoff (*Flexible Interactive Tradeoff*), proposto por (DE ALMEIDA AT, 2016), é um método multicritério de elicitación de constantes de escala no modelo aditivo que requer informação parcial a respeito das preferências do decisor, superando as principais desvantagens de outros procedimentos de elicitación baseados em informação completa. Apesar de não requerer informação completa, o método FITradeoff fornece informação completa, como resultado da sua aplicação. O processo de elicitación flexível é conduzido de maneira interativa junto ao(s) decisor(es), apresentando uma ampla gama de aplicabilidade a problemas práticos.

Neste ponto deve ser considerada a pergunta da pesquisa:

Qual a concepção de um modelo de decisão multicritério mais adequado para auxiliar na escolha, análise e avaliação das tecnologias de geração de energia elétrica, a partir de informações parciais e que agregue desempenhos em diferentes critérios, gerando um valor global para comparar as opções disponíveis, ajudando o(s) decisor(es) a equilibrar os diversos aspectos envolvidos na decisão?

1.1 JUSTIFICATIVA

Problemas de decisão na área de energia são, na maioria das vezes, bastante complexos. As instalações de geração de energia precisam satisfazer uma série de objetivos, em uma ampla gama de questões; por exemplo, uma nova planta pode ter como objetivos fornecer um bom retorno financeiro, baixos custos de manutenção, ao mesmo tempo, uma grande produção de energia estável e efeitos sociais e ambientais positivos. Conciliar os diferentes objetivos dentro do processo de tomada de decisão na maioria das vezes constitui um desafio. Todo o desenvolvimento energético terá impacto sobre uma série de diferentes partes interessadas, de diferentes formas. Alcançar um consenso de opinião, entre as partes interessadas, é muitas vezes uma das etapas mais demoradas e difíceis do processo de planejamento.

A dificuldade de chegar a um consenso de opinião entre as partes interessadas repercute de forma mais complicada pelo fato de que o fator humano permeia as análises e discussões, desde que, estas, são, naturalmente, influenciadas por juízo de valor. Ainda, os

efeitos de muitas decisões estão sujeitos a um longo horizonte de tempo, o que proporcionam um maior nível de incerteza. Isto é especialmente importante em áreas sujeitas a rápidas mudanças como o setor de energia. Por exemplo, incerteza das tendências futuras no setor e o preço da energia nos próximos anos, aumenta o desafio no tomador de decisão. Muitos dos critérios que um tomador de decisão deve ter em conta, são difíceis de quantificar, especialmente quando se trata de informações sobre o meio ambiente e custos e benefícios sociais. Isso dificulta a comparação desses critérios com os que são tangíveis, como as estimativas financeiras, por exemplo. A questão da avaliação monetária dos impactos também complica o processo de tomada de decisão.

Um processo de decisão multicritério (*MCDM/A*) ajuda a superar algumas dessas questões em maior medida do que outras ferramentas de apoio à decisão, como a análise custo-benefício. A metodologia é capaz de considerar diversos objetivos diferentes, que podem ser ponderados para refletir a hierarquia de objetivos, além de, geralmente, envolver a participação generalizada. Isso pode contribuir para melhorar a responsabilidade e transparência das decisões alcançadas, proporcionando maiores níveis de propriedade sobre o processo de tomada de decisão e seus resultados. Por estas razões, as análises multicritério são frequentemente utilizadas no planejamento do governo e do setor público, onde a responsabilidade das decisões para o público é vital. Este envolvimento das partes interessadas é um dos principais motivos por trás do desenvolvimento e uso destas ferramentas.

Os métodos de decisão multicritério facilitam o processo de tomada de decisão, deixando claros os pressupostos dos vários interessados (*stakeholders*), fornecendo um processo estruturado com uma trilha de auditoria que suporte aprendizagem e avaliação. Isso permite a transparência das partes interessadas e pode ser seguido facilmente pelos moradores locais. No entanto, a transparência em torno da metodologia não conduz necessariamente à aceitação social do resultado da decisão. A aceitação social baseia-se em processos complexos que envolvem uma variedade de elementos cognitivos e emotivos e diferentes atores sociais terão diferentes e, possivelmente contrastantes, pontos de vista, nos casos em que tais conflitos surgem, a aceitação pode ser impossível de alcançar. Embora a aceitação social possa ser difícil de alcançar, a transparência em torno do método permite as partes interessadas tomar conhecimento dos processos que foram realizados no exercício da tomada de decisão, mesmo que não estejam totalmente de acordo com o resultado da decisão final (BURTON e HUBACEK, 2007).

A principal crítica às tecnologias de produção de eletricidade que dependem de combustíveis não renováveis (por exemplo, carvão, petróleo, gás natural e urânio) é que a maioria desses combustíveis se esgotará dentro de cerca de 100 anos (IAEA, 2010) e (SHAFIEE e TOPAL, 2009). Outra preocupação é que o custo desses combustíveis continue a subir. Além disso, o colapso de vários estados políticos rigidamente controlados aumentou a fragilidade da ordem mundial geopolítica. Esta turbulência e a instabilidade ameaçam as cadeias de fornecimento globais associadas à maioria das fontes de energia não renováveis e, especialmente, o petróleo. Por outro lado, desastres tecnológicos, como o colapso de Fukushima Daiichi, levaram o Japão e outros países a abandonar a energia nuclear e buscar alternativas (STEIN, 2013).

Por outro lado, no longo prazo, usinas de energia baseadas em combustíveis renováveis oferecem a solução mais abrangente para esses problemas. Consequentemente, tomadores de decisão em todo o mundo estabeleceram políticas para incentivar a transição para combustíveis renováveis, que incluem a energia solar, eólica, hidrelétrica, geotérmica e biomassa. O compromisso da Alemanha com a energia solar começou há décadas e é um exemplo de como subsídios podem estimular uma indústria. Atingiu um marco recentemente quando metade da demanda diurna do país foi atendida pela energia solar durante o verão (LOBEL, 2012). O Brasil gerou, em 2017, cerca de 624,3 TWh de energia elétrica. A energia elétrica gerada no Brasil tem como origem diversas fontes. Um dado positivo é que cerca de 80% desta energia elétrica é gerada através de fontes renováveis, predominantemente a Hidráulica com participação de 61% seguida da Eólica: 8%, Biomassa (bagaço de cana): 9%, e Solar: 1%. Quanto as não renováveis, destaca-se o gás natural: 7%, derivados de petróleo: 6%, carvão e derivados: 2%, nuclear: 1%. Energia importada: 5%. A capacidade instalada de geração de energia elétrica (2017) foi de 157,6 GW, distribuída da seguinte forma: Hidrelétrica: 100 GW, Biomassa: 14,5 GW, Térmica: 28 GW, Nuclear: 2 GW, Eólica: 12,2 GW, Solar: 0,9 GW. (ELETROBRAS, 2017). Trata-se de um conjunto de alternativas extremamente amplo cuja mobilidade, por motivos diversos, requer, constantemente, análises e avaliações que resultam em decisões sobre sua evolução.

Embora os combustíveis renováveis ofereçam muitos benefícios, como ser "livre" e abundantes, as usinas elétricas baseadas nesses combustíveis sofrem limitações de produção e capacidade devido à variabilidade da energia, tais como radiação solar e correntes térmicas durante todo o dia e ano. Estes e outros compromissos financeiros, técnicos e socioeconômicos colocam imensos problemas para o(s) decisor(es) políticos e investidores

quando da avaliação de qual a melhor opção tecnológica, tanto a curto como a longo prazo, o que leva alguns perguntar (STEIN, 2013):

- Quais critérios devem ser usados para avaliar alternativas energéticas para a geração de energia elétrica?
- Quais fontes de energia renováveis são preferidas em detrimento de outras? Quando devem ser oferecidos incentivos?
- O quanto "melhor" são as fontes renováveis do que fontes não renováveis de energia? E sob quais critérios?
- Qual é a melhor combinação de energia renovável e não renovável? Quais fontes?

No que diz respeito à GREED, após cinco anos de aplicação da REN ANNEL 482/687 (ANNEL, 2012), sua evolução vem apresentando algumas características que recomendam análises, discussões e proposições no sentido de justificar e/ou aperfeiçoar a sua implementação. Como exemplo pode-se verificar a supremacia absoluta da energia solar frente aos demais tipos de energia considerados e, neste sentido, o “porquê”, “quais as consequências dessa escolha?” ou “o que se pode fazer”? De modo a fomentar uma participação maior de todas as tecnologias que, por suas características, podem aderir a situações específicas trazendo grandes benefícios a sociedade como um todo.

Para ir de encontro a tais questões é imprescindível considerar a escolha de uma tecnologia para a geração de energia elétrica distribuída, como uma tomada de decisão que deve considerar os múltiplos fatores envolvidos, que são determinantes para os resultados finais obtidos. Qual tecnologia deve ser escolhida, dentre as disponíveis na REN ANNEL 482/687 (ANNEL, 2012)? Qual a mais indicada? Quais os critérios devem ser considerados para justificar tal escolha? O que se perde e o que se ganha e/ou perde com cada escolha? Essas questões precisam ser respondidas quando da tomada de decisão relativa a uma nova aplicação, programa de governo ou política de incentivo.

Por outro lado, uma avaliação ampla, considerando todas as dimensões envolvidas num processo decisório com relação à GREED, apresenta como principal desafio a inexistência de dados e informações fundamentadas e confiáveis, o que, no caso das tecnologias para a GREED, é substancial. Por exemplo, não existem dados de vento para baixa altura, compatível com os pequenos aerogeradores eólicos e, de um modo geral, para todas as tecnologias, não são disponíveis dados para os custos fixos e variáveis, custos de manutenção, empregos gerados, etc. Ainda, parâmetros referentes aos impactos ambientais e

sociais, também não podem ser disponibilizados. Só com o tempo, com a maturação oriunda da utilização das tecnologias envolvidas na REN ANNEL 482/687 (ANNEL, 2012), é que será possível a construção de um banco de dados, capaz de suportar, adequadamente, as avaliações sobre a implantação da GREED no Brasil. A alternativa para lidar com essa limitação é a de lançar mão do conhecimento e experiência dos especialistas nas áreas envolvidas em cada tecnologia considerada.

O fornecimento de energia para as áreas rurais nos países em desenvolvimento transcende a solução simples baseada na melhor tecnologia. Frequentemente, os métodos para avaliar alternativas enfatizam alguns aspectos, e na maioria dos casos, os fatores que influenciam a eletrificação rural são negligenciados, uma vez que a maioria das propostas não considera as necessidades da população (CHERNI J, 2007).

Além disso, segundo Rojas ROJAS e YUSTA (2014), uma atenção inadequada foi dada ao desenvolvimento rural em quase todos os países em desenvolvimento. Em particular, os requisitos energéticos foram abordados de forma inadequada. Este fato justifica a importância de identificar um processo de planejamento energético coerente, compreensível, transparente e sistêmica e que facilite melhorias acesso a energia moderna com base nos requisitos e condições do ambiente local do residente. Conseqüentemente, uma análise objetiva por meio de métodos matemáticos pode contribuir com informações relevantes sobre a formulação ótima de planejamento de energia nas zonas rurais ou remotas.

Este estudo desenvolve um método que vem auxiliar nas respostas às perguntas acima. Para esse fim, foi implementado um modelo abrangente de tomada de decisão multicritério (*MCDM/A*). Acredita-se que este método e seus resultados são valiosos para especialistas em políticas, investidores e empresas de serviços públicos executivos responsáveis por tomar decisões políticas e de investimento. De um modo geral, é uma ferramenta de planejamento energético para apoiar os tomadores de decisão do governo e do setor privado, quanto às escolhas e diretrizes que tenham maior possibilidade de acerto em um planejamento para a aplicação ou fomento de plantas de energia elétrica, permitindo, inclusive, sua avaliação de desempenho, de acordo com os vários grupos de interesse envolvidos. Ainda, para o caso específico da GREED, as aplicações urbana e rural por apresentarem situações fortemente diferenciadas quanto as suas características de implementação, necessitam que tais diferenças sejam consideradas, de modo a estabelecer uma simplificação quanto ao modelo utilizado para a definição da melhor escolha da tecnologia para cada caso.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Nesta seção serão apresentados os objetivos geral e específicos.

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolvimento de um modelo de decisão multicritério para o auxílio à escolha, análise e avaliação de tecnologias de geração de energia elétrica.

1.2.2 Objetivos específicos

São os seguintes os objetivos específicos desse estudo.

- (a) Estabelecer os critérios que permitam as análises referentes aos processos de decisão multicritério quanto às tecnologias de geração de energia elétrica utilizadas no Brasil;
- (b) Sistematizar um conjunto de dados e informações completas e parciais referente à aplicação da Resolução Normativa ANEEL 482/687 (ANNEE, 2012), até o ano 2018 de modo a apoiar às iniciativas voltadas a implantação de sistemas GREED;
- (c) Estabelecer os critérios que permitam o tratamento adequado das aplicações urbana e rural, como pré-requisito para a escolha de uma tecnologia para um sistema GREED, no âmbito da Resolução Normativa 482/687 da ANEEL (ANNEE, 2012);
- (d) Com o desenvolvimento do modelo em questão pretende-se:
 - Apoiar o planejamento, a avaliação e/ou a definição de políticas públicas voltadas à implantação de plantas de geração de energia elétrica.
 - Permitir a avaliar preliminar do impacto causado por cada tecnologia, considerando as características próprias a cada situação específica.
 - Explicitar as consequências resultantes da escolha de uma tecnologia, quando é considerado um amplo conjunto de critérios. Por exemplo, a situação de domínio absoluto da solar fotovoltaica (FV) no caso da GREED, no âmbito da Resolução Normativa 482/687 da ANEEL (ANNEE, 2012).

- Realizar avaliação comparativa entre as tecnologias consideradas, de modo a permitir uma visão global da problemática segundo a influência de diferentes grupos de interesse.
- (e) Contribuir para a identificação de questões relacionadas aos desafios que o Brasil precisa enfrentar para a implementação da GREED no âmbito da resolução da 482/687;
- (f) Tendo por base as aplicações do modelo para a aplicação rural, no caso da GREED, propor um programa de apoio à erradicação da pobreza, dentro da dimensão socioeconômica, no que se refere a geração de emprego e renda.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho tem sua estrutura baseada em 6 (seis) capítulos, que são descritos a seguir.

O capítulo 1 apresenta a Introdução, quando a oportunidade e ideia do trabalho é justificada e definidos os seus objetivos.

O capítulo 2 apresenta a metodologia que foi utilizada para o desenvolvimento do trabalho.

O capítulo 3 apresenta a base conceitual de fundamentação do trabalho, abordando os temas referentes a matriz energética brasileira, geração distribuída de energia elétrica, políticas regulatórias, geração distribuída de energia elétrica no Brasil no âmbito da resolução normativa ANEEL nº 482/2012 e fontes de geração renovável de energia elétrica distribuída. Também são tratados o conceito de sustentabilidade e suas dimensões, a abordagem VFT (*Value - Focused Thinking*) e a decisão multicritérios e o método FITradeoff.

O capítulo 4 apresenta os resultados a partir de dois estudos de caso, o primeiro referente à análise das tecnologias que compõem a Matriz Elétrica Brasileira, numa visão geral da aplicação de grande porte, abrangendo tecnologias renováveis como também as não renováveis e o segundo concernente a uma aplicação referente à GREED (do inglês RDEG – *Renewable Distributed Energy Generation*), no Âmbito da REN ANEEL nº 482 (ANNEEL, 2012), que representa a geração de pequeno porte, numa localidade rural no interior do estado de São Paulo.

O capítulo 5 apresenta as conclusões do presente estudo e as recomendações para trabalhos futuros.

Finalmente o Anexo apresenta o detalhamento da proposta para um futuro programa de incremento ao Programa Luz para Todos voltado para modelos de negócios sustentáveis visando ao público de baixa renda.

2 METODOLOGIA

A partir da fundamentação teórica, estabelecida no capítulo 2 foi desenvolvido o modelo, objetivado, tendo por base um procedimento dinâmico para a construção de modelos de decisão multicritérios (*MCDM/A*), proposto por de Almeida (2015). Consiste em três fases principais subdivididas em doze passos cuja sequência é flexível, de tal forma que o(s) decisore(s) pode(m) voltar às etapas anteriores quando necessário, incentivando a aprendizagem e a geração de informações durante o processo. Neste trabalho acrescentou-se na fase preliminar do procedimento uma etapa que diz respeito à caracterização do problema, momento em que são estabelecidos seus princípios fundamentais. Ao construir um modelo de decisão multicritério (*MCDM/A*), é necessário representar aspectos relevantes do contexto de decisão para garantir a adequação da análise a ser desenvolvida.

Para cada aplicação, embora seja mantido o procedimento proposto por de Almeida (2015), o problema necessita ser caracterizado e, também, considerados os objetivos e critérios que melhor representam aquela situação particular. Portanto, após a definição do contexto, são estabelecidos os objetivos do problema com base na abordagem focada no valor (do inglês *FVT - Value-Focused Thinking*) (KEENEY, 1992) e no conceito de Sustentabilidade, que segundo Fialho (2008) deve ser analisada e caracterizada a partir de suas diferentes dimensões.

Para o estabelecimento dos critérios são consideradas as mesmas bases teóricas, utilizadas para os objetivos, sendo acrescentadas as referências de experiências comprovadas, já estabelecidas na literatura. Para a parametrização dos critérios lançou-se mão da literatura bem estabelecida, dados das empresas governamentais e, quando não disponíveis, foram estabelecidos critérios qualitativos baseados nos conceitos estabelecidos por meio da engenharia e da ciência.

O modelo é completado com a escolha do método multicritério mais adequado que no caso deste estudo é o método *FITradeoff (Flexible Interactive Tradeoff)*, proposto por (DE ALMEIDA AT, 2016).

Para a aplicação do método foram considerados como decisor(es), grupos de interesse, com diferentes perfis (hipotéticos) de decisão, que, normalmente, estão envolvidos em questões ligadas ao setor energético e que estabelecem a correlação das forças sociais, políticas, técnicas e ambientais.

A partir dos resultados obtidos na aplicação do modelo é realizada uma análise de sensibilidade para verificar a robustez dos resultados encontrados para cada perfil de decisão

quando os valores de desempenho das alternativas de geração elétrica nos critérios são ligeiramente alterados. Isso foi feito variando os valores de desempenho em $\pm 10\%$ dentro dos limites do espaço de consequências original para cada critério, mantendo os intervalos dos valores de pesos viáveis. Para cada perfil de decisão, a solução foi simulada 100.000 vezes.

A aplicabilidade do modelo foi testada por meio de dois estudos de caso. O primeiro refere-se a atual matriz elétrica brasileira, para a qual, foram analisadas as oito diferentes tecnologias de energia elétrica que a compõem, sob quatro dimensões: a financeira, a técnica, a ambiental e a socioeconômica. Uma análise de sensibilidade foi realizada para verificar a robustez dos resultados obtidos. A aplicação do modelo proposto fornece informações que podem ser utilizadas no Brasil na elaboração de políticas de energia, mostrando o potencial de uso do método para solucionar problemas relacionados (SOARES, KANG e ALMEIDA, 2018). Este estudo utilizou os módulo de escolha do sistema de suporte a decisão FITradeoff DSS (CDSID, 2018).

O segundo estudo de caso diz respeito à mini e micro geração de energia elétrica. Foram avaliadas quatro diferentes tecnologias de energia elétrica, no âmbito da Resolução Normativa 482/687 da ANEEL (ANNEE, 2012), que regulamenta e define o contexto da GREED no Brasil. Já este estudo utilizou, além do módulo escolha, também o módulo de ordenação do sistema de suporte a decisão FITradeoff SAD (CDSID, 2018).

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A base conceitual utilizada para o trabalho e que caracteriza sua fundamentação teórica é apresentada a seguir consistindo dos seguintes tópicos principais: Matriz Energética brasileira, Geração Distribuída de Energia Elétrica, Políticas Regulatórias para a Geração de Energia Elétrica Distribuída, Geração Distribuída de Energia Elétrica no Brasil (GREED), Tecnologias para a GREED, Conceito de Sustentabilidade, Abordagem FVT e Decisão Multicritério.

3.1 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

A diversificação das fontes de energia é vital, particularmente para países dependentes do petróleo, a fim de que eles possam alcançar opções de fornecimento mais seguras, criar mais empregos e contribuir para a energia sustentável e o desenvolvimento (AL GARNI, KASSEM, *et al.*, 2016). Tomar decisões sobre quais tecnologias devem ser expandidas requer múltiplos fatores a serem avaliados (SAN CRISTÓBAL, 2011), uma vez que não é apenas a produção e o consumo de energia que são importantes, mas também questões como aspectos sociais, econômicos e ambientais devem ser considerados. no processo (ZOGRAFIDOU, PETRIDIS, *et al.*, 2016). Assim, os decisores têm a tarefa complicada de considerar muitas nuances (STRANTZALI e ARAVOSSIS, 2016), pois querem garantir um equilíbrio entre os diversos aspectos (BALEŽENTIS e STREIMIKIENE, 2017) e às vezes precisam fazer compensação (*trade-off*) entre eles (ZOGRAFIDOU, PETRIDIS, *et al.*, 2016).

Para ilustrar as deliberações que o(s) decisor(es) precisam empreender, poder-se-ia, por exemplo, considerar fontes de energia não renováveis. Elas apresentam as vantagens de ter usinas de energia altamente eficientes e produzir energia a uma taxa constante. No entanto, surgem implicações do ponto de vista ambiental, e há um esforço mundial para reduzir seu uso (DA SILVA, 2016). Por outro lado, a energia renovável - a energia gerada a partir do uso de elementos naturais - está sendo promovida para uma ampla variedade de aplicações em todo o mundo (DE MELO CA, 2016). As fontes renováveis de energia estão livres da poluição e aumentam a economia do país (DA SILVA, 2016) e (POHEKAR SD, 2004). Por outro lado, a novas tecnologias, energeticamente eficientes, também são mais caras quando comparadas às convencionais (BALEŽENTIS e STREIMIKIENE, 2017).

No Brasil, a forma mais frequente de gerar eletricidade é por hidrelétrica (DE MELO CA, 2016) e (AQUILA, PAMPLONA, *et al.*, 2016). Isso pode ser explicado pela topografia do Brasil, que favorece a predominância de fontes hidrelétricas para geração de energia (AQUILA, PAMPLONA, *et al.*, 2016). No entanto, não é sensato depender apenas de fontes hidrelétricas, uma vez que esse tipo de geração é dependente de condições hidrológicas (DA SILVA, 2016) e tem impactos socioambientais significativos (AQUILA, PAMPLONA, *et al.*, 2016). Neste contexto, a avaliação de fontes de energia além da energia hidrelétrica é crucial para garantir que os recursos renováveis formem uma alta parcela do total de recursos da matriz elétrica brasileira (DA SILVA, 2016).

A evolução do setor de geração de energia elétrica necessita de ser acompanhada por uma busca contínua por soluções mais adequadas para cada realidade temporal, onde fatores controláveis e não controláveis vão surgindo, naturalmente, de acordo com as mudanças nas conjunturas política, socioeconômica, técnica e ambiental.

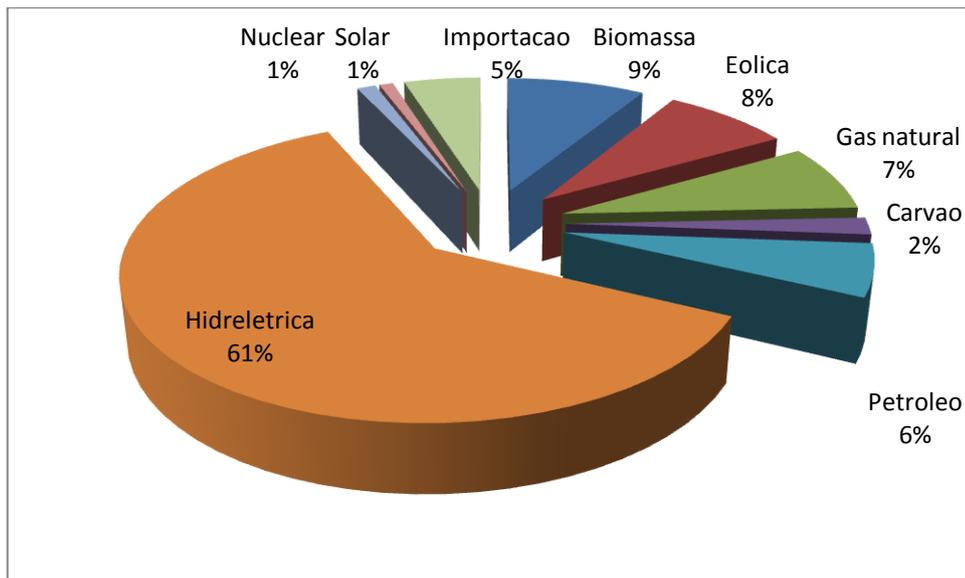
Nos países desenvolvidos, a Matriz Energética constitui-se numa atividade regular dos órgãos de planejamento energético, na qual se reavaliam periodicamente premissas e hipóteses adotadas inicialmente, revisando-as quando necessário. Os modelos energéticos são utilizados para simular os efeitos de eventuais políticas energéticas, de outras políticas públicas e de eventos diversos sobre suas respectivas matrizes energéticas, eventos estes, que podem estar relacionados a mudanças nos preços relativos dos energéticos, na trajetória da inovação tecnológica, na estrutura econômica e no padrão de consumo dos indivíduos.

Neste sentido, no Brasil, o Ministério de Minas e Energia, por meio da Empresa de Pesquisa Energética – EPE vem desenvolvendo trabalhos visando subsidiar e esclarecer tomadores de decisão no governo e no setor privado, membros da academia, organizações ambientais, e demais setores da sociedade com interesse na questão da energia elétrica no Brasil, com o objetivo de atualizar e caracterizar o aproveitamento elétrico a partir do gás natural, biomassa, carvão e nuclear e das energias renováveis hidráulica, biomassa, eólica, solar e oceânica, respectivamente, apresentando para cada uma das fontes seu potencial, o panorama mundial e nacional, a estrutura da respectiva cadeia da geração elétrica, a caracterização técnica e econômica, as questões socioambientais e o potencial de geração, entre outros aspectos (ENERGIA TERMELÉTRICA, 2016) e (ENERGIA RENOVÁVEL TOLMASQUIM, MAURÍCIO T., 2016).

Na projeção de novos investimentos na geração de energia elétrica, questões tais como: Quais plantas de energia precisam ser montadas e/ou expandidas? Qual tecnologia deve ser escolhida, não renovável ou renovável? E dentro de cada grupo, qual a mais

indicada? Quais os critérios devem ser considerados para justificar tal escolha? Precisam ser respondidas, buscando o compromisso adequado entre os aspectos mais relevantes destas decisões. As principais tecnologias de geração da energia elétrica mencionadas definem a matriz de geração elétrica brasileira cuja composição percentual pode ser verificada na Figura 1.

Figura 1 Matriz elétrica brasileira. Fonte: adaptada de (ANEEL, 2018)



3.2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA ELÉTRICA

Vivenciamos hoje, na era da informação, uma sociedade, estruturada em rede, definida como globalizada. As estruturas sociais tendem a se organizar segundo as relações de produção e o consumo (CASTELLS, 2000). No entanto, esta tendência está se modificando, uma segunda era da descentralização pode ser observada quando se verifica a vulnerabilidade dos sistemas complexos frente a questões que repercutem além dos problemas econômico-financeiros. Alanne e Saari (2006) analisaram os sistemas de geração distribuída de energia quanto à eficiência, confiabilidade e interação com o meio ambiente, como alternativa aos sistemas tradicionais de geração de energia. Tendo por base as dimensões política, econômica, social e ambiental, associadas à regionalização e ao grau de descentralização, concluem que a geração distribuída é uma boa opção para o desenvolvimento sustentável.

Especificamente, quanto à geração de energia elétrica em pequena escala, também definida por geração distribuída, embora esteja na ordem do dia das discussões sobre planejamento energético, não é um conceito novo.

Segundo Pepermans et al. (2005), as primeiras plantas de energia elétrica supriam as necessidades dos clientes exclusivamente nas proximidades da planta de geração. As primeiras redes operavam em corrente contínua e a tensão era limitada bem como a distância possível entre geração e consumidor. O balanceamento entre demanda e fornecimento de energia era feito, parcialmente, no local, por meio da utilização de baterias, que podiam ser acopladas, diretamente, a rede de corrente contínua. Com o passar dos anos, com o advento da corrente alternada, viabilizou-se a transmissão de eletricidade por grandes distâncias. Os projetos das plantas de eletricidade aumentaram significativamente, resultando em ganhos de escala e redução dos custos marginais. Foram construídos grandes sistemas elétricos, interconectados, como o caso brasileiro, consistindo em imensas redes de transmissão e distribuição e em plantas de geração centralizadas e gigantescas. Neste caso, a segurança do fornecimento passou a repousar no fato de que a falha em uma dada planta de geração poderia ser compensada por outra, que esteja interconectada ao sistema em alta voltagem, possibilitando a economia de escala na geração de energia elétrica.

De acordo com o relatório da PikeResearch (DEXTER GAUNTLETT; KERRY-ANN ADAMSON, 2012), considerando os últimos 100 anos, a tecnologia usada para a geração de eletricidade manteve-se quase a mesma, mas os aspectos econômico, ambiental, social e político mudaram radicalmente. Durante esse tempo, os sistemas de geração com combustível fóssil e com energias renováveis têm crescido de forma tremenda (por meio das medidas atuais, os 100 quilowatt (kW) de capacidade da planta de energia Pearl Station nos EUA seria classificada como geração distribuída). Hoje, a maior planta de geração de energia elétrica do planeta fica na China, a Hidrelétrica das Três Gargantas (*Three Gorges Dam*) com uma capacidade estonteante de 22,5 gigawatts. A aparente demanda insaciável por eletricidade, entretanto, é agora acoplada à crescente preocupação com o meio ambiente, redução dos gases do efeito estufa e segurança energética. Ao mesmo tempo, as plantas de geração centralizadas, bem como os modelos de transmissão e distribuição estão com seus custos aumentando, mesmo para os níveis atuais de demanda. Para o futuro, com o crescimento populacional e consequente necessidade de aporte de energia elétrica, os referidos custos podem se tornar preocupantes. Por outro lado, apesar do pequeno tamanho em escala, as fontes de GREEN, tais como solar fotovoltaica, eólica de pequeno porte e células de combustível estacionárias, com menor necessidade de linhas de transmissão e baixa emissão de gases do efeito estufa,

estão prontas para mudar o paradigma do século 20 quanto à produção de energia elétrica. Os dois modelos não são necessariamente excludentes. Hoje, as instalações de GREED representam menos de 1% do total da capacidade instalada de geração de eletricidade no mundo, o que significa que o modelo da geração distribuída de energia ainda se encontra em sua forma embrionária. Por outro lado, este é um seguimento que está amadurecendo de modo muito rápido e com a expectativa de que venha a cumprir um importante papel no século 21. Um indicador importante para tanto, é o crescimento do número de aplicações ao redor do mundo, quando as tecnologias de geração distribuída de energia são mais viáveis economicamente quando comparadas com instalações centralizadas que requerem sistemas de transmissão para chegar até os centros populacionais. Existe uma forte tendência para geração distribuída de energia que permite ao consumidor maior controle sobre a eletricidade que consomem e geram. Porém, para atingir todo o seu potencial, a GREED necessita de novos modelos de negócios, desenvolvimento tecnológico, políticas públicas e investimento no, em geral incerto, clima econômico.

Na última década, inovações tecnológicas, mudanças econômicas e uma regulação ambiental mais restritiva resultaram em uma renovação do interesse com respeito à geração distribuída. Avaliados pela *International Energy Agency* (IEA, 2002), foram cinco os principais fatores que contribuíram para tal interesse, ou seja: (i) o desenvolvimento de tecnologias de geração elétrica em escala reduzida, (ii) restrições na construção de novas linhas de transmissão, (iii) aumento na demanda por uma eletricidade mais confiável, (iv) liberalização do mercado de energia e (v) preocupações com as mudanças climáticas.

Segundo a Fundação Getulio Vargas (FREITAS e HOLLANDA, 2015) não há uma definição convergente para geração distribuída, Ackermann (ACKERMANN, ANDERSSON e SÖDER, 2000) e Pepermans (PEPERMANS, DRIESEN, *et al.*, 2005) discutem esta questão. A política energética de cada país aborda - e incentiva - este tipo de geração de maneira diversa. Em uma definição mais geral, a geração distribuída pode ser entendida como sistemas de potência de capacidade reduzida e que ficam alocadas próximas ao centro de consumo, sem a necessidade de extensas redes para sua transmissão. Em alguns países é considerado, ainda, o tipo de tecnologia de conversão e a utilização da fonte, se intermitente, de combustível fóssil, ou renovável. Entretanto, a definição de qual seria a potência instalada para que algum empreendimento de geração seja considerado distribuído é função, principalmente, da política energética aplicada.

No Brasil, de acordo com o Ministério de Minas e Energia (EPE, 2014), adota-se como definição para geração distribuída aquela geração de energia, abrangendo eletricidade e

outros energéticos, localizada próxima ao consumidor final, cuja instalação objetiva seu atendimento prioritário, podendo ou não gerar excedentes energéticos comercializáveis para além das instalações do consumidor final. Nesse sentido, a geração distribuída pode ser classificada por tamanho: grande porte e o agrupamento de médio/pequeno porte, de modo a tratar empreendimentos com lógica similar do ponto de vista do investimento, modo de operação e barreiras à implementação. Enquanto, em geral, as unidades de grande porte estão associadas fortemente à lógica industrial, a geração distribuída de menor porte apresenta uma lógica mais vinculada à realidade de residências e do setor comercial.

3.3 POLITICAS REGULATÓRIAS

De acordo com a Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency*, IEA), diversas opções de políticas de incentivo à utilização da energia solar térmica e fotovoltaica passaram a ser consideradas a partir da crise do petróleo (década de 70). No entanto, apenas no início dos anos 90 que as políticas de incentivo ligadas à tarifa de energia elétrica, como a Tarifa Prêmio (do inglês *Feed-In-Tariff* - FIT), comuns em países europeus e asiáticos, e o Sistema de Compensação de Energia (do inglês *Net Energy Metering* - NEM), nos EUA, passaram a ser as mais utilizadas, e frequentemente combinadas com incentivos fiscais. Em alguns locais utiliza-se ainda Certificados de Energias Renováveis (*Renewables Energy Certificates* – REC's).

Em todo o mundo, para o incentivo à GREED, os principais mecanismos são a Tarifa Prêmio (*Feed-in Tariff* - FIT) e o Sistema de Compensação de Energia (*Net Metering*) , que são discutidos a seguir.

3.3.1 Tarifa premio (*Feed-in Tariff* – FIT)

É um mecanismo utilizado em políticas públicas destinadas a acelerar o investimento em tecnologias de energias renováveis por meio da oferta de contratos de longo prazo aos produtores de energias renováveis, normalmente com base no custo de geração de cada tecnologia.

O incentivo à produção de energia vem do fato de que o valor pago pela energia injetada na rede é maior que o da energia comprada da distribuidora. Esse mecanismo vai sendo reduzido ao longo do tempo, para incentivar a redução do custo de geração. A Alemanha é uma grande referência para exemplificar a tarifa premio (FIT) que foi adotada

como mecanismo de incentivo ao uso das energias renováveis em 1990. Esse marco regulatório tratava da introdução da energia produzida pelas Fontes Renováveis de Energia na rede elétrica convencional. Tal Lei baseava-se na compra obrigatória, pelas concessionárias, da energia gerada por esses sistemas, através do mecanismo de tarifa prêmio (FIT). Este mecanismo de incentivo permite que toda a energia gerada, através da utilização de fontes renováveis como fontes primárias e injetada na rede de distribuição, seja remunerada por um valor fixo durante um período de tempo suficiente para tornar o investimento atrativo (BERTOI, 2012). As companhias distribuidoras de energia elétrica ficam obrigadas a comprar e remunerar cada kWh gerado por um valor, usualmente, superior ao valor da tarifa praticada ao consumidor.

O cálculo do valor da tarifa prêmio (FIT) considera o retorno sobre o patrimônio, os juros sobre o capital de empréstimos e capital de giro, a depreciação do equipamento e as despesas de manutenção e operação, a fim de assegurar ao investidor a mesma rentabilidade da utilização das fontes convencionais na matriz energética (VILLARINI, 2011). O pagamento da tarifa prêmio (FIT) geralmente é administrado e efetuado pela distribuidora de energia elétrica que por sua vez, repassa e dilui o custo entre todos os consumidores. É um mecanismo independente de incentivo financeiro por agentes governamentais, com baixo custo para o consumidor final, e já representou, por exemplo, apenas 20 centavos de euro 16 adicionais na fatura de energia elétrica mensal de cada consumidor na Alemanha, devido à tarifa prêmio (FIT) aplicada ao aproveitamento da energia solar (PAPADOPOULOU, 2011).

O valor e o modelo de aplicação da tarifa prêmio (FIT) variam de acordo com o país onde foi regulamentada e dependem da capacidade de produção, dos custos de instalação e dos equipamentos da unidade geradora. O modelo segue três premissas básicas: (a) Garantia de acesso a rede; (b) Contratos longos de compra da energia gerada; (c) Preços baseados no custo de produção acrescentado de um valor que permita uma margem de atratividade ao investidor. Em 2008, havia 69 países ou regiões com a tarifa prêmio (FIT) instituída e, em 2015, esse número aumentou para 83 (REN21, 2016).

3.3.2 Compensação de energia (*Net Metering*)

A Compensação de Energia (*Net Energy Metering*) é a modalidade política de incentivo que permite ao proprietário ou usuário do sistema com alguma fonte renovável de energia injetar o excedente de energia na rede de energia elétrica, definido com um crédito, e este crédito será abatido da conta de energia elétrica. Também podem ser descontados de sua

conta de energia em outras ocasiões, quando a unidade geradora não produzir energia suficiente para o autoconsumo.

A Compensação de Energia é aplicada em pelo menos 53 países, incluindo Itália, Israel e grande parte dos Estados Unidos (REN21, 2016), sendo o mecanismo regulatório adotado no Brasil para a microgeração distribuída por fontes renováveis, conforme a resolução normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANNEE, 2012). Apesar do mesmo princípio de funcionamento o sistema adotado nos Estados Unidos e Japão, em alguns países da Europa e no Brasil apresentam algumas diferenças. A grande diferença é que, no Brasil, a concessionária não paga ao consumidor pela energia injetada na rede. O sistema é de compensação de energia, ou seja, o crédito gerado pelo excedente é de energia (kWh).

A Compensação de Energia pode ser entendida como um sistema cujo faturamento da unidade geradora, conectada à rede, resulta da diferença entre a quantidade de energia consumida e a quantidade gerada. No modelo mais simples e mais adotado não há armazenamento da energia gerada e a medição líquida da energia aponta para três situações:

- (a) Quantidade de energia gerada menor que a quantidade de energia consumida: O valor a ser faturado corresponde à energia consumida descontada da energia gerada;
- (b) Quantidade de energia gerada igual à quantidade de energia consumida: Não há faturamento na unidade geradora conectada à rede ou, apenas o pagamento de um valor mínimo, estipulado em regulamentação específica;
- (c) Quantidade de energia gerada maior que a quantidade de energia consumida: A diferença é injetada na rede da distribuidora e gera créditos para compensação na fatura de energia elétrica em meses subsequentes.

Analisando o caso do Japão, Goetzberger e Hoffmann (2005), avaliam que esse sistema de compensação é mais efetivo onde a tarifa da energia elétrica paga pelo consumidor é alta. Deve haver uma paridade tarifária para tornar a Compensação de Energia um instrumento de incentivo viável.

Para registrar o balanço energético entre a energia gerada e a energia consumida para o faturamento mensal é preciso apenas um único medidor bidirecional de energia elétrica.

3.3.3 Panorama mundial

Os formuladores das políticas públicas de diversos países no mundo têm-se centrado predominantemente no desenvolvimento das tecnologias de geração a partir de fontes de energias renováveis. A tarifa premio (FIT) é a política de tarifação mais amplamente utilizada para incentivar a utilização das fontes renováveis de energia, de acordo com os dados do Renewables Global Status Report 2016 (REN21, 2016). Por outro lado, 53 países haviam adotado políticas similares à Compensação de Energia (*Net Metering*). As políticas fiscais, incluindo subvenções, empréstimos e incentivos fiscais, também continuam a ser uma ferramenta importante para promover a implantação de novos projetos e o desenvolvimento avançado de tecnologias que utilizam energia renovável. Muitos países ainda usam uma combinação dessas políticas para o avanço das energias renováveis no setor de energia.

3.4 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL

A evolução do marco regulatório da indústria elétrica brasileira caracteriza-se, em sua história recente, pela transição do modelo de monopólio estatal para o modelo de mercado, focalizando as fontes renováveis de energia devido ao imperativo de sustentabilidade ambiental deste o início do século XXI.

A primeira iniciativa que efetivamente incorporou o uso de energia alternativa, no caso a solar fotovoltaica, no âmbito nacional, foi estabelecida pelo governo brasileiro em 1994: o Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios (PRODEEM), Conduzido pelo Ministério de Minas e Energia (MME), teve como objetivo, levar energia elétrica as comunidades utilizando principalmente a geração fotovoltaica.

Por mais expressivos que fossem os números do PRODEEM, o programa foi suspenso em 2002 pelo Tribunal de Contas da União (TCU) dado o elevado número das mais diversas irregularidades encontradas, destacando-se falhas de gestão e centralização das atividades. Seguindo as orientações do TCU, foi então lançado, em dezembro de 2004, o Plano de Revitalização e Capacitação do programa (PRC-PRODEEM), tendo como objetivos a localização, o diagnóstico, a revitalização ou remoção e o tombamento dos sistemas existentes.

O PRODEEM foi incorporado ao Programa Luz para Todos (LPT), também conhecido como o Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica, que foi instituído pelo Decreto n° 4.873, de 11 de novembro de 2003 (DECRETO N° 4.873, 2003), e

inicialmente visava prover, até o ano de 2008, o acesso à energia elétrica à totalidade da população do meio rural brasileiro (ELETROBRÁS, 2008). Porém, em 28 de abril de 2008, o governo federal estendeu o prazo de conclusão do programa até 2010 em virtude de milhares de novos pedidos de ligação de pontos de energia.

Com a crise de energia elétrica no país vivida em 2001, a diversificação das fontes de energia passou a ter grande importância, trazendo novamente as fontes renováveis alternativas de energia ao centro das atenções. Neste contexto, por meio da Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002 (LEI Nº 10.438, 2002), foi criado o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) (LEI Nº 10.438, 2002) com o intuito de aumentar a participação da energia elétrica produzida por empreendimentos a partir das fontes eólica, pequenas centrais hidrelétricas (PCH's) e biomassa no sistema interligado nacional (SIN). Apesar da energia solar fotovoltaica não ter sido contemplada pelo PROINFA, na própria Lei 10.438/02 há um dispositivo que dispõe sobre a utilização dos recursos da Reserva Global de Reversão (RGR) para um programa de fomento a essa tecnologia (Art. 23, inciso II). De forma indireta, poder-se-ia dizer que este dispositivo estaria sendo atendido, pois o LPT é o maior beneficiário dos recursos da RGR, havendo uma grande oportunidade para a tecnologia solar fotovoltaica ser aplicada, em especial na Região Amazônica e no semiárido, (PORTO, 2007).

A ANEEL, buscando evitar a repetição dos erros do passado, como no caso do PRODEEM e outras iniciativas, regulamentou o uso dos Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes (SIGFI's) a serem instalados no âmbito do LPT. Essa regulamentação deu-se através da Resolução Normativa da ANEEL, nº83 de 20 de setembro de 2004 (ANEEL, 2004).

Finalmente, com o objetivo de reduzir barreiras para a conexão de pequenas centrais geradoras na rede de distribuição (desde que utilizem fontes renováveis de energia ou cogeração com elevada eficiência energética), a ANEEL publicou a Resolução Normativa nº 482/2012 (ANEEL, 2012), posteriormente aprimorada pela Resolução Normativa ANEEL nº 687/2015 (ANEEL, 2015). E, complementarmente, na seção 3.7 do Módulo 3 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST (ANEEL), foram estabelecidos os procedimentos para acesso de micro e mini geradores ao sistema de distribuição, e criado o sistema de compensação de energia elétrica correspondente. Conforme disposto nesses regulamentos, a micro e a mini geração distribuída consistem na produção de energia elétrica a partir de pequenas centrais geradoras que utilizam fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conectadas à rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

A emissão da Resolução Normativa nº 482/2012 (ANEEL, 2012) é considerada o principal marco no cenário de micro e minigeração de energia do país por estabelecer a base técnica e comercial que permite que os consumidores instalem pequenos geradores em suas unidades consumidoras e troquem energia com a distribuidora local.

3.4.1 A resolução normativa ANEEL Nº 482/2012

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), no exercício das suas competências legais, promoveu a Consulta Pública nº 15/2010 (de 10 de setembro a 9 de novembro de 2010) e a Audiência Pública nº 42/2011 (de 11 de agosto a 14 de outubro de 2011) (ANEEL, 2014), as quais foram instauradas com o objetivo de debater os dispositivos legais que tratam da conexão de geração distribuída de pequeno porte na rede de distribuição.

Como resultado desse processo de consulta e participação pública na regulamentação do setor elétrico, a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, estabeleceu as condições gerais para o acesso de micro e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica. No que se refere à política de incentivo, a resolução em questão, adotou o sistema de compensação de energia elétrica (*Net Metering*), como modelo de comercialização da energia gerada.

A partir da Resolução Normativa 482 da ANEEL e com os aperfeiçoamentos introduzidos por meio da Resolução Normativa ANEEL nº 687 (ANEEL, 2015) foram estabelecidos os seguintes pontos principais:

- MICROGERAÇÃO = Central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;

- MINIGERAÇÃO = Central geradora de energia elétrica com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou para as demais fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;

- COMPENSAÇÃO = Sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa;
- AUTOCONSUMO REMOTO = Caracterizado por unidades consumidoras de titularidade de uma mesma Pessoa Jurídica, incluídas matriz e filial, ou Pessoa Física que possua unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras, dentro da mesma área de concessão ou permissão, nas quais a energia excedente será compensada;
- GERAÇÃO COMPARTILHADA = Caracterizada pela reunião de consumidores, dentro da mesma área de concessão ou permissão, por meio de consórcio ou cooperativa, composta por pessoa física ou jurídica, que possua unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras nas quais a energia excedente será compensada;
- SISTEMAS CONDOMINIAIS (PESSOA FÍSICA E JURÍDICA) = Empreendimento com múltiplas unidades consumidoras: caracterizado pela utilização da energia elétrica de forma independente, no qual cada fração com uso individualizado constitua uma unidade consumidora e as instalações para atendimento das áreas de uso comum constituam uma unidade consumidora distinta, de responsabilidade do condomínio, da administração ou do proprietário do empreendimento, com microgeração ou minigeração distribuída, e desde que as unidades consumidoras estejam localizadas em uma mesma propriedade ou em propriedades contíguas, sendo vedada a utilização de vias públicas, de passagem aérea ou subterrânea e de propriedades de terceiros não integrantes do empreendimento;
- DURAÇÃO DOS CRÉDITOS DE ENERGIA ELÉTRICA = Os créditos de energia ativa resultantes após compensação em todos os postos tarifários e em todas as demais unidades consumidoras expiram em 60 (sessenta) meses após a data do faturamento e serão revertidos em prol da modicidade tarifária sem que o consumidor faça jus a qualquer forma de compensação após esse prazo;

- ASSINATURA DE CONTRATOS = Fica dispensada a confirmação de uso e conexão na qualidade de central geradora para os participantes do sistema de compensação de energia elétrica, nos termos do Capítulo III, sendo suficiente a emissão pela Distribuidora do Relacionamento Operacional para a microgeração e a celebração do Acordo Operativo para a minigeração, nos termos da Seção 3.7 do Módulo 3 do PRODIST.
- POSSIBILIDADE DE COMPENSAÇÃO DE CRÉDITOS DE ENERGIA ENTRE MATRIZES E FILIAIS = O montante de energia ativa injetada que não tenha sido compensado na própria unidade consumidora pode ser utilizado para compensar o consumo de outras unidades consumidoras, observando o enquadramento como empreendimento com múltiplas unidades consumidoras, geração compartilhada ou autoconsumo remoto;

Ainda foram estabelecidos prazos mais curtos de tramitação de pedidos junto às distribuidoras e que estas devem adequar seus sistemas comerciais e técnicos além de elaborar normas técnicas para tratar do acesso de microgeração e minigeração distribuída.

3.4.2 Geração distribuída de energia elétrica no Brasil no âmbito das resoluções normativas ANNEL N° 482 e 687

Durante os cinco anos de sua vigência, a Resolução Normativa de nº 482 (ANNEL, 2012), posteriormente revisada por meio da RN de nº 687 (ANNEL, 2015), vem sendo avaliada por diversos autores voltados à identificação dos fatores que caracterizam o desempenho da micro e minigeração distribuída e sua inserção na matriz energética brasileira.

Segundo Bertois (2012) as políticas de incentivos podem ser categorizadas em três grupos distintos: as políticas de regulamentação, os incentivos fiscais e de financiamento do capital. Muitos governos têm diferentes opções para promover o uso das fontes de energia renováveis. Muitas vezes, uma mistura de instrumentos de incentivos é a chave para seu sucesso. Para o caso brasileiro, Bertois (2012) estudou os instrumentos aplicados à microgeração distribuída, através de fontes renováveis de energia, pelo viés dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR) de distribuição de energia elétrica. Foram propostos cenários que permitiram a aplicação de incentivos sob a perspectiva da aquisição dos componentes, do financiamento e subsídio de capital, de pagamento pela geração de energia elétrica, pelos incentivos fiscais e pelo sistema de Compensação de Energia (*Net Metering*)

adotado no Brasil. Os resultados do estudo indicam que, no Brasil, a microgeração distribuída, através de SFCR, não é viável economicamente sem o auxílio de políticas de incentivo. Entretanto, o sistema de Compensação de Energia (*Net Metering*) e a implantação de linha de crédito, para financiamento do custo inicial investido num SFCR, revelam-se políticas suficientes para contornar esta tendência.

Daniel Cruz (2015), realizou um estudo sobre a da atual conjuntura e a identificação de possíveis barreiras existentes ao desenvolvimento da micro e minigeração de energia elétrica no Brasil através de análise crítica e mensurável da atual maturidade do setor, isto é, do atual estágio de desenvolvimento e da margem de evolução possível nos aspectos mais relevantes para esta atividade, ou seja, regulações, incentivos, capacidade tecnológica e capacitação profissional. Enfocando o desenvolvimento do setor nacional de micro e minigeração eólica e solar (tecnologias com maior potencial de instalação) apresentou propostas de ações visando solucionar questões econômicas, técnicas e regulatórias que possivelmente estão dificultando o alcance de um maior equilíbrio de interesses entre os principais agentes envolvidos nesta atividade econômica, ou seja, potenciais usuários, concessionárias de energia, fabricantes e órgãos do governo, aumentando a atratividade e dinamizando os negócios no setor, com benefícios diretamente estendidos ao desenvolvimento do país como um todo.

Vieira (2013) analisou o potencial de subsídio de políticas públicas para tornar o investimento em SFCR viável em cada estado brasileiro. Comparou os esforços realizados em países como Espanha, Japão, Alemanha e EUA, voltados para o desenvolvimento da energia solar, e percebeu que o Brasil precisará menos subsídios do que praticado nestes países. Pela política de programas Buydown, uma redução de 30% no custo inicial viabilizaria mais de 75% dos estados do Brasil, enquanto nos países supracitados foram aplicadas subvenções de até 70% no custo das placas. Já a política de tarifa premio (FIT) exigiria um prêmio de 140% em relação à tarifa convencional, viabilizando mais de 70% dos estados brasileiros. Nos outros países ocorreram prêmios de até 250% na aplicação dessa política. Quando se compara o investimento feito em usinas hidrelétricas com o resultado de programas que utilizassem esses SFCR, verificam-se resultados que mostram que em alguns casos mais energia seria gerada incentivando-se estes sistemas do que investindo nas grandes hidrelétricas.

Oyama, *et al.* (2016) no seu trabalho de investigação, procurou levantar, analisar e sintetizar as principais políticas de incentivo que vêm sendo empregadas para promover o uso das fontes de energia renováveis para a geração distribuída no país e avaliar o conteúdo da Portaria INMETRO n° 168/2015 – que trata da certificação de aerogeradores. Os resultados

do trabalho mostraram a viabilidade da mini e microgeração distribuídas a partir dos auxílios das políticas de incentivo, e esboçaram um cenário atual do Brasil quanto à certificação dos aerogeradores de pequeno porte nacionais e importados, evidenciando as normas que não foram adotadas na Portaria citada e o impacto delas na segurança do consumidor e na garantia da qualidade do produto. Procurou também uma resposta ao questionamento: por que a micro e minigeração eólica distribuída não vem se desenvolvendo tanto quanto a solar no âmbito da Regulamentação Normativa (REN) nº 482/2012 – aprimorada pela REN nº 687/2015 – pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

De Melo (2016) realizou uma análise comparativa entre a regulamentação governamental para as fontes de energia renováveis no Brasil e na Alemanha, considerando que o Brasil é o país líder mundial na utilização de energia renovável convencional – hidroelétrica, enquanto a Alemanha tem obtido os principais resultados na utilização das Fontes de Energia Renováveis Não Convencionais (FERNC). A análise focou em dois problemas considerados críticos: o quadro legal e regulatório e as instituições criadas para apoiar o desenvolvimento do mercado das FERN. O principal aprendizado do Brasil, com respeito à experiência Alemã é considerar como uma oportunidade estratégica para diminuir a dependência das fontes de energia não renovável, principalmente o petróleo e, por outro lado, da energia renovável convencional, mas baseadas nas grandes plantas hidroelétricas, de modo a descentralizar o setor de energia por meio da priorização do enorme potencial solar, eólico e da biomassa, que garantem o surgimento de uma indústria com relação amigável com o meio ambiente. Para tanto, três pontos críticos foram identificados: (1) O quadro legal e regulatório deve ser melhorado; (2) necessidade de planejamento de longo prazo, levando em conta os aspectos social, econômico e climático e (3) as instituições que de apoio as FERN, no Brasil, devem ser atualizadas e agências específicas de energia devem ser criadas.

Miranda (2012) buscou confrontar o marco normativo das fontes renováveis na Alemanha, a Lei de Fontes Renováveis de Energia do ano de 2001 (Erneuerbare Energien--Gesetz ou EEG) com o recente modelo criado pela ANEEL. O critério de avaliação não pode ser a conformidade com o texto estrangeiro, mas a eficácia da norma no estímulo à adoção em grande escala de novas fontes sustentáveis de energia, com o consequente desenvolvimento tecnológico necessário para a redução de seus custos. Segundo Miranda (MIRANDA, 2012) a Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL não apresenta esse alcance transformador. Ao optar por um complexo sistema de compensação de energia elétrica em vez de simplesmente remunerar o produtor da energia, o modelo brasileiro desconsiderou o principal motivador no sistema produção capitalista - o retorno financeiro.

Benedito (2009) procurou caracterizar a Geração Distribuída de eletricidade, no Brasil, por meio de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR), a partir de aspectos técnicos, econômicos e regulatórios. No estudo foi calculado o custo de geração, a partir da energia solar, utilizando-se SFCR, para dezesseis localidades estrategicamente selecionadas. Esse valor variou em função da maior ou menor disponibilidade do recurso solar e da taxa de desconto adotada, tendo sido encontrado o valor médio de US\$ 0,56 /kWh, cerca de 2,1 vezes maior que a tarifa residencial média nas mesmas cidades. Benedito (2009) considerando que a tarifa convencional tende a crescer nos próximos anos, pressionada pelo descompasso entre oferta e demanda, e que o custo de geração fotovoltaico tende a diminuir, no mesmo período, devido a ganhos de produtividade no processo de fabricação de componentes fotovoltaicos, elaborou um modelo matemático para prever o momento em que esses dois indicadores equiparar-se-ão. Verificou-se que o tempo médio de equiparação será de 7 anos, podendo ser menor que 5,0 anos em localidades onde a tarifa é mais cara que a média nacional e a irradiação média anual é superior à verificada no restante do país. Por fim, o trabalho analisa o enquadramento que a legislação faz dos geradores fotovoltaicos interligados à rede pública de distribuição, apontando os pontos favoráveis e os entraves legais à disseminação dos SFCR.

Akemi (2014) comparou a viabilidade econômica da instalação de células fotovoltaicas em uma unidade consumidora de energia elétrica do grupo B com e sem a assistência da legislação vigente da atividade de microgeração, ou seja, a resolução normativa nº482/2012 da ANEEL. Esse fundamento foi determinado por meio do estudo do tempo de retorno do projeto, vida útil do equipamento e valor economizado durante a vida do investimento. Para o estudo foram coletados dados: geográficos do local de instalação, tecnológicos do equipamento a ser instalado, da potência elétrica de ligação e da tarifa na qual está inserida a unidade consumidora. Concluiu-se que o melhor cenário para obter viabilidade econômica é após o advento da resolução normativa e utilizando capital próprio.

Macedo (2013) avaliou se a geração distribuída de pequeno porte, cujo acesso ao sistema se dá em baixa tensão, pode ser encarada como uma aliada do negócio de distribuição de energia elétrica no Brasil, diante das atuais regras do setor elétrico, com foco nos resultados financeiros para a distribuidora. Empregando uma ferramenta oriunda do conceito de Coopetição, a Rede de Valores, o trabalho apresenta um panorama do atual relacionamento entre distribuidoras e geração distribuída. Três cenários de penetração são avaliados para o Estado do Paraná que, conjugados com dados de mercado da Copel Distribuição S.A., servem de análise sobre a influência do crescimento de geração distribuída na remuneração da

distribuidora. São observados aspectos como a utilização do custo de disponibilidade como remuneração pelo uso do sistema, a perda de receita pela redução do mercado e a influência da variação de mercado no cálculo do Fator X. Os resultados apontam para ausência de motivadores para que as distribuidoras encorajem a geração distribuída de pequeno porte, dentro das atuais regras do setor elétrico e do modelo de negócio de distribuição.

Bruno Freitas e Holanda (2015) avaliaram os projetos de mini e microgeração distribuída, baseados no atual arcabouço regulatório no Brasil e com preocupação voltada para o consumidor final. Verificaram como o tema é abordado em outros países, apresentando suas políticas de incentivo. Com enfoque nos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR), analisaram a sua viabilidade, levando em consideração parâmetros econômicos e a atual regulação. Também discutiram os principais obstáculos para a implementação da mini e microgeração distribuída em maior escala no Brasil, apontando possíveis caminhos que poderiam aumentar os incentivos para que estes sistemas possam ser uma alternativa viável aos que desejam produzir sua própria energia.

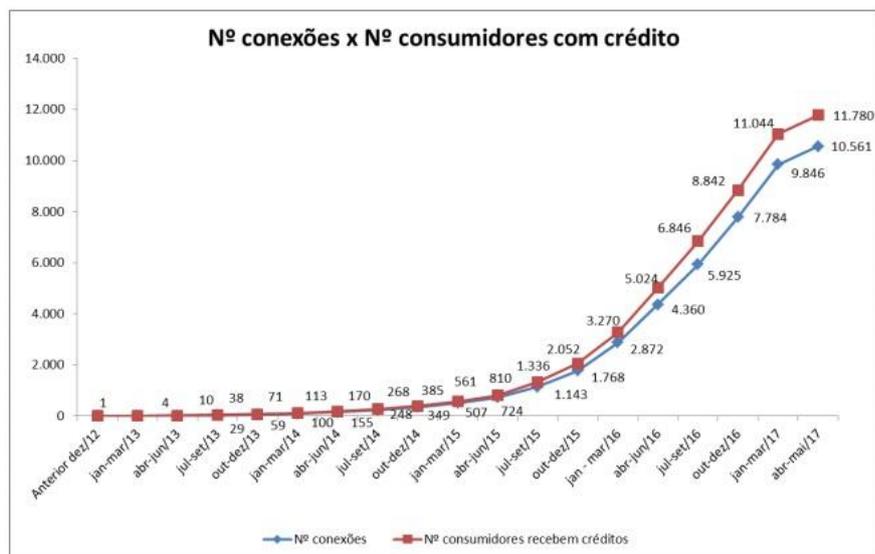
Gianinni, Dutra e Guedes (2013) por meio de estudos no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) apresentam um panorama inicial do mercado de energia eólica de pequeno porte no Brasil, identificando suas principais características, oportunidades e desafios. Conjuntamente, na estrutura do estudo, procuraram elencar e discutir as questões-chaves para a promoção do mercado e seus principais instrumentos de políticas públicas. Um ponto importante é o levantamento das principais questões metodológicas sobre a modelagem para o estudo do potencial da energia eólica de pequeno porte no Brasil. Um levantamento realizado por Dutra e Guedes (2012) mostrou que as tarifas residenciais (incluindo impostos) praticadas pelas concessionárias da Região Nordeste apresentam valores que tornam competitivos os investimentos na geração eólica de pequeno porte utilizando aerogeradores nacionais instalados em locais com fator de capacidade superiores a 20%.

Renny Nakabayashi (2014) analisou a atratividade econômica da micro e minigeração solar com relação às tarifas de energia elétrica. No seu trabalho realizou a avaliação econômico-financeira de sistemas fotovoltaicos de geração distribuída sob a ótica do consumidor residencial. A análise foi realizada para as 27 capitais brasileiras e incluiu estimativas relacionadas às seguintes figuras de mérito: Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Payback (tempo de retorno sobre o investimento). Foi realizada uma análise de sensibilidade e uma projeção dos resultados para o ano de 2020, utilizando Simulação de Monte Carlo.

3.4.3 Situação da resolução normativa ANEEL N° 482/687

Após a publicação da REN 482/12, iniciou-se no país um lento processo de difusão de micro e minigeradores distribuídos, o qual começou a acelerar a partir de 2016. O gráfico da Figura 2, apresenta os valores acumulados de conexões e consumidores que recebem os créditos de micro e minigeração distribuída até o dia 23/05/2017, segundo a Nota Técnica n° 0056/2017-SRD/ANEEL (ANEEL, 2017).

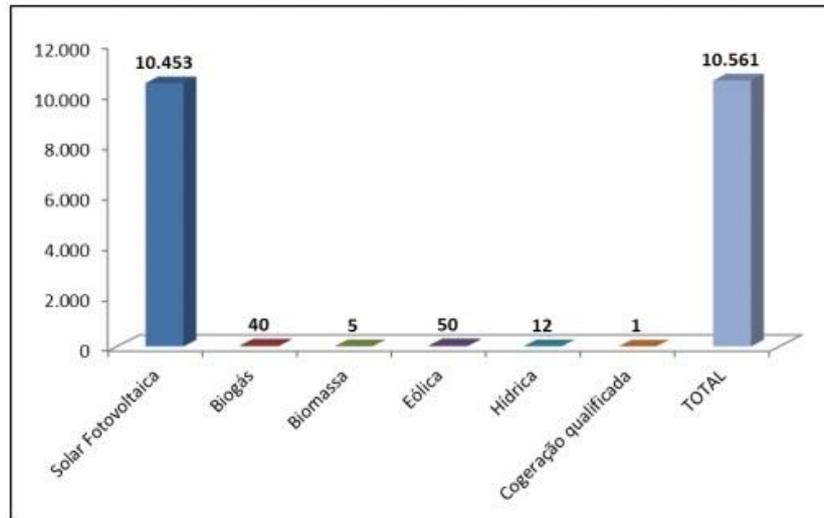
Figura 2 Conexões e consumidores que recebem os créditos de micro e minigeração distribuída. Fonte: (ANEEL, 2017)



O número de consumidores com micro ou minigeração distribuída no final de 2016 é 4,4 vezes superior ao registrado no final de 2015, indicando um crescimento acentuado no último ano, mas ainda abaixo do potencial de expansão no país.

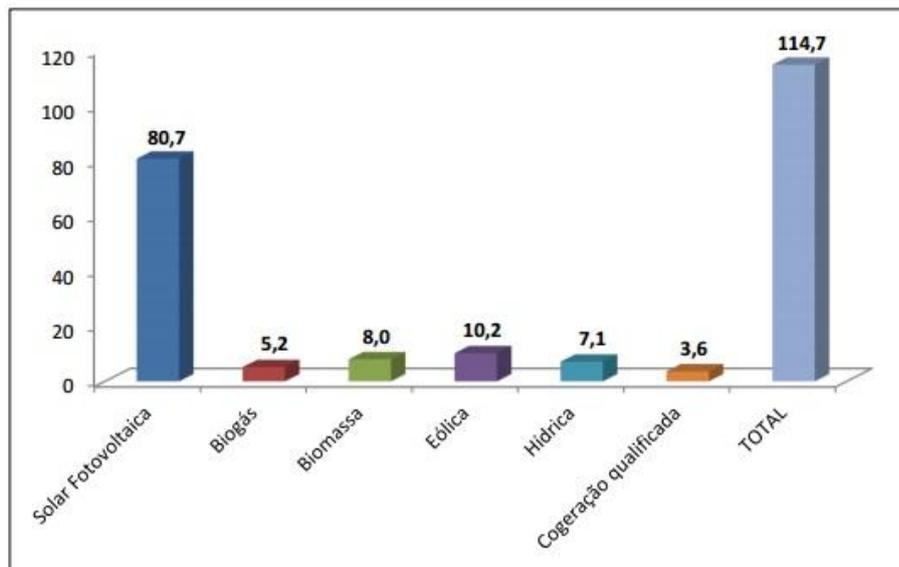
A Figura 3 apresenta o gráfico que ilustra a distribuição dos geradores instalados por fonte de energia, indicando que a fonte solar fotovoltaica representa 99% do número total de instalações, seguida pela fonte eólica.

Figura 3 Conexão por tipo de fonte até 23/05/17. Fonte: (ANEEL, 2017)



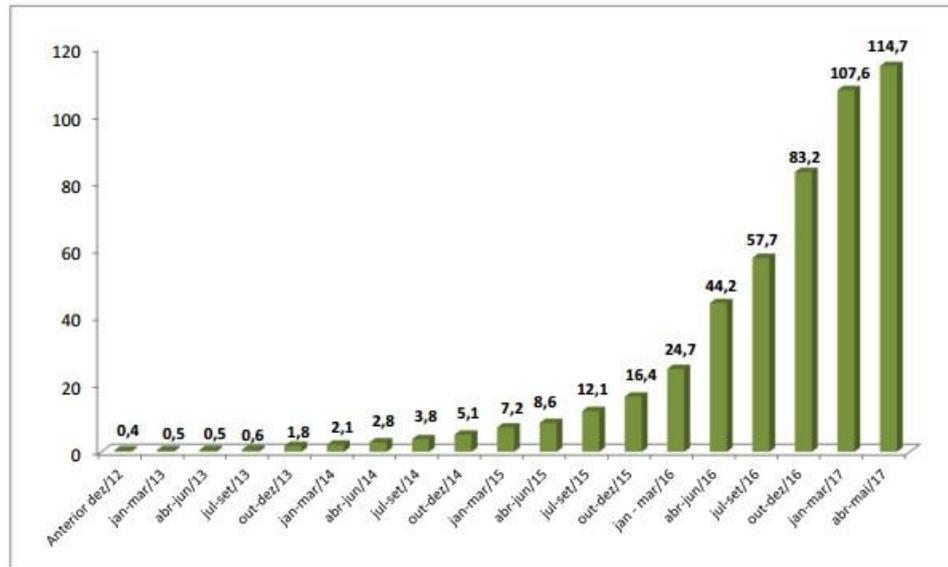
Em termos de potência instalada, a fonte solar responde por 70% e a eólica por 9%, conforme o gráfico apresentado na Figura 4.

Figura 4 Potência instalada por fonte até 23/05/17. Fonte: (ANEEL, 2017)



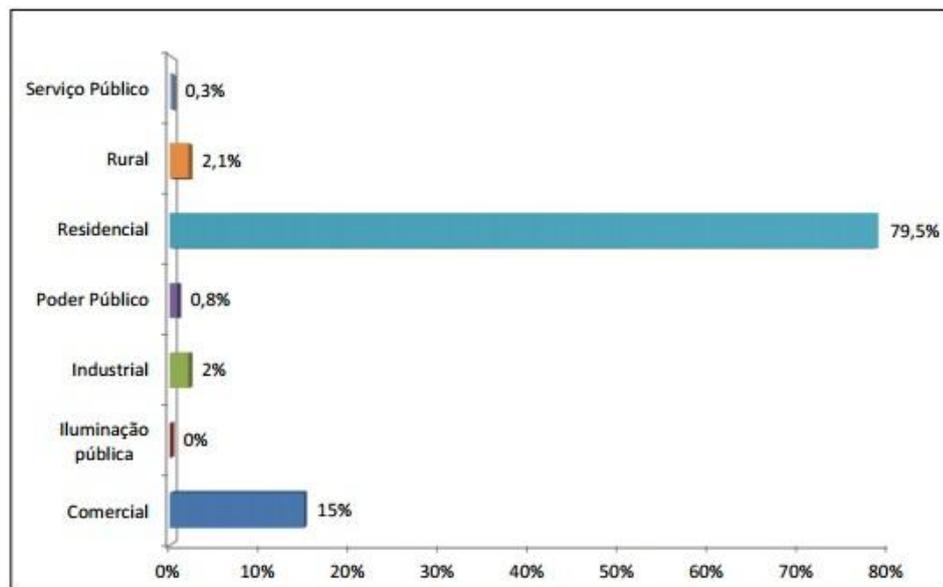
O gráfico da Figura 5 apresenta a evolução da potência instalada desde 2012, evidenciando o forte crescimento em 2016, com aumento de 407% em relação a 2015.

Figura 5 Evolução da potência instalada (MW) até 23/05/17. Fonte: (ANEEL, 2017)



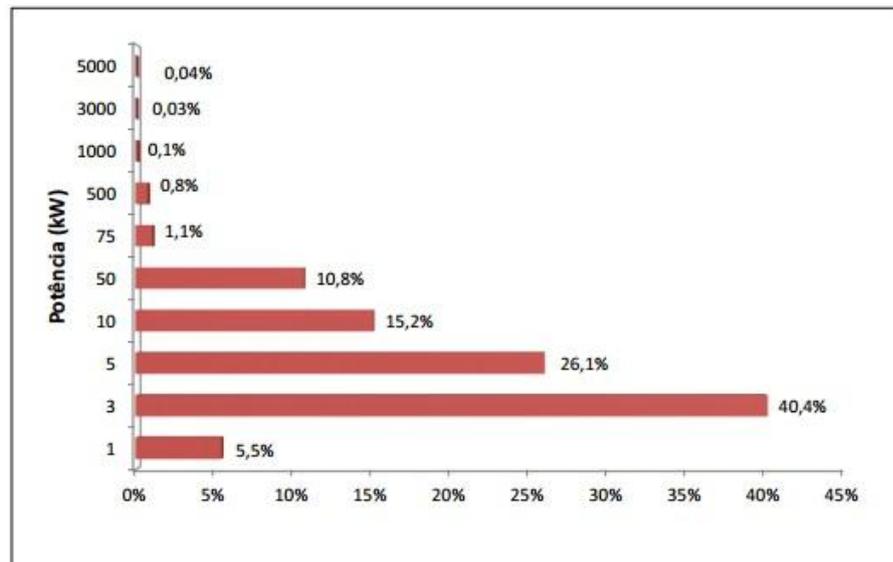
Com relação à participação dos consumidores, destacam-se as classes residencial (79,5%) e comercial (15%), conforme o gráfico ilustrado na Figura 6.

Figura 6 Classes de consumo dos consumidores até 23/05/17. Fonte: (ANEEL, 2017)



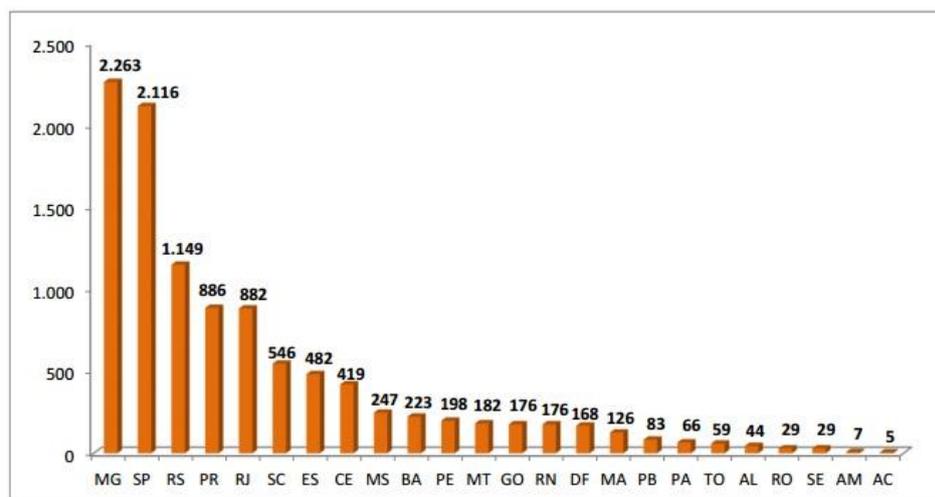
Em termos de faixas de potência, observa-se que 72% dos equipamentos têm potência menor ou igual a 5 kW, o que está associado principalmente ao perfil dos consumidores residenciais, conforme o gráfico apresentado na Figura 7.

Figura 7 Faixas de potência dos geradores até 23/05/17. Fonte: (ANEEL, 2017)



A distribuição de micro e minigeradores por Estado é apresentada no gráfico da Figura 8. A maior concentração de sistemas no Estado de Minas Gerais, seguido por São Paulo.

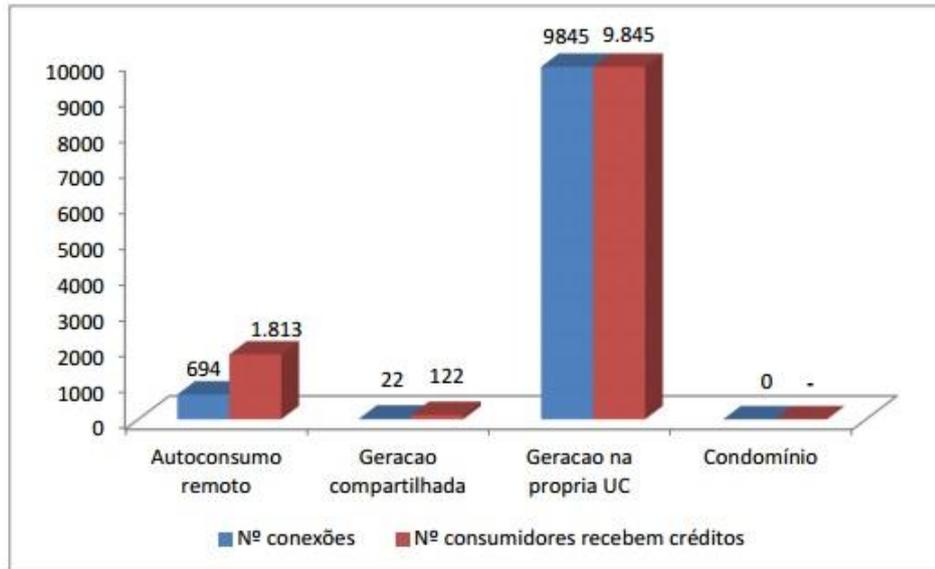
Figura 8 Número de conexões por Estado até 23/05/17. Fonte: (ANEEL, 2017)



Com relação às modalidades de geração distribuída, o gráfico da Figura 9 ilustra a quantidade de conexões e de consumidores que recebem os créditos, ressaltando que no caso de geração na própria unidade consumidora (UC) o sistema atende apenas o próprio local de

consumo, e nos outros casos, a geração destina-se a mais de uma instalação, conforme os requisitos estabelecidos na REN nº 482/2012.

Figura 9 Modalidades de geração distribuída até 23/05/17. Fonte: (ANEEL, 2017)

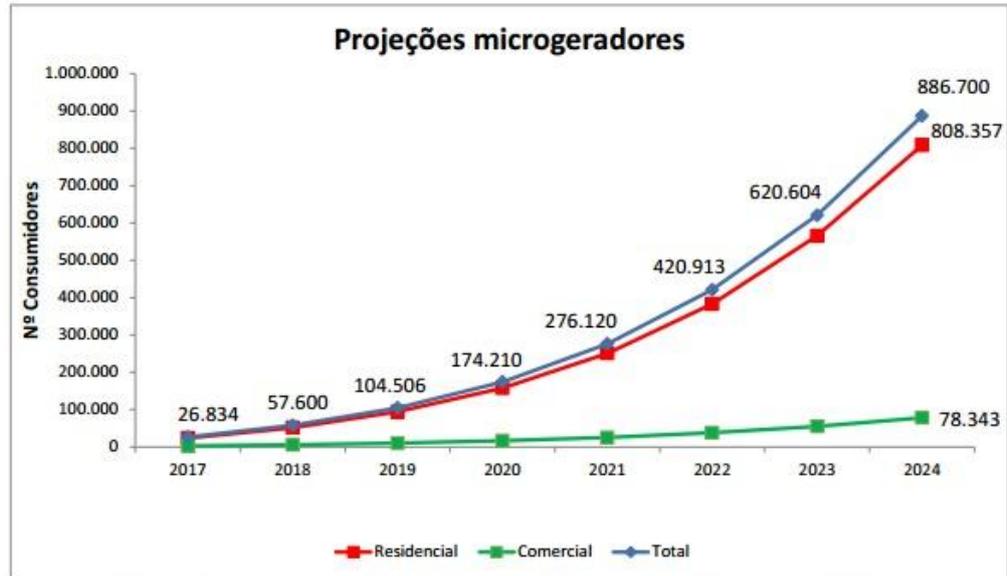


A partir do gráfico da figura 9, pode-se verificar que 93,2% das conexões destinam-se ao atendimento de apenas uma unidade consumidora, o que está coerente com a concentração das instalações de geração nas classes residencial e comercial apresentada na Figura 6. Contudo, deve-se destacar que até o dia 23/05/17, não havia registro de nenhuma conexão de microgeração em condomínios e poucas na modalidade de geração compartilhada, as quais foram inovações trazidas pela REN nº 687/2015.

3.4.3.1 Projeções para o horizonte 2017-2024

Para estimar o crescimento do número de consumidores residenciais e comerciais que irão instalar ou receber os créditos de microgeração solar fotovoltaica no horizonte 2017-2024, a ANEEL adotou-se a mesma metodologia empregada na Análise de Impacto Regulatório - AIR constante do Anexo V da Nota Técnica nº 0017/2015-SRD/ANEEL (ANEEL, 2017). Estimativa apresentada no gráfico da Figura 10.

Figura 10 Projeção de unidades consumidoras que receberiam os créditos.
Fonte: (ANEEL, 2017)



3.5 FONTES DE GERAÇÃO RENOVÁVEL DE ENERGIA ELÉTRICA DISTRIBUIDA

Neste item são apresentadas as principais características das tecnologias utilizadas na GREED e que são contempladas na Resolução Normativa 482/687 da ANEEL (ANEEL, 2012).

Como as tecnologias em questão possuem um vasto cabedal de conhecimento estabelecido os conceitos teóricos, apresentados neste trabalho, se resumem aos fundamentos necessários à construção do modelo MCDA.

3.5.1 Energia eólica

Para o aproveitamento dos ventos como fonte de energia, uma previsão da velocidade do vento é de suma importância. É necessário avaliar a sua variação ao longo do dia, das estações do ano e com a altura, pois a caracterização do potencial eólico de um local configura-se como item básico para um projeto eólico.

3.5.1.1 Análise do vento

O cálculo da velocidade média diária, mensal e anual constitui-se em uma informação fundamental para a definição da condição técnica de uma área para aproveitamento de geração eólica (Equação 1).

$$V = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (1)$$

Onde,

v_i é a velocidade do vento registrada (m/s)

n é o número de dados (adimensional)

Além da velocidade média do vento durante um período, sua distribuição também é um fator crítico na avaliação de recursos eólicos. As turbinas eólicas instaladas em dois locais com a mesma velocidade média do vento podem apresentar uma produção de energia totalmente diferente devido às diferenças na distribuição da velocidade.

Após sua obtenção, os dados de velocidade, referentes a um local considerado, devem ser submetidos a um tratamento estatístico, de forma a proceder-se à análise para estimativas do comportamento dos ventos, baseadas no período em que foram realizadas as medições. Do tratamento dos dados são obtidos os parâmetros estatísticos como a velocidade média e o desvio padrão, necessários à definição do regime de ventos e, em consequência, do potencial eólico de um dado local.

A velocidade do vento é considerada como uma variável aleatória contínua. Ela varia ao longo do dia, do mês, do ano. Para melhor ser analisada, pode ser representada por uma distribuição estatística. A distribuição que melhor consegue descrever as estatísticas da velocidade do vento é a distribuição de *Weibull*.

Segundo Mathew (2006), na distribuição *Weibull*, as variações na velocidade do vento são caracterizadas por duas funções: (1) A função densidade de probabilidade e (2) A função de distribuição cumulativa. A função de densidade de probabilidade ($f(v)$) indica a fração de tempo (ou probabilidade) para a qual o vento está a uma dada velocidade v e é dada por:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (3)$$

Onde,

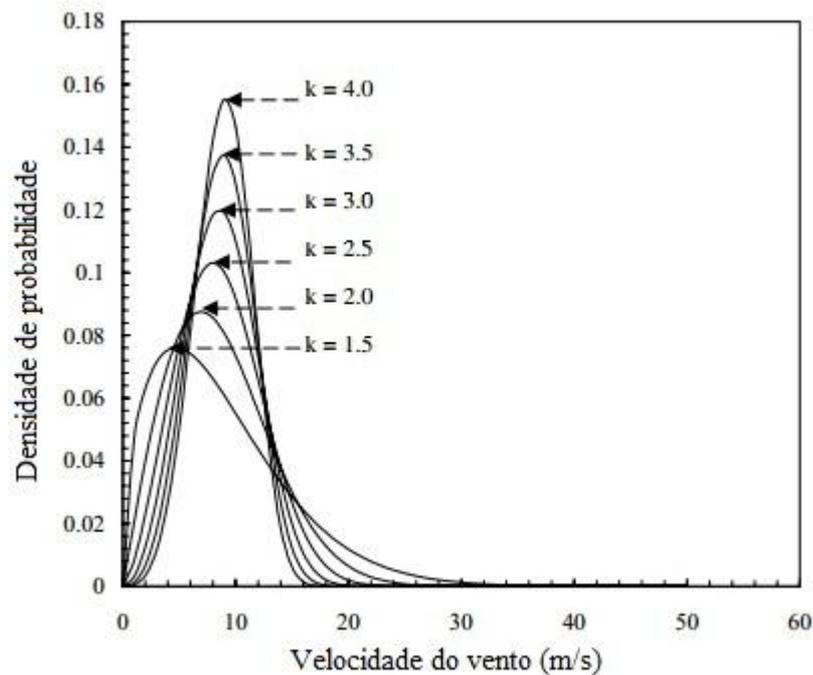
v é a velocidade do vento registrada (m/s)

c é o fator de escala (m/s)

k é o fator de forma (adimensional)

O gráfico da Figura 11 ilustra a função densidade de probabilidade de Weibull para diferentes fatores de forma.

Figura 11 Função de densidade de probabilidade Weibull para diferentes valores de k . Fonte: Extraído de (MATHEW, 2006)

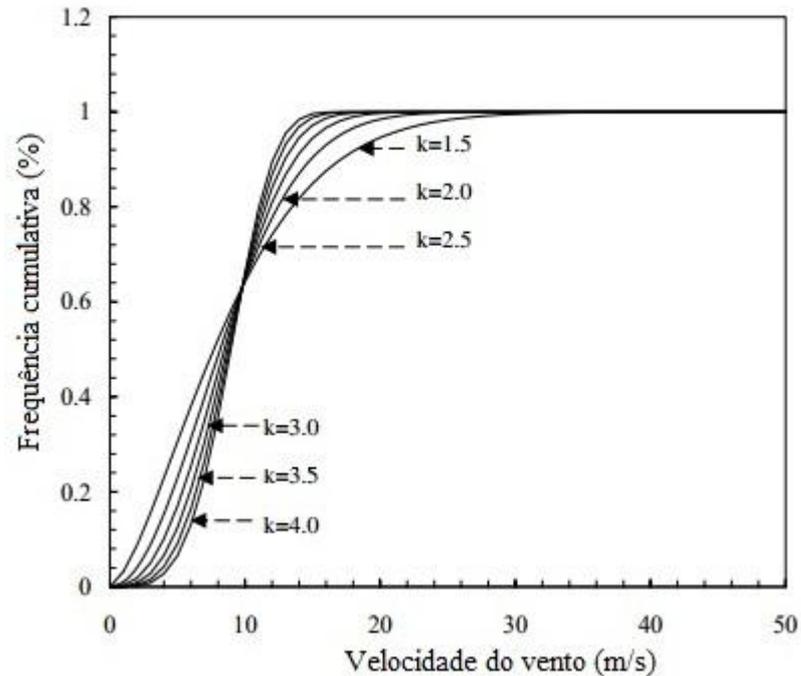


A função de distribuição cumulativa da velocidade v nos dá a fração de tempo (ou probabilidade) que a velocidade do vento é igual ou inferior a v . Assim, a distribuição cumulativa $F(v)$ é a integral da função de densidade de probabilidade, portanto,

$$F(v) = \int_0^{\infty} f(v)dv = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (4)$$

O gráfico da figura 12 apresenta a função de distribuição cumulativa de *Weibull* para diferentes fatores de forma.

Figura 12 Função de distribuição cumulativa de *Weibull* para diferentes valores de k . Fonte: Extraído de (MATHEW, 2006)



O fator de escala c está relacionado com a velocidade média do vento no local. Já o fator de forma k relaciona-se com a variância da velocidade do vento em torno da velocidade média.

A velocidade média do vento de um regime, seguindo a distribuição de Weibull é dada por:

$$V_m = \int_0^{\infty} v f(v) dv \quad (5)$$

Segundo Lysen, (1983), a velocidade média pode ser expressa como uma função de c e de k ou, vice versa, c uma função de V_m e k . Substituindo $f(v)$ (Equação 3), a intergral resultante não pode ser resolvida, entretanto pode ser reduzida para uma intergral padrão denominada função gama, que é definida por;

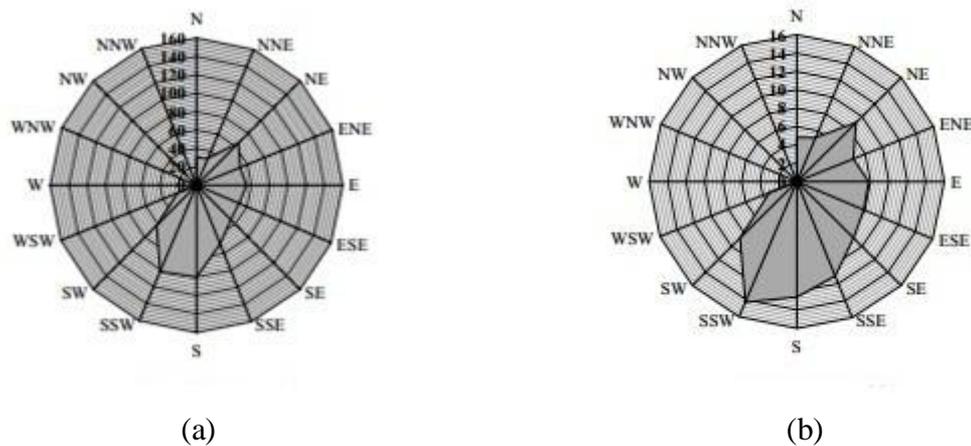
$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-y} y^{x-1} dy \quad (7)$$

Com $y = \left(\frac{v}{c}\right)^k$ e $\frac{v}{c} = y^{x-1}$ se obtém $x = 1 + \frac{1}{k}$ e após algumas manipulações matemáticas, que:

$$V_m = c \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (6)$$

Sabe-se que o vento varia também em direção. Assim, deve-se levar em conta este comportamento. Normalmente, as direções são divididas em setores onde são feitos os estudos do comportamento do vento e apresentados graficamente através da rosa dos ventos. A determinação da direção predominante do vento é importante para a definição da direção de posicionamento dos aerogeradores. A Figura 13 ilustra os gráficos referentes a rosa dos ventos.

Figura 13 Rosas de vento mostrando a distribuição de freqüência (a) de velocidade (b) em diferentes direções. Fonte: Extraído de (MATHEW, 2006)



O estudo da distribuição das direções constitui fator essencial em um projeto, considerando que a localização dos aerogeradores devesse ser tal que seja minimizado o comprometimento da captação energética individual.

A potência disponível no vento que passa em uma área A , transversal ao fluxo de ar é dada pela Equação 4 (CUSTÓDIO, 2007).

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (8)$$

Onde:

P é a potência do vento (W)

ρ é a massa específica do ar (kg/m^3)

A é a área da seção transversal (m^2)

v é a velocidade do vento (m/s)

Verifica-se nesta equação uma relação direta entre a potência disponível no vento e a massa específica do ar. Esta por sua vez varia com a temperatura e a pressão atmosférica. Uma expressão para a estimativa da massa específica do ar, ou densidade, em função da altitude do local e da temperatura ambiente é dada pela Equação 9 (CUSTÓDIO, 2007) e (LIMA e GUIMARÃES, 2011)

$$\rho = \frac{352,4 \left(1 - \frac{z}{45271}\right)^{5,2624}}{273,15 + t} \quad (9)$$

Onde :

ρ é a massa específica do ar (kg/m^3)

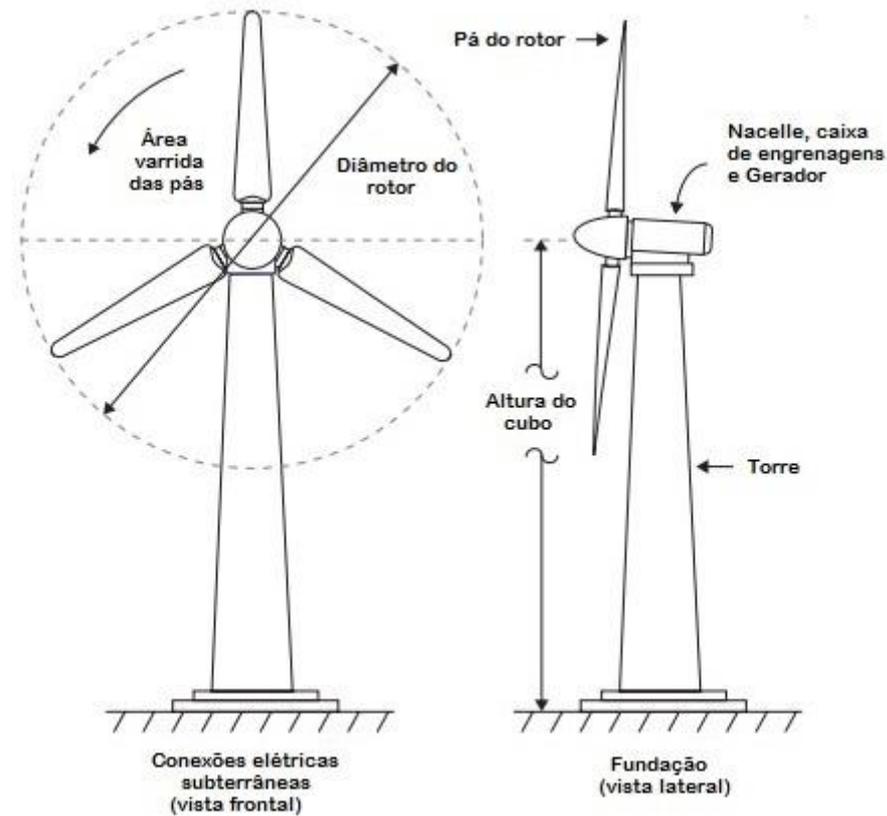
z é a altitude do local (m^2)

T é a temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$)

3.5.1.2 Extração da potência do vento

A extração da energia cinética do vento é realizada por aerogeradores. A ação dos ventos sobre um rotor eólico transforma sua energia cinética em energia mecânica que é transformada em energia elétrica por meio de um gerador. Na Figura 14 estão apresentados os elementos componentes de um aerogerador.

Figura 14 Desenho esquemático de um aerogerador. Extraído de (CASES, 2005)



A potência desenvolvida por uma turbina eólica depende da velocidade do vento e da velocidade rotacional. As relações entre potência, a velocidade do vento e a velocidade rotacional são, normalmente, apresentadas por coeficientes adimensionais, a fim de tornar esta informação aplicável em diversas circunstâncias.

Uma turbina eólica não pode extrair toda a potência disponível do vento. Quando o fluxo de vento passa pela turbina, uma parte da sua energia cinética é transferida para o rotor e o restante é “arrastada” pelo ar que sai da turbina. Portanto, a potência real produzida por um rotor é definida pela eficiência com que esta transferência de energia do vento para o rotor ocorre. Esta eficiência geralmente é denominada como o coeficiente de potência C_p . Ele indica a relação entre a potência realmente extraída do vento por uma turbina eólica e a potência disponível no vento. Sua expressão é apresentada na Equação 10 (MATHEW, 2006).

$$c_p = \frac{P_t}{\frac{1}{2} \rho A v^3} \quad (10)$$

Onde:

C_p é o coeficiente de potência (adimensional)

P_t é a potência produzida pela turbina (W)

ρ é a massa específica do ar (kg/m^3)

A é a área da seção transversal (m^2)

V é a velocidade do vento (m/s)

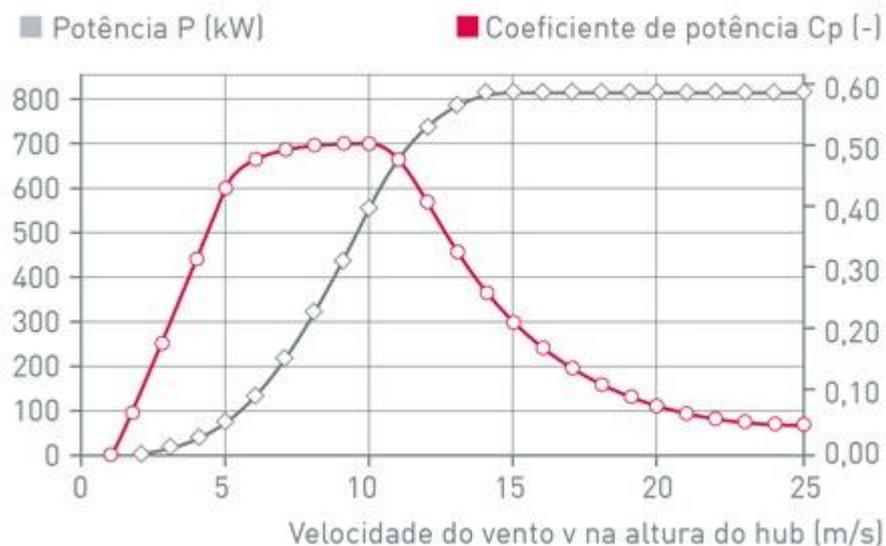
Na expressão (10) a potência extraída pela turbina teórica (P_t), não considera as perdas mecânicas da operação. O verdadeiro valor da potência extraída do vento é menor, assim como o coeficiente de potência real da turbina e pode ser corrigido:

$$C_{p\text{corr}} = C_p \cdot \eta$$

Onde η representa o rendimento das perdas mecânicas e varia entre 0 e 1.

A Figura 15 ilustra o gráfico da curva de potência e do coeficiente C_p em função da velocidade do vento de um aerogerador eólico, no caso, fabricado pela ENERCON, modelo E-48/800 kW (ENERCON, 2017).

Figura 15 Curva da potência calculada e do coeficiente de potência do aerogerador ENERCON modelo E-48 / 800 kW (ENERCON, 2017)



Percebe-se, por meio do gráfico da Figura 14, que o C_p da turbina eólica varia de acordo com a velocidade do vento. Esta variação se refere ao fato das pás do rotor alterarem sua eficiência aerodinâmica em função da variação do vento incidente. O ponto máximo de C_p indica a máxima eficiência da turbina. No caso da potência, verifica-se que aumenta com a velocidade do vento, até que alcance a potência nominal da turbina e, a partir daí, permanece constante. Para o caso de velocidade do vento excessivamente alta, a turbina é retirada de operação para evitar o estresse mecânico do conjunto.

3.5.1.3 *Estimativa da energia gerada*

Para se estimar a energia gerada em uma fazenda eólica devem ser seguidas as seguintes etapas (G.P.VIAJANTE):

- Escolha do local
- Medição do vento no local
- Tratamento dos dados de vento
- Escolha dos aerogeradores
- Definição da capacidade da fazenda eólica
- Definição do *layout* para os aerogeradores
- Cálculo da energia gerada na fazenda eólica

Para a escolha do local a ser instalada uma fazenda eólica, alguns fatores devem ser levados em consideração. O regime de vento da região deve ser analisado, uma vez que a potência de um aerogerador varia proporcionalmente com o cubo da velocidade do vento. Deve-se ainda levar em consideração a interligação com a rede elétrica, o que sugere que o local esteja próximo das linhas de transmissão para que as perdas na transmissão sejam as menores possíveis.

3.5.1.3.1 Dados do vento

Para a análise do vento são utilizados os mapas de potencial eólico, que são mapas temáticos dos regimes médios de vento (velocidade, direções predominantes e parâmetros estatísticos de *Weibull*) e fluxos de potência eólica de acordo com as alturas das medições consideradas. Para o Brasil, tem-se o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, desenvolvido pelo

CEPEL – ELETROBRÁS, que cobre todo o território nacional e apresenta dados de velocidade média anual e direção do vento para diversas alturas (30, 50, 80, 100, 120, 150 e 200 metros), tendo como base as simulações realizadas com o modelo de mesoescala *Brams* e o ajuste dos resultados com dados medidos referentes ao ano de 2013 (CEPEL, 2018).

3.5.1.3.2 Ajuste da velocidade do vento

O cálculo da produção de energia leva em consideração os efeitos das variações da densidade do ar no cálculo da produção de energia pelo uso de dados referentes à altitude e temperatura dos locais e as alturas das torres das turbinas.

A produção de energia não ajustada é a energia produzida pelas turbinas em condições padrão de temperatura e pressão atmosférica. O cálculo é baseado na velocidade média do vento na altura do cubo do aerogerador para o local proposto. A velocidade do vento na altura do cubo é geralmente significativamente maior que a velocidade do vento medida na altura do anemômetro devido ao cisalhamento do vento. Com base em Cases, (2005) para o cálculo da velocidade média do vento na altura do cubo pode-se utilizar a lei de potência que é dada por:

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{h}{h_0}\right)^\alpha \quad (11)$$

Onde,

v é a velocidade média do vento na altura do cubo h ,

v_0 é a velocidade do vento na altura no anemômetro h_0

α é o expoente de cisalhamento do vento.

Os valores de h , h_0 , v_0 e α são especificados por o usuário.

Para condições onde a altura do cubo do aerogerador encontra-se próxima a altura do ponto de medição (velocidade conhecida), aplica-se diretamente a expressão logarítmica, que é dada por:

$$\frac{v}{v_0} = \frac{\ln\left(\frac{h}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_0}{z_0}\right)} \quad (12)$$

Onde,

v é a velocidade média do vento na altura do cubo h ,

v_0 é a velocidade do vento na altura no anemômetro h_0

z_0 é o comprimento de rugosidade [m].

Os valores de h , h_0 , v_0 e z_0 são especificados por o usuário.

A lei de potência é decorrente de experimentos e é mais adequada para alturas superiores a 100 m, onde a lei logarítmica tem limitações. Neste trabalho foi utilizada a lei de potência para encontrar a velocidade média do vento a uma altura de 18 m.

3.5.1.3.3 Tratamento dos dados do vento

A justada a velocidade, pode ser calculado o fator de escala c por meio da Equação 6. A partir dos valores da velocidade média v e dos fatores k e c , a função de densidade de probabilidade Weibull ($f(v)$) pode ser calculada fornecendo a fração de tempo (ou probabilidade) para a qual o vento está a uma dada velocidade v .

3.5.1.3.4 Energia extraída por meio do aerogerador

A partir da Curva de Potência, fornecida pelo fabricante, para o aerogerador escolhido, obtém-se a energia anual gerada. Considerando que o ano contém 8760 horas, a Produção Anual de Energia – PAE (do inglês, da norma IEC - AEP *Annual Energy Production*) para cada aerogerador em kWh é dada pela Equação 13 (CUSTÓDIO, 2007).

$$PAE = \sum [f(v)P(v)] \quad (13)$$

Onde:

v é a velocidade do vento [m/s]

$f(v)$ é a frequência de ocorrência da velocidade do vento v

$P(v)$ é a potência produzida pelo aerogerador na velocidade do vento v

A partir da Energia Anual Gerada é possível determinar o fator de capacidade F_c , ou seja,

$$F_c = \left(\frac{PAE}{(P_n 8,76)} \right) 100 \quad (14)$$

Onde:

P_n é a potência nominal do aerogerador, fornecida pelo fabricante

3.5.2 Energia solar

As células fotovoltaicas (FV), convertem diretamente a luz solar em eletricidade sendo sua forma moderna inventada em 1954 nos laboratórios da *Bell Telephone*. Hoje, a tecnologia FV é uma das tecnologias de energias renováveis de mais rápido crescimento e espera-se que ela represente um grande papel no futuro mix global de geração de eletricidade. Os sistemas FV também são um dos mais "democráticos" entre as tecnologias renováveis, na medida em que seu tamanho modular significa que eles estão ao alcance de indivíduos, cooperativas e pequenas empresas que desejam ter acesso a sua própria geração de energia elétrica.

A Energia Solar Fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (Efeito Fotovoltaico). O efeito fotovoltaico, relatado por Edmond Becquerel, em 1839, é o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz. A célula fotovoltaica é a unidade fundamental do processo de conversão (CEPEL-CRESESB, 2004)

O ano de 1958 marca o início, com grande sucesso, da utilização de fotocélulas nos programas espaciais, sendo este o principal uso das células solares até o final da década de 70. A crise energética de 1973 renovou e ampliou o interesse em aplicações terrestres e em 1998 a produção de células fotovoltaicas atingiu a marca de 150 MWp, sendo o Silício quase absoluto no ranking dos materiais utilizados (CEPEL-CRESESB, 2004). A partir do fim da

década de 70, o uso terrestre supera o uso espacial, sendo que esta diferença vem aumentando de modo intenso. Este uso crescente vem sendo acompanhado por inovações que permitem o aumento da eficiência de conversão de energia das fotocélulas, bem como uma significativa redução de seus custos. O problema da eficiência de conversão e custo de material, e ainda o grande conhecimento adquirido pela teoria física das células têm impulsionado a pesquisa de células solares produzidas com materiais diferentes do silício monocristalino. Atualmente são estudados e mesmo utilizados o silício policristalino e amorfo, o arseneto de gálio e o sulfeto de cádmio, dentre outros. No entanto, o conhecimento da tecnologia que emprega o silício, em particular o monocristal e a abundância da matéria prima que lhe dá origem, tem sido as razões mais importantes que tornaram o silício o material predominante no processo de desenvolvimento tecnológico (FADIGAS, s.d.).

Uma célula fotovoltaica é a unidade básica de um sistema fotovoltaico. É a responsável pela conversão da radiação solar em eletricidade. Como uma única célula não é suficiente para gerar potências elétricas elevadas, os fabricantes associam várias células, e as encapsulam para proteção, formando assim um módulo fotovoltaico. Os módulos comerciais diferem entre si por vários fatores, como a capacidade de gerar potencial, chamado de potência-pico, fator de forma, área, etc. E esses valores se alteram de acordo com o tipo de célula fotovoltaica utilizada. A Tabela 1 relaciona os principais tipos de células fotovoltaicas com respeito as suas eficiências em utilização.

Tabela 1 Células fotovoltaicas. Fonte (FADIGAS, s.d.)

Material	Eficiência em Laboratório (%)	Eficiência em produção (%)	Eficiência em produção em série (%)
Silício Monocristalino	24,7	18	14
Silício Policristalino	19,8	15	13
Silício Amorfo (a-Si)	13	10,5	7,5
Disseleneto de Cobre e Índio (CIS)	18,8	14	10
Telureto de Cádmio (CdTe)	16,4	10	9

O custo das células solares foi, inicialmente, o grande desafio para a indústria e o principal empecilho para a difusão dos sistemas fotovoltaicos em larga escala. No entanto, a tecnologia fotovoltaica está se tornando cada vez mais competitiva, tanto porque seus custos

estão decrescendo, quanto porque a avaliação dos custos das outras formas de geração está se tornando mais real, levando em conta fatores que eram anteriormente ignorados, como a questão dos impactos ambientais.

3.5.2.1 Sistemas fotovoltaicos (FV) conectados a rede (on grid)

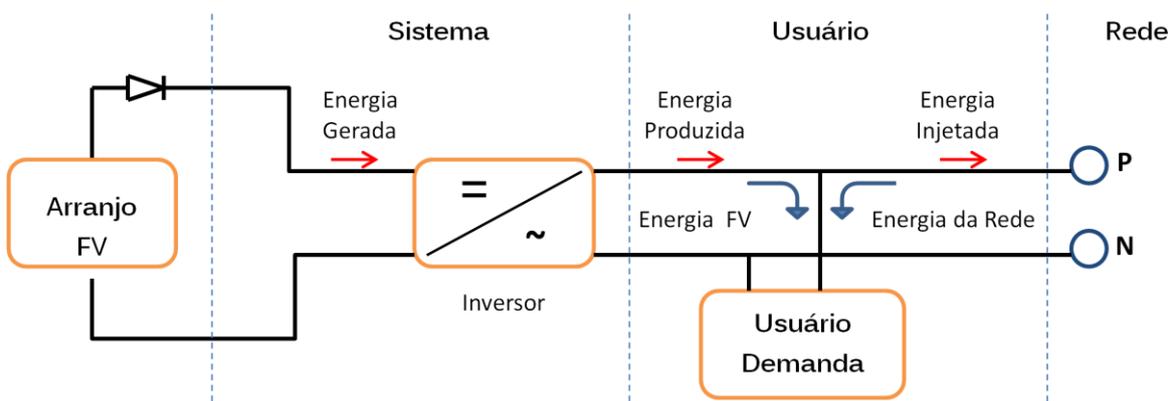
Sistemas *on grid* são aqueles caracterizados por estarem integrados à rede elétrica que abastece a população, sendo, portanto, os sistemas utilizados na GREED. Diferente dos sistemas isolados (*off grid*) que atendem a um propósito específico e local, estes sistemas também são capazes de abastecer a rede elétrica, possibilitando o seu uso por qualquer consumidor interligado. Tais sistemas dependem de regulamentação e legislação favorável, pois usam a rede de distribuição das concessionárias para o escoamento da energia gerada. Os sistemas conectados têm uma grande vantagem com relação aos isolados, por não utilizarem baterias e controladores de carga. Isso os torna cerca de 30% mais eficientes e também garante que toda a energia seja utilizada, ou localmente, ou em outro ponto interligado. Eles podem ser utilizados tanto para abastecer uma residência, ou simplesmente produzir e injetar a energia no sistema público de distribuição, assim como uma usina hidroelétrica ou térmica.

Na configuração mais comum, eles são instalados de tal forma que, quando o gerador solar fornece mais energia do que a necessária para o atendimento da instalação consumidora, o excesso é injetado na rede elétrica, a instalação consumidora acumula um crédito energético (o relógio contador típico é bidirecional e neste caso anda para trás).

Por outro lado, quando o sistema solar gera menos energia do que a demandada pela instalação consumidora, o déficit é suprido pela rede elétrica, como mostra o esquema da Figura 16 (MOURA, 2009).

Figura 16 Esquema ilustrativo da aplicação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede.

Fonte: (MOURA, 2009)



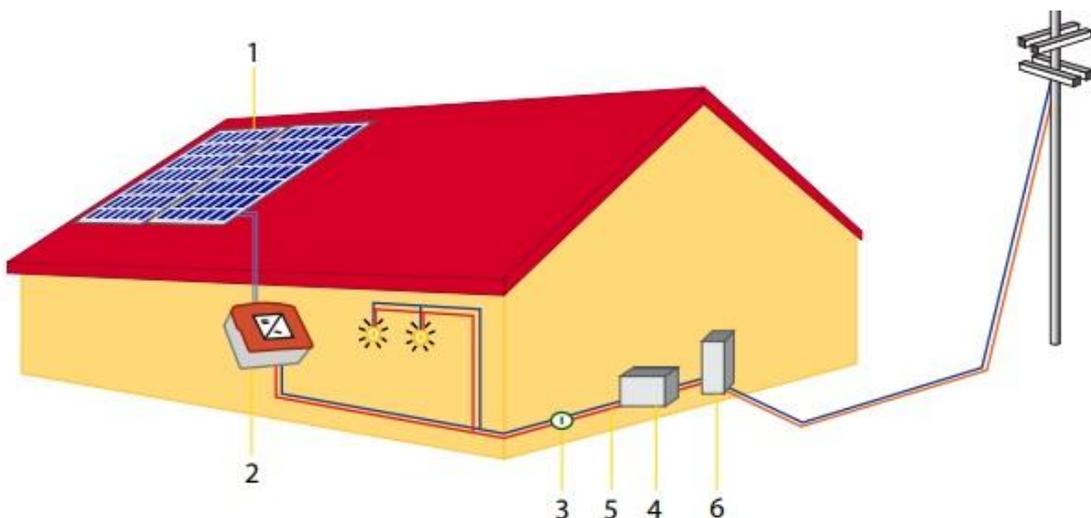
Perdas por transmissão e distribuição, comuns ao sistema tradicional de geração centralizada, são assim minimizados. Outra vantagem destes sistemas é o fato de representarem usinas descentralizadas que não ocupam área extra, pois estão integradas ao envelope da edificação, (RÜTHER, 2004).

Basicamente um sistema fotovoltaico conectado à rede é composto por dois equipamentos principais: o gerador, constituído pelo conjunto de módulos fotovoltaico (FV), também chamado arranjo FV, responsável pela coleta da irradiação solar incidente no seu plano e geração da energia elétrica com tensão de corrente contínua (CC); e o inversor que transforma e inverte a energia produzida na tensão de operação da rede elétrica convencional, corrente alternada (CA). A Figura 17 ilustra um sistema completo fotovoltaico conectado a rede.

Podem ser observados os seguintes componentes:

- 1 – Módulos Fotovoltaicos;
- 2 – Inversor *Grid-Tie* – Transforma a corrente contínua do módulo em corrente alternada de 127V/220V e 60Hz, compatível com a eletricidade da rede;
- 3 – Interruptor de Segurança;

Figura 17 Sistema conectado a rede (on grid). Fonte: (SOUZA, s.d.)



- 4 – Quadro de Luz - distribui energia para casa;
- 5 – A eletricidade alimenta os utensílios e eletrodomésticos;

- 6 – O excedente volta para a rede elétrica através do medidor fazendo-o rodar ao contrário, reduzindo a tarifa de energia elétrica.

3.5.2.2 Conceitos básicos para o projeto básico de um sistema fotovoltaico (on grid)

Para o projeto de um sistema fotovoltaico é necessário um profundo conhecimento da carga, suas características, perfil ao longo dos dias e meses como também das características da radiação solar incidente no local. O critério de dimensionamento pode ser o de menor custo, maximização da energia suprida (confiabilidade) ou uma combinação de ambos. Em projetos de aplicação de pequeno porte, o dimensionamento é mais simplificado, baseando-se nos valores médio das cargas e radiação solar como, por exemplo: radiação diária (kWh/m^2), média mensal ou valores típicos, e, comportamento médio da carga (FADIGAS, s.d.)

Existem para isto planilhas eletrônicas que orientam passo a passo o dimensionamento do sistema.

Pode-se dividir o projeto de um sistema fotovoltaico em três etapas:

- (a) Avaliação do recurso solar
- (b) Estimativa da demanda de energia elétrica
- (c) Escolha da configuração do sistema com base nos critérios de projeto e dimensionamento dos componentes do sistema

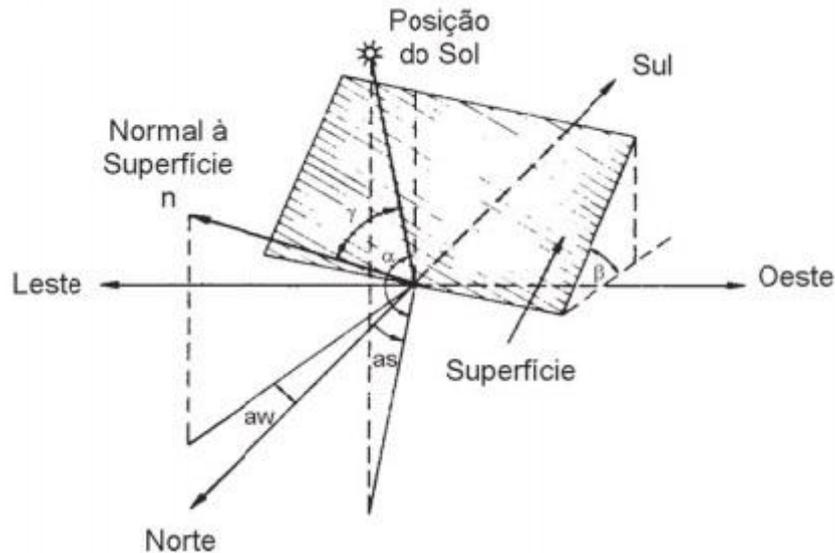
Discriminando,

- (a) Avaliação do recurso solar.

Em aplicações para suprimento de pequenas demandas, os módulos são instalados em posição fixa, orientados para o hemisfério norte (módulos instalados no hemisfério sul) com inclinação segundo a latitude do local e perfil de demanda. Em projetos de maior porte, pode-se tornar viável economicamente instalar sistema seguidor do movimento do sol de acordo com a hora do dia e com o dia do ano (movimento em dois eixos: (Leste-Oeste; Norte-Sul). A Figura 18 ilustra ângulo de posicionamento do sol com relação à abertura do plano do painel. A corrente gerada pelo módulo é dada pela expressão $I = I_o \cdot \cos \gamma$; onde I_o é a corrente gerada com o ângulo de incidência do sol normal à superfície horizontal e γ é o ângulo de incidência do sol com relação à normal. Para ângulos de incidência do sol acima de 50° , a energia gerada

desvia significativamente da lei do cosseno. Por exemplo, para ângulo igual a 50° , o cosseno é igual a 0,5, porém, a energia gerada é igual a 0,45 da gerada com ângulo de incidência normal à superfície.

Figura 18 Relações geométrica sol-terra-painel solar. Fonte: (SOUZA, s.d.)



Normalmente, as estações meteorológicas fornecem a radiação solar total incidente do plano horizontal, assim sendo é necessário corrigir esta radiação no plano de abertura do painel, ou seja:

Radiação solar incidente no plano de abertura = radiação solar horária (plano horizontal) x cosseno do ângulo de inclinação segundo a latitude do local.

Os dados de radiação solar também são especificados em termos de fluxo de potência (kW/m^2), valor médio ao longo do dia, e energia acumulada ao longo de um dia em número de horas de sol pleno. Esta grandeza reflete o número de horas em um dia em que a radiação solar dever permanecer em 1000 W/m^2 , de forma que a energia resultante seja a mesma coletada naquele dia.

(b) Estimativa da demanda.

Para dimensionamento do sistema de geração é necessário analisar as características da demanda, potência nominal e perfis de consumo ao longo dos meses. A forma mais comum de se especificar uma carga é através do seu consumo diário de energia. Uma forma de avaliar a carga é através do produto do consumo nominal dos equipamentos, expressos em ampéres, e do tempo de utilização em bases diária. O consumo pode também ser expresso em Watt-hora.

Outro fator importante na avaliação da carga é a determinação dos valores extremos de consumo (máximo e mínimo) para que os componentes possam ser dimensionados segundo as condições críticas de operação. Além disso, deve-se pensar que todos os equipamentos poderão ser acionados ao mesmo tempo. Tensão nominal e características adicionais sobre os equipamentos (CA ou CC, eficiências, etc) completam a especificação da carga.

(c) Configuração e dimensionamento da geração fotovoltaica.

De posse dos dados meteorológicos de relevância e da expectativa de demanda de energia para o sistema, parte-se para o dimensionamento do painel fotovoltaico. Trata-se também de um processo iterativo onde o projetista oscila entre a escolha do modelo e o cálculo do número de unidades necessárias para um dado sistema, considerando aspectos como vida útil, confiabilidade e custo. A escolha do tipo, arranjo e do número de módulos fotovoltaicos a serem utilizados depende de uma série de fatores, dentre eles:

- tensão nominal do sistema - curva característica
- curva característica $I \times V$
- custo da área disponível para instalação
- degradação do desempenho em função da temperatura ambiente e idade dos módulos
- custo e expectativa de vida para o módulo.

O processo de determinação da capacidade instalada dos módulos divide-se basicamente em duas partes. A primeira consiste na determinação da inclinação do arranjo e do mês crítico (de acordo com os dados estimados ou medidos de radiação solar para o local) e a segunda consiste na determinação do número de módulos (FADIGAS, s.d.).

Os parâmetros mais importantes para o dimensionamento são:

- consumo calculado para a carga
- radiação solar global no plano do painel
- eficiência do banco de baterias
- perdas causadas por componentes adicionais (depende da configuração)

A determinação da energia gerada pelo painel solar pode ser feita pela seguinte equação:

$$Eg = \frac{Con}{\eta_i \eta_f} \quad (15)$$

Onde:

Eg = energia gerada pelo painel (kWh)

Con = consumo diário de energia (kWh)

η_i = eficiência do inversor (em aplicações de corrente alternada)

η_f = perdas na fiação

A potência instalada pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$P = \frac{Eg}{SP} \quad (16)$$

Onde:

P = potência instalada em kW

SP = horas máximas de radiação (Ex: radiação solar diária média incidente no pior mês de $5 \text{ kWh/m}^2 = 5 \text{ horas de } 1\text{kW/m}^2$ (radiação máxima incidente)

A energia anual gerada pelo painel pode ser expressa por:

$$EG = P \times FC \times 8760 \text{ h/ano} \times DI(kWh) \quad (17)$$

Onde:

EG = energia anual gerada (kWh)

FC = fator de capacidade do sistema (INS/24)

8760 = número de horas no ano

DI = disponibilidade do sistema (número de horas/ano em que o sistema está disponível)

Além do dimensionamento do painel, o projetista vai confrontar-se com a especificação dos controladores de carga e sistema de condicionamento da potência. Estes componentes, que se integrarão ao sistema em função do tipo de aplicação e/ou configuração, precisam de uma correta especificação para uma boa operação.

Esta metodologia simplificada, apresentada acima, por se basear em valores médios dos componentes, muitas vezes conduz a um dimensionamento que se costuma chamar de “não ótimo”, ou seja, maximiza a confiabilidade, além da necessária, sobredimensionando os componentes o que conduz a um custo elevado. Por se caracterizar por maior simplicidade é útil para dimensionar sistemas de pequeno porte.

Existem diversos softwares para auxiliar no projeto de sistemas fotovoltaicos. Os softwares já possuem cadastrados os principais modelos de painéis e inversores disponíveis no mercado além da base de dados meteorológicos que ajudam prever o volume de energia a ser gerada pelo sistema. Vale a pena comparar os dados de irradiação com os valores dos atlas solarimétricos do Brasil, pois muitas vezes, encontram-se diferenças não desprezíveis. Podemos citar o PV*Sol (2018), PVsyst (2018), Sunny Design (2018) e Solergo (2018) como alguns dos softwares mais utilizados. A NeoSolar (2018) disponibiliza a Calculadora Solar Fotovoltaica para uma primeira estimativa do tamanho do sistema de energia solar (*Grid Tie*). Ainda, o Instituto Ideal lançou recentemente um simulador solar muito prático no site América do Sol (América do Sol, 2018).

3.5.2.3 Potencial do recurso solar no Brasil

O projeto *Solar and Wind Energy Resource Assessment – SWERA* (SWERA, 2012) reúne em seu site bancos de dados e ferramentas de análise do recurso solar e eólico desenvolvidos em conjunto com várias organizações internacionais. As informações e dados disponibilizados no site do SWERA estão livremente disponíveis ao público e são destinados a apoiar o trabalho de políticos, analistas, investidores e outros tomadores de decisão envolvidos com o setor energético. A coordenação das atividades no Brasil e América Latina ficou com o Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de

Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) que publicou como um dos resultados do projeto SWERA, o "Atlas Brasileiro de Energia Solar" (PEREIRA, 2006). A partir dos mapas do Atlas é possível verificar que a energia solar apresenta médias diárias anuais acima de 4,2 kWh/m² para todo o território nacional, chegando a valores acima de 6,4 kWh/m² nas regiões com maior nível de incidência solar anual, que são ótimos níveis.

3.5.3 Energia hidráulica

De um modo geral a tecnologia de geração de energia elétrica, por meio de recursos hidráulicos, apresenta características importantes que a destaca entre os meios renováveis de geração de energia, entre elas pode-se citar (CERPCH, 2018):

- A energia é produzida a uma taxa constante; sendo assim, a necessidade de armazenamento em baterias é quase inexistente e a energia está disponível a qualquer hora;
- A tecnologia é robusta, totalmente estabelecida e apresenta vida útil elevada, cerca de 20 anos, podendo atingir 50 a 60 anos de funcionamento sem maiores investimentos, com um baixo custo de reparos e manutenção;
- As centrais não emitem dióxido de carbono (CO₂) ou qualquer outro resíduo prejudicial à saúde, além de serem silenciosas e operarem com reduzida perda de calor.

Por outro lado as seguintes desvantagens podem ser citadas:

- É uma tecnologia de "local específico"; isto é, são necessários locais adequados, próximos ao ponto onde a energia será utilizada;
- Secas e mudanças na utilização da água e do solo podem reduzir a produção de energia;

As Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH's) são empreendimentos de exploração de recursos hídricos para produção de energia elétrica, no qual se instalam turbinas hidráulicas acopladas aos geradores de eletricidade, que são impulsionadas pelo fluxo d'água resultante de um desnível provocado por barragem ou um curso d'água (POLIZEL, 2007). Não

necessitam de grandes reservatórios e operam a fio d'água. As pequenas centrais possibilitam ainda, melhor atendimento às necessidades de carga de pequenos centros urbanos e regiões rurais, e representam um dos principais focos de prioridade com relação à expansão da oferta de energia elétrica no Brasil.

A Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, por meio da resolução de nº 394, ANEEL (1998), definiu a Pequena Central Hidrelétrica, ou PCH, como usinas hidrelétricas de pequeno porte e com capacidade instalada de geração superior a 1 MW e inferior a 30 MW. Além disso, a área do reservatório deveria ser igual ou inferior a 3 km². Tal área é delimitada pela cota d'água associada à vazão de cheia com tempo de recorrência de 100 anos. Posteriormente essa definição foi modificada para um limite inferior de capacidade de 3 MW com área de reservatório de até 13 km², excluindo a calha do leito regular do rio (ANEEL, 2015).

De acordo com as “Diretrizes para Elaboração de Projeto Básico de Usinas Hidrelétricas” da ELETROBRAS (1999), as PCH's podem ser classificadas conforme o desnível da queda d'água e pela capacidade de geração conforme Tabela 2.

Existem dois tipos de PCH's:

(a) PCH de acumulação - são empregadas para regularizar as vazões hídricas necessárias para a produção de energia elétrica. Este tipo é construído quando a vazão do curso d'água não for suficiente para suprir a descarga necessária do sistema gerador. Neste caso, a barragem acumula água nas horas de baixo consumo elétrico para utilizar nos períodos de alta demanda.

Tabela 2 Classificação das PCH's . Fonte: (ELETROBRAS, 1999)

Classificação das PCH's:	Potência (kW)	Queda de Projeto – H _d (m)		
		Baixa	Média	Alta
Micro	P < 100	H _d < 15	15 < H _d < 50	H _d > 50
Mine	100 < P < 1.000	H _d < 20	20 < H _d < 100	H _d > 100
Pequena	1.000 < P < 30.000	H _d < 25	25 < H _d < 130	H _d > 130

(b) PCH a fio d'água - a vazão não é regularizada por meio de acumulação. Tal tipo é adotado quando a vazão mínima do rio for maior do que a descarga necessária para atender à demanda de geração elétrica.

As PCH's que operam a fio d'água, ou seja, permitem a passagem contínua de toda água com capacidade nominal mais estável, aproveitando a vazão natural dos rios sem precisar estocar grandes quantidades de água. Com isso, em ocasiões de estiagem, a vazão disponível pode ser menor que a capacidade das turbinas, causando ociosidade. Em situações contrárias, as vazões são maiores que a capacidade de utilização das máquinas, fato esse que permite a passagem de água pelo vertedor.

Quanto à microcentrais hidrelétricas, estas são as mais adequadas para possibilitar a geração de eletricidade em pequenas propriedades rurais. Elas são construídas aproveitando-se cursos d'água com vazões e quedas relativamente pequenas, através de obras simples, baratas e com os menores impactos ambientais. Se as condições topográficas e hidrológicas forem adequadas, a construção de uma microcentral hidrelétrica justifica-se em diversas situações, destacando-se os seguintes casos (CERPCH, 2018):

- Nas propriedades que se encontram localizadas distantes das redes de distribuição de eletricidade das concessionárias;
- Nas propriedades onde o consumo de energia elétrica é elevado;
- Nas propriedades onde se deseja abastecimento em rede trifásica e a concessionária só atende em rede monofásica. A vantagem das linhas trifásicas é a de permitirem o acionamento de motores trifásicos, que são mais baratos que os monofásicos, demandam menores custos de manutenção, e são encontrados com maiores potências;
- Para a inserção social, com uso da energia na melhoria das condições das atividades produtivas de uma propriedade ou de uma comunidade;
- Para atendimento a programas de universalização do uso da energia elétrica, etc.

– Vantagens e limitações das microcentrais hidrelétricas

- ☑ ·Apresentam concepção simplificada, que lhes proporciona baixo custo de implantação e manutenção e facilidade na operação;
- ☑ A tecnologia é de fácil adequação para a fabricação e utilização em países em desenvolvimento ou em áreas remotas;
- ☑ ·A manutenção das microcentrais é bastante simples. Resume-se na lubrificação periódica dos rolamentos e na substituição de correias de transmissão, quando necessário. Trabalhos de conservação das estruturas, tais como pintura e limpeza também são recomendadas;
- ☑ ·Os custos totais, geralmente, são menores do que os custos das outras alternativas tecnológicas;
- ☑ ·Não há grandes barragens, obras hidráulicas importantes e grandes alagamentos; assim, os problemas enfrentados pelas grandes hidroelétricas, como o deslocamento de populações e a estratificação dos reservatórios, são evitados;
- ☑ ·Nos pequenos riachos, onde são normalmente instaladas, a potência máxima é limitada e não pode ser aumentada caso haja um crescimento da demanda.
- ☑ ·Apresentam concepção simplificada, que lhes proporciona baixo custo de implantação e manutenção e facilidade na operação.

As PCHs são instaladas principalmente em rios de pequeno e médio porte que possuam desníveis significativos o suficiente para gerar potência hidráulica que movimentará as turbinas da usina. Estas, por sua vez, acionarão o gerador elétrico, transformando a energia cinética de rotação em energia elétrica. A energia elétrica é, então, conduzida, por meio de cabos elétricos ou barras condutoras, dos terminais do gerador até o transformador elevador, onde sua tensão será elevada para a adequada condução, por meio de linhas de transmissão, até os centros de consumo. A tensão tem seu valor elevado, principalmente, para reduzir as perdas através dos fios condutores das linhas de transmissão.

3.5.3.1 Componentes de uma PCH

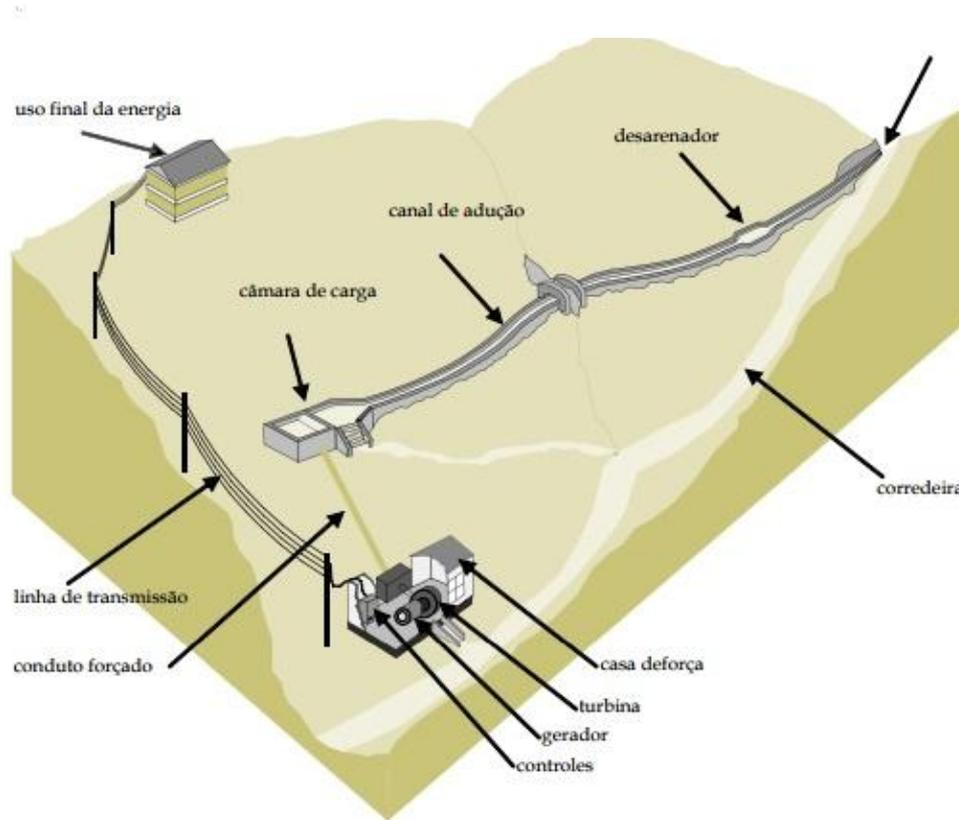
Os componentes que compõem uma PCH podem ser divididos em dois grupos principais: as estruturas civis para o represamento, captação e adução da água e os

componentes hidromecânicos e eletromecânicos. Entre as obras civis podem ser destacadas as seguintes estruturas:

- O Reservatório: acumula água para regularizar o rio e garantir a vazão mínima a ser turbinada.
- O Vertedouro: controla o nível do reservatório impedindo que, durante uma grande cheia, a água passe por cima da barragem, danificando sua estrutura.
- A Barragem: tem a função de reter a água, criando artificialmente um desnível. Podem ser construídas com os mais diversos tipos de materiais (pedras, concreto, madeira ou alvenaria de tijolos) e no caso das PCHs, não têm a função de acumulação, mas sim de desviar parte da vazão para o canal de adução. Tal característica é responsável pela sua forma de operação (operação a fio d'água). Segundo CERPCH (2007, p. 14) as barragens raramente são construídas somente para uma microcentral, mas, algumas vezes, uma pequena barragem é integrada a uma microcentral de geração de energia para o controle de cheias e para o uso com sistemas de irrigação. Em alguns casos, essas barragens de microcentrais são adaptadas para o suprimento de água, ou utilizadas para fornecer uma vazão "remanescente", ou seja, a vazão mínima especificada pelos comitês reguladores para salvar peixes e plantas que estão à jusante (abaixo) da barragem. É uma estrutura que deve ser bem calculada, pois envolve sérias questões de segurança.
- A Tomada d'água: estrutura, geralmente construída de concreto, responsável pela captação de água do reservatório.
- O Canal de adução: sua função é conduzir a água do reservatório da tomada d'água à câmara de carga; segue uma mesma curva de nível.
- A Câmara de carga: elemento que liga o canal de adução ao conduto forçado. Conduto forçado: conduz a água sob pressão do trecho mais inclinado até a casa de máquinas, onde irá ser turbinada.
- A Casa de máquinas: construção que abriga os grupos geradores (turbina e gerador elétrico) e os equipamentos de controle, em alguns casos pode abrigar ainda os equipamentos elétricos de transmissão.
- O Canal de fuga: devolve ao leito do rio a vazão de água que passou pela turbina.

Alguns destes componentes podem ser observados na Figura 19.

Figura 19 Representação esquemática de uma PCH. Fonte: (CERPCH, 2018))

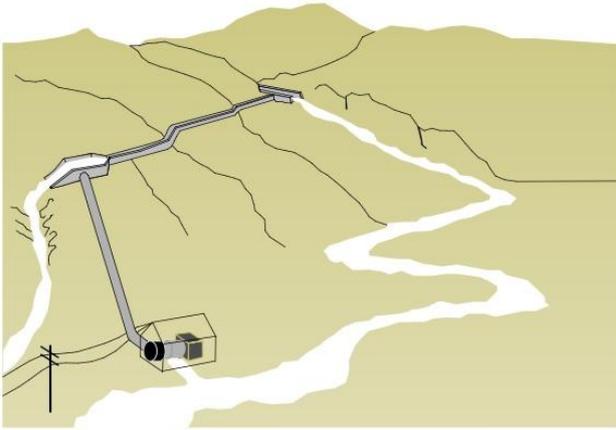


3.5.3.2 Formato de uma microcentral hidrelétrica

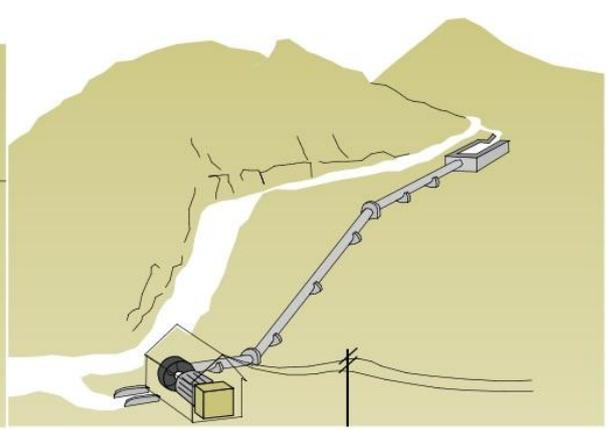
Na prática o que define o arranjo de uma microcentral hidrelétrica é a forma do relevo, ou a topografia do local escolhido para a construção, e os locais que são apropriados para a construção de uma microcentral hidrelétrica podem variar extremamente. Incluem desde as posições montanhosas, onde há áreas de cachoeiras, de rápidos e de corredeiras das montanhas, passando pelos rios de planalto até chegar aos córregos e aos rios das planícies, mais largos e lentos. Em alguns casos o desenvolvimento envolve pequenas obras e adaptações, já em outras situações exige construções de maior porte e soluções inteiramente novas. A Figura 20 a seguir ilustra as quatro disposições de arranjo das estruturas mais comuns para uma microcentral hidrelétrica, segundo CERPCH (2007. P. 10).

Figura 20 Disposições de arranjo das estruturas mais comuns para uma microcentral hidrelétrica.
Fonte: (CERPCH, 2018)

(a) *Microcentral em desvio com canal de adução e conduto forçado*



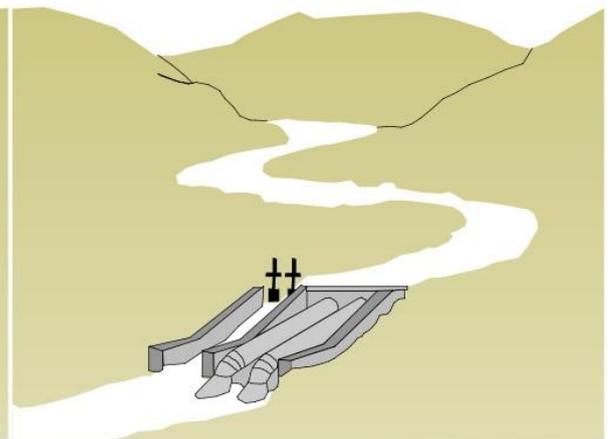
(b) *Microcentral em desvio apenas com conduto forçado*



(c) *Microcentral de baixa queda em desvio sem conduto forçado*



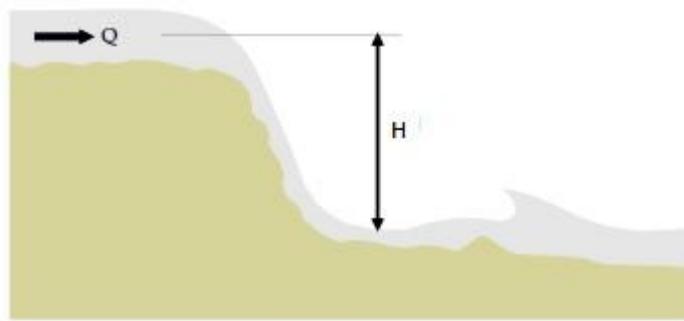
(d) *Microcentral de baixa queda com represamento*



3.5.3.3 Energia gerada

A energia hidráulica é medida por duas grandezas: o desnível e a vazão de água (Figura 21). O desnível é a medida vertical entre o nível do lago da represa formada pelo barramento e o nível mais baixo onde a água pode ser devolvida no leito natural do rio. E a vazão é a água disponível para a movimentação das turbinas hidráulicas.

Figura 21 Cálculo da potência hidráulica. Fonte: (CERPCH, 2018)



Para o cálculo da energia hidráulica tem-se a seguinte fórmula:

$$P_H = \rho g H Q \quad (18)$$

Onde:

P_H é potência hidráulica (W)

ρ é a massa específica da água (kg/m³)

g é aceleração da gravidade (9,81 m/s²)

H é desnível hidráulico (m)

Q é a vazão disponível (m³/s)

Os equipamentos utilizados atualmente nas centrais hidrelétricas são capazes de converter uma grande parte da energia hidráulica disponível em energia útil. Apesar disso, durante essa conversão ocorrem perdas inevitáveis. Por esse motivo a potência hidráulica é corrigida por um rendimento que leva em consideração todas essas perdas, sendo então a potência útil igual a:

$$P_U = \rho g H Q \eta \quad (19)$$

Sendo:

P_U é a potência útil

η é o rendimento global da conversão

O rendimento global dos equipamentos utilizados nas microcentrais situa-se dentro da faixa de 50% a 70% sendo que os maiores valores são para os aproveitamentos de maior potência.

Se a água cai ou é conduzida de um nível mais alto para um nível mais baixo, então essa vazão de água resultante pode ser utilizada. Normalmente um conduto ou uma tubulação forçada é utilizado para levar a água declive abaixo, e disto resulta uma vazão de água sob pressão. Quando se permite que a água mova algum tipo de turbina, a pressão é então transformada em energia mecânica e pode ser utilizada no acionamento de um gerador elétrico ou um moinho de grãos ou algum outro tipo de equipamento. Para se determinar a energia gerada, duas medições são necessárias: a queda d'água, que é a diferença da altura vertical pela qual a água cai, e a vazão existente, que é medida em metros cúbicos por segundo. Determinada a potência, pode ser feita uma estimativa aproximada do custo da microcentral. Sabendo-se que o custo médio para cada kW instalado é da ordem de R\$ 4.500,00, basta multiplicar esse valor pela potência do aproveitamento para se obter o custo da microcentral. Ressalta-se que essa estimativa poderá falhar para os casos de potências abaixo de 20 kW (CERPCH, 2018).

Para Ivandel, Hambus diretor do Portal PCH,

“O que determina a instalação de uma pequena central hidrelétrica é um levantamento do potencial hídrico do rio, um projeto básico sobre a capacidade de geração, além do cálculo do custo do empreendimento. Somente de posse desse número é que saberemos se é viável ou não a instalação de uma PCH. Por isso, esse tipo de empreendimento demanda estudos prévios para verificar a sua viabilidade”. Ivandel destaca ainda que “dentre os diversos fatores, é importante mencionar que o retorno do investimento é em curto prazo, em função da tendência de aumento no custo de energia elétrica. Hoje a PCH é uma energia limpa e viável que promove uma geração distribuída e proporciona um desenvolvimento econômico e sustentável”. Portal Massa Cinzenta (2010),

3.5.3.4 Capacidade instalada no Brasil

Segundo dados da Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL (2018), a capacidade instalada das PCH's no país, é de cerca de 5.031.451 kW de potência outorgada e potência fiscalizada pela ANEEL de 5.014.775 kW, com 431 usinas em operação, representando 3,19% de toda a energia gerada no país. Existe espaço para mais 2.200 unidades apenas para suprir a demanda interna.

As resoluções elaboradas pela ANEEL permitem que a energia gerada nas PCH's entre no sistema de eletrificação, sem que o empreendedor pague as taxas pelo uso da rede de transmissão e distribuição. O benefício vale para quem entrou em operação até 2003. As PCHs são dispensadas ainda de remunerar municípios e estados pelo uso dos recursos hídricos.

No que diz respeito à geração distribuída, no âmbito da REN ANEEL nº 482/687, apenas 12 usinas estão em operação com capacidade de geração instalada de 7.100 kW (ANEEL, 2017)

3.5.4 Bioenergia

Neste trabalho considerou-se a bioenergia no que diz respeito à geração de biogás como combustível para o acionamento de motores de combustão interna que, por sua vez, acionam geradores elétricos para a produção de energia.

O biogás constitui uma mistura gasosa obtida pela conversão microbiológica anaeróbia de resíduos agroindustriais e domésticos, que tem como componente principal o metano. Como o gás metano é uma importante fonte energética, o biogás é considerado um biocombustível de origem biológica, não fóssil, e sendo uma fonte de energia renovável, pode auxiliar consideravelmente a emancipação da dependência dos combustíveis oriundos da cadeia petroquímica (CASSINI, POVINELLI, *et al.*, 2003).

A complexidade de tipos de biomassa que podem ser utilizados em processos de biodigestão para produção de biogás é imensa. Porém para ser usada a biomassa como substrato, ela deve possuir na sua composição carboidratos, proteínas, gorduras, celulose e hemicelulose (que são polissacarídeos) (STEINHAUSER, 2008).

Em Pernambuco a Companhia de Eletricidade do Estado de Pernambuco – ELPE, juntamente com a ANEEL, desenvolveu um projeto de P&D intitulado “Arranjos técnicos e

comerciais para inserção de geração de energia elétrica a partir do biogás de resíduos e efluentes líquidos dentro de um modelo com biodigestores dispersos” (PERES e PALHA, 2016). Tal projeto resultou no Inventário da Biomassa Produtora de Biogás de Pernambuco, que pode ser considerado como um exemplo importante de comprovação do potencial do biogás como combustível alternativo para a geração de energia elétrica no Brasil.

De acordo com a ANNEL, ANEEL (2008), a biomassa é considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética, reduzindo assim a dependência por combustíveis fósseis.

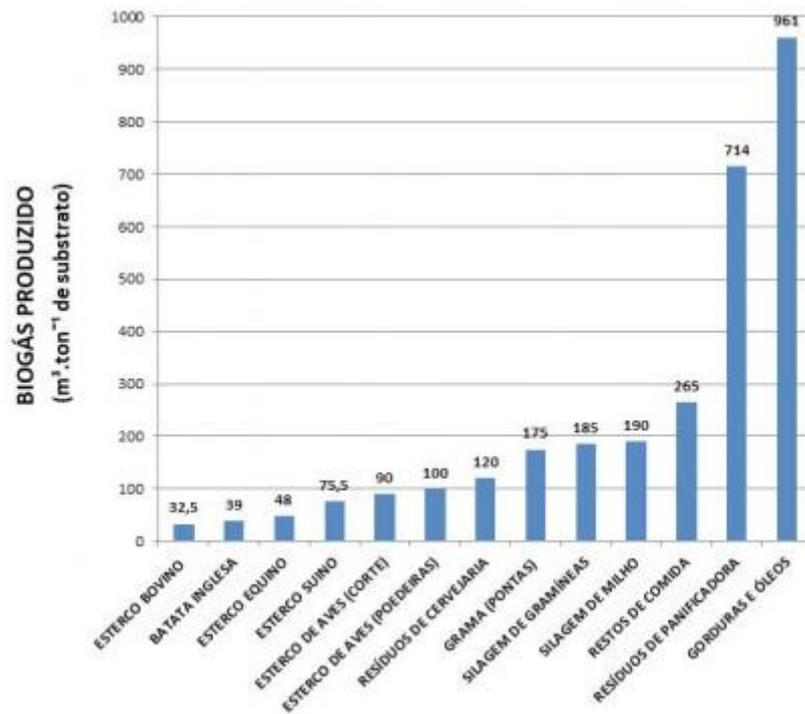
A produção de biomassa e sua utilização na produção do biogás possui seu maior potencial a partir de dejetos de animais da pecuária, de resíduos sólidos na agricultura e na agroindústria e a partir de esgotos sanitários e resíduos sólidos urbanos.

A agricultura familiar, a criação de pequeno porte e a pequena agroindústria, se de um lado são determinantes nas condições socioeconômicas da população rural, por outro, geram resíduos impactantes ao meio ambiente e nem sempre de fácil degradabilidade. A utilização do potencial energético gerado a partir da utilização desses resíduos é, sem dúvida, uma estratégia de enorme impacto, não apenas na proteção ao meio ambiente, como também na melhoria da renda da população.

A biomassa descartada anualmente nos sítios pode ser utilizada para a produção de biometano, principal componente do biogás que ao ser produzido, gera como resíduo o adubo líquido com baixa carga orgânica e rico em sais nutrientes para o solo. Logo, o biogás pode ser utilizado para produzir energia elétrica ou energia térmica e o adubo orgânico para adubar as plantações.

Segundo PERES e PALHA (2016, p.22) os excrementos de animais são os que produzem um menor teor de biogás em comparação com as silagens e restos de comida, onde se enquadram as perdas pós – colheita de frutas e verduras. Portanto, estima – se que os resíduos de frutas e verduras podem produzir 265 m³ de biogás por tonelada (restos de comida). Os resíduos gerados no processamento de frutas, como em indústrias de suco e de polpa consistem de bagaço das frutas e cascas. Foi considerada a produção de 100 m³ de biogás por tonelada deste resíduo. A Figura 22 ilustra a produção de biogás por tipo de substrato.

Figura 22 Produção de Biogás por tipo de substrato. Fonte: (PERES e PALHA, 2016)



3.6 SUSTENTABILIDADE

A discussão sobre sustentabilidade e/ou desenvolvimento sustentável é vasta e abrange, desde estratégias e ações desenvolvidas no nível das nações, até estratégias e ações especificamente relacionadas à responsabilidade social e ambiental no contexto empresarial (FROEHLICH, 2014).

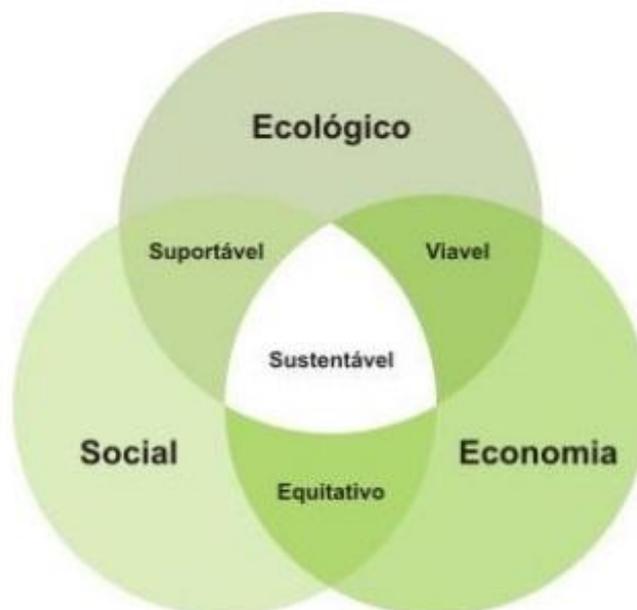
No Brasil, a sustentabilidade passou a ser considerada estratégica a partir da década de 1990, devido à mudança no patamar de atuação das empresas brasileiras, possibilitada pelo maior grau de internacionalização e pelo desenvolvimento do mercado global de capitais, dentre outros. Com isso, as empresas passaram a ser cobradas, tendo de assumir sua parcela de responsabilidade com a sociedade. Passam a serem fatores críticos de sucesso práticas até então pouco conhecidas, tais como prestação de contas para um amplo leque de partes interessadas e novas formas de repartição dos frutos do crescimento da empresa, não mais se restringindo ao pagamento de dividendos para os acionistas (ZYLBERSZTAJN e LINS, 2010).

3.6.1 Conceituação

Desde a publicação do Relatório Brundtland (1987), o qual considera que o desenvolvimento sustentável é aquele que deve satisfazer as necessidades da geração presente sem comprometer as necessidades das gerações futuras, muitas definições surgiram para o termo. Mas, o ponto comum entre todas está nas três dimensões que se relacionam e compõem o termo sustentabilidade, ou seja, a dimensão econômica, a dimensão ambiental e a dimensão social. Essas dimensões também são conhecidas como o tripé Pessoas, Planeta e Lucro (do inglês *triple bottom line* ou *People, Planet e Profit*) ou ainda, tripé da sustentabilidade (NEATS, 2011) e (MASCARENHAS e WENDEL, 2013). A sustentabilidade só pode ser alcançada com o equilíbrio entre essas dimensões.

É importante ter em mente que a sustentabilidade não se dá apenas pela preservação dos recursos naturais. Ela depende das ações do dia a dia, do consumo e da produção. O desenvolvimento sustentável é global e atende as necessidades do homem sem esgotar os recursos naturais, incorporando aspectos sociais, econômicos e ecológicos. Se não forem considerados todos esses aspectos, pode ser suportável, equitativo e viável, mas não é sustentável. A Figura 23 ilustra essa interação.

Figura 23 Interação entre os aspectos social, econômico e ecológico – Fonte: modificado de (NEATS, 2011)



Pode-se dizer que o conceito de sustentabilidade considera a conciliação do crescimento econômico com a manutenção do meio ambiente, além de um foco na justiça social e no desenvolvimento humano; assim como uma distribuição e utilização equilibrada de recursos com um sistema de igualdade social (BANERJEE, 2002). Desse modo, atuar de forma sustentável é uma questão importante. Não se trata de modismo ou de “jogada de marketing”. As organizações de ponta já despertaram para a necessidade de rever processos e conscientizar as partes interessadas (*stakeholders*) quanto ao papel de cada um.

Froehlich (2014), realizou uma estratificação bibliográfica sobre o tema desde sua origem na década de 70, com a obra *Os Limites do Crescimento*, de autoria do Clube de Roma, passando pelo do Relatório Brundtland da *World Commission for Economic Development* de 1987, também chamado *Nosso Futuro Comum* (1991) (*Our Common Future*). que é o documento final da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, promovida pela ONU, nos anos 80 e chefiada pela então primeira-ministra da Noruega, Gro Harlem Brundtland. No documento em questão, o desenvolvimento sustentável é tido como um processo de mudanças em que a exploração de recursos, a direção dos investimentos, a orientação do desenvolvimento tecnológico e as alterações institucionais são realizadas de maneira consistente, de acordo com as necessidades atuais e futuras (BANERJEE, 2002).

Seguiu-se a Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento, no Rio de Janeiro, em 1992, que ficou conhecida como Eco 92 ou Cúpula da Terra. Um dos resultados nesta Conferência foi a aprovação do documento Agenda 21 (2002). Este documento ressalta a preparação do mundo para os desafios do século XXI por meio de um plano de ação que enumera os objetivos a serem atingidos pelas sociedades para sustentar a vida no planeta. Outras conferências das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento, como a Rio+5 e Rio+10, aconteceram respectivamente em 1997 e 2002, em Johannesburgo, objetivando revisar a implementação da Agenda 21 (2002), com o objetivo de reafirmar compromissos e propor novas ações.

Ainda no ano 2000, a ONU promoveu a Assembleia do Milênio. E este encontro reuniu 191 delegações e contou com a presença dos principais chefes de Estado do mundo. O debate resultou na Declaração do Milênio, documento que consolidou várias metas estabelecidas nas conferências mundiais ocorridas na década de 90, propondo objetivos para a erradicação da pobreza no mundo.

No final do século XX, a ONU lançou a ideia de parceria entre as Nações Unidas, ONGs e empresas com o objetivo de obter convergência entre as práticas do setor privado e

os valores universais. A ideia ganhou corpo e nome: Global Compact ou Pacto Global, fundamentado na Declaração Universal da Organização Internacional do Trabalho e na Declaração do Meio Ambiente de Desenvolvimento (UNCED, 1992).

Em junho de 2012, realizou-se a Conferência das Nações Unidas em Desenvolvimento Sustentável - Rio+20, no Rio de Janeiro, com o objetivo de renovar o compromisso político com o desenvolvimento sustentável, por meio da avaliação do progresso e das lacunas na implementação das decisões adotadas por meio das principais cúpulas sobre o assunto e do tratamento de temas novos e emergentes (UNCED, 2012).

Além de tentar reconciliar o crescimento econômico com a preservação do meio ambiente, a agenda de Brundtland também enfatiza a justiça social e o desenvolvimento humano dentro do quadro de referência da equidade social e da distribuição e utilização equitativa dos recursos naturais. A sustentabilidade, conforme Redclift (1987) significa coisas diferentes para diferentes povos, embora as teorias de sustentabilidade enfatizem a primazia da justiça social, a posição é frequentemente invertida, ficando a justiça subordinada à sustentabilidade. Como nem sustentabilidade nem justiça têm significados claros, abre-se o caminho para legitimar um dos termos em referência ao outro.

3.6.2 Dimensões da sustentabilidade

A sustentabilidade pode ser analisada e caracterizada a partir de diferentes dimensões. No entanto, Fialho (2008) afirma que “apesar de apresentarem similaridades nas áreas prioritárias identificadas, são interdependentes, ou seja, não é possível isolá-las”.

Três dimensões da sustentabilidade – econômica, social e ambiental - estão presentes e são similares no levantamento bibliográfico realizado por Froehlich (2014) com diversos autores, entre eles, (PAWLOWSKI, 2008), (SPANGENBERG e BONNIOT, 1998), (OECD, 1993), e (SACHS, 1993).

Entretanto, outras dimensões também são referenciadas, independentemente, pelos mesmos autores, como a dimensão cultural, por Sachs (1993), a dimensão institucional por Spangenberg e Bonniot (1998), as dimensões política, moral, legal e a técnica por Pawlowski (2008). Alguns consideram a dimensão ecológica, distinguindo-a da ambiental. Segue a conceituação das dimensões da sustentabilidade nas perspectivas dos autores referidos, tendo como principal referência Sachs (1993) que apresenta as dimensões em um contexto global e não apenas empresarial. A partir do conceito de ecodesenvolvimento, Ignacy Sachs (1993), economista polonês, naturalizado francês, desenvolveu o que chamou de as cinco dimensões

de sustentabilidade: sustentabilidade social, econômica, ecológica, espacial, e sustentabilidade cultural.

- SOCIAL: que se refere ao alcance de um patamar razoável de homogeneidade social, com distribuição de renda justa, emprego pleno e/ou autônomo com qualidade de vida decente e igualdade no acesso aos recursos e serviços sociais.

- ECONÔMICA: desenvolvimento econômico intersetorial equilibrado, com segurança alimentar, capacidade de modernização contínua dos instrumentos de produção, razoável nível de autonomia na pesquisa científica e tecnológica e inserção soberana na economia internacional.

- ECOLÓGICA: relacionada à preservação do potencial do capital natural na sua produção de recursos renováveis e à limitação do uso dos recursos não renováveis.

- TERRITORIAL: refere-se a superação das disparidades inter-regionais. Busca uma relação equilibrada cidade-campo e estratégias de desenvolvimento ambientalmente seguras para áreas ecologicamente frágeis.

- CULTURAL: significa traduzir o conceito normativo de ecodesenvolvimento em uma pluralidade de soluções particulares, que respeitem as especificidades de cada ecossistema, de cada cultura e de cada local. Refere-se a capacidade de autonomia para elaboração de um projeto nacional integrado e endógeno (em oposição às cópias servis dos modelos alienígenas) e autoconfiança, combinada com a abertura para o mundo.

Mais recentemente Sachs (2002) incorporou mais três dimensões ao modelo de sustentabilidade, as dimensões Ambiental, Política Nacional e Política Internacional. Ao enfatizar estas dimensões, Sachs (2002), deixa claro que, para alcançar a sustentabilidade, é necessário valorizar as pessoas, seus costumes e saberes. Fica evidente que se deve ter uma visão holística dos problemas da sociedade, para além de focar apenas na gestão dos recursos naturais. É um pensamento muito mais profundo, que visa uma verdadeira metamorfose do modelo civilizatório atual.

Tendo como pressuposto o ecodesenvolvimento e suas dimensões da sustentabilidade, formuladas por Sachs, nesse estudo se procurou avaliar as diferentes tecnologias de geração de energia elétrica indo muito além do binômio custo-benefício, modelo excludente e não sustentável, considerando as múltiplas dimensões do desenvolvimento sustentável.

Para efeito de ordem prática, as oito dimensões definidas por Sachs, neste estudo, são conjugadas com base em quatro dimensões que melhor estabelecem as soluções em energia, já consideradas por diversos autores entre eles Stein (2013), cada uma delas relacionada aos objetivos a serem alcançados ao investir em uma tecnologia de mini ou microgeração distribuída de energia elétrica no Brasil.

3.6.3 Comunidades mais sustentáveis

As chamadas comunidades sustentáveis foram definidas por Egan (2004).

Figura 24 Disco de Egan para comunidades sustentáveis.
Fonte: Modificado de (EGAN, 2004)



Segundo Egan (2004), existem oito fatores que caracterizam as comunidades mais sustentáveis: a governança; a conectividade; a disponibilidade de serviços; a responsabilidade ambiental; a justiça/igualdade; a prosperidade; o projeto e construção; a vivacidade, a inclusão e a segurança. A Figura 24 apresenta o chamado disco de Egan, um disco apresentando esses oito componentes vitais.

3.7 ABORDAGEM VFT (*Value - Focused Thinking*)

Na abordagem usual, o pensamento é focado em alternativas, você primeiro descobre quais alternativas estão disponíveis e escolhe a melhor do lote. Por outro lado, o pensamento focado no valor (do inglês *Value Focused Thinking* - VFT) consiste, essencialmente, em duas atividades básicas: primeiro, decidir o que se deseja e depois descobrir como obter o desejado. Com o pensamento focado no valor (VFT) a probabilidade de se chegar mais próximo ao que, realmente, se deseja é bem maior. Nos últimos vinte anos, o pensamento focado no valor (VFT) foi aplicado em uma ampla gama de contextos, a fim de identificar os objetivos do(s) decisore(s), incluindo aqueles que trabalham no setor militar, ou em áreas como tecnologia móvel, gerenciamento turístico, objetivos de terroristas, aspectos ambientais e gerenciamento de telecomunicações (KEENEY, 1992).

3.7.1 Aplicações da abordagem VFT (*Value - Focused Thinking*)

No contexto da tecnologia, o VFT foi aplicado por Sheng (2010) para entender os valores da educação que são facilitados por tecnologia móvel e usar tais valores como diretrizes para implementar o uso de dispositivos móveis na área educacional). Ainda no contexto da tecnologia, mais especificamente em problemas de telecomunicações, o VFT foi aplicado para construir um modelo de valor para decisões de gerenciamento em telecomunicações por Keeney (2001). Em relação às questões ambientais, o VFT foi aplicado para desenvolver um conjunto de objetivos referentes às decisões políticas do governo americano por Keeney & MCDaniels (2001). Hassam (2004) abordou um problema comum na gestão ambiental, nomeadamente as implicações comparativas dos materiais de construção, como madeira, alvenaria e concreto. O VFT também foi aplicado para melhorar a qualidade das bacias hidrográficas em Richmond, Virgínia (MW., 2004). Para compreender as decisões de segurança tomadas pelos operadores domésticos de petroleiros o VFT foi utilizado por Merrick (2005). Outro contexto de decisão interessante em que o VFT foi aplicado é o da gestão do turismo, por Kajanus (2004), para mostrar os objetivos fundamentais e significativos para a vitalidade das áreas rurais.

No Brasil, Danielle Morais (2013) aplicaram a abordagem VFT na estruturação de problemas em contextos diversos, ou sejam, gerenciamento de água, sistema de informação/tecnologia da informação (IS/IT) planejamento estratégico, e a eliminação de resíduos de gesso. O foco principal foi apresentar como que, nessas três decisões diferentes,

os problemas foram estruturados e as alternativas viáveis, consistentes com os valores do(s) decisor(es), foram geradas para resolver os problemas de decisão.

3.7.2 Conceituação de objetivo em VFT (*Value-Focused Thinking*)

Em VFT um objetivo é uma declaração de algo que alguém deseja alcançar. Isto é tipificado por três características: um contexto de decisão, um objeto e uma direção de preferência. De acordo com Keeney (1992), além dos objetivos estratégicos, existem dois tipos de objetivos que devem ser distinguidos num processo de decisão: os objetivos fundamentais e os objetivos-meio. Ambos dependentes do contexto de decisão.

Um objetivo fundamental caracteriza um motivo de interesse na situação de decisão enquanto um objetivo-meio é de interesse no contexto da decisão devido às suas implicações para o grau que outro objetivo (mais fundamental) pode ser alcançado. Em outras palavras, os objetivos-meios são importantes porque são meios para a realização dos objetivos fundamentais.

Os objetivos-meio podem ser muito úteis para desenvolver modelos para analisar problemas de decisão e para criar alternativas, no entanto, são os objetivos fundamentais que são essenciais para orientar todo o esforço em situações de decisão e na avaliação de alternativas.

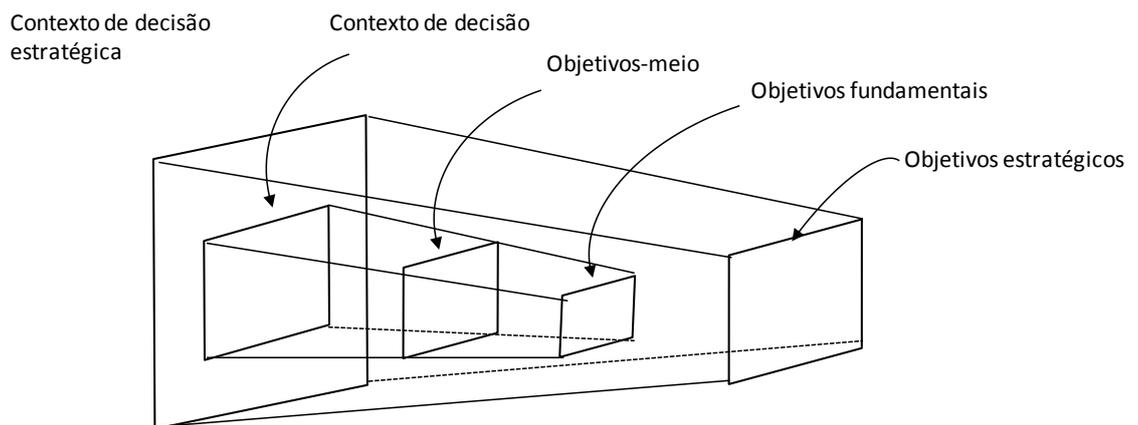
A relevância de cada valor é importante e, a partir deles (valores), é estabelecido o contexto de decisão específico, em duas etapas: (1) conversão de cada valor para um objetivo e (2) organização dos objetivos em objetivos-meios e objetivos fundamentais, especificando seus relacionamentos. Para esclarecer os significados de qualquer valor e colocar todos os valores em um mesmo formato, cada valor pode ser representado como um objetivo usando um verbo e um objeto (KEENEY, 2012). Como exemplos, um objetivo ambiental para o valor "Qualidade da água de um aquífero" pode ser: evitar a poluição do aquífero, ou objetivos socioeconômicos podem ser: fornecer empregos específicos e minimizar a interrupção de fornecimento para as comunidades. Os objetivos que especificam preocupações sobre acidentes podem incluir: seguir os procedimentos de segurança autorizados, garantir uma construção de qualidade e minimizar futuros acidentes de operações. Procedimentos de segurança autorizados é um meio para garantir uma construção de qualidade que, por sua vez, é um meio de minimizar acidentes de operações. Minimizar acidentes de operações também é um objetivo-meio que pode influenciar objetivos fundamentais, como "minimizar perda de vidas" e "evitar danos ao meio ambiente", bem como o objetivo-meio de "maximizar o tempo

de atividade da linha de distribuição", que é um meio para "minimizar o reparo custos" e "maximizar receitas". Objetivos sobre a perda de vidas, danos ao meio ambiente, custos e receita são alguns dos objetivos fundamentais para a decisão sobre uma linha de distribuição de água.

Os objetivos fundamentais são aqueles que são relevantes para avaliar alternativas. É importante reconhecer que os objetivos-meio não devem ser incluídos na avaliação junto com os objetivos fundamentais porque isso seria uma dupla contagem.

É possível verificar a interação entre esses objetivos, por meio da Figura 25 que apresenta uma adaptação De Almeida (2013) da representação da estrutura de objetivos desenvolvida por Ralph Keeney (1976).

Figura 25 Estrutura de objetivos em FVT. Fonte: (DE ALMEIDA, 2013)



O contexto da decisão e os objetivos fundamentais estabelecem a estrutura de decisão (*decision frame*) para a atividade considerada. O contexto de decisão define o conjunto de alternativas apropriado para uma situação de decisão específica. Os objetivos fundamentais explicitam os valores, do(s) decisor(es), que norteiam suas preocupações e definem o tipo das consequências dessas preocupações. Em outras palavras, os objetivos fundamentais são os objetivos finais, em oposição aos objetivos-meio de um determinado contexto de decisão. É fundamental que o contexto de decisão e os objetivos fundamentais sejam compatíveis, desde que, são conceitos interdependentes (KEENEY RL, 1976).

Se o conjunto de objetivos é vago ou incompleto a capacidade intuitiva para o processo de decisão é comprometida, ou seja, as alternativas podem não ser reconhecidas bem como ser prejudicada sua avaliação.

A estruturação dos objetivos é útil para entender o contexto da melhor decisão e necessária para qualquer uso posterior de métodos quantitativos (isto é, para criar valor e/ou função de utilidade para avaliar as alternativas).

Estruturar objetivos envolve o estabelecimento de uma hierarquia de valores a partir de objetivos fundamentais (KEENEY, 1992). Um bom conjunto de objetivos fundamentais deve apresentar as seguintes propriedades (KEENEY R, 2007): Ser, COMPLETO (incluir todos os aspectos fundamentais das conseqüências das alternativas de decisão); NÃO REDUNDANTE (evitar dupla contagem de possíveis conseqüências); CONCISO (reduzir o número de objetivos necessários para a análise de uma decisão); ESPECÍFICO (claramente especificados para que os níveis possíveis para cada objetivo possam ser definidos) e COMPREENSÍVEL (facilitar a geração e comunicação de insights para orientar o processo de tomada de decisão).

Um conjunto de objetivos ótimo, para os quais todas as propriedades acima são verificadas, apesar de desejado e perseguido, na prática, não se consegue, pois se trata de um modelo, ou seja, de uma representação da realidade. Verifica-se, portanto, o estabelecimento de uma relação de compensação entre a redução dos erros e o custo do modelo.

3.8 DECISÃO MULTICRITÉRIO

A análise de decisão pode ser definida em diferentes níveis. Intuitivamente, como “uma formalização do senso comum para a decisão de problemas que são muito complexos para o uso informal do senso comum”. A definição mais técnica de análise de decisão é: “uma filosofia, articulada por um conjunto de axiomas lógicos, e uma metodologia e coleta de procedimentos, com base nesses axiomas, para a análise responsável das complexidades inerentes aos problemas de decisão” (KEENEY, 1982)

Este conjunto de axiomas, já bem estabelecidos na literatura por Keeney (1982), fornece os princípios para a análise dos problemas de decisão e definem que a atratividade das alternativas deve depender de: (1) a probabilidade das conseqüências possíveis de cada alternativa e (2) a preferências dos tomadores de decisão por essas conseqüências. As implicações filosóficas dos axiomas são que todas as decisões exigem julgamentos subjetivos e que, as várias conseqüências e suas conveniências, devem ser estimadas, separadamente,

usando, respectivamente, probabilidade e utilidade. As implicações técnicas dos axiomas são probabilidade e utilidade, que podem ser usadas para calcular a utilidade esperada de cada alternativa e, por consequência, alternativas com maior utilidade esperada, devem ser preferidas. A implicação prática da análise de decisão com base nos axiomas é a provisão de uma base sólida e abordagem geral para incluir julgamentos e valores em uma análise de alternativas de decisão. Isso permite uma análise sistemática de forma defensável de uma vasta gama de problemas de decisão (KEENEY, 1982).

A análise de decisões centra-se em aspectos fundamentais para todos os problemas de decisão, nomeadamente,

1. Uma necessidade percebida de atingir alguns objetivos,
2. Várias alternativas, uma das quais deve ser selecionada,
3. As consequências associadas às alternativas são diferentes,
4. Incerteza geralmente sobre as consequências de cada alternativa,
5. As possíveis consequências não são igualmente valorizadas.

Situações onde há ao menos duas alternativas de ação para uma escolha e múltiplos objetivos envolvidos, muitas vezes conflitantes, caracterizam um problema de decisão multicritério. A esse objetivos são associadas variáveis que os representa e permitem a avaliação de cada alternativa, com base em cada objetivo. Essas variáveis são denominadas critérios ou atributos (DE ALMEIDA, 2013).

Além de alternativas e critérios, um problema de decisão multicritério também conta com a presença de um ou mais decisores, cujo julgamento de valores tem papel fundamental.

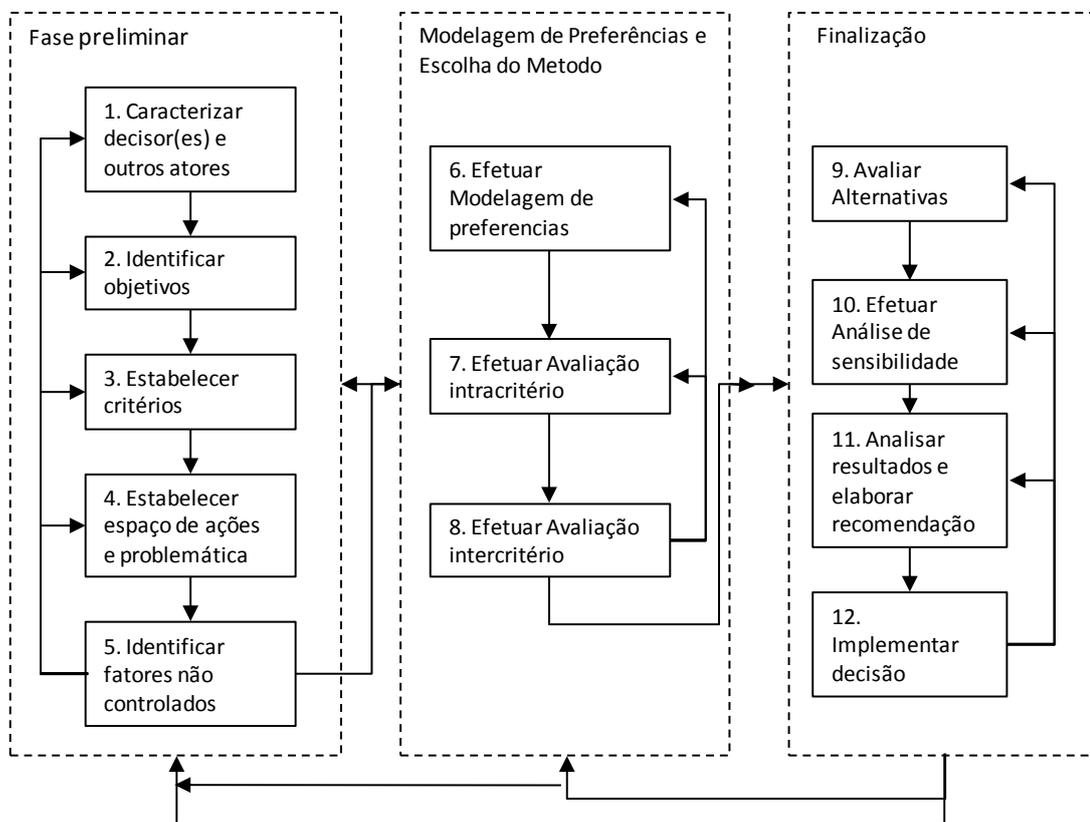
As preferências do(s) decisor(es) são utilizadas, no processo decisório, em busca da obtenção da alternativa de ação que apresente o melhor compromisso entre os critérios, resultando na melhor consequência obtida com a decisão tomada.

Neste contexto, um modelo de decisão corresponde a uma representação formal e simplificada do problema enfrentado com suporte de um método multicritério de apoio à decisão (MCDM/A)

3.8.1 Construção de um modelo multicritério

Para facilitar a construção de um modelo multicritério uma sistematização dos passos necessários deve ser estabelecida. Neste trabalho foi utilizado um procedimento desenvolvido por De Almeida (2013) que consiste em três fases principais subdivididas em doze passos que foram sequenciados de modo flexível visando ao domínio do contexto de decisão e a geração de informações (*insights*) durante todo o processo. A Figura 26 apresenta o procedimento em questão.

Figura 26 Procedimento para resolução de um problema de decisão.
Fonte: Extraído de De Almeida (2013, p. 165)



3.8.2 Critérios ou atributos

Os critérios, conhecidos também como atributos ou medida de eficácia ou desempenho, medem o grau com que os objetivos de um problema de decisão são atingidos pelas possíveis alternativas, ou, em outras palavras, definem diferentes níveis de consequências para as alternativas (KEENEY, 1992). De maneira mais formal, pode-se

definir um critério através de uma função sobre o conjunto de alternativas possíveis que mede o desempenho obtido no objetivo do qual o critério foi derivado (DE ALMEIDA, 2013).

Keeney (1992) classifica os critérios ou atributos em: critérios naturais, critérios construídos e critérios *proxy*. Os critérios naturais possuem uma interpretação comum para todos os contextos de decisão, por outro lado, os critérios construídos são adequados apenas a um dado contexto de decisão. Estes critérios requerem a construção de uma escala de valor qualitativa, envolvendo a descrição de vários níveis de impacto, distintos, que indicam diretamente o grau com que o objetivo associado é atingido. Os critérios *proxy* consistem em uma medida indireta que pode ser associada ao objetivo que se deseja medir. Os critérios *proxy* de um objetivo fundamental podem ser os objetivos naturais de um dos objetivos-meio que compõem o objetivo fundamental.

Considerando uma definição formal para um problema genérico, tem-se a existência de um conjunto de alternativas $A_1, \dots, A_j, \dots, A_J$ para ser avaliado em termos do impacto na conquista dos objetivos $O_1, \dots, O_i, \dots, O_n$. Para cada objetivo O_i , identifica-se um critério ou atributo X_i para indicar, diretamente, por meio de uma escala, o grau em que o objetivo O_i é alcançado. O nível específico, de realização, medido para X_i será indicado por x_i . Para ilustrar esta notação, suponha o objetivo de selecionar uma usina de energia nuclear considerando o menor custo. O critério para este objetivo poderia ser o custo medido em milhões de dólares. Estritamente falando, o critério é custo e sua escala milhões de dólares. No entanto, em termos de notação, o critério e a sua escala juntos, é referido, como X_i . Um nível específico de X_i pode ser $X_i = 1.500$, significando 1.500 milhões de dólares (KEENEY, 1981).

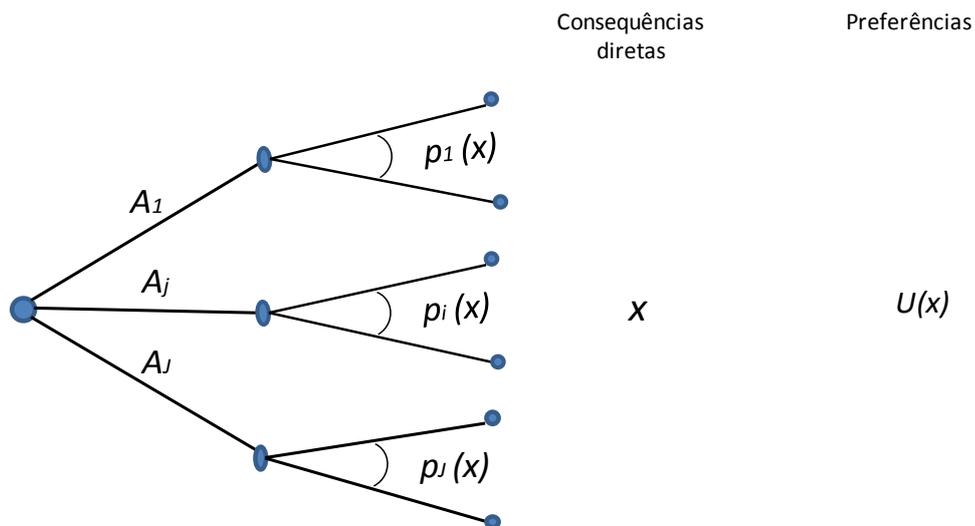
Idealmente, como resultado da estruturação do problema, seria possível definir um conjunto dos critérios X_1, \dots, X_n de modo que as consequências de importância no problema sejam categorizadas como $x = (x_1, \dots, x_n)$. Então a análise envolveria o seguinte: as consequências de cada alternativa A_j seriam modeladas como $p_j(x)$, onde p_j poderia ser uma distribuição de probabilidade ao longo das possíveis consequências de A_j ou uma relação determinística entre a alternativa A_j e suas consequências.

Então a medida de desejabilidade para os vários x 's seria necessária. Se p_j for determinística, esta medida de desejabilidade deve ser uma função de valor v , que atribui um número $v(x)$ a cada consequência x tal que as consequências com valores mais elevados são preferidas com relação aquelas com valores mais baixos. Então o tomador de decisão deve escolher a alternativa resultando em o valor mais alto. Se p_j for probabilística, o indicador de desejabilidade deve ser uma função utilidade u , que é uma função de valor com propriedades

especiais. Especificamente, a função utilidade permite comparar alternativas com base na utilidade esperada - a alternativa associada com mais alta utilidade esperada sendo preferida. Um conjunto de axiomas que justifica o critério de utilidade esperado nos casos envolvendo incerteza é encontrado em Pratt, Raiffa e Schlaifer (1964 apud KEENEY, 1981). Uma discussão detalhada sobre funções de valor e funções de utilidade está em Keeney (1976).

Keeney (1981) considera a situação determinística como um caso especial do caso mais complexo (e mais típico) da situação probabilística, para analisar a problemática da modelagem das consequências. Nesta situação, o problema básico está ilustrado por meio da representação esquemática da Figura 27. Para cada alternativa A_j , a utilidade esperada $Eu(A_j)$ é calculada a partir de $p_j(x)$ e $u(x)$. Dado os critérios X_1, \dots, X_n , o problema de decisão torna-se uma questão de determinar $u(x)$ e $p_j(x)$, para cada alternativa.

Figura 27 Situação determinística. Extraída de (KEENEY, 1981)



3.8.2.1 Seleção de critérios

Selecionar critérios ou atributos é uma parte importante no processo de decisão, quando se considera a melhoria na comunicação e criação de alternativas, por conta dos *insights* que pode fornecer sobre os valores em questão. Mas, selecionar critérios é ainda mais importante, e de fato essencial, para quantificar um modelo de valor e subsequentemente avaliar as alternativas consideradas.

É útil reconhecer que a seleção de um critério para um dado objetivo é um problema de decisão enfrentado pelo analista. Em termos mais simples, a escolha é sobre um critério natural, um critério construído ou um critério *proxy*. Claramente, a resposta depende das circunstâncias. Se um critério natural estiver disponível, então ele deve ser geralmente escolhido. Se nenhum critério natural estiver disponível, as coisas se tornam mais complexas, ou um critério construído ou um proxy deve ser escolhido ou os objetivos devem ser ainda decompostos em componentes, usando a lógica de especificação (KEENEY, 1992). Então os critérios devem ser procurados para cada novo nível inferior de objetivos até que sejam encontrados. A escolha de um critério deve ser avaliada em termos das propriedades desejáveis para o seu estabelecimento.

Três propriedades são desejáveis para que um critério seja útil ao(s) decisor(es): compreensibilidade, mensurabilidade e operacionalidade (KEENEY, 1992). De acordo com o autor, um critério é compreensível se, ao conhecer seu nível dada uma situação particular, o(s) decisor(es) é (são) capaz(es) de compreender, claramente, a medida com que o objetivo associado é atingido, isto é, não há ambiguidade na descrição das consequências em termos dos critérios, bem como na interpretação dessas consequências. Um critério é mensurável se o(s) decisor(es) for(em) capaz(es) de expressar suas preferências relativas com respeito a seus diferentes níveis. Um atributo é operacional se for razoável para dois propósitos: descrever as possíveis consequências em relação ao objetivo associado e fornecer uma base sólida para julgamentos de valor sobre a conveniência dos vários graus nos quais o objetivo pode ser alcançado (DE ALMEIDA, 2013).

Segundo Keeney (1992), alguns prós e contras das três possibilidades - atributos construídos, atributos de proxy e decomposição – Devem ser considerados para os casos mais difíceis em que não existe nenhum atributo natural óbvio.

3.8.2.2 *Critérios construídos*

Os critérios construídos medem precisamente o que o objetivo fundamental deve abordar, por causa da forma como é construído, ou seja, uma descrição completa do objetivo associado. Além do mais, é mais fácil separar os julgamentos sobre as consequências, dos julgamentos de valor, quando um critério construído é usado em vez de um critério *proxy* ou posterior decomposição.

As possíveis falhas dos critérios construídos dizem respeito a sua compreensibilidade e operacionalidade. Os critérios construídos não têm a interpretação comum dos níveis que

são associados aos critérios naturais e *Proxy*, portanto, quase sempre é mais difícil para se comunicar sobre as consequências usando um critério construído. Como resultado da dificuldade de compreensão do critério, também pode ser, operacionalmente, difícil quantificar julgamentos de valor sobre os níveis das consequências. Mais uma vez o problema resume-se a quão cuidadosamente o atributo é construído.

Diversos recursos podem ser considerados na construção de um critério, por exemplo, para o objetivo de "minimizar a desfiguração facial", uma questão de ordem geral é levantada: para problemas médicos ou problemas ambientais, como pode os efeitos visuais serem adequadamente contabilizados por meio de critérios? Pode-se contemplar a necessidade de um critério e pensar "Que palavras podem descrever um imagem inteira?" A resposta é que você não precisa de palavras; as imagens podem ser usadas para tal atributo (KEENEY, 1992).

A criação de tal critério é em si o resultado de um pouco do pensamento focado em valores. É necessário um critério porque o objetivo de minimizar a desfiguração física é parte de uma decisão importante. As alternativas para critérios que naturalmente vêm à mente são critérios descritos com texto. Mas esta é apenas uma alternativa, embora seja a maioria, comumente utilizada para descrever níveis de critérios. A busca ampliada dos critérios pode levar ao critério visual.

Um critério pode ser criado diretamente das alternativas disponíveis ou hipotéticas ou ambas. Com respeito a um dado objetivo, você classifica as alternativas em termos do grau com que elas atingem, isoladamente, esse objetivo. O resultado é uma função de valor (ou seja, uma função de valor ordinal) para contribuições de alternativas nesse objetivo. Se você desenvolver a escala construída usando questões semelhantes às usado para desenvolver uma função de valor mensurável ou uma função de utilidade, então a escala resultante possui as propriedades cardinais correspondentes dessa função (KEENEY, 1992).

Tem-se, também a decomposição, que pode ser interpretada como um procedimento especial para construir um critério para um objetivo. Neste procedimento, o objetivo é, primeiramente, especificado segundo os objetivos dos seus componentes. Então, os critérios são encontrados para aqueles componentes e são integrados através do uso de julgamentos de valor. O resultado dessa integração é essencialmente um critério construído para o objetivo original. No extremo, o modelo de valor é essencialmente nada mais do que um critério construído para o objetivo fundamental mais geral em uma situação de decisão.

A vantagem da decomposição é que pode permitir a identificação de atributos naturais para os novos objetivos de nível inferior criados por meio da decomposição. Esses atributos

naturais são compreensíveis e, provavelmente, será relativamente fácil de usar para descrever as conseqüências e quantificar um modelo de valor. A desvantagem é que mais informações precisam para ser reunidas, porque há mais atributos para cada alternativa e o modelo de valor requer mais julgamentos de valor. Há também a possibilidade de que a especificação de um objetivo de nível superior em objetivos de componente pode levar a buracos na hierarquia de objetivos, especialmente se o objetivo de nível superior é amplo e um pouco vago. Por exemplo, com o objetivo de "melhorar o moral da organização", a especificação pode facilmente perder aspectos importantes da moral (KEENEY, 1992).

3.8.2.3 *Crítérios proxy*

O uso de critérios *proxy* geralmente reduz o número de critérios necessário para uma situação de decisão e simplifica a descrição das conseqüências. Isso reduz o esforço necessário para reunir informações factuais enquanto aumenta o esforço necessário para especificar o modelo de valor. Isso também confunde questões de fato com questões de valor e conseqüentemente resulta em menos visão do que poderia ser o caso.

O uso de critérios *proxy* aumenta a probabilidade de redundância na avaliação, porque é equivalente a ter vários objetivos meio na hierarquia dos objetivos fundamentais. Na medida em que isso significa que estes objetivos meio podem estar associados a mais de um objetivo fundamental, aumenta a possibilitando de dupla contagem, que pode ocorrer quando o modelo de valor é avaliado.

3.8.2.4 *Medição dos critérios - escalas*

Em todos os problemas de decisão, análises prescritivas ou normativas, deve haver a indicação do grau em que cada objetivo é alcançado, por meio das várias alternativas definidas, segundo cada critério considerado. Isso requer o estabelecimento de uma escala (ou escalas) para cada critério derivado do objetivo que se deseja alcançar. Para importantes problemas de decisão, o processo de definição dessas escalas deve ser logicamente consistente e sistemático, ao mesmo tempo, é inerentemente subjetivo, desde que deve considerar o julgamento, conhecimento e a experiência profissional.

Para medir critérios diretos ou critérios *proxy*, existem basicamente apenas dois tipos de escalas, escalas naturais e escalas construídas (subjetivas). Na prática, a distinção entre os

tipos de escala nem sempre é, completamente, clara, mas, por meio da discussão sobre os dois casos extremos, as possibilidades para casos no meio devem ser óbvias.

As escalas naturais são aquelas que foram estabelecidas por meio do uso comum e interpretação. Escalas construídas, por outro lado, são muitas vezes desenvolvidas, especificamente, para um problema a ser abordado. Por exemplo, um dos objetivos na instalação de uma usina de energia pode ser para minimizar o impacto estético prejudicial. Como nenhuma escala natural de estética existe para esse impacto, é necessário construir um. Isso pode implicar a descrição verbal ou ilustração de diferentes graus de impacto estético. Podem ser designados como níveis inteiros, digamos de 0 a 10. Pode-se construir a escala tal que a degradação entre os níveis é uniforme se é necessário ou útil ter um escala. Uma escala construída deve ter pontos chaves bem definidos para transmitir o seu significado para indivíduos diferentes daqueles que a construíram (KEENEY, 1981).

À medida que a sociedade determina mais e mais formas de medir características, o número e a diversidade das escalas naturais crescem. Por exemplo, antes da escala de decibéis, pode-se imaginar que uma escala construída foi necessária para medir o volume. Após um uso significativo, o que já era uma escala construída assume muitos dos recursos de uma escala natural. O PIB (Produto Interno Bruto), por exemplo, foi construída para agregar vários fatores para indicar a saúde econômica de um país. Após anos de uso, os significados dos níveis específicos do PIB são essencialmente próprios sem toda a construção por trás da escala. Uma escala construída especial é simplesmente a dicotomia de se atingir ou não um objetivo, ou seja, torna-se uma escala binária.

A afirmação de que as escalas naturais não requerem julgamentos subjetivos, é enganosa e falsa. O julgamento subjetivo é usado para decidir se uma proposta de escala é apropriada. Além disso, muitas das escalas naturais usadas hoje (por exemplo, PIB, desemprego, etc.) foram, no início, necessariamente construídas e os julgamentos subjetivos usados nesse processo de construção ainda fazem parte dessas escalas (KEENEY, 1981).

Geralmente, um forte julgamento subjetivo na escolha de critérios é envolvido, seja para construir uma escala direta ou para usar uma escala natural *proxy*. Isto é especialmente verdadeiro quando os objetivos declarados são verdadeiramente fundamentais e não significam objetivos para alcançar os fins fundamentais. Por exemplo, o objetivo fundamental de um programa de controle de poluição pode ser melhorar saúde, enquanto um objetivo meio seria reduzir a poluição de SO₂. Medir diretamente o primeiro provavelmente exigiria uma escala construída, enquanto a escala natural de toneladas de SO₂ emitidas por ano pode ser um

bom critério proxy para a saúde. Qual o mais apropriado? Dependerá do contexto do problema (KEENEY, 1981).

Muitas das escalas construídas destinam-se a medir mais de uma faceta de um complexo problema. Como resultado, além de todas as considerações necessárias na seleção de escalas naturais, há, adicionalmente, julgamentos de valor, necessariamente integrados, que são feitos quando da construção da escala. Em situações onde implicações de valor são, implicitamente, igualmente importantes para diferentes valores na escala, são necessárias definições baseadas em julgamento de valor. Independentemente da dificuldade de fazer tais julgamentos, eles são uma parte inerente do problema e devem ser implicitamente ou explicitamente abordados.

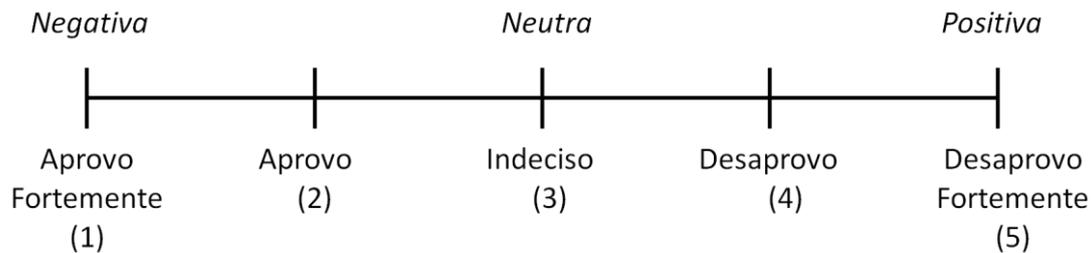
Em muitos casos, não seria possível ou prático para identificar escalas apropriadas, então o procedimento é necessariamente feito de forma informal. Para tais problemas, se faz necessário especificar as preocupações gerais a serem abordadas pelo objetivo. Em vez de tentar avaliar qualquer função de valor completa, o que pode resultar em um grande número de preocupações, a construção da escala pode consistir apenas em vários níveis, talvez com apenas três, claramente definidos por uma descrição específica dos impactos relevantes. O uso dessa escala para medir impactos, provavelmente exigirá a experiência dos indivíduos que a construíram. Os valores associados a diferentes níveis, no entanto, pode ser atribuído e compreendido por inexperientes (KEENEY, 1981).

A história da construção de escalas de mensuração tem como trabalho seminal o estudo de Rensis Likert, publicado em 1932 (LIKERT, 1932). No entanto, é interessante destacar que anteriormente a esta data já se realizavam avaliações subjetivas com o uso de escalas, as quais eram mais sensíveis do que as utilizadas atualmente. Cummins e Gullone (2000) destacam a introdução do *Graphic Ating Method*, por Freyd, em 1923, utilizando uma escala no formato de 10 ou de 100 pontos.

Rensis Likert era um psicólogo americano e o método Likert de medição de atitude foi formulado em sua tese de doutorado sendo uma versão abreviada publicada em um artigo de 1932 no periódico *Archives of Psychology* (LIKERT, 1932). Na época, muitos psicólogos acreditavam que seu trabalho deveria limitar-se ao estudo de comportamentos observáveis sendo rejeitada a noção de que fenômenos não observáveis (ou latentes) como atitudes poderiam ser medidos (JOHNS, 2010). Como o seu contemporâneo, Louis Thurstone, Likert não estava de acordo. Eles argumentaram que as atitudes variam ao longo de uma dimensão de negativa a positiva, assim como as alturas variam ao longo de uma dimensão de curta a alta, ou a riqueza varia de pobre a rica. Para Likert, a chave para medir a atitude bem sucedida

foi transmitir essa dimensão subjacente aos entrevistados, de modo que pudessem escolher a opção de resposta que refletisse melhor sua posição nessa dimensão. Esta noção direta é ilustrada na Figura 28 que apresenta sua forma de escala.

Figura 28 Modelo de escala desenvolvido por Likert. Fonte: (LIKERT, 1932)



No que diz respeito a Likert, as atitudes em relação a qualquer objeto ou em qualquer questão variam ao longo da mesma dimensão subjacente a positiva. Isso teve três implicações significativas. Primeiro, seu método era universalmente aplicável. Na própria pesquisa de Likert, ele mediu opiniões sobre temas tão diversos quanto o controle de natalidade, o chinês, a evolução, a guerra e a existência de Deus. Em segundo lugar, desde que as opções de resposta abrangem a dimensão negativa à positiva, sua formulação, precisa, pode variar. Daí o artigo de 1932 de Likert (1932) incluir itens redigidos, como no exemplo acima, com escalas de resposta que vão de “desaprovar fortemente” para “aprovar fortemente”. Em terceiro lugar, porque as respostas eram comparáveis em diferentes questões – em cada caso, simplesmente relatando de forma positiva ou negativa a disposição do respondente quanto ao objeto de atitude em questão – eles poderiam receber os mesmos códigos numéricos, conforme ilustrado no diagrama acima. Além disso, com vários itens no mesmo objeto amplo (como os listados acima), esses códigos podem ser somados ou calculada a sua média para fornecer uma indicação da orientação geral positiva ou negativa de cada respondente em relação a esse objeto. Esta é a base das escalas de Likert.

Na escala de Likert, os respondentes escolhem somente um dos pontos fixos estipulados na linha, em um sistema de cinco categorias de resposta (pontos), partindo de “aprovo fortemente” até “desaprovo fortemente”. A escala de Likert também introduz o caráter bidimensional da escala e com um ponto neutro no meio da escala. Desde a publicação de sua obra, a escala formulada por Likert tem se tornado popular. As razões para isto incluem o tipo de psicometria (CUMMINS e GULLONE, 2000) utilizada na investigação, a dificuldade de generalizações com o uso de grande número de opções de marcação e a natureza complexa de escalas alternativas.

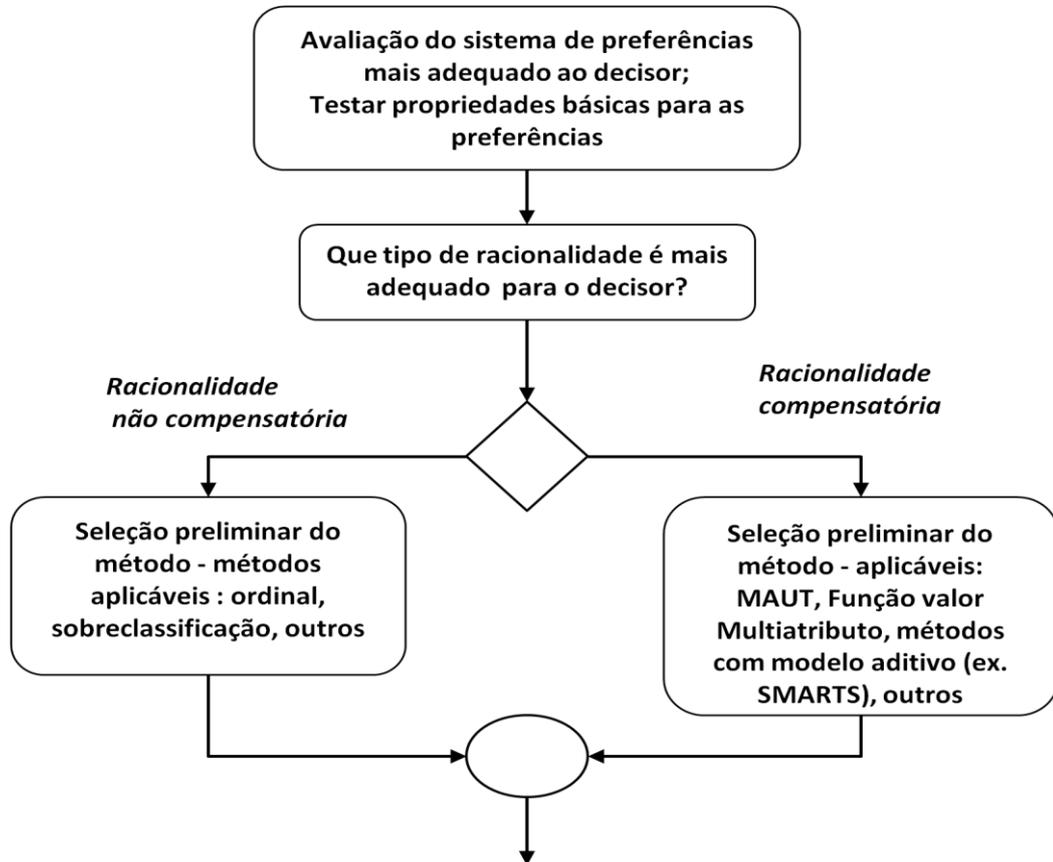
O trabalho de Likert (1932) deixou claro que sua escala centrava-se na utilização de cinco pontos, e não menciona o uso de categorias de respostas alternativas na escala a ser utilizada. Embora o uso de escalas com outro número de itens, diferente de cinco, represente uma escala de classificação, quando esta não contiver cinco opções de resposta, não se configura uma escala Likert, mas sim do “tipo Likert”. No entanto, como Clason e Dormody, (1994) ressaltam, muitos estudos têm usado diversas opções, paralelas à escala tradicional de cinco pontos, obtendo resultados satisfatórios. Neste caso, a escala se configura como do tipo Likert.

Em sua essência, a escala de Likert é um instrumento de medição de atitudes que podem ser consideradas como predisposições para reagir negativa ou positivamente a respeito de destinações, equipamentos, operações, etc. A abordagem para medir atitudes tem sido, durante décadas, onipresente nos questionários de todos os tipos: pesquisa de mercado, sondagem de opinião, grandes pesquisas governamentais e estudos acadêmicos em áreas que vão desde ciência política até design de produto (JOHNS, 2010). Não somente é uma maneira agradável de avaliar opiniões específicas, mas também se presta muito facilmente à construção de medidas de itens múltiplos que pode medir atitudes e valores mais amplos.

3.8.3 Estrutura de preferencia

A Figura 29 apresenta um diagrama funcional definido por De Almeida (2013) onde podem ser verificados os passos para a consolidação das preferências. Na construção de um modelo de decisão é definida a estrutura de preferência mais adequada para representar as preferências do(s) decisor(es). Neste trabalho assumiu-se que todas as alternativas podem ser comparadas entre si, não havendo, portanto, a presença de incomparabilidade e que o(s) decisor(es) consegue(m) identificar relações de preferência e indiferença entre os pares de consequências considerados.

Figura 29 Modelagem de preferências. Fonte: extraído de (DE ALMEIDA, 2013)



Têm-se, portanto, a estrutura de preferência (P,I). Ela possui uma relação simétrica - indiferença (I) e outra assimétrica - preferência (P) que permite a obtenção de uma pré-ordem completa (completa, pois não há incomparabilidade) (DE ALMEIDA, 2013). Neste caso, têm-se:

$$aPb \Rightarrow v(a) > v(b)$$

$$aIb \Rightarrow v(a) = v(b)$$

Onde $v(a)$ e $v(b)$ são, respectivamente, as funções valor da alternativa a e da alternativa b.

Ainda as propriedades de ordenabilidade e transitividade são verificadas Assume-se que a estrutura (P,I) é apropriada para o(s) decisor(es) realizar(em) a ordenação das alternativas e que a transitividade foi respeitada. Como a estrutura (P,I) é apropriada para o(s) decisor(es) expressar suas preferências sobre o conjunto de consequências do problema de decisão, então o modelo tradicional, no qual se incluem os métodos de critério único e síntese,

tal como o modelo de agregação aditivo, podem ser usados. A racionalidade mais adequada para o(s) decisor(es), neste caso, é a compensatória, pois um pior desempenho em custo do investimento, por exemplo, pode ser compensado por um melhor desempenho na quantidade de energia gerada. Da mesma forma que um pior desempenho na vida útil poderia ser compensado, por exemplo, por um melhor desempenho na eficiência de geração. A avaliação global da alternativa dependerá do valor da consequência para cada critério e do quanto uma tecnologia é melhor do que a outra em determinado critério, e não apenas do subconjunto de critérios em que a alternativa A é melhor do que a alternativa B, de tal forma que é possível haver compensação entre os critérios. Eles, aqui considerados, também são mutuamente independentes em preferência, visto que a estrutura de preferência condicional no espaço em um determinado critério, dado um valor fixo de outro critério, será independente deste valor que foi fixado;

3.8.4 Métodos multicritérios

Os métodos multicritérios são claramente necessários quando não se podem representar todos os objetivos de um problema por meio de uma única métrica. Quando as variáveis de um problema possuem unidades de medida diferentes, não é possível combiná-las e obter um resultado síntese, que seria a representação da avaliação global de uma dada alternativa, sendo necessário, portanto, um método MCDM/A. Quando da utilização de um método MCDM/A, a combinação dos objetivos é feita por meio da avaliação subjetiva de um decisor ou grupo de decisores, com capacidade de definição para o problema.

Este trabalho tem por base uma abordagem multicritério específica: o modelo de agregação aditivo determinístico, que é um método de agregação a critério único de síntese. Sua natureza compensatória permite que um pior desempenho de uma alternativa em um determinado critério seja compensado por um melhor desempenho em outro critério (DE ALMEIDA, 2013).

A Tabela 3 ilustra uma matriz de decisão, na qual se encontram as alternativas de decisão do problema, os critérios considerados e a avaliação de cada alternativa i para cada critério j que leva à função valor $v_j(a_{ij})$. A construção da função valor para cada elemento é baseada na avaliação das consequências (*payoffs*) a serem obtidas. No entanto, para efeito de simplificação é usual referir-se à alternativa (DE ALMEIDA, 2013).

Para solucionar um problema no modelo da Tabela 3, com base no modelo aditivo, são requeridos dois tipos de avaliação: intracritério e intercritério. A avaliação intracritério

consiste em determinar um valor que representa a avaliação de cada alternativa i para cada critério j de acordo com as preferências do(s) decisor(es), o que leva à função valor intracritério $v_j(a_{ij})$.

Tabela 3 Matriz de decisão para um problema multicritério. Fonte: (DE ALMEIDA, 2013)

Alternativas	Critérios			
	C_1	C_2	C_m
a_1	$v_1(a_{11})$	$v_2(a_{12})$	$v_m(a_{1m})$
a_2	$v_1(a_{21})$	$v_2(a_{22})$	$v_m(a_{2m})$
.....
a_n	$v_1(a_{n1})$	$v_2(a_{n2})$	$v_m(a_{nm})$

Unidades diferentes representando os valores dos critérios traz a necessidade de normalização dos valores das consequências, ou seja, a transformação dos valores das consequências, em cada critério, em valores numa escala, geralmente de 0 e 1, assumindo uma função linear numa determinada escala (DE ALMEIDA, 2013).

Existem vários procedimentos de normalização, por exemplo, quando todas as funções valor $v_j(a_{ij})$ são lineares, o procedimento definido por meio da equação 20, para a normalização dos critérios, pode ser adotado:

$$v'_j(a_{ij}) = [v_j(a_{ij}) - \text{Min } v_j(a_{ij})] / \text{Max } v_j(a_{ij}) - \text{Min } v_j(a_{ij}) \quad (20)$$

Onde $v_j(a_{ij})$ é o valor da avaliação da alternativa i para o critério j , e $v'_j(a_{ij})$ é o valor normalizado da avaliação da alternativa i para o critério j . Este é o método de normalização utilizado na maioria dos métodos aditivos, onde o valor normalizado, da consequência, pode ser interpretado como um percentual da faixa de variação entre os valores máximo e mínimo daquele critério (DE ALMEIDA, 2013).

Este procedimento de normalização possui valor mínimo 0 e valor máximo 1 para as consequências normalizadas. Para o caso da função valor em que se deseja minimizar o resultado, deve-se transformá-la usando $v'_j(a_{ij}) = 1/v_j(a_{ij})$, que mantém a cardinalidade para uma escala de razão. O método FITradeoff, utilizado neste trabalho, realiza a normalização por meio deste procedimento.

Na avaliação intercritério, são definidos os valores das constantes de escala dos critérios, para posteriormente ser feita a agregação aditiva, conforme equação (21) (FREJ, 2017):

$$v(a_i) = \sum_{j=1}^n k_j v_j(a_{ij}) \quad (21)$$

Onde k_j é a constante de escala normalizada para o critério j , conforme equação 22:

$$\sum_{j=1}^n k_j = 1 \quad ; \quad k_j > 0 \quad (22)$$

Desta forma, a solução do problema é dada pela seleção da alternativa que apresenta o maior valor global $v_j(a)$.

3.8.3.1 Aplicação dos métodos multicritérios

Os métodos multicritérios de apoio à decisão (do inglês *Multicriteria Decision Making/Aiding* - MCDM/A) têm sido aplicados, com sucesso, em diferentes contextos de tomada de decisão, como meio de auxílio em problemas de planejamento energético (ZHANG L, 2015). Extensas revisões da literatura sobre a aplicação de tais técnicas em áreas como alocação de recursos energéticos, gerenciamento de energia de construção, análise de impacto ambiental, gerenciamento de energia de transporte e planejamento nacional de energia podem ser encontradas em Strantzali (2016), Pohekar (2004) e Kumar (2017). Atenção particular tem sido dedicada à avaliação multicritério das opções de geração de energia elétrica visando ao estabelecimento de políticas de energia mais adequadas para uma região ou país. Neste contexto, diferentes técnicas MCDM / A foram aplicadas (KUMAR A, 2017).

Em sua revisão de literatura, Pohekar & Ramachandran (2004) descobriram que a técnica mais popular é o *Analytical Hierarchy Process* (AHP). Este método foi aplicado por Stein (2013) para classificar as tecnologias de energia elétrica, renováveis e não renováveis, no contexto americano. Recentemente, Malkawi e Azizi (2017) usaram esse método para avaliar as opções de energia na Jordânia. O AHP também tem sido usado em combinação com

outros métodos. San Cristóbal (2011) e Kaya & Kahraman (2010) combinaram o AHP com o método VIKOR para, respectivamente, lidar com a energia renovável na Espanha e na Turquia. Haddad, Liazid e Ferreira (2017) propuseram o uso de informações (feedback) de especialistas junto com o AHP para avaliar diferentes opções de energia renovável para a Argélia. A teoria dos conjuntos difusos também foi combinada com o método AHP, como nos estudos realizados por Alipour, Alighaleh e Hafezi (2017) e Kahraman, Kaya & Cebi (2009), nos quais os primeiros avaliam alternativas energéticas para alocação de recursos no Irã e os últimos determinam a alternativa de energia renovável mais adequada para a Turquia, respectivamente. Sul-Ki, Young Sin e Heo (2011) utilizaram o AHP para selecionar fontes de energia renováveis para o fornecimento de energia à Coreia do Norte na superação de sua crônica escassez de energia.

Métodos de sobreclassificação (do inglês *outranking*) também foram utilizados no contexto energético. Beccali, Cellura e Mistretta (2003) utilizaram método ELECTRE (*Elimination et Choix Traduisant la Réalité*) para selecionar a tecnologia de geração de energia elétrica mais apropriada de acordo com três grupos de critérios: tecnológico, energético e ambiental e socioeconômico, neste trabalho, um estudo de caso é realizado para a ilha da Sardenha. Tsoutsos et al (2009) realizaram o planejamento de energia sustentável usando análise multicritério na ilha de Creta com a ajuda dos métodos PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation*) I e II. Papadopoulos e Karagiannidis (2011) aplicaram o ELECTRE III para a otimização de sistemas energéticos descentralizados, entre outros.

Apesar de sua popularidade, o método AHP bem como os demais métodos os métodos acima mencionados, exigem informação completas do(s) decisor(es), a fim de definir os parâmetros necessários e avaliar as alternativas. Ao executar aplicações reais, entretanto, estabelecer tais parâmetros precisos pode ser uma tarefa cognitivamente exigente para o(s) decisor(es). Além disso, em tais casos, a informação disponível é frequentemente incompleta (KAYA T, 2010), (RIABACKE M, 2012) e (MOUSAVI M, 2017).

Em todo o mundo, há um movimento em direção à exploração de fontes de energia renováveis em oposição aos combustíveis fósseis, reconhecendo a necessidade de diversificar as tecnologias na matriz elétrica, e, para a mesma, o reconhecimento da importância da contribuição da GREED, não só quanto ao aspecto da geração de energia elétrica em si, mas também da inclusão social, enquanto fator de desenvolvimento econômico, cultural e humano. Neste desafio, precisam ser levados em consideração os múltiplos aspectos envolvidos na tomada de decisões envolvidas e a necessidade de métodos que acomodam informações

incompletas do(s) decisor(es). Como uma alternativa aos métodos que exigem informações completas, foram desenvolvidas muitas técnicas MCDM/A que utilizam informações parciais, segundo De Almeida Filho (2017), porém, ainda não foram amplamente aplicadas à tomada de decisão sobre o setor elétrico.

Em apoio a todas essas questões, a principal contribuição deste trabalho é propor um modelo MCDM/A para avaliação de tecnologias de geração de energia elétrica que acomode situações em que a informação disponível é incompleta, utilizando o método *Flexible and Interactive Tradeoff* (FITradeoff) (DE ALMEIDA AT, 2016). Este método é baseado em informações incompletas (ou parciais) e tem como objetivo reduzir o esforço cognitivo exigido do(s) decisor(es) ao extrair suas preferências e, portanto, pode ser uma ferramenta útil no contexto de seleção de tecnologias e planejamento de energia. O FITradeoff SAD (em inglês DDS - *Decision Support System*) está disponível para download mediante solicitação após o registro em <http://fitradeoff.org/>.

Segundo De Almeida (2016), o FITradeoff é um método MCDM/A que utiliza informações parciais a partir do posicionamento do(s) tomador (es) de decisão. Por meio do processo de elicitación flexível, o FITradeoff modela a informação parcial fornecida pelos tomador (es) de decisão como demonstrações de preferência para obter valores viáveis para os pesos utilizados no âmbito da Teoria do Valor Multiatributo ou (MAVT - *Multi-Attribute Value Theory*), a teoria mais amplamente utilizada na solução de problemas de decisão multicritério (WEBER M, 1993).

3.8.3.2 Teoria do valor multiatributo

Multi-Attribute Value Theory – MAVT

Seja A um conjunto discreto composto por m alternativas e F outro conjunto composto por n critérios. Os elementos que compõem a matriz de decisão $D_{m \times n}$ correspondem aos valores das consequências atribuídos a cada combinação de alternativa e critério, ou seja, a consequência é um resultado obtido quando o(s) decisor(es) escolhe(m) uma alternativa a ser implementada. Segundo De Almeida (2015) estes valores de consequência estão associados aos objetivos do problema que se pretende alcançar e cada alternativa $a \in A$ é avaliada por meio de seu vetor de consequências, n -dimensional, $x_a = (x_1^a, x_2^a, \dots, x_j^a, \dots, x_n^a)$, considerando n critérios, e sendo x_j^a a consequência relativa ao critério j . Então cada alternativa leva a uma

consequência, que se reflete nestes n critérios. Os modelos MCDM/A sob o MAVT são construídos de tal forma que um valor numérico possa ser associado a cada alternativa por meio de uma função valor v com as seguintes propriedades (KEENEY R, 2007) e (KEENEY RL, 1976).

$$v(x_a) > v(x_b) \Leftrightarrow x_a \succ x_b \quad e$$

$$v(x_a) = v(x_b) \Leftrightarrow x_a \sim x_b \quad \forall a, b \in A$$

A função valor aditivo (23) é uma das mais conhecidas e utilizadas no contexto MAVT (DE ALMEIDA AT, 2015). Ela fornece o valor global para cada alternativa em A , usando uma abordagem decomposta, que combina os valores de consequências normalizados $v_j(x_a)$ com as constantes de escala dos critérios (também chamada de peso) k_j (JP., 2009) e (GW., 1995).

$$v(x_a) = \sum_{j=1}^n k_j v_j(x_j^a) \quad (23)$$

Onde,

$$\sum_{j=1}^m k_j = 1$$

e $k_j > 0$.

A função de valor marginal v_j é definida de tal forma que o intervalo de valores das consequências para o critério C_j , ou seja, seu espaço de consequências é remapeado para uma nova escala, para que, ao pior valor (*Pior_j*) será atribuído o valor 0 (zero) e ao melhor (*Melhor_j*) o valor 1 (um). Se uma escala local for utilizada, o pior e o melhor valor corresponderão aos limites do espaço de consequências de acordo com o conjunto A de alternativas viáveis (JP., 2009). Como ilustração, a regra matemática para a função de valor marginal linear é dada por:

$$v_j(x_j^a) = (x_j^a - \text{Pior}_j) / (\text{Melhor}_j - \text{Pior}_j) \quad (24)$$

Deve-se notar que os pesos k_j em (23) devem manter uma relação matemática com a faixa de variação (*range*) das consequências, ao utilizar uma escala local, isto é, devem variar em função do espaço de consequências, refletindo o impacto das faixas de variação (*ranges*) de um critério no valor geral v (JP., 2009) e (GW., 1995). A determinação dos pesos é uma importante questão no contexto MAVT e, muito frequentemente, caracteriza-se como uma tarefa cognitivamente exigente e demorada (WEBER M, 1993) e (RIABACKE M, 2012). O uso de modelos multicritérios depende do estabelecimento de parâmetros relacionados à estrutura de preferência do(s) decisor(es). O estabelecimento dos pesos dos critérios pode ser um dos principais desafios enfrentados em um problema de decisão, pois além da subjetividade inerente à informação preferencial do(s) decisor(es), ainda há o real significado que o termo peso deve ter para ser apropriado ao modelo que representará a decisão.

Embora seja amplamente utilizado na prática, o modelo aditivo, também conhecido como soma ponderada, é comumente aplicado de maneira errada, sendo o uso inadequado de pesos o erro mais comum. Keeney (1992) argumenta que um equívoco comum é a consideração das constantes de escala (os pesos) como apenas a importância relativa dos critérios, o que é inadequado para o modelo aditivo que compensa os desempenhos entre diferentes critérios. Neste caso, é necessário considerar a informação da escala ou o intervalo dos desempenhos em cada critério. Em outras palavras, as constantes de escala não representam apenas o peso ou grau de importância dos critérios, mas envolve também um fator de escala relacionado aos valores das consequências. Portanto, para determinar os valores de k_j é necessário elicitare as preferências do(s) decisor(es) levando em consideração a compensação (*tradeoff's*) entre os valores das consequências (KEENEY RL, 1976).

Também, segundo Keeney (2002), entre os outros erros comuns estão à falta de mensuração adequada para as consequências e a avaliação da compensação (*tradeoff*) sem uma conexão adequada com o leque de consequências.

É importante enfatizar que o modelo aditivo em si é apenas a soma ponderada, que é um procedimento bastante simples. Alguns procedimentos foram propostos para lidar com a elicitação de pesos para o modelo aditivo, como os métodos SMARTS / SMARTER apresentados por Edwards e Barron (1994) e o procedimento de compensação (*tradeoff*) apresentado por Keeney e Raiffa (1976) que possui uma forte teoria que o suporta (WEBER M, 1993). Uma das vantagens do procedimento de compensação (*tradeoff*) é a consideração de funções não-lineares para avaliação intracritérios, diferente de outros métodos de levantamento de peso. No procedimento de levantamento de peso, o procedimento de

compensação (*tradeoff*) começa com o ranqueamento (*ranking*) dos critérios, pedindo ao tomador de decisão que escolha entre duas consequências. Cada consequência tem o melhor desempenho em um dos critérios e o pior desempenho nos demais critérios, de modo que o critério com o melhor desempenho no primeiro é diferente daquele com o melhor desempenho no segundo.

Após o ordenamento, o(s) tomador(es) de decisão precisa(m) estabelecer pontos de indiferença entre vetores de consequências hipotéticas. Estabelecer esses valores exatos, no entanto, é cognitivamente difícil para as pessoas (RIABACKE M, 2012) exige que o(s) decisor(es), a cada etapa, no momento de fazer comparação entre as consequências, especifique o ponto exato que o torna indiferente entre as duas consequências, para que, a partir daí, seja obtida uma igualdade que fará parte do sistema de equações para obtenção dos valores dos pesos. Especificar este ponto exato de indiferença não é uma tarefa fácil para o(s) decisor(es), visto que exige um alto esforço cognitivo (DE ALMEIDA AT, 2016). Estudos comportamentais mostraram que o(s) decisor(es) apresentam um alto índice de inconsistências em suas respostas ao usar este procedimento (WEBER M, 1993).

O método *Flexible and Interactive Tradeoff* - FITradeoff (DE ALMEIDA-FILHO AT, 2017) é uma alternativa para lidar com problemas MCDM/A no contexto MAVT. Baseia-se no procedimento de compensação (*tradeoff*) de Keeney e Raiffa (KEENEY RL, 1976), no entanto, não exige o estabelecimento de valores exatos de indiferença, em vez disso, usa informações parciais do(s) tomador(es) de decisão, reduzindo assim seu esforço (DE ALMEIDA-FILHO AT, 2017). O método é elucidado a seguir.

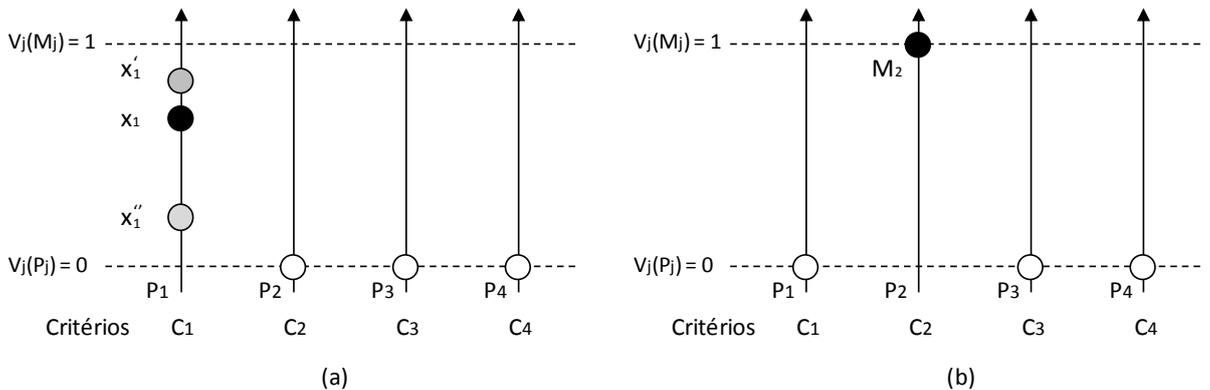
3.8.3.3 O método FITradeoff

Segundo De Almeida (2016), o método FITradeoff pode ser dividido em três etapas. A primeira corresponde à avaliação intra-critério, na qual uma função de valor marginal é obtida para cada critério. A segunda etapa do método corresponde à obtenção do ranqueamento (*ranking*) dos pesos dos critérios, considerando o seu espaço de consequências. E a terceira etapa, trata do processo de elicitación flexível, na qual um decisor, expressa suas preferências em relação a duas alternativas hipotéticas, h_1 e h_2 . Como ilustração, suponha que h_1 e h_2 tenham, respectivamente, vetores de consequência $x^{h_1} = (x_1^{h_1}, x_2^{h_1}, \dots, x_n^{h_1})$ e $x^{h_2} = (x_1^{h_2}, x_2^{h_2}, \dots, x_n^{h_2})$, em que h_1 tem um valor de desempenho intermediário no primeiro critério classificado, $Pior_1 < x_1^{h_1} < Melhor_1$ e os piores valores possíveis nos outros critérios,

$x_2^{h_1} = Pior_2, \dots, x_n^{h_1} = Pior_n$, enquanto h_2 tem o melhor valor de desempenho no segundo critério classificado, $x_2^{h_2} = Melhor_2$ e pior desempenho nos critérios restantes $x_1^{h_2} = Pior_1$, $x_3^{h_2} = Pior_3, \dots, x_n^{h_2} = Pior_n$, assumindo $k_1 > k_2 > \dots > k_n$. De acordo com MAVT e considerando que as funções de valor marginal aplicadas são monotônicas e levam a $Pior_i = 0$ e $Melhor_i = 1 \forall i$, se o tomador de decisão prefere x^{h_1} a x^{h_2} , então temos $k_1 v_1(x_1^{h_1}) > k_2$ e x_1' passa a assumir o valor de $x_1^{h_1}$, caso contrário, se obtêm $k_1 v_1(x_1^{h_1}) < k_2$, e x_1'' assume o valor de $x_1^{h_1}$. Conforme ilustrado, o método não procura encontrar valores exatos para os pesos dos critérios; em vez disso, ele usa as informações parciais do(s) decisor(es) na forma de desigualdades e, a cada novo nível de informações obtidas, o espaço de pesos é atualizado. Com base nesse espaço de pesos, um problema de programação linear é executado para verificar se há pelo menos um vetor de pesos que maximize o valor geral (23) de uma alternativa, que também está sujeita a condições que verifiquem sua otimização potencial. Se não houver vetor de pesos que satisfaça essas condições, a alternativa não será mais considerada no processo como uma solução potencial. Assim, sempre que o(s) decisor(es) coloca suas preferências, o FITradeoff verifica se é possível reduzir o subconjunto de alternativas potencialmente ótimas, na tentativa de chegar a uma recomendação o quanto antes.

Portanto, trata-se de um processo iterativo junto ao decisor, onde as questões são baseadas no grau de informação necessária para se obter a solução do problema. Para melhor entender como funciona este processo iterativo, com o auxílio da Figura 30, considera-se uma comparação que envolve uma consequência que representa o critério 1 (a) e outra consequência que diz respeito ao critério 2 (b).

Figura 30 Consequências com informação flexível para o critério 1 (a) e para o critério 2 (b).
 Fonte: (DE ALMEIDA, 2013)



Suponha que, na etapa de ordenação, foi definido que a constante de escala do critério 1 (k_1) é maior do que a constante de escala do critério 2 (k_2). Então, por exemplo, o decisor deverá escolher se prefere uma consequência com um valor intermediário do critério 1 em torno do ponto x_1 (e o pior valor para os demais) ou uma consequência com o melhor valor do critério 2 (e o pior valor para os demais). No caso do procedimento de compensação (*tradeoff*), x_1 seria o ponto em que se teria uma relação de indiferença, mais difícil para ser identificado pelo decisor. O procedimento da elicitacão flexível solicita informações mais suaves (DE ALMEIDA, 2013) como os pontos x'_1 e x''_1 por exemplo. Neste caso o decisor teria a seguinte relação de preferência:

$$(x'_1, P_2, P_3, P_4) P (P_1, M_2, P_3, P_4) P (x''_1, P_2, P_3, P_4)$$

Logo, para um valor de desempenho referente ao ponto x'_1 o decisor prefere a consequência (a) da figura 27. Por outro lado, com referencia ao ponto x''_1 a preferência seria para a consequência (b).

A partir das declarações de preferência estrita por parte do decisor e considerando que o valor das consequências é dado pela função de agregação aditiva da equação (20), as seguintes inequações são obtidas:

Se o decisor informam que $(a)P(b) \Rightarrow v(a) > v(b)$

$$k_1 v_1(x_1^{h1}) + k_2 P_2 + k_3 P_3 + k_4 P_4 >$$

$$k_1 P_1 + k_2 v_2(M_2) + k_3 P_3 + k_4 P_4$$

Como o valor de M_2 é 1(um) e os demais pesos, k_i , 0 (zero)

$$k_1 v_1(x_1^{h1}) > k_2$$

$$\text{Logo: } x'_1 \leftarrow x_1^{h1}$$

Se o decisor informam que $(b)P(a) \Rightarrow v(a) < v(b)$

$$k_1 v_1(x_1^{h2}) < k_2$$

$$\text{Logo: } x_1'' \leftarrow x_1^{h1}$$

Tem-se as seguintes inequações:

$$k_1 > k_2 > k_3 > k_4$$

$$\sum_{i=1}^n k_i = 1, \quad k_i > 0$$

$$k_1 v_1(x_1') > k_2$$

$$k_1 v_1(x_1'') < k_2$$

$$k_2 v_2(x_2') > k_3$$

$$k_2 v_2(x_2'') < k_3$$

.

.

.

$$k_n v_n(x_n') > k_n$$

$$k_n v_n(x_n'') < k_n$$

Então a partir destas inequações, o espaço de pesos φ é obtido:

$$\varphi = \{(k_1, k_2, \dots, k_n) \mid \sum_{i=1}^n k_i = 1; k_1 v_1(x_1'') < k_2 < k_1 v_1(x_1'); \dots; k_i v_i(x_i'') < k_{i+1} < k_i v_i(x_i'); \dots; k_{n-1} v_{n-1}(x_{n-1}'') < k_n < k_{n-1} v_{n-1}(x_{n-1}')\}$$

Ao longo do processo, baseado nas respostas do(s) decisor(es), o espaço de pesos atual - que começa o processo variando de 0 a 1 - vai sendo reduzido, por meio das novas inequações obtidas, trazendo novos valores para os limites das constantes de escala. A cada pergunta respondida, pelo decisor, o modelo irá calcular o desempenho das alternativas no presente espaço de pesos, por meio de problemas de programação linear, dentro de um processo iterativo. Assim a cada etapa de avaliação com o decisor procura-se avaliar se a informação já permite uma resposta adequada ao decisor. Caso não seja ainda possível, outros

valores de x'_i e x''_i são atualizados, por meio de uma comparação entre critérios vizinhos, para avaliação subsequente (DE ALMEIDA, 2013).

A partir de $k_1 > k_2 > \dots > k_n$, o problema de programação linear em cada avaliação é definido como:

$$\text{Max } \sum_{i=1}^n k_i v_i(a_{ij}), \quad j = 1, \dots, m \quad (25)$$

considerando as seguintes restrições:

$$\sum_{i=1}^n k_i v_i(a_{ij}) \geq \sum_{i=1}^n k_i v_i(a_{iz}), \quad z = 1, 2, \dots, m, z \neq j \quad (26)$$

$$k_i v_i(x'_i) > k_{i+1} \quad i = 1 \text{ a } n - 1 \quad (27)$$

$$k_i v_i(x''_i) < k_{i+1} \quad i = 1 \text{ a } n - 1 \quad (28)$$

$$\sum_{i=1}^n k_i = 1 \quad (29)$$

$$k_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, n$$

O problema de programação linear, representado, busca testar se uma alternativa a_j pode ser a melhor para alguns dos vetores de pesos pertencentes ao espaço atual (de pesos) delimitado pelas restrições geradas pelas declarações do decisor.

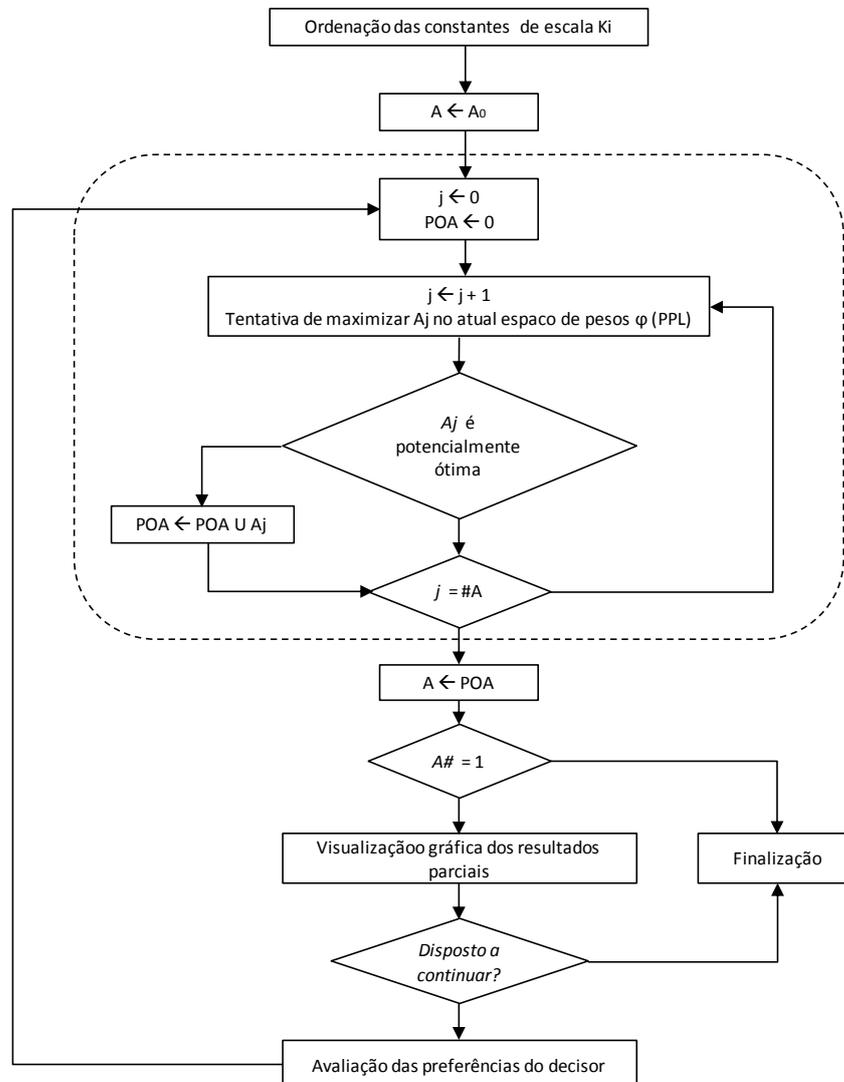
A equação 25 procura encontrar um conjunto de pesos que maximize o valor da alternativa testada sujeita às restrições do problema. A equação 26 impõe que a alternativa testada tenha um valor pelo menos igual ao valor de qualquer alternativa que ainda seja considerada para escolha, chamada potencialmente ótima. Inicialmente, todas as alternativas são consideradas potencialmente ótimas.

As equações 27 e 28 requerem que a relação $k_j + 1 / k_j$ esteja entre um intervalo limitado por um limite superior $v(x'_j)$ e um limite inferior $v(x''_j)$. Imediatamente após a classificação dos critérios, $x'_j = b_j$ (o melhor desempenho no critério j entre os desempenhos que

podem ser obtidos com as alternativas em A) e $x^j = w_j$ (o pior desempenho no critério j entre os desempenhos que podem ser obtidos com as alternativas em A), fazendo com que os limites delimitem um intervalo entre 0 e 1. A Equação 29 garante a normalização dos pesos.

Segundo Frej (2017), as variáveis de decisão são as constantes de escala k_1, k_2, \dots, k_n e a_{ij} representam a consequência (*payoff*) da alternativa j no critério i , conforme a matriz de decisão considerada. Este formato de programação linear é executado, a cada interação, para cada uma das alternativas, testando o seu potencial ótimo. O decisor não percebe o tempo de execução da programação linear. A Figura 31 mostra um fluxograma do processo iterativo.

Figura 31 Fluxograma do processo iterativo do método FITradeoff. Fonte: (FREJ, 2017)



No fluxograma da Figura 30 tem-se que:

A é o conjunto de alternativas que podem ser ótimas para o problema.

A_0 é o conjunto inicial de alternativas do problema.

POA representa o conjunto que recebe todas as alternativas consideradas potencialmente ótimas por meio da programação linear.

Conforme ilustrado, o método não busca encontrar valores exatos para os pesos dos critérios, em vez disso ele usa a informação parcial do decisor na forma de desigualdades, e em cada novo nível de informação obtido, o espaço de pesos é atualizado. Com base neste novo espaço de pesos, um problema de programação linear é realizado para verificar se há pelo menos um vetor de pesos que maximiza o valor global (24) de uma alternativa, também sujeito a condições que verificam sua potencialidade de otimização. Assim, sempre que o decisor oferece sua preferência, o FITradeoff verifica se é possível reduzir o subconjunto de alternativas potencialmente ótimas, na tentativa de obter uma recomendação o mais rápido possível.

3.8.3.4 *Suposições como base do método FITradeoff*

Existem muitos métodos MCDM/A para serem aplicados. O método mais apropriado para resolver um problema de decisão deve acomodar suas características fundamentais, ou em outras palavras, seja adequado para o contexto do problema e sua natureza, bem como a estrutura de preferência do(s) tomador(es) de decisão e o tipo de racionalidade mais conveniente (DE ALMEIDA AT, 2015).

Como base para a escolha do método MCDM/A para o modelo em voga são ressaltadas as seguintes características:

- (a) O espaço de ações do problema corresponde a um conjunto discreto da forma $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$, onde o número de alternativas é igual a n (DE ALMEIDA, 2013). O número e definição de cada alternativa no conjunto dependerão da região e do problema específico em que o modelo será aplicado;
- (b) O tipo de problemática é o P. α , de acordo com a classificação apresentada por Roy (1996), pois é um problema de escolha de uma tecnologia no ambiente de várias alternativas.

- (c) É assumida uma independência preferencial (KEENEY RL, 1976) e uma racionalidade compensatória do decisor.
- (d) Os Critérios considerados para o modelo são inteligíveis e mensuráveis (KEENEY RL, 1976) e também determinísticos – Monotônicos;
- (e) É necessária a acomodação de informações incompletas do decisor ao lidar com problemas relacionados à energia;
- (f) Não exigência do estabelecimento de valores exatos de indiferença, o que permite a utilização de informações parciais do decisor. Esta característica vem de encontro à inexistência de dados para a maioria dos critérios, considerados, referentes as tecnologias de geração de energia no Brasil;
- (g) Flexibilidade na variação possível dentro das faixas de comparação para a o procedimento de elicitación junto ao decisor.
- (h) Tem-se como premissa que o decisor representa especialista(s) com experiência, conhecimento e discernimento suficientes para lidar com as tecnologias envolvidas nos problemas. Ainda, o FITradeoff SAD permite pular uma questão no caso de alguma dúvida por parte do decisor, por meio da opção sem resposta (*no answer*) e continuar com novas questões sem comprometer o procedimento de elicitación.

Tendo em mente essas questões, apoiar o modelo com o método FITradeoff (DE ALMEIDA AT, 2016) é apropriado, pois foi projetado para encontrar soluções que satisfaçam as declarações de preferência do decisor no contexto do MAVT. Neste contexto, o método FITradeoff permite que o processo de levantamento de preferências seja baseado em uma forte base axiomática. Além disso, o FITradeoff SAD oferece uma maneira flexível e interativa de obter as informações de preferência do decisor. Isso permite que intuições (*insights*) sobre o problema sejam geradas, uma vez que o decisor pode acessar a progressão do subconjunto de soluções potenciais em cada estágio do processo de elicitación e, conseqüentemente, enriquecer o processo de tomada de decisão.

A fim de alcançar recomendações para cada perfil de decisão considerados no problema, o FITradeoff realiza o processo de elicitación flexível em que o(s) decisor(es) precisa(m) expressar suas preferências em relação aos vetores de conseqüências. Nesse processo, os valores exatos das ponderações de critérios não são calculados. Em vez disso, o FITradeoff, baseado na estrutura axiomática do MAVT, utiliza, da melhor forma possível, as

informações disponíveis no formato de desigualdades, a fim de chegar a uma solução o mais breve possível. Assim, o FITradeoff requer apenas informações parciais do(s) decisor(es), reduzindo assim o esforço cognitivo exigido. Como comparação com uma técnica usando informação completa sob o MAVT, se o procedimento clássico de compensação (Tradeoff) fosse aplicado, o decisor precisaria responder a um processo de comparação de desempenho (*benchmarking*), de $3(n - 1)$ questões para cada perfil de decisão (DE ALMEIDA AT, 2016), no qual n corresponde ao número de critérios do modelo, a fim de encontrar as soluções.

Vale ressaltar que este modelo foi validado utilizando-se a estrutura (*framework*) para construção de modelos de decisão multicritério apresentados em (DE ALMEIDA AT, 2015). Uma das principais características de um processo de validação dentro de tal estrutura é que ela avalia a estrutura axiomática da teoria subjacente ao modelo. Nesse caso, é o MAVT que melhor se ajusta a esse problema de decisão, portanto, no processo de construção, algumas características são verificadas, como: a racionalidade compensatória do(s) decisor(es) (DE ALMEIDA AT, 2015), a propriedade de independência preferencial (KEENEY RL, 1976) e um conjunto discreto de alternativas. A informação preferencial e factual (KEENEY, 1992), usada neste processo, foi verificada em algumas oficinas informais, que resultou em trazer várias percepções ao modelo.

4 APLICAÇÃO DO MODELO - ESTUDOS DE CASO

Com o intuito de comprovar a aplicabilidade do modelo desenvolvido, foram estudados dois casos de decisão sobre tecnologias de geração que representam a geração de energia elétrica como um todo. O primeiro diz respeito aos sistemas de grande porte, dentro do contexto da Matriz Elétrica Brasileira e, de forma complementar, o segundo estudo trata do caso das aplicações de pequeno porte, referentes à GREED, no âmbito da Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012 (ANNEE, 2012), posteriormente aprimorada pela Resolução Normativa ANEEL nº 687/2015 (ANNEE, 2015). Para cada caso foi desenvolvido um modelo MCDM/A, com base na estrutura conceitual e método multicritério estabelecido, considerando as especificidades de cada aplicação. No caso da Matriz Elétrica Brasileira, foram consideradas 8 (oito) tecnologias de geração e critérios com parâmetros já bem estabelecidos na literatura. Por outro lado, no caso da mini e micro geração da GREED, a pouca disponibilidade de dados referentes as 4 (quatro) tecnologias consideradas, reforçaram a necessidade de construção de critérios apropriados a essa classe de geração de energia elétrica.

A seguir será apresentada a modelagem e estruturação do problema referente à análise das tecnologias que compõem a Matriz Elétrica Brasileira.

4.1 ESTUDO DE CASO 1 – MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA

4.1.1 Análise de contexto

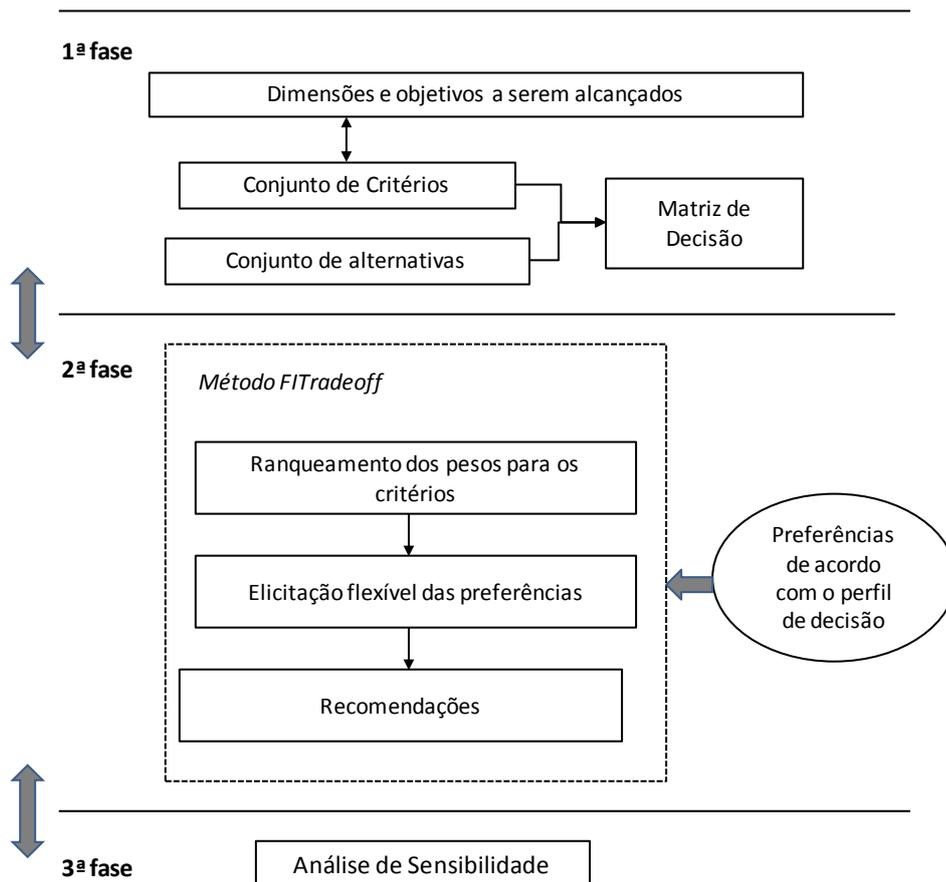
Em todo o mundo, há um movimento em direção à exploração de fontes de energia renováveis em oposição aos combustíveis fósseis, reconhecendo a necessidade de diversificar as tecnologias na matriz elétrica. Para tanto, devem ser levados em consideração os múltiplos aspectos envolvidos na tomada de tais decisões e a necessidade para métodos que acomodam informações incompletas do(s) decisor(es).

Neste estudo de caso o contexto é a atual matriz elétrica brasileira, dada à importância da necessidade de sua diversificação por meio de investimentos em tecnologias que complementem a geração hidrelétrica. Considerando os múltiplos aspectos que precisam ser levados em conta na tomada de tais decisões, o modelo proposto MCDM/A é usado para avaliar oito tecnologias diferentes de energia elétrica, renováveis e não renováveis, que

compõem a atual matriz elétrica brasileira sob quatro dimensões de sustentabilidade: financeira, técnica, ambiental e socioeconômica (Tabela 4 – mais adiante), assumindo o conjunto de critérios apresentado na Tabela 5 (mais adiante). A aplicação do modelo proposto fornece informações que podem ser utilizadas no Brasil na elaboração de políticas de energia, mostrando o potencial de uso do método para solucionar problemas relacionados.

A Figura 32 mostra o esquema seguido para desenvolver o modelo para selecionar em qual tecnologia de geração investir. Isso é dividido em estabelecer os conjuntos de critérios e alternativas, aplicando o método FITradeoff de acordo com cada perfil de decisão de avaliação proposto, e, finalmente, realizando a análise de sensibilidade por meio da qual a robustez dos resultados é verificada.

Figura 32 Esquema para construir o modelo MCDM/A proposto.
Extraído de (SOARES, KANG e ALMEIDA, 2018)



A seguir, destacam-se as dimensões, conjuntos de critérios e alternativas relativos ao modelo, bem como as premissas por trás do método escolhido.

4.1.2 Dimensões e conjunto de critérios

O conceito de sustentabilidade, para o qual uma definição foi divulgada pela Comissão *Brundtland* das Nações Unidas (NATIONS, 1987), passou a ser considerado, no mundo dos negócios, principalmente a partir do último quarto do século XX. Desde então, tem sido considerado em processos de decisão, em problemas complexos, envolvendo múltiplos objetivos, muitas vezes conflitantes como pode ser verificado pelo levantamento bibliográfico realizado por Froehlich (2014) com diversos autores. A tomada de decisão racional em relação às tecnologias de geração de energia, em termos de planejamento, projeto e gerenciamento, enquadra-se nessa classe de problemas (WANG, YIN JING, *et al.*, 2009).

Inicialmente, a sustentabilidade foi disseminada com base no Triple Bottom Line, que abrange os aspectos econômicos, sociais e ambientais (dimensões) (ELIKINGTON, 1997). A partir daí, novas dimensões foram incorporadas ao conceito de sustentabilidade, tais como: institucional (SPANGENBERG e BONNIOT, 1998), política, moral, jurídica e técnica (PAWŁOWSKI, 2008) e cultural (SACHS, 1993).

Na área de energia, várias formas de análise multicritério foram realizadas usando as três dimensões iniciais do tripé Pessoas, Planeta e Lucro (do inglês *triple bottom line* ou *People, Planet and Profit*) (ELIKINGTON, 1997), ao qual o aspecto técnico foi adicionado como uma quarta dimensão. Sob essas quatro dimensões, Wang et al. (2009) revisaram métodos de análise de decisão multicritério (MCDA) em diferentes estágios de utilização de decisões multicritério relacionadas à energia sustentável, incluindo a seleção de critérios, ponderação, avaliação e agregação final. Com base nessas quatro dimensões, Stein (2013) (STEIN, 2013) realizou uma ampla revisão dos estudos utilizando análise de decisão multicritério para avaliar as opções de geração de energia elétrica, a partir das quais foram estabelecidos os critérios mais adequados para cada situação.

Com base nas dimensões referidas acima, o modelo proposto neste trabalho compreende um conjunto de treze critérios relacionados (Tabelas 4 e 5). Modelos baseados em grupos similares de critérios podem ser encontrados em (HADDAH, ABDELKRIM e FERREIRA, 2017) e (BECCALI, CELLURA e MISTRETTA, 2003) e (RAHMAN, PAATERO, *et al.*, 2016).

Os critérios da Tabela 4 são considerados inteligíveis e mensuráveis (KEENEY RL, 1976), o que significa que não há ambiguidade na descrição das consequências, seja em termos de critérios ou na interpretação de tais consequências (KEENEY, 1992), e o(s)

decisor(es) pode expressar suas preferências com respeito a diferentes níveis de consequência para um critério.

Tabela 4. Dimensões e objetivos a serem alcançados.

DIMENSÃO	REFRENTE À	OBJETIVO
Financeira	Custos relacionados ao investimento na tecnologia de geração de energia elétrica	Minimizar custos
Técnica	Aspectos técnicos da tecnologia que influenciam a geração de energia elétrica	Maximizar o desempenho operacional e a eficiência do processo de produção
Ambiental	Impacto da tecnologia no meio ambiente e na saúde humana	Minimizar os impactos negativos sobre o meio ambiente e no bem estar da população
Socioeconômica	Impacto socioeconômico causado pela implementação de uma tecnologia	Maximizar os efeitos socioeconômicos

A partir da dimensão financeira, os critérios Custo do Investimento, O & M Variável, O & M Fixo e Custo do Combustível foram estabelecidos para representar o objetivo de minimizar os custos. Por outro lado, do ponto de vista da dimensão técnica, os objetivos levaram a três critérios relacionados ao desempenho operacional e a eficiência do processo de produção de energia: Eficiência de Geração, Fator de Capacidade e Controlabilidade da fonte de energia, que considera a possibilidade de controlar a disponibilidade da fonte de energia bem como o seu armazenamento. Tal critério é definido de tal forma que separa as tecnologias em duas classes: tecnologias com entrada imprevisível, dado o fenômeno natural em que se baseiam; e aqueles cuja entrada pode ser definida a priori. Assim, é considerado um critério binário no problema.

Para a dimensão ambiental foi considerado o critério Custo das Externalidades, que diz respeito aos impactos ambientais em populações humanas e sistemas naturais causados por uma intervenção tecnológica para a geração de energia elétrica. Estes incluem impactos ambientais em vários níveis, tais como: emissão de poluentes atmosféricos locais (SO₂, CO₂ e NO_x), saúde humana, impacto nas plantações e em ecossistemas naturais, bem como considerações menos concretas, incluindo impactos na recreação, conforto, estética e contribuições para o bem-estar social. Esses impactos são refletidos em custos ocultos que não são considerados pelos produtores e consumidores de energia.

Quanto a dimensão socioeconômica, os critérios de Custo Externo, Empregos na Fase de Construção e Instalação, Empregos na Fase de Fabricação e Empregos durante a Operação e Manutenção foram definidos para representar os objetivos de minimizar impactos negativos sobre o meio ambiente e a vida das pessoas e maximizar o impacto socioeconômico causado por uma tecnologia de geração de energia. Para avaliar cada tecnologia com relação a como ela contribui para maximizar o retorno financeiro e levar em conta a depreciação, dois critérios temporais foram adicionados: Vida útil e Disponibilidade Temporária.

Tabela 5 Conjunto de critérios.

Dimensão	Critério	Notação	Definição	Unidade
Financeira	Custo do Investimento	C1	Considera os custos relacionados à construção e instalação de uma planta de geração de energia elétrica	US\$/kW
	Custo variável de O&M	C2	Considera os custos variáveis relacionados à operação e manutenção de uma planta de geração de energia elétrica	US\$/kW
	Custo fixo de O&M	C3	Considera os custos fixos relacionados à operação e manutenção da planta de geração de energia elétrica	US\$/kW
	Custo do Combustível	C4	Custo do combustível necessário para gerar eletricidade	US\$/kW
Técnica	Eficiência de geração	C5	Considera a capacidade de conversão de cada tecnologia de geração de energia, ou seja, estabelece a relação entre a eletricidade gerada pela usina e a energia fornecida pela fonte.	%
	Fator de capacidade	C6	Considera o período de tempo em que a planta está ativa, gerando eletricidade. Condições naturais que ocorrem nos locais onde as usinas estão localizadas e paradas programadas para reparos e manutenção devem ser consideradas.	%
	Controlabilidade	C7	Considera a possibilidade de controlar a disponibilidade da fonte de energia bem como o seu armazenamento. É tratado como um critério binário, no qual o valor zero corresponde a uma tecnologia não controlável e outra a uma tecnologia controlável.	-

Dimensão	Critério	Notação	Definição	Unidade
Ambiental	Custo das Externalidades	C8	Considera os impactos ambientais em populações humanas e sistemas naturais causados por uma usina de geração de energia.	€/KWh
Socioeconômica	Vida útil	C9	Tempo de vida em operação dos dispositivos principais da planta de geração de energia	Anos
	Disponibilidade Temporária	C10	Estimativa das reservas da fonte de energia, em anos, até sua completa exaustão.	Ano
	Emprego na fase de manufatura	C11	Considera os trabalhos gerados durante a fabricação de dispositivos e equipamentos da usina de geração de energia	Empregos/ano/ MW
	Emprego na fase de construção e instalação	C12	Considera os trabalhos gerados ao construir a infra-estrutura e instalar os dispositivos e equipamentos da usina de geração de energia elétrica	Empregos/ano/ MW
	Emprego durante operação e manutenção	C13	Considera os trabalhos gerados ao operar e manter os dispositivos e equipamentos da usina de geração de energia elétrica	Empregos/ano/ MW

Embora este conjunto esteja sujeito a variações, dependendo do contexto específico em estudo, pode ser assumido como geral para avaliar as tecnologias de geração de energia elétrica.

4.1.3 Definição dos Parâmetros

Para este estudo de caso, os valores de referência ou parâmetros dos critérios detalhados na Tabela 5 foram estabelecidos com base na literatura e nas recomendações publicadas dos órgãos competentes. Esses parâmetros são cruciais para o modelo, pois representam a consequência obtida, para cada alternativa, considerando um problema determinístico. A Tabela 6 mostra a lista de fontes de dados pesquisadas para obter os valores de referência usados para realizar a avaliação.

Tabela 6 Critérios e fontes de dados.

DIMENSÃO	CRITÉRIO	FONTE
Financeira	Custo do investimento	[(ELIKINGTON, 1997), (TOLMASQUIM, 2016 R), (TOLMASQUIM, 2016 NR)]
	Custo variável de O&M	
	Custo fixo de O&M	
	Custo do combustível	
Tecnica	Eficiência de Geração	[(TOLMASQUIM, 2016 R), (TOLMASQUIM, 2016 NR), (EVANS, 2010), (TIDBALL, 2010)]
	Fator de Capacidade	
	Controlabilidade	-
Ambiental	Custo das Externalidades	[(RAFAJ e KYPREOS, 2007), (EXTERNE, 2005)]
Socio-economica	Vida Útil	[(TOLMASQUIM, 2016 NR) ³⁷ , (WEI, 2010)]
	Disponibilidade Temporária	[(TOLMASQUIM, 2016 NR), (ANP.GOV, 2017), (MME, 2017)]
	Empregos na fase de manufatura, na fase de construção e instalação e durante a operação e manutenção	[(GREENPEACE, 2013)]

4.1.4 Espaço de ações

O espaço de ações, ou seja, o conjunto de alternativas viáveis, consiste em oito tecnologias de geração elétrica que compõem a matriz elétrica brasileira (TOLMASQUIM, 2016 R) e (TOLMASQUIM, 2016 NR), incluindo fontes renováveis e não renováveis: eólica, solar, hidrelétrica, biomassa, nuclear, petróleo, carvão e gás natural. Cada um deles é avaliado de acordo com o conjunto de 13 critérios (ver Tabela 5), que dá origem à Tabela 7. Os valores das consequências mostrados na Tabela 7 baseiam-se em bancos de dados governamentais e acadêmicos confiáveis (as fontes de dados estão disponíveis na Tabela 6).

Na Tabela 7, vale a pena notar que, para o critério C10, embora o intervalo de valores de consequência seja grande (de 14,8 a 2×10^9 anos), uma função de valor marginal linear é assumida, de modo que as preferências aumentam monotonamente de acordo com aumentos nos valores de consequência.

Tabela 7 Matriz de Consequências.

Tecnologias de Geração de Energia Elétrica	Critérios												
	C1 (US\$/kW)	C2 (US\$/MWh)	C3 (US\$/kW-year)	C4 (US\$/MMBTU)	C5 (%)	C6 (%)	C7	C8 (€/KWh)	C9 (Anos)	C10 (Anos)	C11 (Emprego/Ano/MW)	C12 (Emprego/Ano/MW)	C13 (Emprego/Ano/MW)
Eólica	1,060.00	0.00	21.94	0.00	35	43	0	0.13	20	2x10 ⁹	7.7	3.3	0.6
Solar	1,610.00	0.00	19.00	0.00	22	24	0	0.39	25	2x10 ⁹	10.9	6.9	0.3
Hidrelétrica	2,636.42	1.80	13.00	0.00	90	55	0	0.13	50	2x10 ⁹	6.0	1.5	0.6
Biomassa	1,169.50	6.94	14.00	30.71	40	60	1	0.59	20	5,000	14.0	2.9	1.5
Nuclear	6,100.00	15.00	98.11	7.86	33	85	1	0.68	60	260	19.6	1.3	1.1
Petróleo	554.00	3.42	10.76	136.48	38	80	1	4.69	25	31	1.7	1	0.1
Carvão	3,500.00	6.95	68.49	10.00	33	66	1	12.72	40	200	7.7	3.5	0.1
Gás Natural	800.00	12.90	7.19	0.00	35	30	1	2.04	30	14.8	1.7	1	0.1

4.1.5 Perfis de decisão e aplicação do FITradeoff

Existem vários grupos de pressão que buscam se envolver na escolha e implementação de tecnologias de energia elétrica, cada um com sua própria perspectiva e estrutura de valores em relação à geração de energia. Uma empresa de serviços públicos, por exemplo, enfatiza aspectos técnicos e financeiros, como desempenho da fábrica e retorno do capital. A comunidade, por outro lado, valoriza os impactos sociais, econômicos e ambientais. Portanto, o que é preferido por um grupo pode não ser por outro (STEIN, 2013).

A fim de obter uma visão melhor sobre a solução mais adequada a partir de diferentes perspectivas, quatro perfis hipotéticos de decisão, correspondentes a quatro diferentes grupos de pressão, normalmente envolvidos nas questões energéticas (STEIN, 2013), foram definidos, a saber: produção de energia, retorno sobre o investimento, impacto ambiental e criação de empregos. Para cada perfil de decisão, o processo de levantamento do FITradeoff foi realizado com base em dados da matriz de consequências (Tabela 7), os quais simularam os interesses específicos de diferentes grupos de pressão em relação ao problema.

Então, para cada perfil de decisão, uma estrutura diferente de preferências foi assumida ao ranquear, hipoteticamente, os pesos dos critérios e expressar as preferências. Isso levou a resultados diferentes. Para a condição hipotética do(s) decisor(es), para cada grupo, foi respeitada uma lógica natural para cada ranqueamento estabelecido, baseada nas prioridades comuns a cada grupo de interesse, o que levou a uma maior proximidade com uma condição real.

Nos itens a seguir é comentado apenas a aplicação do método FITradeoff, para cada perfil de decisão, cujos resultados serão melhor discutidos no item 5.7.

4.1.5.1 Perfil de decisão A: Produção de energia

Nesse perfil de decisão, o(s) decisor(es) estão preocupados, principalmente, com o desempenho operacional da usina de geração de energia elétrica. Assim, o foco está na dimensão técnica, representada pelos critérios de Eficiência de Geração, Fator de Capacidade e Controlabilidade de Entrada. As dimensões ambiental, socioeconômica e financeira foram consideradas em patamares diferentes de prioridade em que o grau de importância está relacionado com a ordem do ranqueamento. O ordenamento dos pesos dos critérios foi obtido considerando tanto o espaço de consequências para cada critério quanto à priorização adotada para as dimensões. O ranqueamento final é mostrado em (1), onde w_j corresponde ao peso de um critério C_j da Tabela 7.

$$w_5 > w_6 > w_7 > w_8 > w_9 > w_{10} > w_{11} > w_{12} > w_{13} > w_4 > w_3 > w_2 > w_1 \quad (1)$$

Inicialmente, o ordenamento dos critérios (1) levou a um espaço de pesos em que não havia vetores de pesos que tornassem as tecnologias eólica, solar, carvão mineral ou gás natural uma alternativa potencialmente ótima, ou seja, tecnologias que pudessem se tornar a solução para o problema. Assim, o conjunto inicial de alternativas viáveis foi reduzido para {Hidrelétrica, Biomassa, Nuclear, Petróleo}. A fim de reduzir ainda mais este subconjunto, o FITradeoff realizou um processo de elicitação, durante o qual o(s) decisor(es) responderam a três questões relativas às suas preferências entre as alternativas hipotéticas h_1 e h_2 (ver Tabela 8).

Explicitando, após o ranqueamento o FITradeoff SAD apresenta ao(s) decisor(es) o vetor de consequência x^{h_1} com um valor referente ao primeiro critério entre o pior e o melhor, entre os parâmetros estabelecidos, para aquele critério (no caso, o valor 56 % – eficiência de geração), e o pior valor para os demais critérios. Para x^{h_2} é apresentado o melhor valor da consequência para o último critério ranqueado (no caso, o valor US\$ 554/kW – custo do investimento) e o pior valor para os demais.

Após escolher a consequência x^{h_1} é apresentado ao(s) decisor(es) uma nova comparação, para a escolha, agora entre o mesmo valor anterior, para o primeiro critério e o

pior para os demais e o melhor valor para o segundo critério ordenado no ranqueamento (no caso 85 % – capacidade de geração)

Mais uma vez o(s) decisor(es) escolhem o vetor de consequência x^{h_1} , e lhes é apresentado a comparação entre as consequências do valor intermediário entre o pior e o melhor, entre os parâmetros estabelecidos, agora para o segundo critério ranqueado (no caso 22% – capacidade de geração) e o melhor valor para o terceiro critério (no caso, 1 – controlabilidade).

O processo continuaria de modo similar, porem, após a terceira pergunta ao(s) decisor(es), o subconjunto de alternativas potencialmente ótimas é reduzido e a tecnologia hidrelétrica (PCH) resulta como solução para o perfil de decisão produção de energia.

Tabela 8 Processo de elicitación do FITradeoff para o perfil de decisão A.

Nº de questões	Vetores de consequências (alternativas hipotéticas h_1 e h_2)		Vetor de consequência preferido	Subconjunto de alternativas potencialmente ótimas depois da resposta à pergunta
	$x^{h_1} = (x_5^{h_1}, x_6^{h_1}, \dots, x_2^{h_1}, x_1^{h_1})$	$x^{h_2} = (x_5^{h_2}, x_6^{h_2}, \dots, x_2^{h_2}, x_1^{h_2})$		
1	(56, 24, 0, 12.72, 20, 14.8, 1.7, 1, 0.1, 136.48, 98.11, 15, 6100)	(22, 24, 0, 12.72, 20, 14.8, 1.7, 1, 0.1, 136.48, 98.11, 15, 554)	x^{h_1}	{Hidrelétrica, Biomassa, Nuclear, Petróleo}
2	(56, 24, 0, 12.72, 20, 14.8, 1.7, 1, 0.1, 136.48, 98.11, 15, 6100)	(22, 85 , 0, 12.72, 20, 14.8, 1.7, 1, 0.1, 136.48, 98.11, 15, 6100)	x^{h_1}	{Hidrelétrica, Biomassa, Nuclear}
3	(22, 54.5, 0, 12.72, 20, 14.8, 1.7, 1, 0.1, 136.48, 98.11, 15, 6100)	(22, 24, 1 , 12.72, 20, 14.8, 1.7, 1, 0.1, 136.48, 98.11, 15, 6100)	x^{h_1}	{Hidrelétrica}

4.1.5.2 Perfil de decisão B: Retorno do investimento

Neste perfil de decisão, as tecnologias de energia elétrica são avaliadas a partir de uma perspectiva financeiramente orientada. O(s) decisor(es) no perfil de decisão B priorizaria(m) o desempenho financeiro da usina, que é avaliado de acordo com os critérios de Custo de Investimento, Custo de O&M Variável, Custo de O&M Fixo e Custo do Combustível, ou seja, o subconjunto de critérios representando a dimensão financeira. A classificação dos pesos dos critérios mostrados em (2) foi considerada ao aplicar o método FITradeoff.

$$w_1 > w_4 > w_3 > w_2 > w_5 > w_6 > w_7 > w_8 > w_9 > w_{10} > w_{11} > w_{12} > w_{13} \quad (2)$$

Após este ranqueamento, apenas as alternativas Hidroelétrica, Biomassa e Petróleo foram potencialmente ótimas. Depois de quatro perguntas, a hidreletricidade não era mais considerada uma alternativa concorrente, ou seja, já não fazia parte do conjunto de alternativas potenciais para a escolha e a solução possível era vista como Biomassa ou Petróleo. Mais cinco perguntas foram respondidas, o que levou à recomendação do Petróleo. Assim, para o perfil de decisão B, a solução foi encontrada após nove perguntas terem sido respondidas.

4.1.5.3 Perfil de decisão C: Impacto ambiental

O meio ambiente é a principal preocupação do(s) decisor(es) no perfil de decisão C, onde formas de energia limpas, renováveis e não poluentes são buscadas. O ordenamento (*ranking*) dos pesos dos critérios é apresentado em (3), onde a dimensão ambiental foi priorizada, precedida pelas dimensões socioeconômica, técnica e financeira.

$$w_8 > w_{11} > w_{12} > w_{13} > w_9 > w_{10} > w_5 > w_6 > w_7 > w_2 > w_3 > w_4 > w_1 \quad (3)$$

O conjunto inicial de alternativas potencialmente ótimas foi {Eólica, Solar, Hidrelétrica, Biomassa, Nuclear} e, depois de 20 perguntas terem sido respondidas, as alternativas Eólica e Hidrelétrica mostraram-se soluções equivalentes para o problema no perfil de decisão C.

4.1.5.4 Perfil de decisão D: Impacto socioeconômico

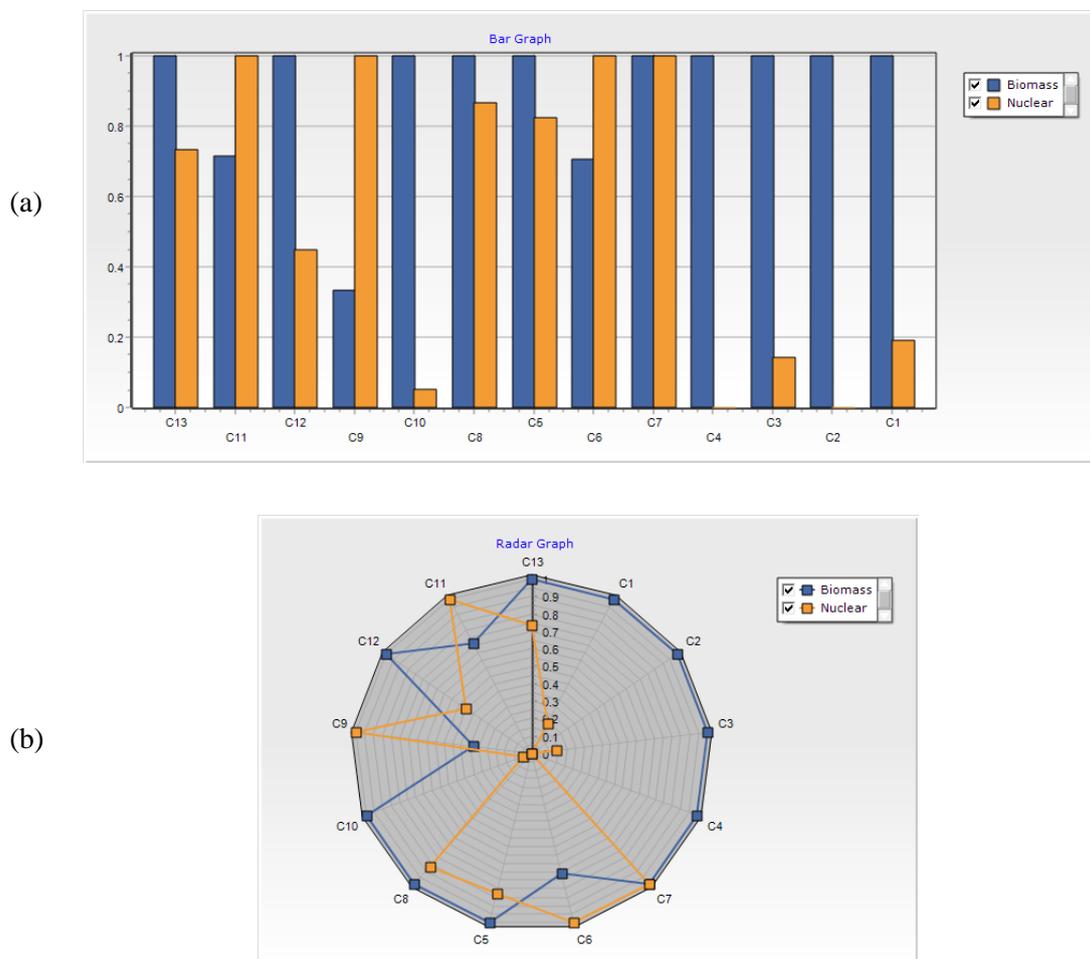
Esse perfil de decisão simula os interesses do(s) decisor(es) que está(ão) preocupado(s) com o impacto socioeconômico, político e os empregos criados pela instalação de uma usina de energia. Essa abordagem enfatiza os critérios relacionados à dimensão socioeconômica, ou seja, Vida útil, Disponibilidade Temporária, Empregos na Fase de Construção e Instalação, Empregos na Fase de Fabricação e Empregos durante a Operação e Manutenção. A classificação final obtida para os pesos dos critérios é mostrada em (4).

$$w_{13} > w_{11} > w_{12} > w_9 > w_{10} > w_8 > w_5 > w_6 > w_7 > w_4 > w_3 > w_2 > w_1 \quad (4)$$

De acordo com as informações obtidas no ranqueamento inicial, as alternativas de Eólica, Petróleo, Carvão e Gás Natural foram descartadas, uma vez que apenas as alternativas Solar, Hidrelétrica, Biomassa e Nuclear eram potencialmente ótimas naquele momento. Após a quinta pergunta ter sido respondida, o subconjunto de alternativas potencialmente ótimas foi reduzido para {Biomassa, Nuclear}. A Figura 33 mostra os resultados obtidos por meio do FITradeoff nesta etapa do processo, o que permite a comparação dos desempenhos das alternativas restantes em cada critério. As Figuras 33 (a) e 33 (b) mostram duas visualizações gráficas diferentes fornecidas por meio do FITradeoff DSS. Ambos apresentam o desempenho das duas alternativas restantes nos critérios. Visualizar os resultados atuais para cada espaço de pesos pode ser útil para ajudar o(s) decisor(es) a obter(em) informações sobre o problema e chegar a uma solução mais rapidamente.

Depois de mais oito perguntas, a Nuclear não era mais uma alternativa concorrente, e a recomendação encontrada foi a Biomassa.

Figura 33 Resultados apresentados por meio do FITradeoff após 5 perguntas respondidas no processo de elicitação do perfil de decisão D: (a) Gráfico de barras e (b) Gráfico radar.



4.1.6 Recomendações e análise de sensibilidade

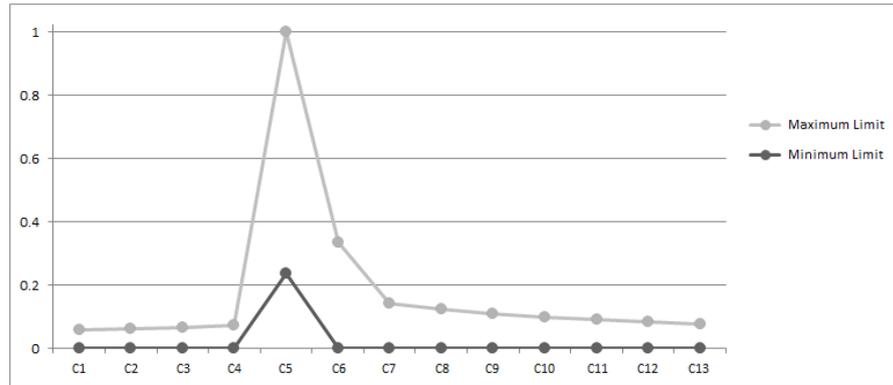
A Tabela 9 resume os resultados encontrados pelo FITradeoff para cada perfil de decisão. Para cada solução, existe um subespaço associado de pesos em que cada peso de critério é limitado por um valor mínimo e máximo. Esse espaço de pesos foi reduzido à medida que mais informações, na forma de declarações de preferência, foram obtidas. A coluna “Número de Perguntas”, na Tabela 9, mostra quantas perguntas foram respondidas, ou seja, quantas declarações de preferência foram dadas, a fim de alcançar as soluções na terceira coluna. A Figura 34 mostra os intervalos de valores viáveis para cada ponderação de critério para cada perfil de decisão.

Tabela 9 Resultados encontrados pelo FITradeoff para cada perfil de decisão.

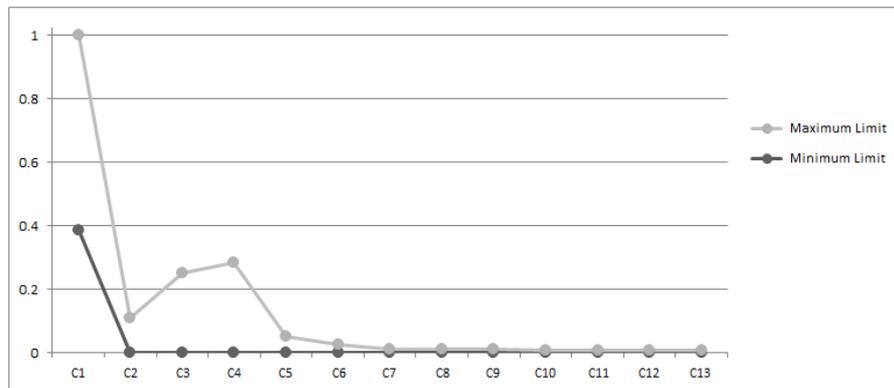
Perfil de Decisão	Número de perguntas respondidas	Recomendação
A	3	Hidrelétrica
B	9	Petróleo
C	20	Eólica e Hidrelétrica
D	13	Biomassa

O espaço de pesos delimitado pelas restrições do modelo não é o correspondente ao de uma alternativa, mas o atual do problema, considerando as respostas fornecidas pelo decisor até o momento. Dependendo, pode haver mais de uma alternativa dentro deste espaço de pesos e uma alternativa dentro deste espaço, pode ser eleita também por um vetor de pesos fora do espaço atual.

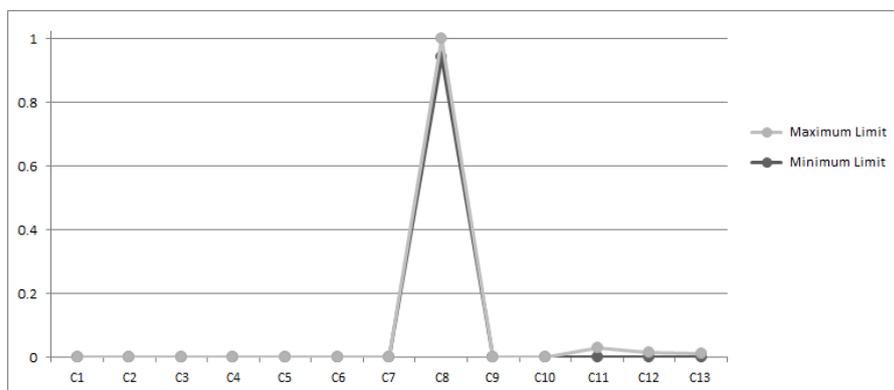
Figura 34 Intervalos de valores dos pesos viáveis para o espaço de pesos quando a solução foi encontrada para cada perfil de decisão: (a) A; (b) B; (c) C; d) D



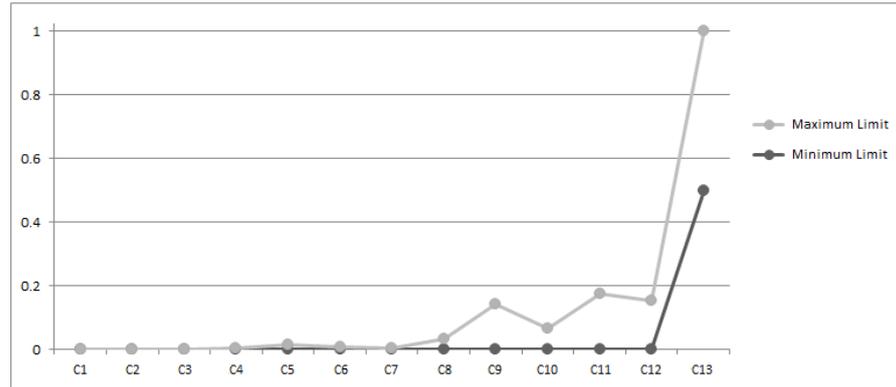
(a)



(b)



(c)



(d)

Ao comparar a Tabela 9 e a Figura 34, verifica-se que há uma relação entre o número de perguntas respondidas para encontrar uma solução para cada perfil de decisão e os intervalos de valores viáveis para os pesos dos critérios. Como as perguntas são respondidas no processo de eliciação flexível do FITradeoff, os limites mínimo e máximo para cada peso de critério são alterados de tal forma que o espaço de pesos é reduzido.

Foi realizada uma análise de sensibilidade para verificar a robustez dos resultados encontrados para cada perfil de decisão, quando os valores de desempenho das alternativas de geração elétrica nos critérios são ligeiramente alterados. Isso foi feito variando os valores dos parâmetros de cada critérios em $\pm 10\%$ dentro dos limites do espaço de consequência original, para cada critério, mantendo os intervalos dos valores de pesos viáveis apresentados na Figura 33. Para cada perfil de decisão, a solução foi simulada 100.000 vezes. A Tabela 10 mostra os resultados, onde cada célula corresponde à percentagem de ocasiões em que uma tecnologia foi encontrada nas soluções simuladas.

Tabela 10 Resultados da Análise de Sensibilidade

Perfil de Decisão	Solução Original	% da tecnologia de geração de energia elétrica na solução simulada							
		Eólica	Solar	Hidrelétrica	Biomassa	Nuclear	Petróleo	Carvão	Gás Natural
A	{Hidrelétrica}	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%
B	{Petróleo}	0%	0%	0%	10.11%	0%	100%	0%	0%
C	{Eólica, Hidrelétrica}	100%	0.001%	50.19%	0%	0%	0%	0%	0%
D	{Biomassa}	0%	0%	0%	100%	32.89%	0%	0%	0%

Na Tabela 10, para alguns perfis de decisão, como o perfil A, a tecnologia recomendada por meio do FITradeoff permanece inalterada em todos os casos simulados. Assim, para este perfil de decisão, a solução mostrou-se robusta, uma vez que a Hidrelétrica permaneceu como a única solução em 100% dos casos simulados, e não havia outras soluções equivalentes competindo com ela. Para outros perfis, como o B, a tecnologia original permanece em todos os casos simulados, mas a solução também inclui uma tecnologia adicional para alguns dos casos, no caso a Biomassa em 10,11% dos casos. Para o perfil de decisão C, a solução original consistia em duas opções equivalentes: Eólica e Hidrelétrica. A alternativa do vento mostrou-se robusta, uma vez que permaneceu como solução em 100% dos casos. Por outro lado, a energia hidrelétrica permaneceu na solução em apenas 50,19% dos casos. Para este perfil de decisão, a alternativa de Solar também foi incluída na solução em 0,001% dos casos simulados. Para o perfil de decisão D, a alternativa de Biomassa esteve presente em 100% dos casos nas soluções simuladas, mas a análise de sensibilidade mostrou que a alternativa da energia Nuclear foi considerada uma solução equivalente em 32,89% dos casos.

4.1.7 Discussão dos resultados

Com a aplicação do modelo MCDM/A proposto, foi utilizado o método FITradeoff para avaliar oito tecnologias de geração elétrica, sob quatro perfis de decisão, que simulam os interesses específicos de diferentes grupos de pressão, assumindo que cada um deles possui estruturas de preferência diferentes.

Para o perfil de decisão A, o foco estava na produção de energia e no desempenho operacional das opções de geração elétrica, e, sob a estrutura de preferência o(s) decisor(es) com essa perspectiva, o FITradeoff recomendou a energia hidrelétrica. Atualmente, é a fonte de eletricidade predominante no Brasil, devido ao país ter imensos recursos hídricos aliados às ações e estratégias adotadas ao longo da história do setor energético brasileiro. O resultado obtido para este perfil de decisão mostrou-se robusto de acordo com a análise de sensibilidade e é consistente com a atual matriz elétrica brasileira, na qual a energia hidrelétrica representa cerca de 64% da produção de eletricidade (SPANGENBERG e BONNIOT, 1998).

Sob a perspectiva financeiramente orientada do perfil de decisão B, o Petróleo foi recomendado como solução por meio do FITradeoff. A análise de sensibilidade mostrou que a alternativa Biomassa foi considerada como uma solução equivalente em 10,11% dos casos,

variando levemente os valores de desempenho das alternativas nos critérios. Isso enfatiza o potencial da Biomassa - uma fonte de energia limpa, sustentável e potencialmente atraente economicamente - em alcançar os objetivos de planejamento da matriz elétrica brasileira. Essa fonte de fato teve participação crescente no contexto brasileiro, devido à expansão do setor de etanol e açúcar estabelecido no país, que, além disso, agrega valor às cadeias produtivas rurais (AQUILA, PAMPLONA, *et al.*, 2016).

Quando o foco foi voltado para minimizar o impacto ambiental, causado pela geração de eletricidade, duas alternativas, a eólica e a hidroelétrica, foram recomendadas por meio do FITradeoff. Ambas as alternativas se encaixam na tendência global de mudar o uso de combustíveis fósseis para opções que não emitem gases de efeito estufa e ajudam a mitigar as mudanças climáticas; no entanto, a análise de sensibilidade mostrou que a energia eólica é, comparativamente, a solução mais robusta. As usinas eólicas, apesar de possuírem um perfil de oferta variável, desempenham um papel importante na segurança operacional do Sistema Interligado Nacional (SIN) - o sistema brasileiro de produção e transmissão de energia elétrica - e podem ser utilizadas, juntamente com a fonte hidrelétrica, de forma complementar.

Para o último perfil de decisão considerado, as vantagens socioeconômicas resultantes do investimento em tecnologia de geração elétrica foram priorizadas. Nas condições consideradas, a solução encontrada por meio do FITradeoff foi a biomassa. Isso pode ser explicado na prática pelo fato dessa opção gerar empregos e renda em toda a cadeia produtiva. Tais empregos promovem um ciclo virtuoso de crescentes níveis de consumo e qualidade de vida, inclusão social, gerando mais atividades econômicas, fortalecendo a indústria local, promovendo o desenvolvimento regional e impedindo o êxodo rural. A solução encontrada é robusta de acordo com a análise de sensibilidade, mas a alternativa de Nuclear provou ser uma solução equivalente para algumas situações, indicando que o(s) decisor(es) no perfil de decisão D poderiam dar mais atenção a esta opção no planejamento da matriz elétrica brasileira.

4.2. ESTUDO DE CASO 2 – GREED NO ÂMBITO DA REN ANEEL N°482

Para este estudo de caso como representante de uma aplicação referente à GREED, no Âmbito da REN ANEEL n° 482 (ANNEEL, 2012), foi considerada uma região rural do Estado de São Paulo (região sudeste do Brasil), escolhida em função da disponibilidade dos dados

sobre às tecnologias de geração a serem analisadas. Esta opção fica próxima ao município de Santa Rita de Passo Quatro.

O procedimento desenvolvido por de Almeida (2013), referenciado no item 4.8.1, foi aplicado neste caso para modelar o problema da seleção/avaliação de tecnologias de geração elétrica para diferentes cenários. Na primeira fase foi acrescentada uma etapa que diz respeito ao contexto do problema. As etapas foram sequenciadas de acordo com o contexto de decisão e a geração de informações durante todo o processo. Segue, então, a fase preliminar,

4.2.1 Análise de contexto

O antropocentrismo e o cálculo econômicos, assim tomados, como uma consequência macroeconômica, ou como um resultado social global, levam ideologicamente à fetichização ou culto da taxa de crescimento econômico, tomando-a pelo que efetivamente não é. Busca-se o maior crescimento possível da produção - medida pelo Produto Interno Bruto, isto é, o valor das quantidades produzidas na unidade de tempo - mesmo que para isto tenha que dilapidar a natureza a ponto de comprometer o processo de reprodução para as gerações futuras (MONTIBELLER, 1993). O crescimento da produção, ou do valor da produção, é associado a crescimento econômico, que por sua vez é identificado com o desenvolvimento econômico. As políticas de desenvolvimento reduzem-se a meras ações que visam o crescimento da economia, portanto relacionadas à acumulação líquida de capital (novos investimentos) e/ou ao progresso técnico (SACHS, 2002).

Para os países do terceiro mundo o conteúdo desse reducionismo economicista do desenvolvimento é especialmente grave do ponto de vista do resultado social, pois o mimetismo tecnológico e dos padrões de consumo, copiando os processos produtivos e as técnicas assim como o modo de vida vigente no primeiro mundo, dirigem o crescimento econômico. Isto é, o grosso da produção, para as classes médias e altas, desconsiderando as condições de vida dos "não-possuidores", ou sejam, trabalhadores, integrantes ou alijados do mercado.

Este trabalho procurou se basear numa posição ética fundamental: o desenvolvimento voltado para as necessidades sociais mais abrangentes, que dizem respeito à melhoria da qualidade de vida da maior parte da população, e o cuidado com as pessoas e com a preservação ambiental como uma responsabilidade para com as gerações que sucederão. Para lidar com essa preocupação foi considerado o conceito de sustentabilidade de Sachs (2002). A tabela 4 resume as dimensões e os objetivos a elas relacionados.

Para o caso brasileiro, a REN ANEEL 687 da ANNEEL (2015) estabelece as condições gerais para acesso de microgeração e minigeração distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica, já explicitado no item 4.3.2.

4.2.2 Zona de aplicação

A definição da zona de instalação de um sistema GREED, se urbana ou rural, é fundamental para o desenvolvimento do modelo de tomada de decisão, desde que, implica em condições completamente distintas, para cada tecnologia de geração, no que se refere às possíveis limitações para a sua implantação, tais como: dificuldade de localização, maior risco de acidentes, fonte de energia comprometida ou inexistente, entre outras.

Em princípio, as instalações em zonas urbanas trazem maior número de complicadores do que aquelas em zonas rurais, muitas vezes inviabilizando o uso de algumas tecnologias. Portanto, a definição da zona de instalação precede qualquer iniciativa de escolha da tecnologia de geração deve ser considerada como condição inicial de entrada do modelo de decisão.

Neste trabalho, devido à possibilidade de apresentar, na maioria das situações, condições de abrigar todas as tecnologias de geração de energia elétrica envolvidas na REN ANEEL nº 687 (2015), a ênfase maior foi dada as aplicações na zona rural.

Um estudo dos objetivos ou critérios de tomada de decisão utilizados no planejamento de energia para ambientes rurais e remotos com fontes de energia descentralizadas revela que o critério econômico é o mais amplamente adotado (100% de todos os trabalhos analisados) até a década de 1990 (ROJAS e YUSTA, 2014). No entanto, tanto na década de 1990 como durante o período seguinte, o critério econômico é combinado com outros, predominantemente critérios técnicos. Atualmente, os autores incluíram outros critérios de interesse (por exemplo, ambiental e social) que se tornaram ainda mais relevantes do que o critério técnico, embora o critério econômico tenha permanecido um aspecto importante durante o processo de tomada de decisão e planejamento. Estes resultados revelam uma clara mudança de paradigma na tomada de decisões após a década de 1990. Durante esta década, o critério econômico não era mais o centro do processo de tomada de decisão, mas começou a ser combinado com outros critérios. Este aspecto causou a evolução da análise de decisão de um único critério para múltiplos critérios. Portanto, essa mudança de paradigma reflete o interesse global no meio ambiente e nos aspectos sociais inerentes da energia. É com base

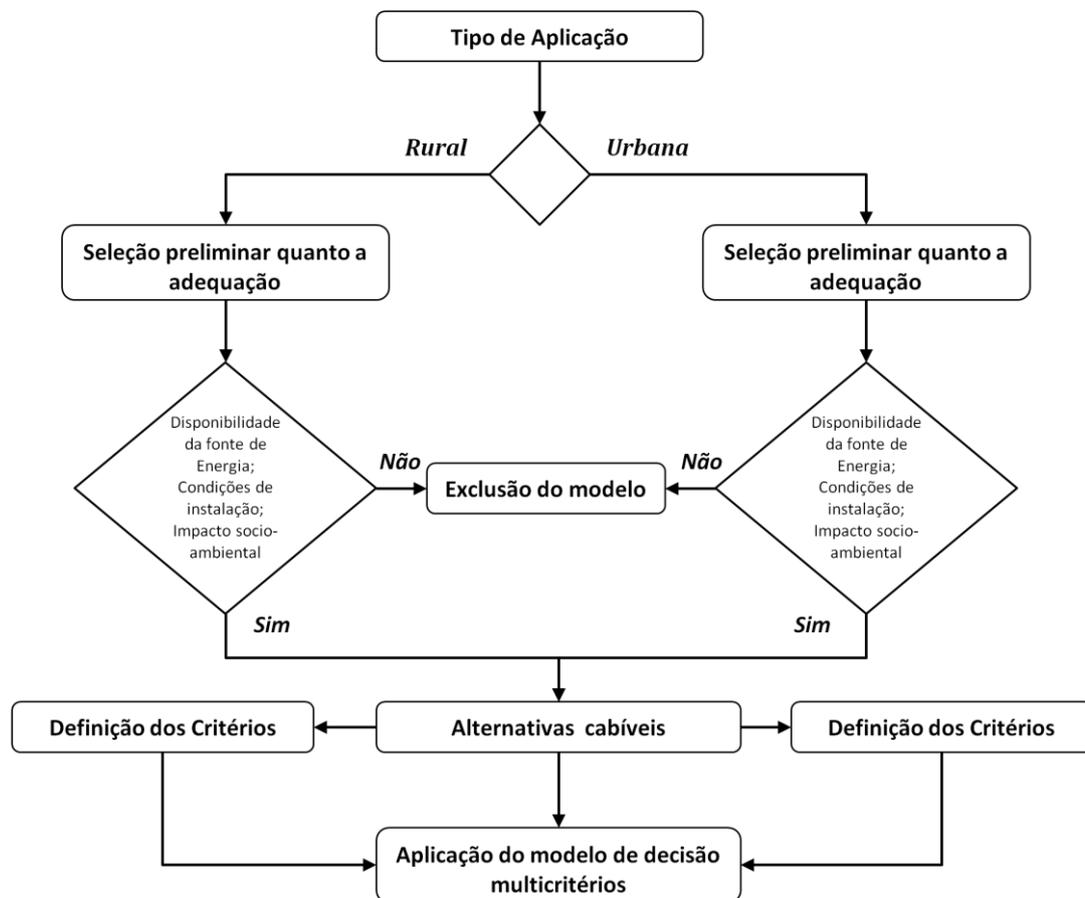
neste novo paradigma e com foco na aplicação rural que os critérios, neste trabalho, foram estabelecidos.

Em função de suas características intrínsecas e impactos ambientais, a decisão sobre a escolha da tecnologia para implementação de uma usina de geração de energia elétrica, no âmbito da REN ANEEL nº 687 (2015), deve passar por um filtro inicial que diz respeito à localização da instalação, se urbana ou rural. Embora essa avaliação venha sendo feita de modo intuitivo ela não foi incorporada, até o momento, formalmente, nos estudos realizados nesta área. A Figura 35 apresenta a uma estrutura referente à seleção inicial das alternativas estabelecidas na REN ANEEL nº 687 (2015) de acordo com o tipo de aplicação: rural ou urbana.

Essa decisão inicial norteia a estrutura do modelo desde que influi, diretamente, na definição das alternativas tecnológicas cabíveis e, também, nos critérios que irão impactar no desempenho de cada alternativa quanto às suas consequências.

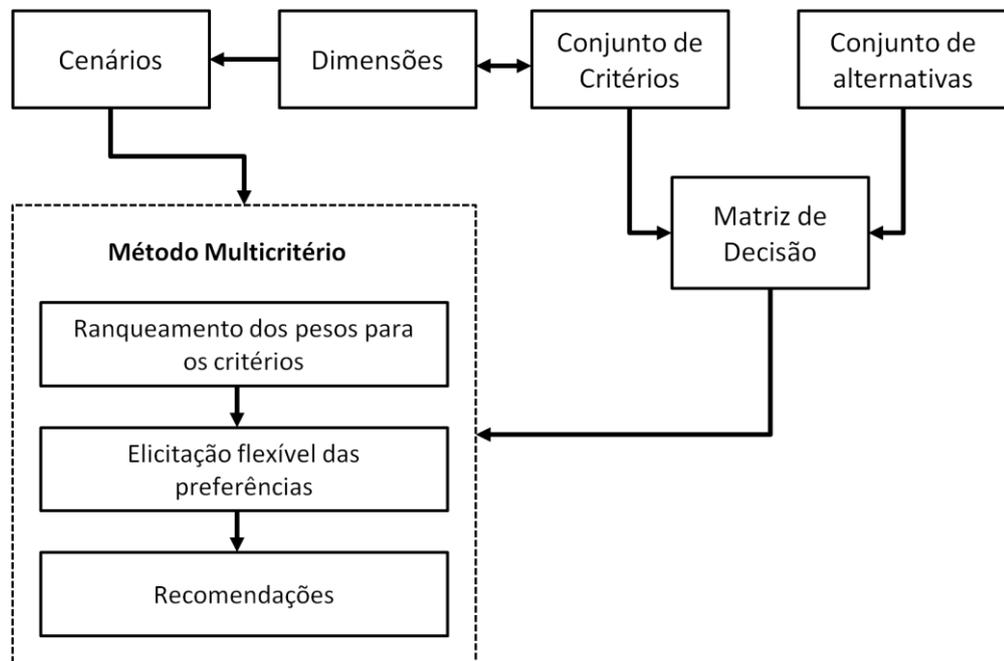
Portanto, quando da aplicação do modelo de decisão multicritérios já foram excluídas aquelas alternativas previamente dominadas devido à inadequação de sua utilização. Dependendo de cada situação é possível que o modelo seja bastante simplificado e diminuído o tempo utilizado para a sua modelagem e estruturação.

Figura 35 Modelo para a seleção inicial das alternativas tecnológicas de geração de energia elétrica, no âmbito da REN ANEEL nº 687



A Figura 36 apresenta um esquema conciso do modelo desenvolvido para a seleção de uma tecnologia de geração elétrica, que é dividido em: estabelecimento dos conjuntos de critérios e alternativas viáveis e aplicação do método multicritério, de acordo com cada cenário de avaliação proposto. Nos próximos subitens, estas etapas são explicadas em detalhes.

Figura 36 Estrutura do modelo MCDA/M.



4.2.3 Caracterização dos decisores e outros atores

No item 5.7 foi explorada a participação dos grupos de influência envolvidos na escolha e implementação de tecnologias de energia elétrica. Em função da generalidade do modelo, os grupos de interesse podem ser definidos de acordo com cada aplicação ou cenário a ser considerado. Assim como no caso de estudo anterior (SOARES, KANG e ALMEIDA, 2018), tendo por base Stein (2013), e, com o intuito de se obter uma melhor visão sobre a solução mais adequada, por meio de diferentes perspectivas, foram considerados os seguintes grupos de interesse: produção de energia, financeiro, meio ambiente e socioeconômico.

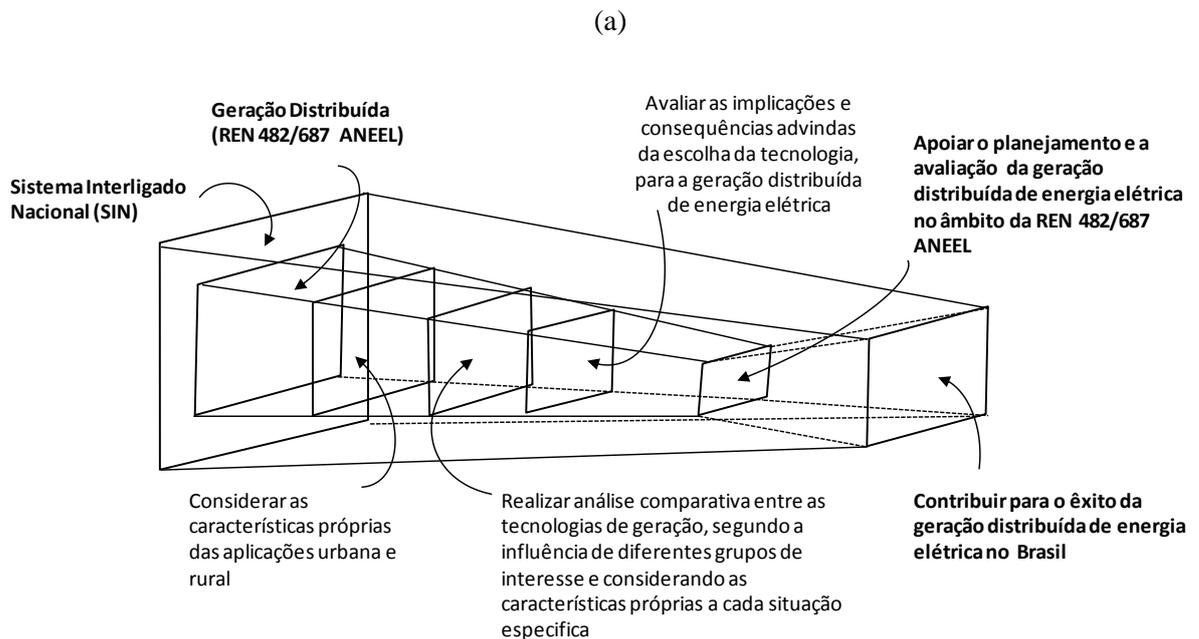
4.2.4 Identificação dos objetivos

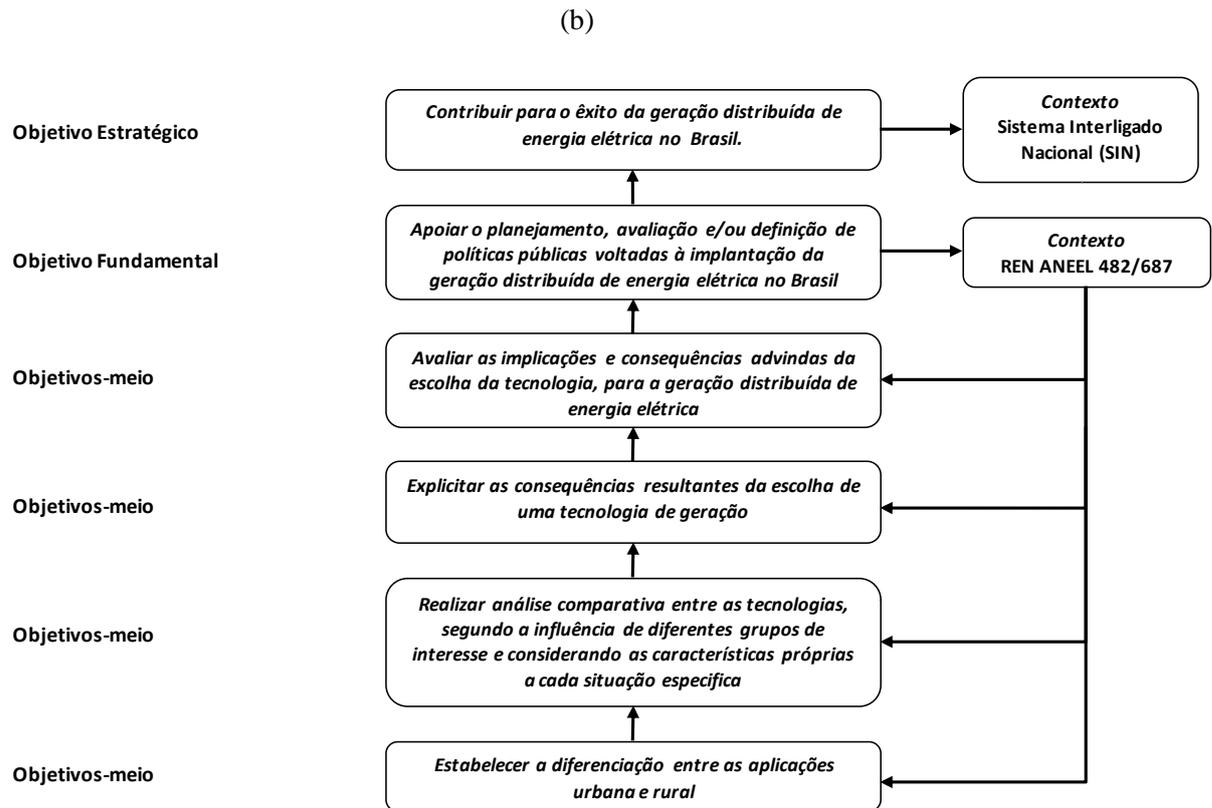
A identificação dos objetivos possui uma influência inicial significativa no modelo final, tendo em vista que o processo decisório, neste ponto, está nos filtros iniciais (DE ALMEIDA, 2013).

Para o desenvolvimento dessa etapa foi utilizada a abordagem VFT (*Value-Focused Thinking*) proposta por Keeney (1992) que apresenta uma visão para o processo de estruturação de objetivos e construção de valores e alternativas para eles.

A Figura 37 (a) apresenta a estrutura de objetivos, desenvolvida para este caso, em VFT, enquanto a Figura 37 (b) coloca a estrutura de objetivos sob o conceito de segmentação lógica relacional.

Figura 37 Estrutura de objetivos para a análise das tecnologias de geração de energia distribuída. (a) Em VFT Fonte: Adaptada de (KEENEY RL, 1976) e (b) elaborada pelo autor.





O objetivo estratégico Contribuir para o êxito da geração distribuída de energia elétrica no Brasil é referenciado ao contexto estratégico Sistema Interligado Nacional (SIN). Como parte deste contexto, tem-se a geração distribuída de energia, regulamentada pela Resolução Normativa nº 482/2012 (ANEEL, 2012), cujo objetivo fundamental é Apoiar o planejamento, a avaliação e/ou definição de políticas públicas voltadas à implantação da geração distribuída de energia elétrica no Brasil no âmbito da REN 482/687 ANEEL.

Para se atingir esse objetivo fundamental, foram definidos os seguintes objetivos-meio: Estabelecer a diferenciação entre as zonas de aplicação urbana e rural que inicia o processo de segmentação lógica “para cima” alimentando cada nível de objetivo que o sucede. Então se tem em seguida, “Considerar as características próprias das aplicações urbana e rural” => “Realizar análise comparativa entre as tecnologias de geração, segundo a influência de diferentes grupos de interesse, considerando também as características próprias a cada situação específica” => “Avaliar as implicações e consequências advindas da escolha da tecnologia, para a geração distribuída de energia elétrica”.

4.2.5 Propriedades dos objetivos

Para que seja assegurada a integridade e consistência dos objetivos eles devem apresentar as propriedades de compreensibilidade, concisão, especificidade, não redundância e completude (KEENEY, 1992).

O objetivo estratégico “Contribuição para o êxito da geração distribuída de energia elétrica no Brasil no âmbito da REN ANEEL 482/687”

e o objetivo fundamental “Apoiar o planejamento, análise e/ou definição de políticas públicas voltadas à implantação da geração distribuída de energia elétrica no Brasil”

Enquadram-se nas propriedades acima, desde que, são compreensíveis (claros), concisos (breves e precisos) específicos (particulares) não redundantes (não pleonásticos) e definem completamente o desejado.

Os quatro objetivos-meio:

“Sistematizar um conjunto de dados e informações referente à aplicação da REN ANEEL 482/687”

“Considerar as características próprias das aplicações urbana e rural, visando à diferenciação entre as aplicações urbana e rural”

“Realizar análise comparativa entre as tecnologias de geração”

“Avaliar as implicações e consequências advindas da escolha de cada tecnologia”.

Também se enquadram nas propriedades definidas acima.

4.2.6 Estabelecimento dos critérios

Dado que se pretende alcançar objetivos múltiplos e conflitantes por meio da inserção de sistemas de geração distribuída de energia elétrica, foram estabelecidos critérios para medir como um possível investimento em tecnologia de geração distribuída de energia elétrica contribuiria para a realização dos objetivos do problema.

Para as análises que integram os objetivos definidos no item 6.1.2, foi considerado o conceito de sustentabilidade definido por Sachs Sachs (1993), como premissa para orientação no estabelecimento dos critérios.

Também foram consideradas as aplicações encontradas na literatura para problemas na área de decisão quanto a escolha de tecnologias para a geração de energia elétrica (STEIN, 2013), (ANDRADE, 2016) e (MELLO, 2003).

Os critérios foram estabelecidos de acordo com as dimensões e objetivos da Tabela 5. Com base na dimensão financeira, foram estabelecidos os critérios Custo de investimento e custo de operação e manutenção (O&M), para representarem o objetivo de minimizar custos.

Por outro lado, na perspectiva da dimensão técnica, os objetivos conduzem a quatro critérios relacionados ao objetivo de maximizar desempenho e eficiência operacional: eficiência de geração, fator de capacidade, controlabilidade da fonte de energia e manutenção.

Quanto à dimensão socioambiental, os critérios que representam os objetivos de minimizar os impactos negativos no meio ambiente e nas pessoas são: emissão de CO₂, ocupação da terra, risco de acidente e impacto socioambiental, que expressam o conceito de externalidades.

Para a dimensão socioeconômica, cinco critérios consideram o objetivo de maximizar o desempenho econômico: vida útil, ganho secundário e emprego (constituído dos sub-critérios: empregos na fase de manufatura, empregos na fase de construção e instalação e empregos durante operação e manutenção). A Tabela 11 resume o conjunto de critérios definidos para a construção do modelo MCDM/A, visando à avaliação das tecnologias de geração de energia elétrica no âmbito da REN ANEEL 482/687.

Tabela 11 Critérios para a avaliação das tecnologias de geração de energia elétrica no âmbito da REN ANEEL 482/687. Fonte: elaborada pelo autor.

Dimensão	Critério	Notação	Definição	Unidade
Financeira	Custo do Investimento	C1	Considera os custos relacionados à construção e instalação de uma planta de geração de energia elétrica	US\$/kW
	Custo de O&M	C2	Considera os custos de operação e de manutenção de uma planta de geração de energia elétrica	US\$/kW

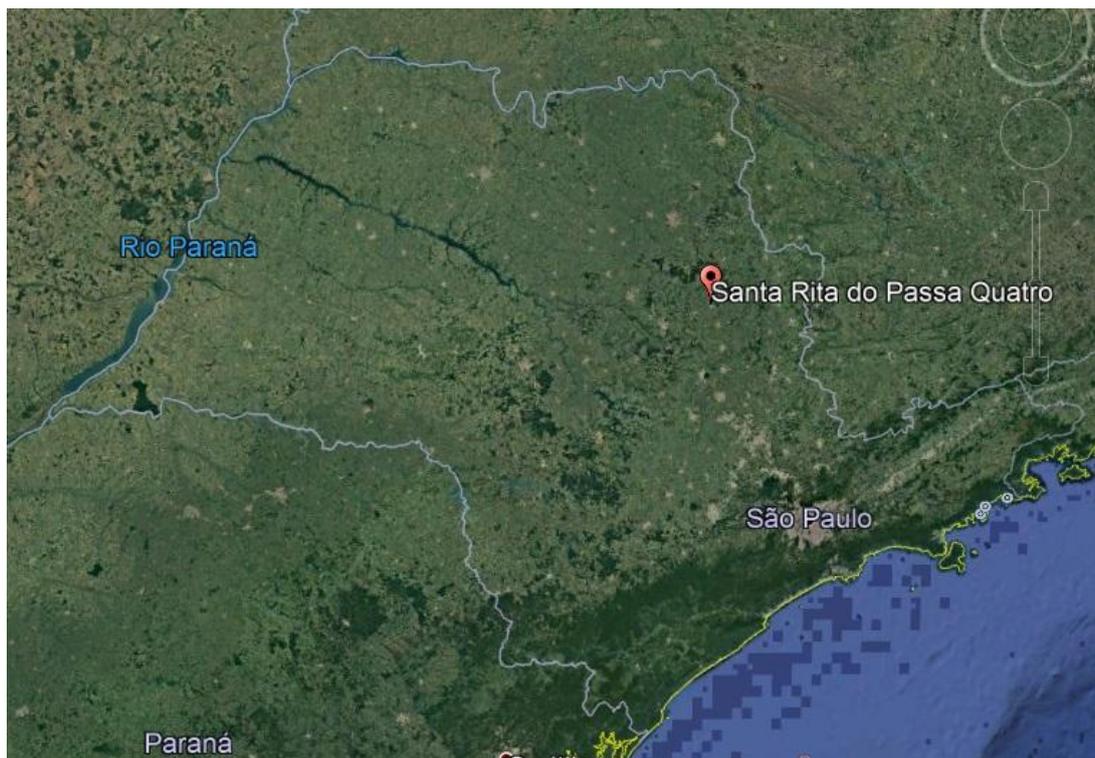
Dimensão	Critério	Notação	Definição	Unidade
Técnica	Eficiência de geração	C3	Considera a capacidade de conversão de cada tecnologia de geração de energia	%
	Fator de capacidade	C4	Considera o período de tempo em que a planta está ativa, gerando eletricidade	%
	Manutenção	C5	Considera a facilidade/simplicidade em realizar a manutenção dos dispositivos de geração	-
	Controle	C6	Considera a possibilidade de controlar a disponibilidade da fonte de energia e seu armazenamento	-
Socioambiental	Emissão de CO ₂	C7	O CO ₂ é um dos gases que contribuem para o efeito estufa e que pode ser emitido como resultado do processo produtivo de geração de energia elétrica	gCO ₂ EQ/kWh
	Ocupação da terra	C8	Considera a quantidade de área necessária para que uma tecnologia funcione	m ² /MW _h
	Risco de acidentes	C9	Considera o grau da possibilidade de ocorrência de acidentes inerante a cada sistema de geração de energia	-
	Impacto socioambiental	C10	Considera o impacto das tecnologias sobre a vida e o bem estar das pessoas	-
Socioeconômica	Vida útil	C11	Tempo de vida em operação dos dispositivos e equipamentos da planta de geração de energia	Anos
	Ganho secundário	C12	Considera a obtenção de um subproduto com valor agregado, como consequência da geração de energia	
	Emprego na fase de manufatura	C13	Considera os trabalhos gerados durante a fabricação de dispositivos e equipamentos da usina de geração de energia	Empregos/ano/ MW
	Emprego na fase de construção e instalação	C14	Considera os trabalhos gerados ao construir a infra-estrutura e instalar os dispositivos e equipamentos da usina de geração de energia elétrica	Empregos/ano/ MW
	Emprego durante operação e manutenção	C15	Considera os trabalhos gerados ao operar e manter os dispositivos e equipamentos da usina de geração de energia elétrica	Empregos/ano/ MW

4.2.7 Parametrização dos critérios

Nesta seção são detalhados os critérios e definidos os parâmetros e características que o definem com base em cada dimensão da sustentabilidade. Tais parâmetros são de importância fundamental para o modelo, desde que, representam qual a consequência que se poderá obter para cada alternativa. Por outro lado, para o contexto da aplicação, caracterizam um grande desafio e, ao mesmo tempo, importante contribuição para este trabalho, pois existem poucos dados disponíveis a respeito das tecnologias de geração de pequeno porte no Brasil.

A região rural escolhida fica no interior do Estado de São Paulo e corresponde à área da Bacia Hidrológica do rio Mogi Guaçu (Figura 38).

Figura 38 Área considerada para a localização dos sistemas de geração renovável de energia elétrica



Para esta região, Guitarrara (2012) analisou o potencial hidrelétrico dos rios e pequenos cursos d'água, visando à implantação de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH). Entre as possibilidades estabelecidas, foi escolhida aquela de menor capacidade de potência e, portanto, a que melhor se adéqua à microgeração de energia elétrica. Esta opção fica próxima ao município de Santa Rita de Passo Quatro e apresenta as seguintes características:

Queda	Área de Contribuição (km ²)	Vazão (l/s)	HB (m)	HL (m)	Potencial (kW)	TVR (m)
2 (Agr.)	16,6	94,7	14,9	14,2	9,6	350

Quanto ao potencial eólico, o Atlas Eólico Brasileiro (CEPEL, 2018) indica uma velocidade média de 4,5 m/s para uma altura de 30 m e um coeficiente de Weibull $K=2,0$. Com relação à energia solar, o Atlas Solar do Estado de São Paulo (ATLAS, 2018) indica uma incidência solar de 5,4 kWh/m²/dia. Por fim, para a biomassa geradora do biogás foi considerado o resíduo bovino devido a sua maior difusão entre os pequenos criadores.

Para uma melhor verificação quanto ao desempenho das tecnologias de geração de energia elétrica sob o modelo MCDM/A, a partir dos critérios definidos, optou-se pela estratégia de considerar a energia eólica gerada como referência para as demais tecnologias, desde que, sua definição é a mais difícil, diante da pouca disponibilidade de aerogeradores de pequeno porte, que sejam eficientes a baixas velocidades de vento. Para o aerogerador escolhido, o Skystream 3.7 (SKYSTREAM, 2018) e (ENERGIA, 2018), com uma torre de 18 m, foi obtida uma geração de 179 kW/mês para a região em voga. A partir desse dado foram estabelecidas as demais tecnologias considerando que a energia solar pode ser dimensionada, de acordo com a geração desejada, enquanto as energias hidrelétrica e da biomassa podem, também, na sua geração, serem controladas.

4.2.7.1 Dimensão financeira

Dois critérios financeiros consideram os custos e condições de aquisição de cada tecnologia de geração da energia elétrica. São eles:

4.2.7.1.1 Custo médio do investimento

Compreende os custos de adquirir e instalar uma planta de geração distribuída de energia elétrica. É um critério natural, a minimizar, cuja consequência é representada por uma variável determinística, medida pela unidade financeira considerada em US\$/kW. Os valores para cada tecnologia estão apresentados na Tabela 12 e foram obtidos da seguinte forma: eólica, aerogerador Skystream 3.7 – 2,6 kW (SKYSTREAM, 2018) e (ENERGIA, 2018), solar, 04 placas (330 W) - 11,26 m², 1,41 kW, Portal Solar (SOLAR, 2018), micro hidrelétrica, 5 kW

(BALARIM, 1996), biogás, biodigestor + Motogerador Branco B4T3500L – 3,4 kW (BGS, 2018) e (BRANCO, 2018).

Tabela 12 Parâmetros referentes ao critério custo médio do investimento.

Tecnologia de geração	Potência Instalada (kWp)	Capacidade de Geração (kWh/mês)	Custo (US\$ 1000,00/kW)	Total (US\$ 1000,00)	Informação
Eólica	2,4	400	3,23	7,75	Skystream Marine (aerogerador – 3,72m)
Solar (FVT)	2,97	400	2,34	6,95	Portal solar 23 m ² – 11 placas (260W)
Hidráulica (PCH)	3,7	400	1,20	4,44	Hydroenergy.(custo aprox.)
Biomassa	2,5	400	1,12	2,8	Motor Bufalo Bfg 2500, à gasolina convertido

4.2.7.1.2 Custos de operação e manutenção (O&M)

São considerados os custos de operação e de manutenção que compreendem os gastos com pessoal, material de consumo e equipamentos (exclusive reposição e reparos de grande monta nos equipamentos permanentes principais da usina) necessários à operação normal da usina e do sistema de transmissão associado (conexão)¹. Considera, portanto, os custos fixos referentes à operação e manutenção da planta de geração de energia elétrica. Para a biomassa foi considerado o valor referente aos dejetos de suínos e aves (TOLMASQUIM, 2016 R).

Seguem os parâmetros dos critérios financeiros para cada tecnologia (Tabela 13).

Tabela 13 Parâmetros referentes aos critérios da dimensão financeira.

Tecnologia de geração	Custo Médio do Investimento (R\$ 1000,00/kW)	O&M (2015US\$/kWano)
Eólica	3,23	85,00
Solar (FVT)	2,34	19,00
Hidráulica (PCH)	1,20	13,00
Biomassa	1,12	22,00

¹ Existem poucos dados disponíveis a respeito dos custos operacionais das tecnologias de geração de pequeno porte que devem apresentar custos unitários de operação e manutenção mais elevados.

4.2.7.2 Dimensão técnica

Quatro critérios técnicos consideram o desempenho operacional e a eficiência do processo produtivo de cada tecnologia de geração da energia elétrica. São eles:

4.2.7.2.1 Eficiência de geração

Considera a capacidade de conversão da energia disponível na fonte, em energia elétrica por cada tecnologia de geração. Ou seja, estabelece a relação entre energia elétrica gerada pela planta e a energia disponibilizada por meio da fonte.

As eficiências das plantas variam muito de > 90% para a energia hidrelétrica, passando para os valores intermediários para a biomassa (30-50%) e para a eólica (23-45%) e, finalmente, solar (4-22%).

É um critério natural, a otimizar, cuja consequência é representada por uma variável determinística medida em termos percentuais (%). Os valores para cada tecnologia são bem estabelecidos na literatura em (TOLMASQUIM, 2016 R), (EVANS, 2010) (TIDBALL, 2010) e (EIA, 2013). Os parâmetros referentes aos critérios da dimensão técnica são apresentados, conjuntamente, na Tabela 8.

4.2.7.2.2 Fator de capacidade

Refere-se ao período de tempo em que a planta está ativa, gerando eletricidade. As condições naturais que ocorrem nos locais onde as plantas estão localizadas e as paradas programadas para reparos e manutenção devem ser consideradas. Este critério diz respeito à capacidade de geração de energia em um dia. Por meio da tabela 10 observa-se que a hidráulica tem a maior classificação de capacidade geral, enquanto a energia solar tem a menor devido à variabilidade diária nas condições climáticas que afetam o incidente de energia solar na Terra (isso é, naturalmente, também uma função da geografia local).

Um sistema dotado de fonte não intermitente pode gerar energia durante 24 horas por dia, enquanto que um sistema solar de mesma potência instalada pode gerar, dependendo de sua localização geográfica, uma média de 6 horas equivalentes de potência nominal ao longo do dia. Logo, para que o sistema fotovoltaico possa produzir a mesma quantidade de energia em um dia, ele deve ter sua potência aumentada em quatro vezes, o que eleva seu custo de implantação. Trata-se de um critério natural, a otimizar, cuja consequência é representada por

uma variável determinística medida em termos percentuais (%). Assim como para o critério eficiência energética, os valores para cada tecnologia são bem estabelecidos na literatura (TOLMASQUIM, 2016 R), (EVANS, 2010) (TIDBALL, 2010) e (EIA, 2013). Os valores médios estão apresentados na Tabela 16.

4.2.7.2.3 *Manutenção*

Paul Komor (KOMOR e MOLNAR, 2015) apresenta uma escala simplificada que utiliza parâmetros generalistas (alta, baixa ou média) para a avaliação da necessidade de manutenção para tecnologias distribuídas de geração de eletricidade renovável.

Neste trabalho, com este critério, busca-se considerar as diferentes características da manutenção para cada tecnologia de geração. Para essa diferenciação propõem-se a avaliação de dois aspectos básicos e determinantes na manutenção: facilidade, que considera a necessidade de mão de obra especializada (complexidade dos dispositivos) juntamente com a disponibilidade de peças de reposição e a necessidade de lubrificação. A Figura 39 apresenta a discretização do critério manutenção. Neste caso, é necessária a construção de uma escala de valor para a sua avaliação qualitativa, tipo Likert (LIKERT, 1932), de cinco pontos, sendo proposta a conceituação apresentada na Tabela 14.

Figura 39 Níveis lógicos de influência para o critério manutenção. Fonte: elaborada pelo autor.

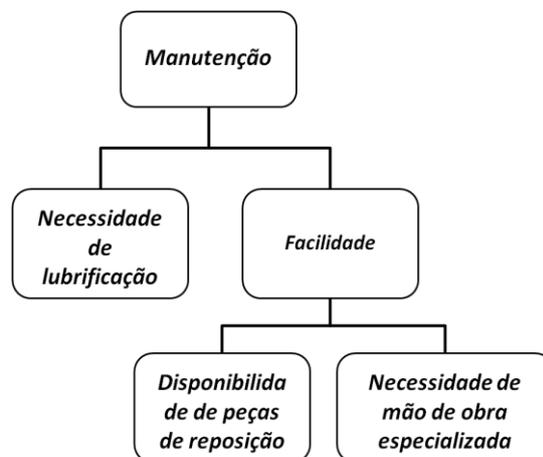


Tabela 14 Escala de avaliação, tipo Likert, para o critério manutenção.

Fonte: elaborada pelo autor.

Nível	Descrição
1	alta complexidade, baixa disponibilidade e com lubrificação
2	baixa complexidade, alta disponibilidade e com lubrificação
3	alta complexidade, baixa disponibilidade e sem lubrificação
4	baixa complexidade, baixa disponibilidade e sem lubrificação
5	baixa complexidade, alta disponibilidade e sem lubrificação

4.2.7.2.4 Controlabilidade da fonte de energia

Considera a possibilidade de se controlar a disponibilidade da fonte de energia de geração bem como seu armazenamento. É a proposição de um critério construído e que é tratado como um critério binário, em termos de zero (0), correspondendo a uma tecnologia não controlável e um (1) a uma tecnologia controlável. Seguem as consequências dos critérios técnicos para cada tecnologia (Tabela 15).

Tabela 15 Parâmetros referentes aos critérios da dimensão técnica.

Tecnologia de Geração	Eficiência Energética (%)	Fator de Capacidade (%)	Manutenção	Controle
Eólica	35	43	1	0
Solar (FVT)	20	24	5	0
Hidráulica (PCH)	90	55	3	1
Biomassa	25,3	60	2	1

4.2.7.3 Dimensão ambiental

Esta dimensão considera o impacto da tecnologia de geração da energia elétrica sobre o meio ambiente. Em função da dificuldade de obtenção de dados referentes a critérios naturais para esta dimensão, dois conceitos foram considerados para os estudos: a emissão do CO₂ como gás que concorre para o efeito estufa (GEE) e o conceito de Externalidades.

4.2.7.3.1 Emissão de CO₂

Todos os sistemas de energia emitem gases de efeito estufa (GEE) e contribuem para mudanças climáticas antropogênicas. Atualmente é amplamente reconhecido que as emissões de GEE resultantes do uso de uma determinada tecnologia de energia precisam ser quantificadas em todas as etapas da tecnologia e de seu ciclo de vida. Embora o cálculo exato das emissões de GEE por quilowatt-hora (kWh) seja, muitas vezes, difícil, o conhecimento sólido do ciclo de vida das emissões de GEE podem ser um indicador importante para as estratégias de mitigação no setor de energia.

Em contraste com as tecnologias de combustíveis fósseis, a maior parte das emissões de GEE das tecnologias de energia renovável ocorre a montante da operação da planta - tipicamente para a produção e construção da tecnologia e/ou sua infraestrutura de apoio. Embora, para sistemas de biomassa, a maioria das emissões possa surgir durante o ciclo do combustível, dependendo da sua escolha.

A seguir serão avaliadas as tecnologias da GREED, consideradas nesse trabalho, quanto à emissão de CO₂.

(a) EÓLICA

A produção de eletricidade a partir de turbinas eólicas não gera emissões diretas de GEE, embora as emissões indiretas possam ser atribuídas à construção e montagem da própria usina eólica, a produção e montagem dos materiais a partir dos quais é composta, o transporte desses materiais para o local de instalação e os processos de eliminação de resíduos (DONES e HECK, 2004).

Na construção e instalação, as emissões de GEE variam entre 72-90% das emissões acumuladas (WEISSER, 2007). Diferenças significativas devem-se, principalmente, à fundação da usina. Por exemplo, as turbinas eólicas instaladas no mar (*offshore*) – marítimas - requerem significativamente maiores quantidades de aço e cimento que uma turbina instalada em terra (*on-shore*) – terrestres - para a construção de sua fundação. Para plantas terrestres, no entanto, a maioria das emissões de GEE tem relação com a produção da turbina (principalmente para a torre e a *nacelle*). As emissões de GEE não relacionadas à construção e produção surgem durante a operação e manutenção, desmontagem, transporte de materiais e turbinas, e variam entre 10-28% de emissões cumulativas.

Normalmente, turbinas maiores - em condições de vento semelhantes - têm emissões de GEE de ciclo de vida mais baixas do que turbinas menores. Enquanto as turbinas marítimas têm emissões mais elevadas do que as turbinas terrestres, devido ao alto nível de emissões associadas à fundação, conexão e montagem (DONES e HECK, 2004). As emissões de GEE de ciclo de vida das turbinas eólicas são muito específicas do local e são sensíveis à velocidade do vento, devido ao relacionamento cúbico da velocidade do vento com a potência de saída. Como os regimes de vento variam significativamente com a geografia, os diferentes fatores de capacidade utilizados nos estudos aumentam a variação que pode ser observado nos resultados, que se situam entre 8-30 gCO₂eq/kWh para instalações terrestres e 9-19 gCO₂eq/kWh para instalações marítimas (WEISSER, 2007).

(b) SOLAR

Weisser (2007), resume os resultados de vários estudos de ciclo de vida para sistemas fotovoltaicos, que variam entre 43-73 gCO₂eq/kWh . Tipicamente, quatro sistemas foram avaliados: monocristalino, policristalino, amorfo e CIGS (*Coel Indium Gallium Diselenide*). A maioria das emissões de GEE ocorre a montante do ciclo de vida, durante a produção do módulo (entre 50-80%). Outros lançamentos significativos de GEE, também a montante, estão relacionados ao inversor. Operação, fim de vida e as atividades associadas ao transporte não resultam em emissões cumulativas significativas de GEE. Dos quatro sistemas, As plantas monocristalinas, em média, podem emitir menos GEEs variando entre 43-62 gCO₂eq/kWh. Os outros sistemas fotovoltaicos podem emitir entre 50-73 gCO₂eq/kWh durante todo o ciclo de vida de GEE. As variações nos resultados podem ser por uma série de fatores, como a quantidade, o grau, bem como as condições de irradiação. Diferenças na instalação, como a integração e sistemas não integrados, bem como fachada, telhado plano e telhas solares, ou a eficiência dos equipamentos periféricos, como o equilíbrio do sistema, também afetam significativamente as emissões de GEE.

(c) HIDRAULICA (PCH)

A maioria das emissões de GEE geralmente ocorre durante a produção e construção da usina hidrelétrica (especialmente para represas de reservatório). As emissões durante a construção e produção situam-se aproximadamente entre 2-9 gCO₂eq/kWh (WEISSER, 2007). No entanto, em alguns casos, as usinas hidrelétricas que utilizam reservatórios podem

emitir quantidades significativas de GEE que facilmente supera todas as outras emissões de GEE na cadeia de energia, tanto devido ao desmatamento antes da construção, mas, especialmente, devido a inundações de biomassa e solo. Por exemplo, a biomassa inundada decai em termos aeróbicos - produzindo dióxido de carbono - e anaerobicamente - produzindo dióxido de carbono e metano. A quantidade de liberação de GEE depende do tamanho do reservatório, tipo e quantidade de cobertura de vegetação inundada, tipo de solo, profundidade da água e clima.

(d) BIOMASSA

As emissões de GEE do ciclo de vida dos sistemas de biomassa dependem principalmente da intensidade energética do combustível, das propriedades do biocombustível, bem como da tecnologia da planta e da eficiência da conversão térmica específica. A gama de emissões de GEE de ciclo de vida para os estudos considerados situa-se entre aproximadamente 35-99 gCO₂eq / kWh (WEISSER, 2007). A maioria das emissões ocorre no estágio do ciclo do combustível, enquanto as emissões de GEE durante as outras fases do ciclo de vida são insignificantes. As emissões de GEE biogênicas (emissões resultantes da combustão de biocombustíveis) não estão incluídas, uma vez que se acredita serem neutras em carbono. Geralmente o uso de biomassa na fase de geração de eletricidade é definido como um "neutro em carbono" porque o CO₂ liberado durante a combustão é absorvido durante o crescimento da planta (combustível). As emissões do ciclo de vida para os sistemas de biomassa variam substancialmente dependendo da eficiência da combustão, da taxa de energia e do tipo de alimentação (por exemplo, chips vs. logs vs. pellets vs. gás). Mais recentemente, as publicações sobre as emissões de GEE provenientes do crescimento de diferentes combustíveis energéticos emergiram, mas para a consistência e a comparabilidade, apenas os combustíveis à base de madeira foram citados aqui.

O *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) (EDENHOFER, 2011), realizou uma revisão abrangente das publicações dedicadas à avaliação do ciclo de vida de gases de efeito estufa (GEE) emitidos a partir da geração de energia elétrica por meio de diferentes tecnologias. A partir das referências coletadas, foi construído um banco de dados que se constitui como base para a avaliação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) do ciclo de vida das tecnologias de geração de eletricidade neste trabalho. Tal abordagem avalia não apenas as emissões causadas pelo processo de geração, mas também por todo o ciclo de vida da planta de geração, considerando desde a etapa de planejamento, passando pela construção,

operação e desativação da mesma. Neste trabalho foi adotado o valor médio para as emissões, por fonte, do levantamento realizado em (EDENHOFER, 2011). Os dados do NREL para as emissões de GEE encontram-se dentro das faixas, relacionadas acima (com exceção da biomassa), para as tecnologias consideradas e podem ser verificadas na Tabela 19.

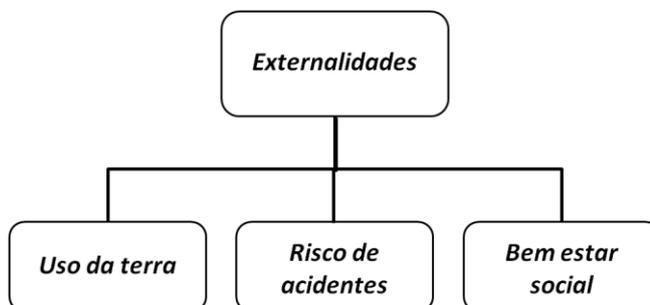
4.2.7.3.2 Externalidades

As externalidades dizem respeito aos efeitos colaterais da produção de bens ou serviços sobre outras pessoas que não estão diretamente envolvidas com a atividade. Em outras palavras, elas referem-se ao impacto de uma decisão sobre aqueles que não participaram dessa decisão (EXTERNE, 2005). As externalidades podem ter efeitos positivos ou negativos, isto é, podem representar um custo para a sociedade, ou podem gerar benefícios à mesma. Consideram os custos impostos à sociedade e ao meio ambiente que não são considerados pelos produtores e consumidores de energia. Incluem os impactos ambientais em diversos níveis, tais como: emissão de poluentes do ar atmosférico local (SO_2 , CO_2 e NO_x), saúde humana, impacto sobre plantações, ecossistemas naturais, como também considerações menos concretas incluindo impactos na recreação, amenidades, estética e outras contribuições para o bem estar social.

A produção de eletricidade pode causar diversos impactos sobre o meio ambiente. Tais impactos também devem ser medidos levando em consideração todos os estágios do ciclo de vida da tecnologia, e não apenas sua operação. Para este critério existem pouquíssimas informações no Brasil, normalmente sem comprovação técnica. Rafaj e Kypreos (2007) estudaram os impactos das externalidades na geração de energia elétrica, com base no projeto Externe (2005). São calculados os custos de externalidades de emissão de poluentes do ar atmosférico local (SO_2 e NO_x), por macrorregiões.

Em função da generalidade dos dados referentes as externalidades, desde que não consideram as especificidades para o caso brasileiro, inclusive o foco na mini e microgeração deste trabalho, além da emissão de poluentes, foram considerados três critérios representativos para o conceito das externalidades, ou seja, uso da terra, risco de acidentes e impacto social (Figura 40), que são discriminados a seguir.

Figura 40 Critérios referentes às externalidades, além da emissão de poluentes.
Fonte: elaborado pelo autor.



(a) USO DA TERRA

A ocupação da terra é uma medida da área que é ocupada direta ou indiretamente. É uma medida da necessidade de terra para que uma tecnologia funcione. Não transmite a maneira como a terra é usada, por quanto tempo ele é usado ou quanto dano é feito ao site como resultado da tecnologia (EVANS, 2010).

As fontes renováveis eólica e solar fotovoltaica, tipicamente, ocupam, diretamente, pouca espaço físico, embora o espaçamento necessário sugira uma dispersão em grandes áreas (por exemplo, os parques eólicos) com pouco impedimento do solo (FRITSCHÉ, 2017). O uso direto não intensivo da terra, frequentemente permite outros usos simultâneos, como pastoreio e mesmo cultivo arável, possível sob ou dentro das fazendas eólicas ou fotovoltaicas (FV). Por outro lado, no caso da hidráulica, é grave o uso da terra no que se refere à localização e necessidade de espaço para as barragens, pois a área inundada exclui a terra de outros usos (exceto recreação / pesca) e, por exemplo, cria barreiras à migração de peixes.

No caso da biomassa de resíduos, a ocupação da terra fica próxima de zero, pois tem-se é um subproduto como combustível. Esta é uma diferença adicional com relação às outras fontes de energia, pois a bioenergia pode ser obtida simultaneamente, da mesma terra, com outros produtos, por exemplo, o leite e a carne de bovinos, suínos ou aves (co-produtos) (EVANS, 2010). Os dados sobre a ocupação da terra para a geração de energia elétrica por meio de energias renováveis estão disponíveis em Evans (2010) e em Fritsche (2017).

(b) RISCO DE ACIDENTES

Este critério diz respeito ao risco de ocorrência de acidentes para os dispositivos de geração de energia elétrica, considerando as diferentes características das tecnologias de geração de energia e os tipos de elementos que a compõem. Para essa diferenciação são propostos três aspectos básicos e determinantes para a segurança, que envolvem controle de energia, são eles: partes móveis em movimento relativo (energia cinética), tamanho e peso dos componentes (energia de inércia) e altura da instalação (energia potencial) que concorrem, entre outros, para problemas de vibração mecânica.

A seguir são resumidas as principais características das tecnologias de geração de energia elétrica, que justificam a diferenciação, entre elas, no que diz respeito a fundamentação necessária as preocupações quanto aos riscos de acidentes.

(i) EÓLICA

O conjunto de turbina eólica/lâmina é sustentado por uma torre que, devido à sua geometria e grande altura, caracteriza uma estrutura flexível, que tende a ser excitada perigosamente pelo vento, em um ou mais de seus modos naturais de vibração. Portanto, é um sistema exposta a vibrações excessivas causadas pelo ciclo de trabalho da turbina e pela interação lâmina-vento (AVILA, DE MORAIS, *et al.*, 2009). Ainda segundo Suzana Avila (2009) Uma solução para o problema das vibrações excessivas estudadas por muitos pesquisadores nos últimos anos é o controle, ou seja, proporcionar mudanças nas propriedades estruturais, melhorando o amortecimento, a rigidez e a resistência, através da instalação de dispositivos ou aplicação de forças externas. Alguns pesquisadores vêm estudando o uso do controle estrutural para ajudar a suprimir as vibrações induzidas pelo vento experimentadas pelas torres de turbinas eólicas como é o caso de Enevoldsen e Mørk (1996) que estudaram o problema de reduzir a resposta dinâmica e, portanto, a carga de fadiga de uma torre de turbina eólica através da introdução de um amortecedor de massa.

Por outro lado, segundo Alkmin (2015) em projetos convencionais, por razões econômicas, é aceitável que estruturas sofram danos desde que não haja colapso e preserve sua vida útil. Entretanto, há ocasiões em que não se admite qualquer prejuízo à estrutura que prejudique seu funcionamento. Neste caso, deseja-se que sobre grandes carregamentos a estrutura seja capaz de absorver e dissipar energia de maneira estável por vários ciclos sem

que danos sejam causados a estrutura e que seja resistente suficiente para evitar ou minimizar ações inelásticas.

Pode-se concluir que, considerando as características intrínsecas de cada projeto, principalmente o fator custo, o controle estrutural está presente, predominantemente, nas turbinas de grande porte. O que leva ao aumento dar preocupação com as consequências da vibração nos conjuntos eólicos de pequeno porte.

(ii) SOLAR

A energia solar fotovoltaica é, sem dúvida, a tecnologia que apresenta o menor fator de risco entre as aquelas consideradas na REN ANEEL nº 482/687. Não possuindo partes moveis em movimento relativo e com o baixo peso dos seus componentes podem ser implantadas sob condições especiais, tais como em nível do solo ou sobre os telhados de residências com segurança e facilidade.

(iii) HIDRAULICA (PCH

Segundo Lobato (2008), de maneira geral, o funcionamento das máquinas hidráulicas gera forças internadas com amplitudes variáveis devido ao ciclo de movimento de seus componentes. A frequência com que esta amplitude se repete é igual a frequência de operação de cada peça. O aparecimento ou presença de falha se dá pela geração de forças ou por mudanças nas forças geradas, devido ao funcionamento normal da máquina. Algumas falhas, como o desbalanceamento e o desalinhamento, são comuns em máquinas rotativas. Outras excitações, como forças de engrenamento, são características únicas de um dispositivo em particular. Esses vários tipos de excitações são normais para todos os elementos móveis e eles formam uma significativa porção de parâmetros que indicam o comportamento de uma específica parte do equipamento.

As fontes excitadoras de máquinas hidroelétricas podem ter origem mecânica, hidráulica, elétrica e magnética. As forças de excitação mecânica mais comuns têm origem devido as seguintes falhas: desbalanceamento de massas rotativas, desalinhamento, vibrações auto-excitadas e defeitos nas engrenagens do multiplicador (LOBATO, 2008). Para as excitações de origem hidráulica, se o sistema estiver em sua faixa operacional normal e sob condições de regime permanente, prevalecem as componentes periódicas hidráulicas, cujas frequências estão relacionadas com a rotação da turbina. Para condições transientes e quando

a máquina trabalha fora de sua faixa operacional normal, as componentes estocásticas tornam-se dominantes, onde nota-se no espectro de vibração uma larga banda de frequências e amplitudes flutuantes sendo que os valores máximos se encontram próximas a frequência de rotação da turbina. Pode-se citar como fontes de excitação hidráulica: não uniformidade do fluxo e formação de vórtices pela passagem do mesmo pela turbina, cavitação e vibrações provenientes da interação entre o rotor e o difusor do distribuidor.

Em termos de excitações do tipo elétrica e magnética, as frequências são elevadas e bem definidas, não oferecendo assim grandes riscos para o conjunto girante. A partir do momento que essas forças alcançam valores significativos, as mesmas poderão afetar e provocar danos nos componentes elétricos do gerador. As excitações elétricas e magnéticas podem ser provenientes de: forças Magnéticas, folgas entre o rotor e o estator e forças de desbalanceamento magnético. As características construtivas e a funcionalidade têm grande peso sobre as consequências de muitos tipos de excitações. Por exemplo, as máquinas que trabalham com quedas d'água e velocidades elevadas, o equilíbrio hidráulico é muito mais importante do que o equilíbrio mecânico (LOBATO, 2008).

Considerando a localização das turbinas hidráulicas (em nível do solo) e que podem ser acondicionadas em locais protegidos o risco de acidentes pode ser controlado e tem pouco impacto numa decisão que prevaleça este critério.

(iv) BIOMASSA

A biomassa, como tecnologia de geração de energia elétrica utilizando (no caso deste trabalho) motores de combustão interna para o acionamento dos geradores elétricos, condiciona as preocupações quanto aos riscos de acidentes às mesmas dos demais usos dos referidos dispositivos térmicos. Aqui também existe os problemas da vibração

Santana (2013) desenvolveu um estudo para identificar e descrever as principais fontes de vibração e ruído em um motor de combustão interna. Segundo ele, os problemas de vibração e ruído de um motor de combustão interna são comuns devido à ampla variedade de peças e componentes que compõem um motor deste tipo. Nos últimos anos, os motores evoluíram consideravelmente em relação ao controle de vibrações e ruídos emitidos, já que esses efeitos reduzem a vida útil dos componentes internos do próprio motor e, além de causar desconforto aos ocupantes do veículo.

A situação da biomassa com respeito ao risco de acidentes é muito parecida com o caso da PCH, porém, apresenta um complicador a mais, pois, neste caso, os dispositivos de geração são, normalmente, localizados mais próximos à circulação de pessoas e animais.

Para o critério risco de acidentes foi estabelecido um critério construído para o qual, foi elaborada uma escala de valor para a sua avaliação qualitativa, tipo Likert (LIKERT, 1932) de sete pontos. A Tabela 16 apresenta os níveis definidos para as consequências referentes a esse critério.

Tabela 16 Escala de avaliação, tipo Likert, para o critério Risco de Acidentes.
Fonte: elaborada pelo autor.

Nível	Descrição
1	Existência de elementos com baixo peso sem movimento relativo e situado em baixa altura
2	Existência de elementos com alto peso, sem movimento relativo e situado em baixa altura
3	Existência de elementos com baixo peso, com movimento relativo e situado em baixa altura
4	Existência de elementos com alto peso, com movimento relativo e situado em baixa altura
5	Existência de elementos com alto peso, sem movimento relativo e situado em grande altura
6	Existência de elementos com baixo peso, com movimento relativo e situado em grande altura
7	Existência de elementos com alto peso, com movimento relativo e situado em grande altura

(c) BEM ESTAR SOCIAL

Este critério considera o impacto de cada tecnologia de geração sobre as pessoas.

(i) EÓLICA

Os principais impactos da energia eólica são tipicamente o ruído, a intrusão visual e o ataque de pássaros. As plantas eólicas geram um pouco de ruído da rotação das lâminas e do ruído da maquinaria da caixa de velocidades e gerador (EVANS, 2010). A reação pública ao impacto visual pode ser significativa. Wolsink (1993) descobriu que era o fator mais influente na oposição pública aos parques eólicos. A reação quanto ao ruído foi considerada menos importante do que impacto visual. Nobbs (2012) desenvolveu uma nova metodologia para registrar o ruído e o aborrecimento nas casas dos moradores afetadas pelo ruído das turbinas eólicas. A técnica registra medidas de ruído de séries temporais que permitem a análise completa do sinal usando uma variedade de técnicas de pós-processamento. Vários parques eólicos iniciais tiveram um impacto negativo na vida das aves devido ao contato do pássaro

com o vento das turbinas. Estudos em profundidade da área proposta antes da construção asseguram que todos os padrões de voo das aves possam ser avaliados no projeto, para reduzir a probabilidade de acidentes com pássaros. (EVANS, 2010).

(ii) SOLAR

A manufatura das células solares envolve o uso de diversos produtos químicos tóxicos, cancerígenos, inflamáveis e explosivos, com a redução contínua dos requisitos de massa durante a fabricação das células, devido ao interesse em células mais finas, os riscos veem sendo reduzidos. No entanto, todos os produtos químicos devem ser cuidadosamente manuseados de modo a garantir o mínimo contato humano e ambiental. Existem também substâncias tóxicas usadas durante a operação, incluindo anticongelante, inibidores de oxidação e metais pesados que resultam da aplicação da lixívia (NaClO) (ABBASI, 2000). O Brilho da energia solar nos painéis é um perigo para a visão tornando isso um problema, para o qual cuidados devem ser tomados. Os locais da planta solar devem ser cuidadosamente selecionados para reduzir a concorrência com a agricultura, erosão do solo e compactação, desvio de vento, possíveis reduções nas taxas de evaporação do solo e ruptura do solo e fluxo de água superficial (EVANS, 2010).

(iii) HIDRAULICA (PCH)

De um modo geral as hidrelétricas fornecem um meio de controle de enchentes e irrigação, bem como uma área para recreação atividades de água e áreas de conservação em torno da barragem. Eles também podem formar uma atração turística. O pior efeito da instalação de barragens é o deslocamento de comunidades dentro da área inundada. Essas pessoas são muitas vezes as comunidades mais pobres, vivendo e cultivando a área por gerações. Muitos estudos têm mostrado as sérias implicações e problemas que essas pessoas têm sofrido, por exemplo, após a remoção (BERMANN, 2007). A inundação das represas geralmente também resultará na perda de sítios arqueológica e culturalmente significativos, bem como a interrupção dos padrões de migração dos peixes.

(iv) BIOMASSA

A concorrência alimentar é a principal questão social com a biomassa. Em muitos casos, as culturas energéticas competem com as culturas de alimentos em terras agrícolas valiosas. Não é o caso da bioenergia proveniente de resíduos gerados na agricultura e pecuária que aciona geradores de elétricos por meio de motores de combustão interna. Sendo essa a mais adequada aplicação da biomassa no âmbito da REN ANEEL nº 482/687, o uso de motores de combustão interna com o biogás apresenta o incomodo do ruído.

Segundo Eliezer Pacheco (2002), o processo de geração de ruído em motores é complexo e pode ser classificado em dois tipos diferentes de ruídos: de combustão e mecânico. O ruído de combustão é a parcela do ruído do motor originado pela variação brusca da pressão dos gases dentro da câmara de combustão. A contribuição de todas as outras fontes do motor é considerada ruído mecânico. O ruído de combustão é influenciado, sobretudo, pelo tipo de sistema de combustão, pelo tempo de entrega dos combustíveis na câmara de combustão, temperatura do motor, condições ambiente, tipo de combustível e da qualidade dos mesmos.

Para o critério bem estar social foi estabelecido um critério construído para o qual, foi elaborada uma escala de valor para a sua avaliação qualitativa, tipo Likert (LIKERT, 1932) de quatro pontos. A Tabela 17 apresenta os níveis definidos para as consequências referentes a esse critério.

Tabela 17 Escala de avaliação, tipo Likert, para o critério bem estar social.
Fonte: elaborada pelo autor.

Nível	Descrição
1	s/impacto sonoro, s/impacto visual, s/risco para os animais, s/ risco direto ao ser humano e s/ganho social secundário
2	baixo impacto sonoro, s/impacto visual, s/risco para os animais, s/ risco direto ao ser humano e c/ganho social secundário
3	baixo impacto sonoro, baixo impacto visual, s/risco para os animais, s/ risco direto ao ser humano e s/ganho social secundário
4	c/impacto sonoro, c/impacto visual, c/risco para os animais, c/ risco direto ao ser humano e s/ganho social secundário

Seguem as consequências dos critérios ambientais para cada tecnologia (Tabela 18).

Tabela 18 Parâmetros referentes aos critérios da dimensão ambiental.

Tecnologia de Geração	Emissão de CO₂ (g CO₂eq/kWh)	Uso da terra (m² / MW_h)	Risco de acidente	Bem estar social
Eólica	12	1	7	4
Solar (FVT)	46	10	1	1
Hidráulica (PCH)	4	10	4	3
Biomassa	18	0	3	2

4.2.7.4 Dimensão socioeconômica

Cinco critérios consideram o impacto socioeconômico de cada tecnologia de geração no que se refere à vida útil da planta de geração, ganho secundário e à capacidade de geração de empregos durante todo o ciclo de utilização considerado, incluindo o projeto, a construção, a operação e a manutenção. São eles:

4.2.7.4.1 Vida útil

Dispõe sobre o tempo de vida em operação dos dispositivos e equipamentos da usina de geração de energia. É um critério natural, bem estabelecido, cujos valores estão disponíveis na literatura. (TOLMASQUIM, 2016 R)

4.2.7.4.2 Ganho secundário

Considera a possibilidade de obtenção de um subproduto com valor econômico agregado, como consequência da geração da energia elétrica. Trata-se da proposição de um critério construído e que é tratado como um critério binário, em termos de zero, correspondendo a uma tecnologia que não apresenta nenhum subproduto durante a geração de energia e um para uma tecnologia que apresente a geração de um subproduto com valor econômico. Como exemplo tem-se a obtenção do fertilizante biolíquido quando da geração de energia elétrica a partir da biomassa, ou mesmo a contribuição com o meio ambiente por meio do aproveitamento dos dejetos animais.

4.2.7.4.3 Geração de empregos na fase de fabricação

Considera os empregos que são gerados durante a fabricação dos dispositivos e equipamentos da planta de geração de energia elétrica.

4.2.7.4.4 Geração de empregos na fase de construção e instalação

Compreende os empregos que são gerados quando da construção da infraestrutura e instalação dos dispositivos e equipamentos da planta de geração de energia elétrica.

4.2.7.4.5 Geração de empregos durante a fase de operação e manutenção

Considera os empregos que são gerados quando da operação e manutenção dos dispositivos e equipamentos da planta de geração de energia elétrica (WEI, 2010).

Os três critérios, descritos acima, conjugam a capacidade de geração de empregos de cada tecnologia. São critérios naturais e foram definidos com base no estudo do Greenpeace (2013), que compara as diferentes tecnologias de geração de energia elétrica com respeito à capacidade de geração de empregos no Brasil. A Tabela 19 apresenta os valores referentes aos critérios da dimensão socioeconômica.

Tabela 19 Parâmetros referentes aos critérios da dimensão socioeconômica.

Tecnologia de geração	Vida Útil (anos)	Ganho Secundário	Empregos Construção Instalação (Emp/ano/MW)	Empregos Fabricação (Emp/ano/MW)	Empregos Operação e Manutenção (Emp/ano/MWh)
Eólica	20	0	7,7	3,3	0,6
Solar	25	0	10,9	6,9	0,3
Hidráulica (PCH)	50	0	6	1,5	0,6
Biomassa	20	1	14	2,9	1,5

4.2.8 Alternativas - tecnologias de geração elétrica

No contexto da REN, Annel (2015), o conjunto de alternativas estabelecido se baseia nas fontes renováveis e co-geração qualificada. Neste trabalho foram escolhidas quatro tecnologias de geração de energia elétrica com base na constatação da maior adequação e procura (ANEEL, 2017). São elas: energia eólica, energia solar fotovoltaica (FV), pequenas centrais hidroelétricas (PCH) e biomassa (biogás). Cada uma delas é avaliada de acordo com o conjunto de critérios (ver Tabela 12), dando origem à Tabela 20, que apresenta a matriz de consequências para o problema.

Tabela 20 Matriz de consequências para o problema de escolha de tecnologia de geração de energia eólica no âmbito da REN ANNEL, nº687 (ANNEL, 2015).

Tecnologias GREED	Critérios														
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15
Eólica	3,23	85	35	43	1	0	12	1	7	4	20	0	7,7	3,3	0,6
Solar (FV)	2,34	19	20	24	5	0	46	10	1	3	25	0	10,9	6,9	0,3
Hidráulica (PCH)	1,20	13	90	55	3	1	4	10	4	1	50	0	6	1,5	0,6
Biomassa	1,12	22	25,3	60	2	1	18	0	3	2	20	1	14	2,9	1,5

4.2.9 Fatores não controlados

Esta etapa consiste na avaliação e identificação de fatores relevantes que não estão sob o controle do(s) decisor(es). Como neste problema, as variáveis são de natureza determinística, não há possíveis estados da natureza que influenciam os valores das consequências em questão.

4.2.10 GREED - Situação hipotética

Para o estudo de caso em questão foi considerada a zona rural do Estado de São Paulo (especificada no item 6.4.1) com base nas seguintes hipóteses:

- a. Aplicação rural;
- b. Disponibilidade de todos os combustíveis;
- c. Disponibilidade de área para instalação;
- d. Potência instalada < 5 KWh

Tais hipóteses justificam a aplicação da Resolução Normativa nº 482/2012 (ANNEL, 2012) para um segmento da sociedade brasileira caracterizado pela população rural e de baixa renda.

4.2.11 Aplicação do método FITradeoff – módulo escolha

Nesta etapa, tendo por base o método escolhido, é feita a parametrização do método obtendo-se as informações intercritérios com a ajuda do(s) decisor(es). Trata-se da obtenção das informações que permitem efetuar a combinação quantitativa dos critérios para o processo de agregação com vistas à avaliação das alternativas. Na obtenção das informações referidas os diversos métodos MCDM/A se caracterizam entre si, quanto à abordagem empregada para a elicitação dos valores para as constantes de escala (DE ALMEIDA, 2013). O método FITradeoff (DE ALMEIDA AT, 2016) utilizado neste trabalho, se baseia na abordagem de elicitação flexível na obtenção das constantes de escala para o modelo.

Para a aplicação do método, dentro do modelo multicritério desenvolvido, por meio do módulo de escolha do FITradeoff, são realizadas as seguintes considerações.

4.2.11.1 Elicitação - Perfis de decisão

Neste trabalho optou-se por um procedimento hipotético de elicitação em que as respostas do(s) decisor(es) para o FITradeoff foram simuladas, considerando os perfis de decisão referentes aos grupos de interesse considerados.

Existem vários grupos de influência envolvidos na escolha e implementação de tecnologias de energia elétrica distribuída (GREED), cada um com sua própria perspectiva e estrutura de valor em relação à geração de energia (STEIN, 2013).

A fim de obter uma melhor visão sobre a solução mais adequada de diferentes perspectivas, foram definidos quatro perfis de decisão correspondentes a quatro grupos de interesse, cujas preocupações estão voltadas para a geração de energia, impacto socioeconômico, desempenho financeiro e impacto socioambiental. Para cada perfil de decisão, o processo de elicitación FITradeoff foi realizado com base em dados da matriz de decisão (ver Tabela 21), simulando os interesses específicos dos diferentes grupos de influência do problema. Cada grupo possui um perfil de decisão próprio, portanto, uma estrutura de preferências diferente foi assumida ao classificar os pesos dos critérios e expressar preferências, levando a resultados diferentes.

4.2.11.1.1 Perfil de decisão A: Geração de energia elétrica

Nesse grupo, o(s) decisor(es) te(ê)m suas preocupações direcionadas, principalmente, ao desempenho operacional da usina de geração de energia elétrica. Assim, o foco está na dimensão técnica, representada pelos critérios eficiência de geração, fator de capacidade, controle de fonte de energia e manutenção. As dimensões ambiental, socioeconômica e financeira foram consideradas com prioridade (menor prioridade) decrescente. O ranking dos pesos dos critérios foi obtido considerando o espaço de conseqüências para cada critério e a priorização das dimensões adotada. O ranqueamento (*ranking*) final está apresentado em (a), onde w_i corresponde ao peso de um critério C_i na Tabela 21.

$$w_3 > w_4 > w_6 > w_5 > w_7 > w_8 > w_9 > w_{10} > w_{11} > w_{12} > w_{13} > w_{14} > w_{15} > w_1 > w_2 \quad (a)$$

Inicialmente, o ordenamento dos critérios (a) levou a um espaço de pesos em que não havia vetores de pesos para a eólica e solar, de modo que as tecnologias eólica e solar pudessem ser alternativas potencialmente ótimas. Desta forma, o conjunto inicial de alternativas viáveis foi reduzido para {Hidrelétrica (PCH) e Biomassa (biogás)}. Para reduzir ainda mais este subconjunto, FITradeoff realizou o processo de elicitación, no qual o(s) decisor(es) respondeu(ram) quatro questões relativas às preferências entre as alternativas hipotéticas h_1 e h_2 (ver Tabela 21). A explicitação da Tabela 21 segue o mesmo padrão

realizado no item 4.1.5.1 do estudo de caso 1. O espaço de pesos foi atualizado com base nessas informações e a PCH foi encontrada como solução para o cenário considerado.

Tabela 21 Processo de elicitação do FITradeoff para o cenário A.

Nº de questões	Vetores de consequências (alternativas hipotéticas h_1 e h_2)		Vetor de consequência preferido	Subconjunto de alternativas potencialmente ótimas após cada resposta
	$x^{h_1} = (x_5^{h_1}, x_6^{h_1}, \dots, x_2^{h_1}, x_1^{h_1})$	$x^{h_2} = (x_5^{h_2}, x_6^{h_2}, \dots, x_2^{h_2}, x_1^{h_2})$		
1	(55, 24, 0, 1, 46, 10, 7, 4, 20, 0, 6, 1.5, 0.3, 3.23, 85)	(20, 24, 0, 1, 46, 10, 7, 4, 20, 0, 6, 1.5, 0.3, 3.23, 13)	x^{h_1}	{PCH e Biogás}
2	(55, 24, 0, 1, 46, 10, 7, 4, 20, 0, 6, 1.5, 0.3, 3.23, 85)	(20, 60 , 0, 1, 46, 10, 7, 4, 20, 0, 6, 1.5, 0.3, 3.23, 85)	x^{h_1}	{PCH e Biogás}
3	(55, 42 , 0, 1, 46, 10, 7, 4, 20, 0, 6, 1.5, 0.3, 3.23, 85)	(20, 24, 1 , 1, 46, 10, 7, 4, 20, 0, 6, 1.5, 0.3, 3.23, 85)	x^{h_1}	{PCH e Biogás}
4	(20, 24, 0, 3 , 46, 1.5, 7, 4, 20, 0, 6, 1.5, 0.3, 3.23, 85)	(20, 24, 0, 1, 4 , 1.5, 7, 4, 20, 0, 6, 1.5, 0.3, 3.23, 85)	x^{h_1}	{PCH}

4.2.11.1.2 Perfil de decisão B: Impacto socioeconômico

Este perfil de decisão simula os interesses de um/grupo de decisor(es) que está(ão) preocupado(s) com o impacto socioeconômico e político e a criação de emprego causada pela instalação de uma usina de energia elétrica. Esta abordagem enfatiza os critérios relacionados à dimensão socioeconômica, ou seja, vida útil, ganho secundário, empregos na fase de construção e instalação, empregos na fase de fabricação e empregos durante a operação e manutenção. O ranqueamento (*ranking*) final obtida para os pesos dos critérios está apresentado em (b)

$$w_{15} > w_{14} > w_{13} > w_{12} > w_8 > w_{11} > w_3 > w_4 > w_5 > w_6 > w_1 > w_2 > w_7 > w_9 > w_{10} \quad (b)$$

Logo, a partir das informações obtidas com o ordenamento inicial, as alternativas eólica, solar e hidrelétrica (PCH) foram desconsideradas, e o subconjunto de alternativas potencialmente ótimas foi reduzido para {Biomassa (biogás)}, como solução para este perfil de decisão considerado.

4.2.11.1.3 Perfil de decisão C: Desempenho financeiro

Neste perfil de decisão as tecnologias de energia elétrica são avaliadas sob uma perspectiva financeiramente orientada. O(s) decisor (es) no cenário B priorizaria(m) o desempenho financeiro da usina de geração, que é avaliado de acordo com os critérios de custo médio do investimento e custo de O&M, , ou seja, o subconjunto de critérios que representam a dimensão financeira. De acordo com os interesses desse perfil de decisão e o espaço de consequências para cada critério, definido através das tecnologias disponíveis, o ranqueamento (*ranking*) dos pesos dos critérios apresentado em (b) foi considerado ao aplicar o método FITradeoff.

$$w_1 > w_2 > w_3 > w_4 > w_5 > w_6 > w_{12} > w_{11} > w_{13} > w_{14} > w_{15} > w_8 > w_7 > w_9 > w_{10} \quad (b)$$

Após o ordenamento, apenas as alternativas hidrelétricas (PCH) e biomassa (biogás) foram potencialmente ótimas. Após 13 (quatorze perguntas respondidas) o resultado inicial se mantém, as Figura 41 e 42 apresentam os resultados disponíveis pelo FITradeoff nesta fase do processo, onde os desempenhos das alternativas restantes, em cada critério, podem ser comparados. Após mais 1 (uma pergunta), a décima quarta, a biomassa (biogás) já não era considerada uma alternativa concorrente, e a solução possível foi a energia hidrelétrica (PCH).

Figura 41 Resultados do FITradeoff durante a elicitación para o cenário C.

Fonte: Gerado por meio do FITradeoff SAD - Gráfico de barras.

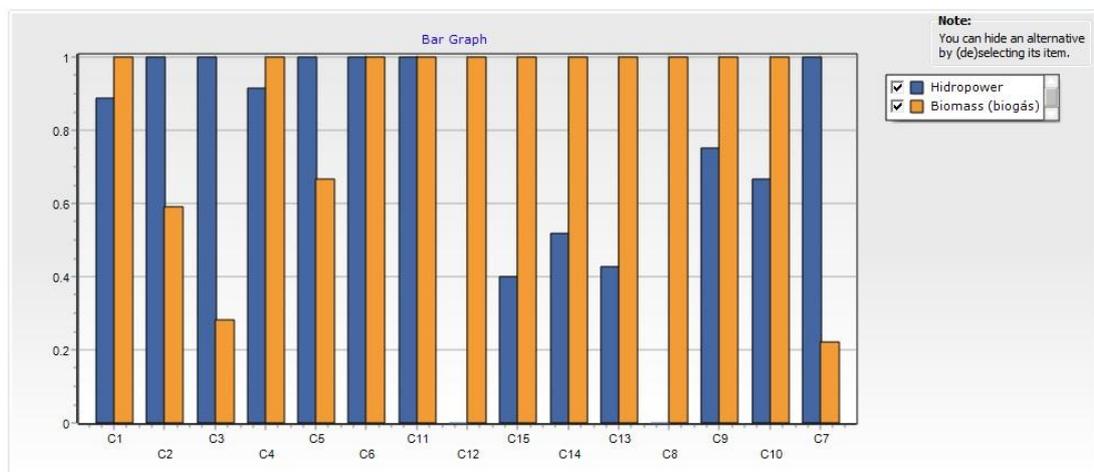
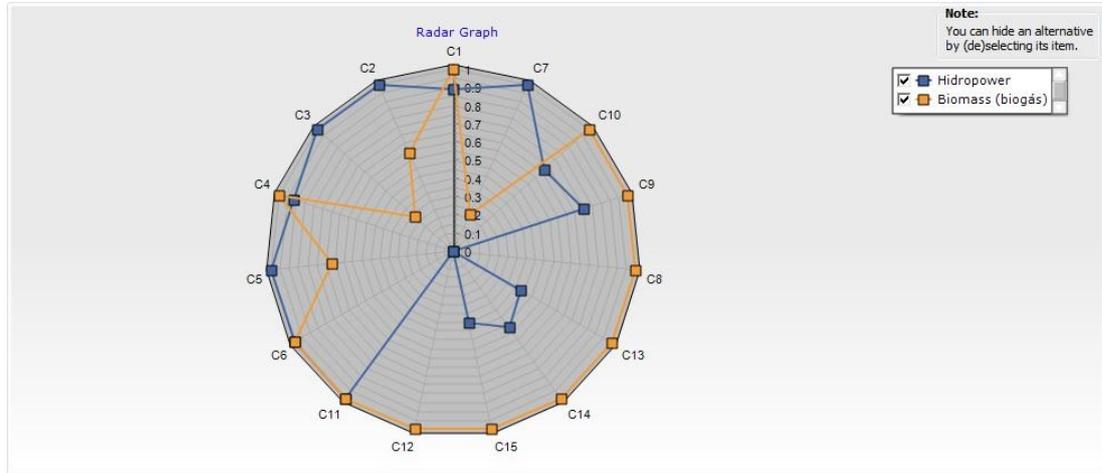


Figura 42 Resultados do FITradeoff durante a elicitação para o cenário C.
 Fonte: Gerado por meio do FITradeoff SAD - Gráfico radar.



4.2.11.1.4 Perfil de decisão D: Impacto socioambiental

As principais preocupações do(s) decisor(es) no grupo D, é o impacto das tecnologias de GREED no meio ambiente e sua interferência na vida das pessoas. O ranqueamento (*ranking*) dos pesos dos critérios é mostrado em (d), onde a dimensão ambiental foi priorizada, precedida das dimensões socioeconômicas, técnicas e financeiras.

$$w_7 > w_{10} > w_8 > w_9 > w_{12} > w_{11} > w_{15} > w_{13} > w_{14} > w_3 > w_4 > w_5 > w_6 > w_1 > w_2 \quad (d)$$

O conjunto inicial de alternativas potencialmente ótimas foi {PCH, Biomassa (biogás) e Solar}. Com duas perguntas respondidas, a energia Solar (FV) já não era considerada uma alternativa concorrente. Após 23 (vinte e cinco perguntas respondidas), a alternativa de energia hidrelétrica (PCH) foi apontada como solução do problema para o cenário D.

4.2.11.2 Recomendações e análise de sensibilidade

4.2.11.2.1 Resultados

A Tabela 23 resume os resultados encontrados pelo FITradeoff para cada grupo e seu respectivo perfil de decisão. Para cada solução, existe um espaço associado de pesos em que

cada peso de critério é limitado por um valor mínimo e máximo. Esse espaço de pesos foi reduzido à medida que mais informações, na forma de declarações de preferência, foram obtidas. A coluna “Número de questões respondidas” na Tabela 22 mostra quantas perguntas foram respondidas, ou seja, quantas declarações de preferência foram dadas, a fim de alcançar as soluções na terceira coluna.

Tabela 22 Resultados encontrados para cada perfil de decisão com o auxílio do método FITradeoff – módulo escolha.

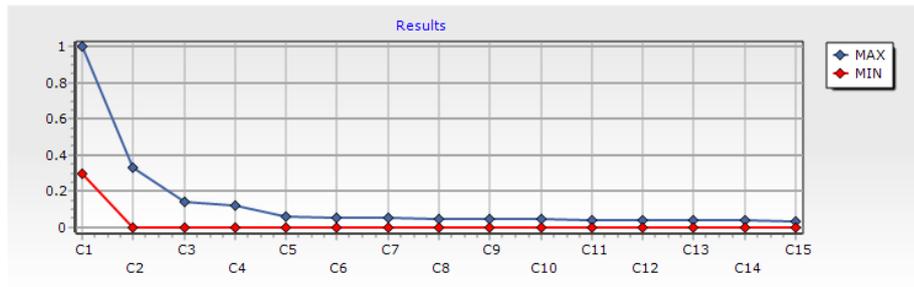
Perfil de Decisão	Nº de Questões Respondidas	Recomendação
A – Geração de Energia	4	Hidrelétrica (PCH)
B – Socioeconômico	0	Biomassa (biogás)
C - Desempenho Financeiro	14	Hidrelétrica (PCH)
D - Socioambiental	25	Hidrelétrica (PCH)

Para comprovar a versatilidade do método FITradeoff quanto a redução do esforço cognitivo por parte do(s) decisor(es), tome-se como referencia o perfil de decisão D (Socioambiental), para o qual o FITradeoff requereu 25 (vinte e cinco) perguntas ao(s) decisor(es) para encontrar a recomendação da tecnologia Hidrelétrica (PCH), caso fosse aplicado um outro procedimento de elicitación, que utilize duas perguntas de aproximação e mais uma pergunta para obtenção da indiferença, seriam necessárias $3(15 - 1) = 42$ perguntas para a obtenção da solução. Ou seja, 17 (dezesete) perguntas a mais, exigindo muito maior esforço cognitivo por parte do(s) decisor(es).

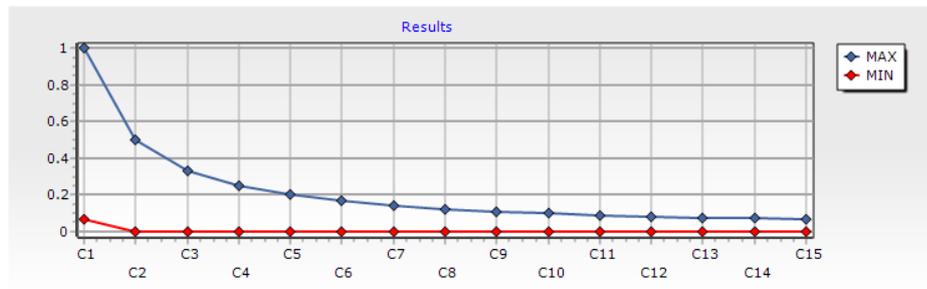
A Figura 43 mostra os intervalos de valores viáveis para cada ponderação de critério para cada perfil de decisão.

Figura 43 Intervalos de valores dos pesos viáveis para o espaço de pesos quando a solução foi encontrada: Perfis de decisão (a) A- Geração de Energia; (b) B- Socioeconômico; (c) C- Financeiro; (d) D- Socioambiental. Fonte: gerado por meio do FITradeoff SAD

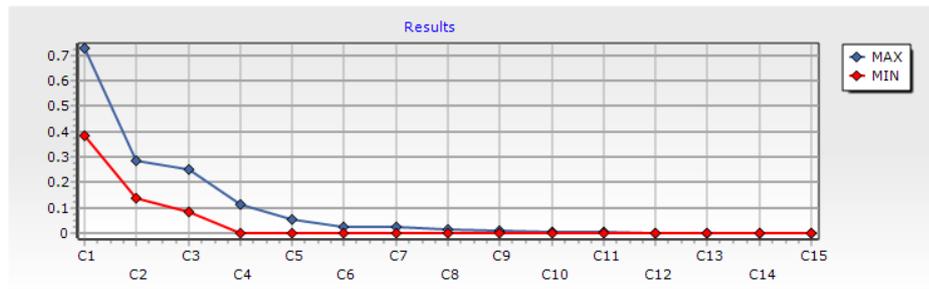
(a)



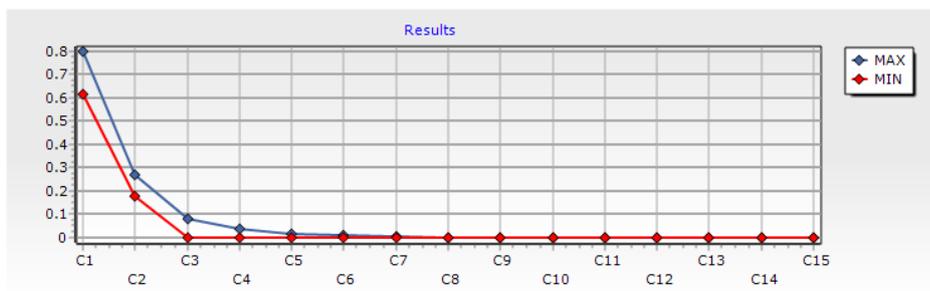
(b)



(c)



(d)



A partir da Tabela 23 e da Figura 43, comprova-se que, a medida que as perguntas são respondidas no processo de elicitación flexível do FITradeoff, os limites mínimo e máximo para cada peso de critério são alterados de tal forma que o espaço de pesos é reduzido. As linhas, nos gráficos - representam os valores máximos e mínimos que a constante de escala de cada critério poderia assumir.

4.2.11.2.2 Análise de sensibilidade

Os resultados obtidos pela aplicação de FITradeoff levam à terceira fase da estrutura, na qual a robustez dos resultados encontrados é verificada por meio de uma análise de sensibilidade.

Ao comparar a Tabela 23 com a Figura 46, pode-se notar que existe uma relação entre o número de perguntas respondidas para encontrar uma solução para cada cenário e os intervalos de valores viáveis para os pesos dos critérios. À medida que as perguntas são respondidas no processo de elicitación flexível do FITradeoff, os limites mínimo e máximo para cada peso critério são alterados de tal forma que o espaço de pesos é reduzido.

É necessária uma análise de sensibilidade para verificar a robustez dos resultados encontrados para cada cenário quando os valores de desempenho (parâmetros) das alternativas de geração elétrica, nos critérios, são ligeiramente alterados. Isso é feito variando os valores dos parâmetros em $\pm x\%$ dentro dos limites do espaço de conseqüências original para cada critério, mantendo os intervalos de valores de pesos viáveis apresentados na Figura 46. Para cada cenário, a solução é simulada 100.000 vezes. A Tabela 23 mostra os resultados encontrados, onde cada célula corresponde à porcentagem com que uma tecnologia foi encontrada nas soluções simuladas.

Tabela 23 Resultados da análise de sensibilidade

Perfis de decisão	Solução Original	% da Tecnologia de Geração de Energia Elétrica na Solução Simulada			
		Eólica	Solar	Hidrelétrica (PCH)	Biomassa (biogás)
A	Hidrelétrica (PCH)	0	0	100	0
B	Biomassa (biogás)	0	0	0	100
C	Hidrelétrica (PCH)	0	0	97,92	2,08
D	Hidrelétrica (PCH)	0	0	87,05	12,95

Na Tabela 23, para alguns perfis de decisão, como A, a tecnologia recomendada por FITradeoff permanece inalterada em todos os casos simulados. Assim, para este perfil de decisão, a solução mostrou-se robusta, uma vez que a Hidrelétrica permaneceu como a única solução em 100% dos casos simulados, e não havia outras soluções equivalentes competindo com ela, o mesmo ocorre com o cenário B, no qual a Biomassa (biogás) permaneceu como solução única em 100% dos casos. Para os outros perfis, como o perfil C, a tecnologia original (Hidrelétrica - PCH) permanece em 97,72 % de todos os casos simulados, mas a solução também inclui uma tecnologia adicional, a biomassa (biogás) para 2,08 % dos casos. Para o perfil de decisão D, a situação anterior se repete, diferindo apenas quanto aos percentuais de cada tecnologia, ou seja. Hidrelétrica (PCH) permanece em 87,05 % de todos os casos simulados, mas a biomassa (biogás) foi considerada uma solução equivalente para 12,95 % dos casos.

4.2.12 Aplicação do método FITradeoff – módulo ordenação

A aplicação do módulo ordenação do FITradeoff SAD (FREJ, DE ALMEIDA e COSTA, 2017) complementa a análise em voga, desde que, permite que seja conhecida a ordem de recomendação para as alternativas. Esta informação permite outro contexto favorável a avaliação das possibilidades por parte do(s) decisor(es), desde que, apresenta o ranqueamento (*ranking*) das alternativas, permitindo que seja verificada a posição de cada uma com relação as demais. A partir daí, por exemplo, escolhas entre tecnologias proximamente ordenadas podem ser avaliadas e escolhidas com base em outros interesses, envolvidos, ou mesmo, alguma tecnologia que, embora não tenha sido a escolhida inicialmente, mas mesmo assim era considerada como opção, por sua colocação em último lugar (pior posição), seria desconsiderada com total segurança.

Para esta seção permanecem os conceitos de enquadramento e características da GREED apresentados no item 4.2.10.

4.2.12.1 Elicitação

Nesta seção serão mantidos os mesmos grupos de interesse, com seus respectivos perfis de decisão, desde que se trata da mesma problemática e o que se deseja com a aplicação do módulo de ordenação do FITradeoff é verificar a posição das demais tecnologias com relação a alternativa recomendada. Para cada grupo, o processo de elicitação do FITradeoff

foi realizado com base em dados da matriz de decisão (ver Tabela 21), simulando os interesses específicos dos diferentes grupos de influência do problema. Cada grupo possui um perfil de decisão próprio, portanto, uma estrutura de preferências diferente foi assumida ao classificar os pesos dos critérios e expressar preferências, levando a resultados diferentes.

4.2.12.1.1 Perfil de decisão A: Geração de energia elétrica

O ranking dos pesos dos critérios foi obtido considerando o espaço de conseqüências para cada critério e a priorização das dimensões adotada. O ranqueamento (*ranking*) final está apresentado em (a), onde w_i corresponde ao peso de um critério C_i na Tabela 21.

$$w_3 > w_4 > w_6 > w_5 > w_7 > w_8 > w_9 > w_{10} > w_{11} > w_{12} > w_{13} > w_{14} > w_{15} > w_1 > w_2 \quad (a)$$

Após o ranqueamento (*ranking*) dos critérios (a), embora já haja uma forte redução no espaço de pesos, não foi possível chegar a qualquer conclusão sobre o ordenamento das alternativas, de modo que o procedimento de elicitação flexível continuou com as perguntas para o(s) decisor(es). Neste processo intenta-se, por meio das declarações do(s) decisor(es), chegar a um espaço reduzido de pesos, cujas possíveis variações do vetor de pesos dos critérios concordem em todas as posições das alternativas na classificação. Após a quarta questão, o modelo mostrou que, embora não houvesse uma definição completa da classificação, já havia a definição da Hidrelétrica (PCH) na primeira posição, e que a Solar não poderia alcançar a segunda posição, como mostra a Figura 44. Depois de 15 (quinze) perguntas, as informações foram suficientes para confirmar que a Solar certamente estaria na última posição do ranking, de acordo com a Figura 45.

Figura 44 Informação parcial disponível após 4 (quatro) perguntas para o(s) decisor(es) com perfil de decisão tipo A. Imagem gerada pelo FITradeoff SAD.

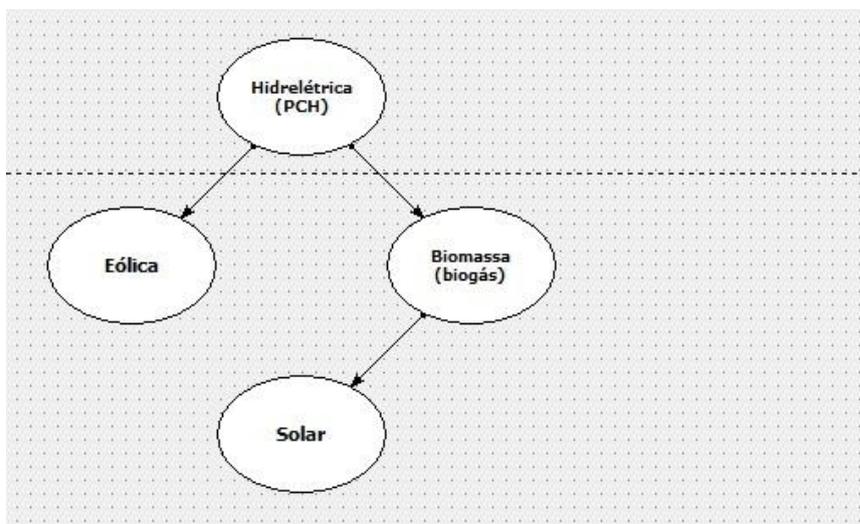
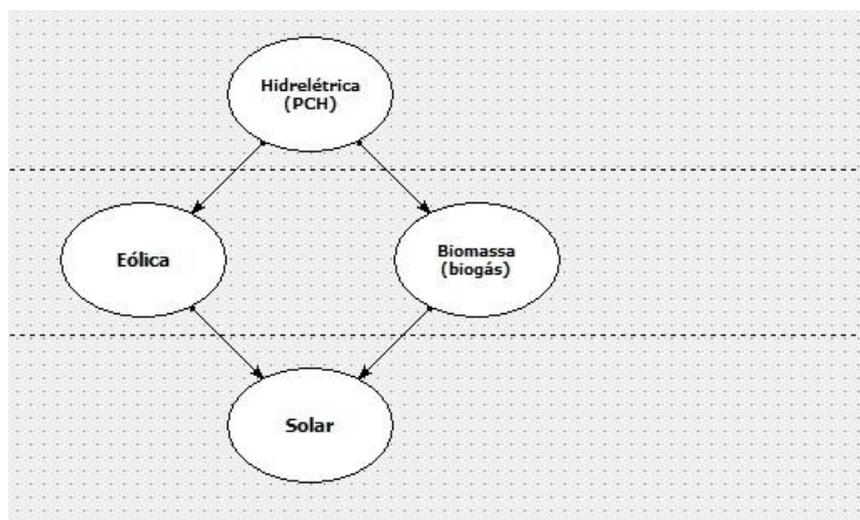
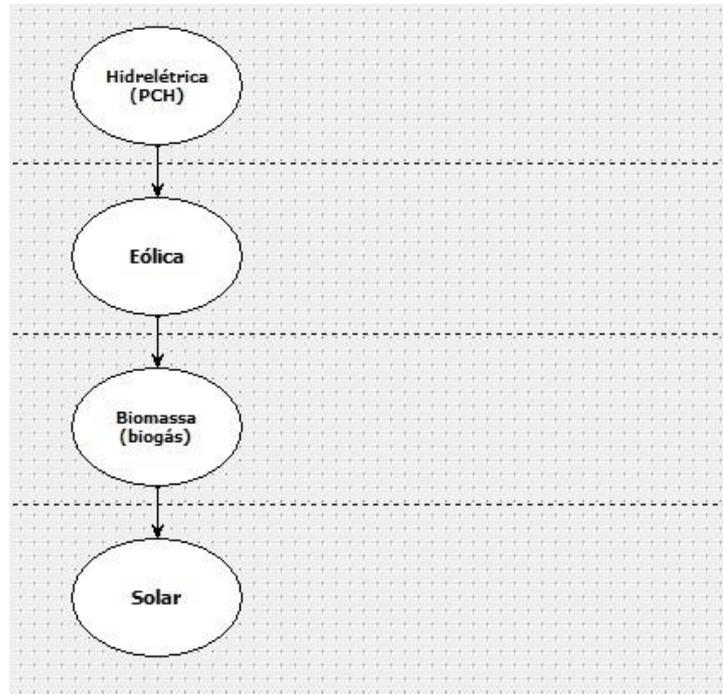


Figura 45 Informação parcial disponível após 15 (quinze) perguntas para o(s) decisor(es) com perfil de decisão tipo A. Imagem gerada pelo FITradeoff SAD.



Após 25 (vinte e cinco perguntas) para o(s) decisor(es) a ordem completa é estabelecida, com a Biomassa em terceiro lugar e a Solar em último lugar como mostra a Figura 46.

Figura 46 Ordem completa para as tecnologias de geração de energia elétrica após 25 (vinte e cinco) perguntas para o(s) decisor(es) com perfil de decisão tipo A. Imagem gerada pelo FITradeoff SAD.



4.2.12.1.2 Perfil de decisão B: Impacto socioeconômico

Esta abordagem enfatiza os critérios relacionados à dimensão socioeconômica, ou seja, vida útil, ganho secundário, empregos na fase de construção e instalação, empregos na fase de fabricação e empregos durante a operação e manutenção. O ranqueamento (*ranking*) final obtido para os pesos dos critérios está apresentado em (b)

$$w_{15} > w_{14} > w_{13} > w_{12} > w_8 > w_{11} > w_3 > w_4 > w_5 > w_6 > w_1 > w_2 > w_7 > w_9 > w_{10} \quad (b)$$

Após o ordenamento dos pesos, a Biomassa já poderia ser identificada como a melhor alternativa, mas não havia definição sobre a posição das outras alternativas, como mostrado na Figura 47. Mais informações foram necessárias do(s) decisor(es). Depois de 14 (catorze) perguntas, a Hidrelétrica (PCH) já estava definida como a última na classificação, com Eólica e Solar permanecendo para definir as posições intermediárias, como mostrado na Figura 48.

Depois de quarenta e cinco perguntas, Eólica ficou em segundo lugar e Solar terceiro (Figura 49).

Figura 47 Informações disponíveis após o ranqueamento (ranking) de critérios para o(s) decisor(es) com perfil de decisão tipo B. Imagem gerada pelo FITradeoff SAD.

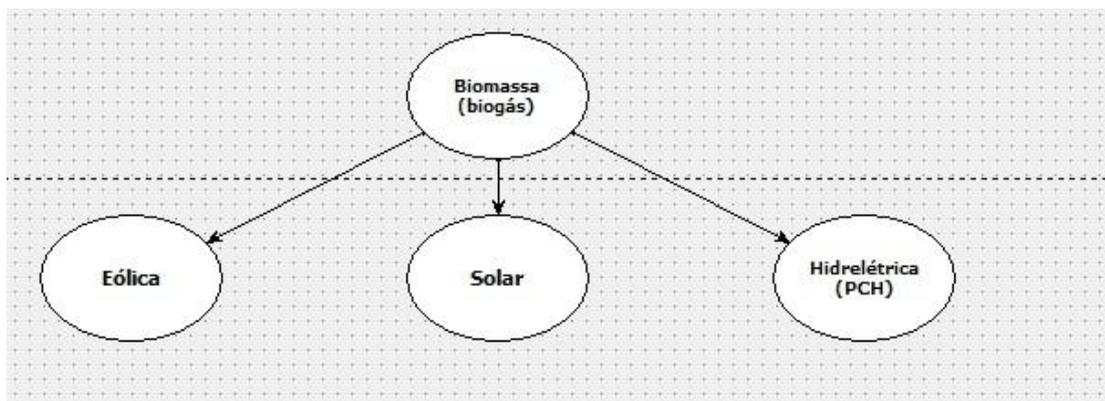


Figura 48 Informação parcial disponível depois de quatorze perguntas para o(s) decisor(es) com perfil de decisão tipo B. Imagem gerada pelo FITradeoff SAD.

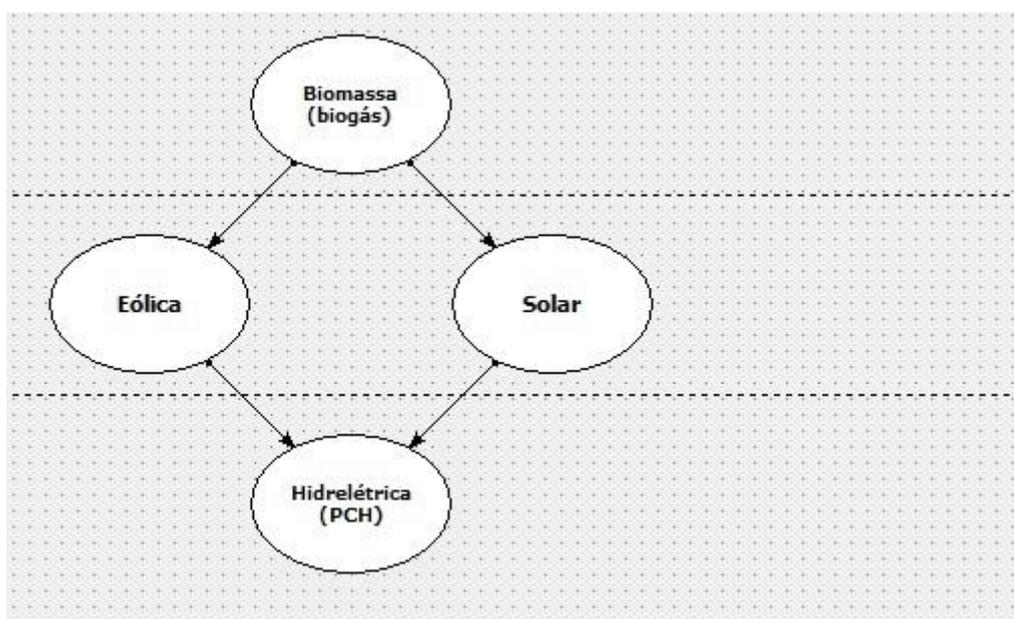
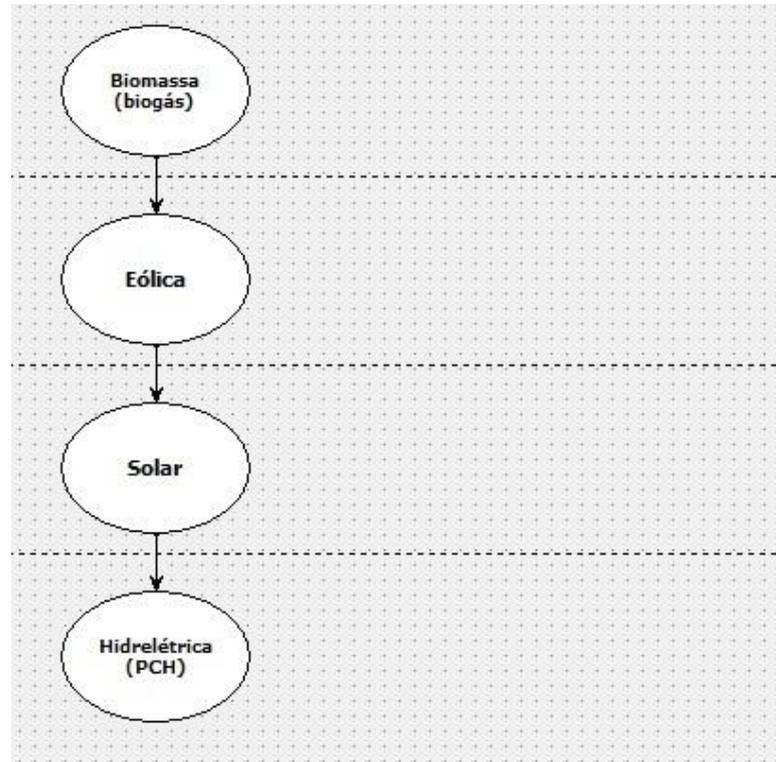


Figura 49 Ordem completa para as tecnologias de geração de energia elétrica após 45 (quarenta e cinco) perguntas para o(s) decisor(es) com perfil de decisão tipo B. Imagem gerada pelo FITradeoff SAD.



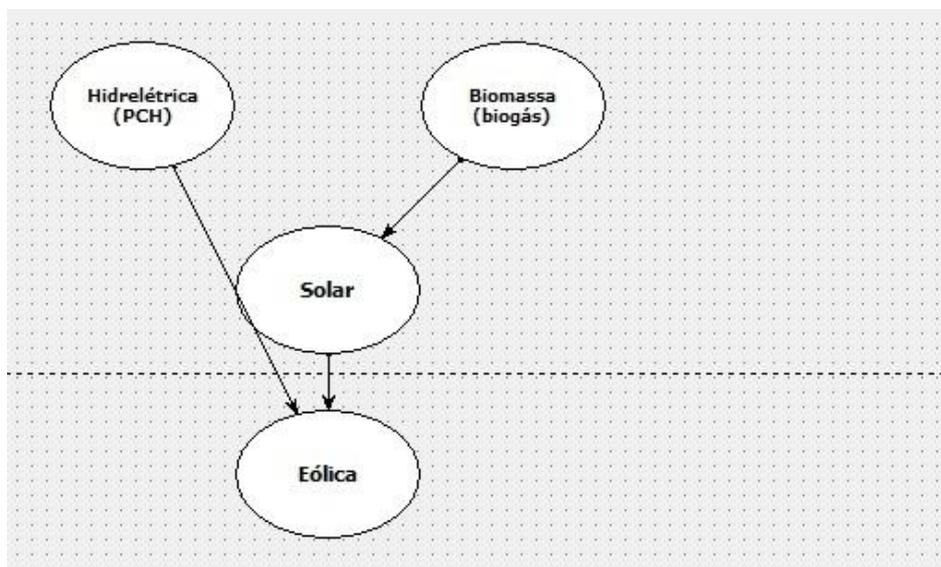
4.2.12.1.3 Perfil de decisão C: Desempenho financeiro

De acordo com os interesses desse cenário e o espaço de consequências para cada critério definido através das tecnologias disponíveis, o ranqueamento (*ranking*) dos pesos de critérios apresentado em (c) foi considerado ao aplicar o método FITradeoff.

$$w_1 > w_2 > w_3 > w_4 > w_5 > w_6 > w_{11} > w_{12} > w_{15} > w_{14} > w_{13} > w_8 > w_9 > w_{10} > w_7 \quad (c)$$

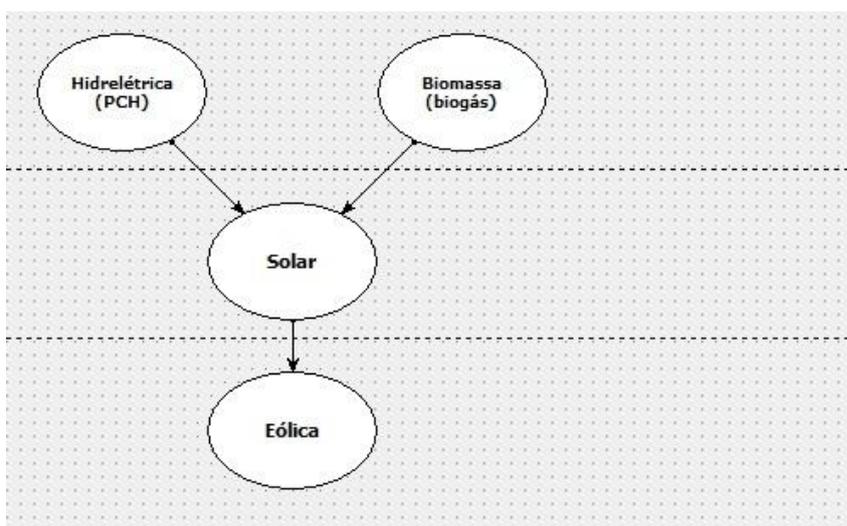
Depois do ordenamento dos critérios, não havia informação suficiente sobre a classificação das alternativas. A única conclusão segura era de que a biomassa era preferível ao solar e que o solar era preferível à eólica, de modo que as posições das quatro alternativas ainda estavam indefinidas. O que poderia ser concluído a partir das informações obtidas é que a Solar e a Eólica não excederiam a segunda e a terceira posições, respectivamente. A Figura 50 mostra a informação parcial após o ordenamento dos critérios.

Figura 50 Informações disponíveis após o ranqueamento (ranking) de critérios para o(s) decisor(es) com perfil de decisão tipo C. Imagem gerada pelo FITradeoff SAD.



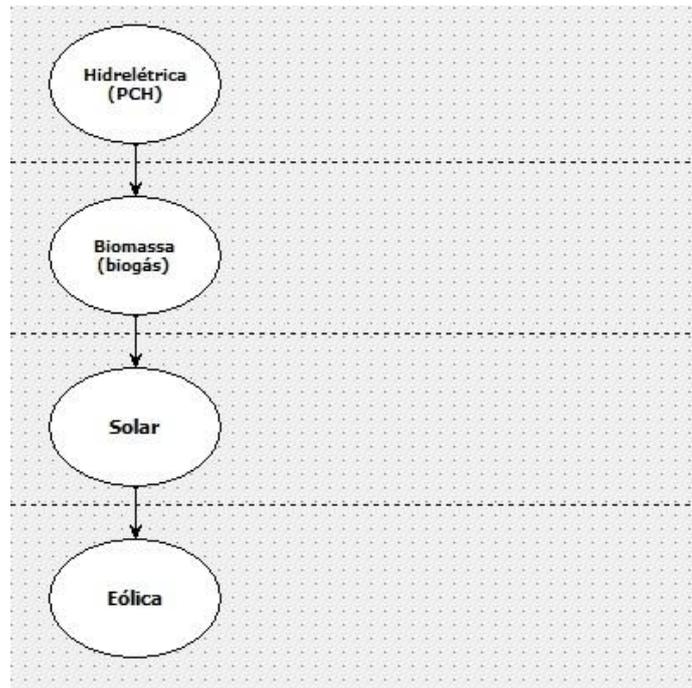
Foram realizadas 4 (quatro) perguntas ao(s) decisor(es) mantendo-se uma indefinição quanto as tecnologias Hidrelétrica (PCH) e Biomassa (biogás) como mostra a Figura 51.

Figura 51 Informação parcial disponível depois de 4 quatro perguntas para o(s) decisor(es) com perfil de decisão tipo C. Imagem gerada pelo FITradeoff SAD.



Após 14 questões, além daquelas do ranking de critérios, obteve-se a ordem das alternativas, com Hidrelétrica (PCH) na primeira posição e Biomassa (biogás) na segunda (Figura 52). Como se pode verificar, a energia Solar ficou em terceiro e a Eólica em último.

Figura 52 Ordem completa para as tecnologias de geração de energia elétrica após 14 (quatorze) perguntas para o(s) decisor(es) com perfil de decisão tipo C. Imagem gerada pelo FITradeoff SAD.



4.2.12.1.4 Perfil de decisão D: Impacto socioambiental

O ranqueamento (*ranking*) dos pesos dos critérios é apresentada em (d), onde a dimensão ambiental foi priorizada, precedida das dimensões socioeconômicas, técnicas e financeiras.

$$w_7 > w_{10} > w_8 > w_9 > w_{12} > w_{11} > w_{15} > w_{13} > w_{14} > w_3 > w_4 > w_5 > w_6 > w_1 > w_2 \quad (d)$$

As informações obtidas após o ordenamento dos pesos dos critérios foram insuficientes para se obter qualquer conclusão sobre a ordem das alternativas, exigindo uma maior interação com o(s) decisor(es) por meio do FITradeoff SSD. Depois de 6 (seis) perguntas ainda haviam

poucas informações, mas o suficiente para definir que a energia Solar foi confirmado na última posição e que a Hidrelétrica (PCH) era preferível a Eólica, de acordo com a Figura 53. Após 14 (quatorze perguntas), a Eólica foi confirmada na terceira posição, já que a Biomassa (biogás) também foi preferível à Eólica, como mostra a Figura 54.

Figura 53 Informação parcial disponível após 6 (seis) perguntas ao(s) decisor(es) com perfil de decisão tipo D. Imagem gerada pelo FITradeoff SAD

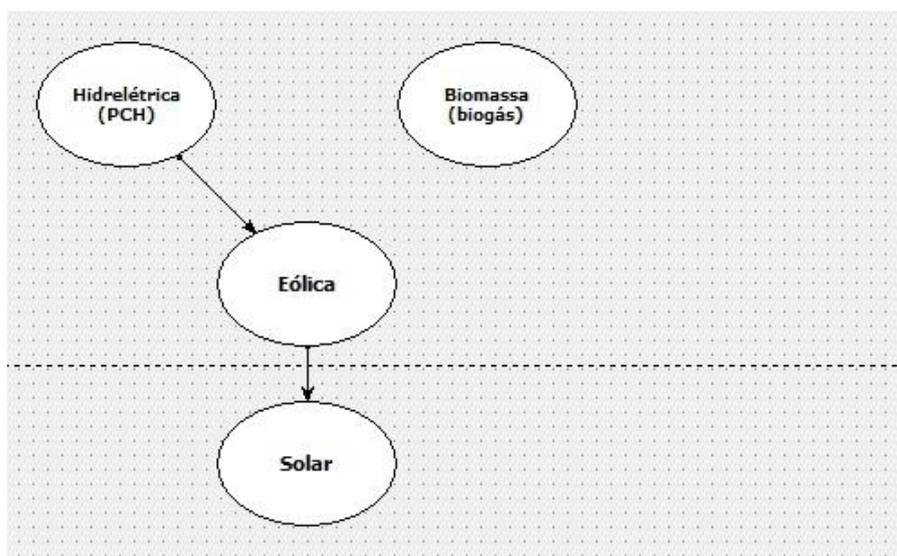
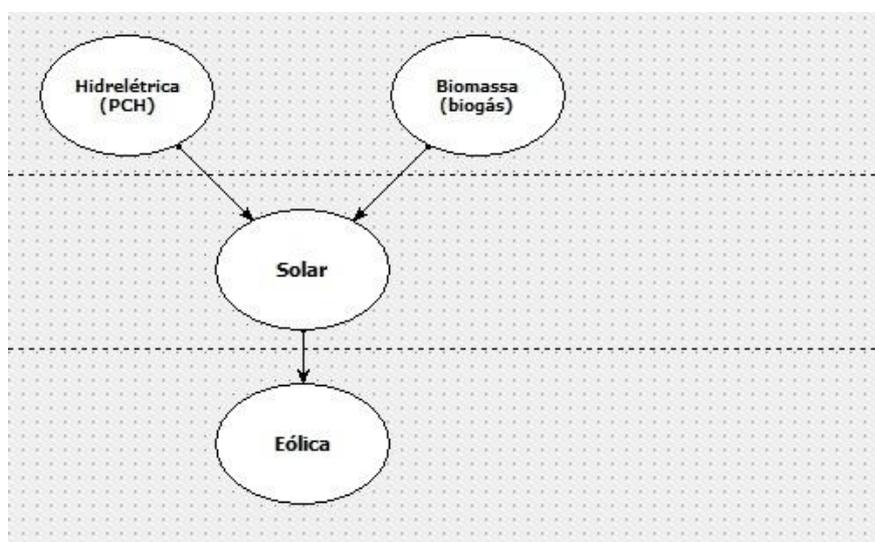
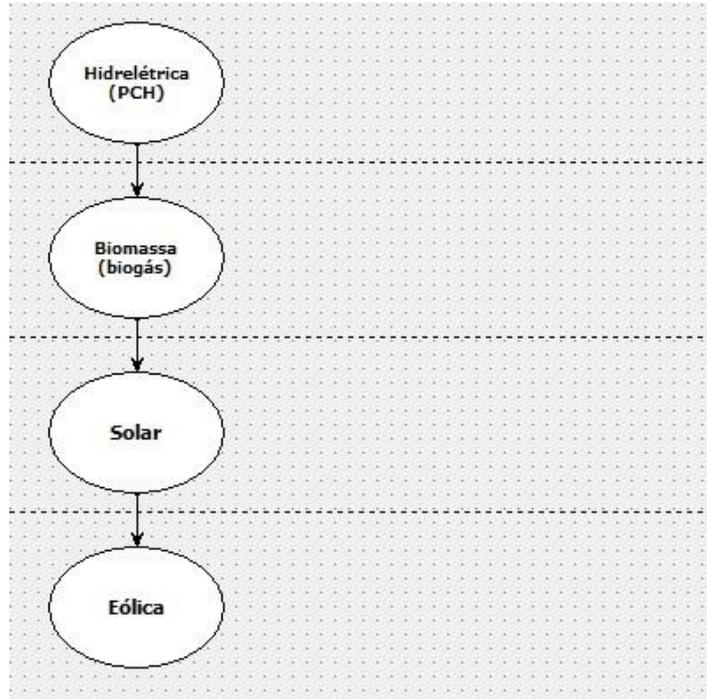


Figura 54 Informação parcial disponível após 14 (catorze) perguntas ao(s) decisor(es) com perfil de decisão tipo D. Imagem gerada pelo FITradeoff SAD.



Após 24 (vinte e quatro questões), as informações coletadas foram suficientes para estabelecer a ordem completa, de modo que a PCH foi a primeira e a Biomassa a segunda. Eólica e Solar ficaram em terceiro e quarto lugares respectivamente (Figura 55).

Figura 55 Ordem completa para as tecnologias de geração de energia elétrica após 24 (vinte e quatro) perguntas para o(s) decisor(es) com perfil de decisão tipo D. Imagem gerada pelo FITradeoff SAD.



4.2.13 Recomendações

A Tabela 23 resume os resultados obtidos por meio do FITradeoff para cada grupo e seu respectivo perfil de decisão. Para cada solução, existe um espaço associado de pesos em que cada peso de critério é limitado por um valor mínimo e máximo. Esse espaço de pesos foi reduzido à medida que mais informações, na forma de declarações de preferência, foram obtidas. A coluna “Número de questões respondidas” na Tabela 56 mostra quantas perguntas foram respondidas, ou seja, quantas declarações de preferência foram dadas, a fim de alcançar as soluções na terceira coluna. Como era esperado as recomendações obtidas no módulo ordenação, para as melhores soluções, são as mesmas que foram obtidas com a aplicação do módulo escolha do FITradeoff SSD e que constam na Tabela 24.

Tabela 24 Resultados encontrados para cada perfil de decisão com o auxílio do método FITradeoff – módulo ordenação.

Perfil de Decisão	Nº de Questões Respondidas	Recomendação
A – Geração de Energia	25	Hidrelétrica (PCH)
B – Impacto Socioeconômico	45	Biomassa (biogás)
C- Impacto Financeiro	14	Hidrelétrica (PCH)
D - Impacto Ambiental	24	Hidrelétrica (PCH)

4.2.14 Discussão dos resultados

Com a aplicação do modelo MCDM/A proposto, foi utilizado o método FITradeoff para avaliar quatro tecnologias de geração elétrica, sob quatro perfis de decisão, que simulam os interesses específicos de diferentes grupos de pressão, assumindo que cada um deles possui estruturas de preferência diferentes. Para o perfil de decisão A, o foco estava na produção de energia e no desempenho operacional das opções de geração elétrica, e, sob a estrutura de preferência o(s) decisor(es) com essa perspectiva, o FITradeoff recomendou a energia hidrelétrica (PCH). Embora, seja a fonte de eletricidade predominante no Brasil, devido ao país ter imensos recursos hídricos aliados às ações e estratégias adotadas ao longo da história do setor energético brasileiro, a experiência com pequenas e microcentrais hidrelétricas, ainda, pode ser considerada muito incipiente. O resultado obtido para este perfil de decisão mostrou-se robusto de acordo com a análise de sensibilidade. A ordenação final mostrou a seguinte sequência: 1º hidrelétrica (PCH); 2º eólica; 3º biomassa (biogás); 4º solar.

O perfil de decisão B prioriza as vantagens socioeconômicas resultantes do investimento em tecnologia de geração elétrica. Nas condições consideradas, a solução encontrada por meio do FITradeoff foi a biomassa. Isso pode ser explicado na prática pelo fato dessa opção gerar (em média) mais empregos e renda em toda a cadeia produtiva e por apresentar a possibilidade de ganhos secundários. Isso promove um ciclo virtuoso de crescentes níveis de consumo e qualidade de vida, inclusão social, gerando mais atividades econômicas e impedindo o êxodo rural. A solução encontrada é robusta de acordo com a

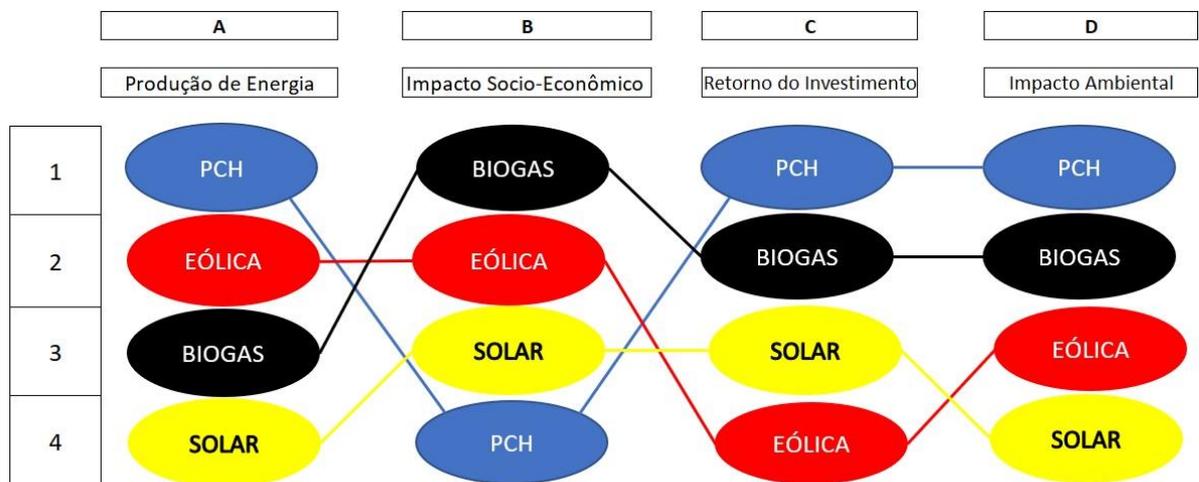
análise de sensibilidade realizada. A ordenação final mostrou a seguinte sequência: 1º biomassa (biogás); 2º eólica; 3º solar; 4º hidrelétrica (PCH).

Sob a perspectiva financeiramente orientada do perfil de decisão C, a energia hidrelétrica (PCH). foi recomendada como solução por meio do FITradeoff. A análise de sensibilidade mostrou que a alternativa biomassa (biogás) foi considerada como uma solução equivalente em 2,08% dos casos, variando levemente os valores de desempenho das alternativas nos critérios. A ordenação final mostrou a seguinte sequência: 1º hidrelétrica (PCH); 2º biomassa (biogás); 3º solar; 4º eólica.

Quando o foco foi voltado para minimizar o impacto socioambiental (perfil de decisão D) causado pela geração de eletricidade, a energia hidrelétrica (PCH), foi recomendada por meio do FITradeoff. No entanto, a análise de sensibilidade mostrou que a biomassa (biogás) é uma solução equivalente em 12,95% dos casos, indicando que o(s) decisor(es) no perfil de decisão D poderiam dar, também, alguma atenção a esta opção tecnológica. A ordenação final mostrou a seguinte sequência: 1º hidrelétrica (PCH); 2º biomassa (biogás); 3º eólica; 4º Solar.

Ao analisar, conjuntamente, os resultados para os quatro perfis de decisão, a hidrelétrica (PCH) é considerada a melhor opção para três grupos (A, C e D), enquanto a opção biomassa (biogás) é a melhor para o grupo B. Embora a opção de hidrelétrica (PCH) seja considerada a melhor com a maior frequência, é considerada a pior para o perfil de decisão B, enquanto a opção biomassa (biogás) aparece como a melhor apenas uma vez, mas para nenhum grupo é mal avaliada, como mostra a Figura 56.

Figura 56 Comparação entre as classificações das alternativas para cada um dos perfis de decisão. Fonte: elaborada pelo autor.



A Figura 56 permite também avaliar as estruturas de preferência de cada perfil de decisão que estabelecem as escolhas que levam aos resultados ilustrados. Como exemplo pode-se verificar que: Os perfis de decisão C e D apresentaram resultados que demonstram uma certa coerência entre suas estruturas de preferência desde que, elegeram as mesmas tecnologias, Hidrelétrica (PCH) e Biomassa (biogás), com as mesmas prioridades, primeiro e segundo lugar, respectivamente, divergindo apenas quanto a penúltima e última colocação, no caso Eólica e Solar (FV). O que permite a conclusão de que os grupos de pressão com os respectivos perfis de decisão C e D possuem interesses comuns que podem ser considerados em uma tomada de decisão sobre um planejamento energético no que se refere à GREED. Por outro lado os resultados dos perfis de decisão A e B demonstram que suas estruturas de preferência possuem pouca aderência, desde que, a escolha primeira de um (perfil A) é a última do outro (perfil B) ou, a escolha primeira do outro (perfil B) é a penúltima do primeiro (perfil A). Neste caso tem-se uma indicação de uma maior diferença entre as estruturas de preferência que pode resultar do fato de que são poucos os interesses comuns e, portanto maiores cuidados devem ser considerados numa tomada de decisão.

Como analisado no item 4.4.3, as aplicações de GREED, no âmbito da resolução normativa ANEEL nº 482/687, apresentam a predominância absoluta da energia solar (FV), no entanto o modelo desenvolvido, em comparação com as demais tecnologias, recomendou a energia solar como penúltima alternativa para os grupos de interesse B - impacto socioeconômico e C - retorno do investimento e, como última, para os grupos A - geração de energia elétrica e D - impacto ambiental.

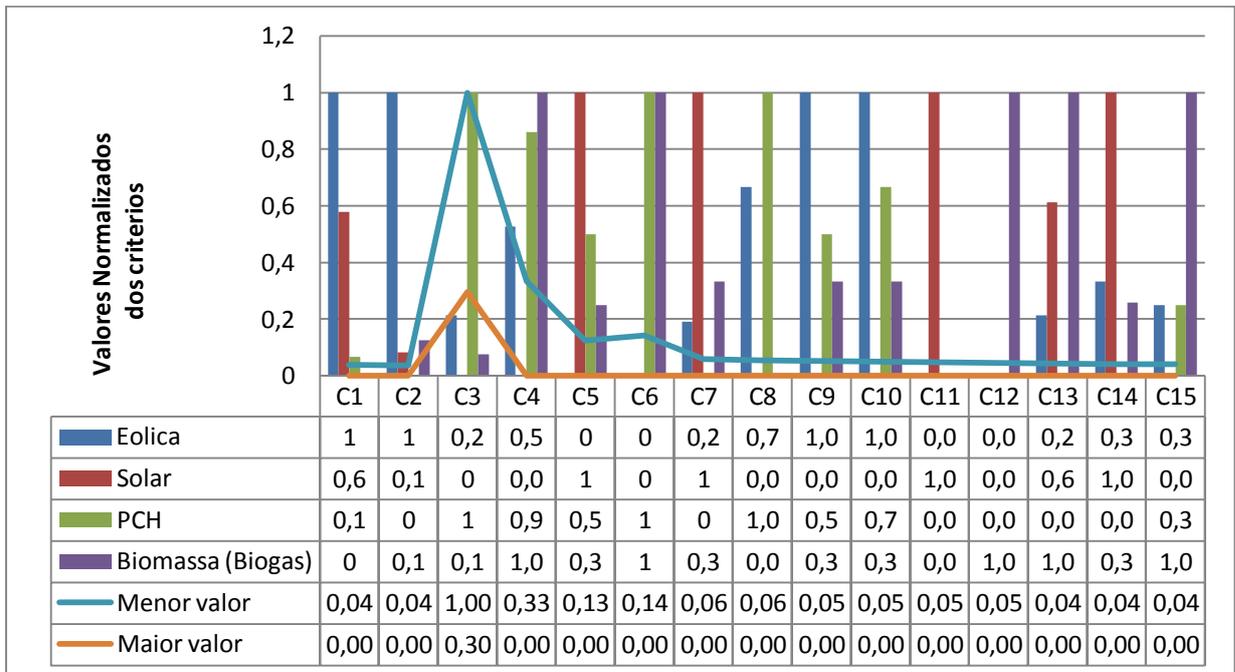
As figuras, a seguir, auxiliam na verificação da situação da tecnologia Solar (FV), com relação às demais tecnologias, para cada perfil de decisão considerado. Nos gráficos são apresentados os valores normalizados das consequências dos critérios (gráfico de barras) e o subespaço dos pesos (gráficos de linha) gerado por meio do FITradeoff SAD, onde, para cada critério verifica o menor e o maior valor da constante de escala (peso) obtidos para cada critério.

Para o grupo com perfil de decisão A - geração de energia elétrica foi construído o gráfico da Figura 57, por meio do qual é possível verificar que para os critérios em que a tecnologia Solar (FV) possui as consequências de maior valor (por exemplo: critérios C5, C7, C11 e C14), as faixas de pesos (menor - maior), correspondentes, são muito baixas. A melhor situação é para a consequência do critério C5, onde se tem uma faixa entre 0 e 0,13 para os pesos. Por outro lado para as melhores faixas de pesos elicitadas, as consequências

dos critérios para a tecnologia Solar (FV) são de valor muito baixo. Isto levou a tecnologia Solar (FV) a ser classificada como ultima opção.

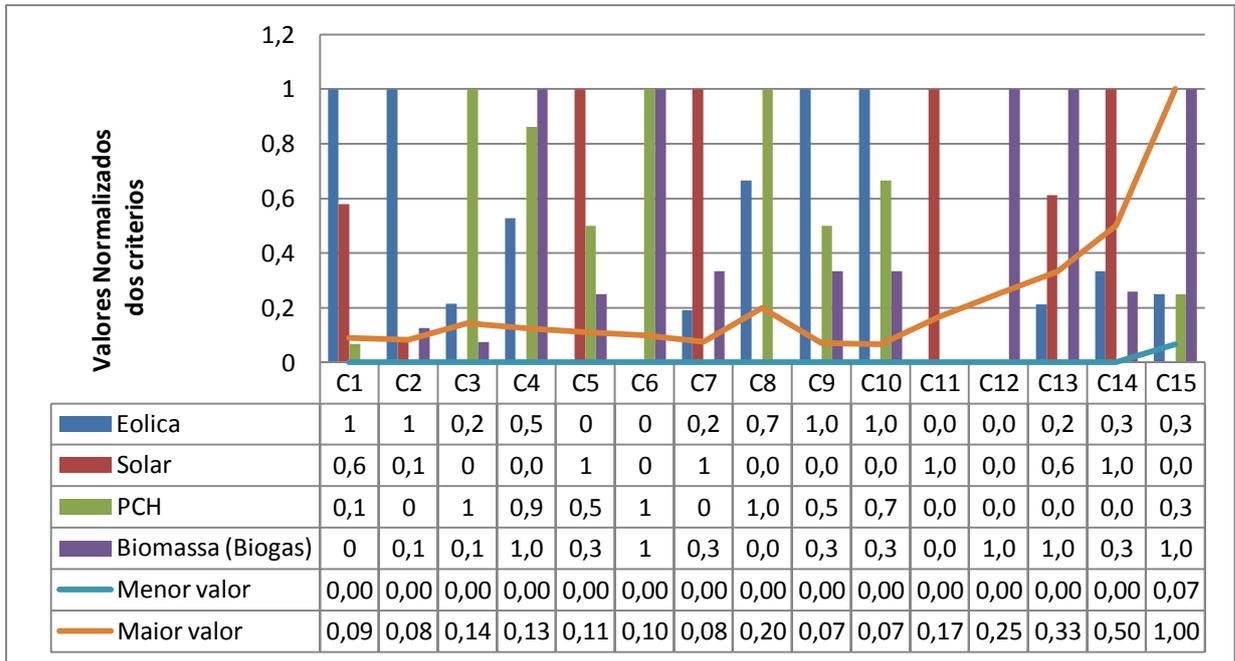
Figura 57 Perfil de decisão do grupo A – Geração de energia elétrica.

Fonte: elaborada pelo autor.



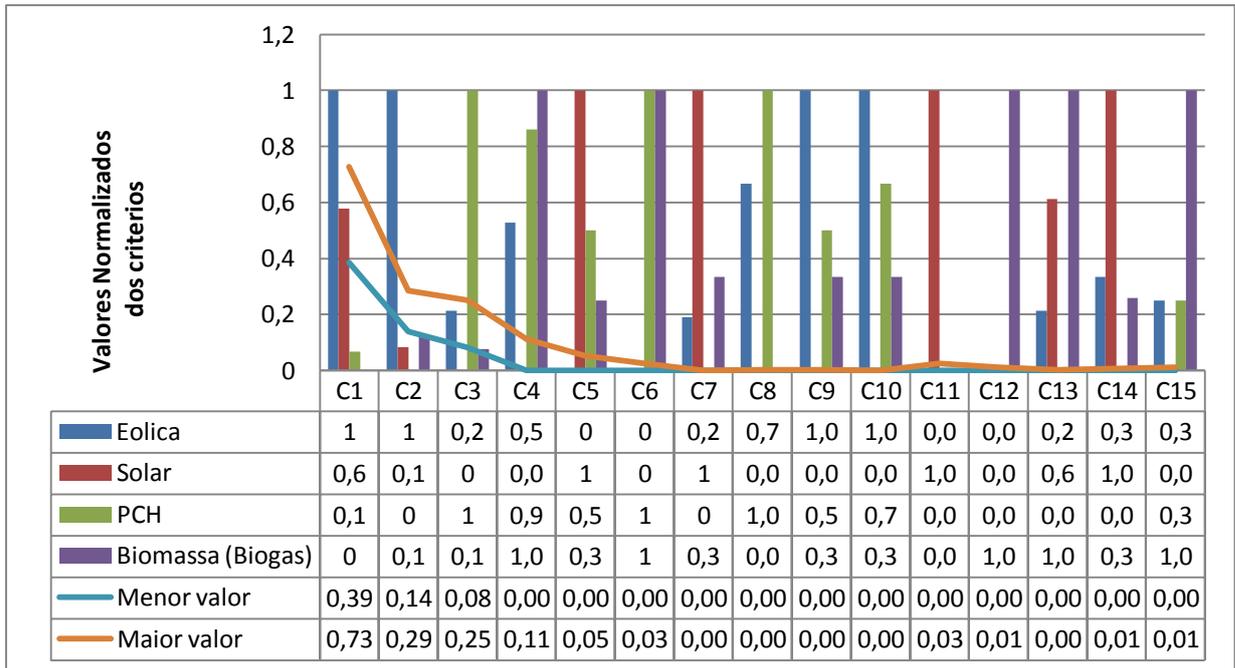
O gráfico da Figura 58 apresenta os valores normalizados das consequências dos critérios (gráfico de barras) e o subespaço dos pesos (gráficos de linha) gerado por meio do FITradeoff SAD para o grupo com perfil de decisão B - impacto socioeconômico. Neste caso a tecnologia Solar (FV) possui alguns critérios com consequências de maior valor submetidas a faixas de pesos melhores, como é o caso dos critérios C14, C13 e C11, mas que ainda levou a sua classificação como penúltima opção, à frente apenas da tecnologia Hidrelétrica (PCH).

Figura 58 Perfil de decisão do grupo B – Impacto socioeconômico.
Fonte: elaborada pelo autor.



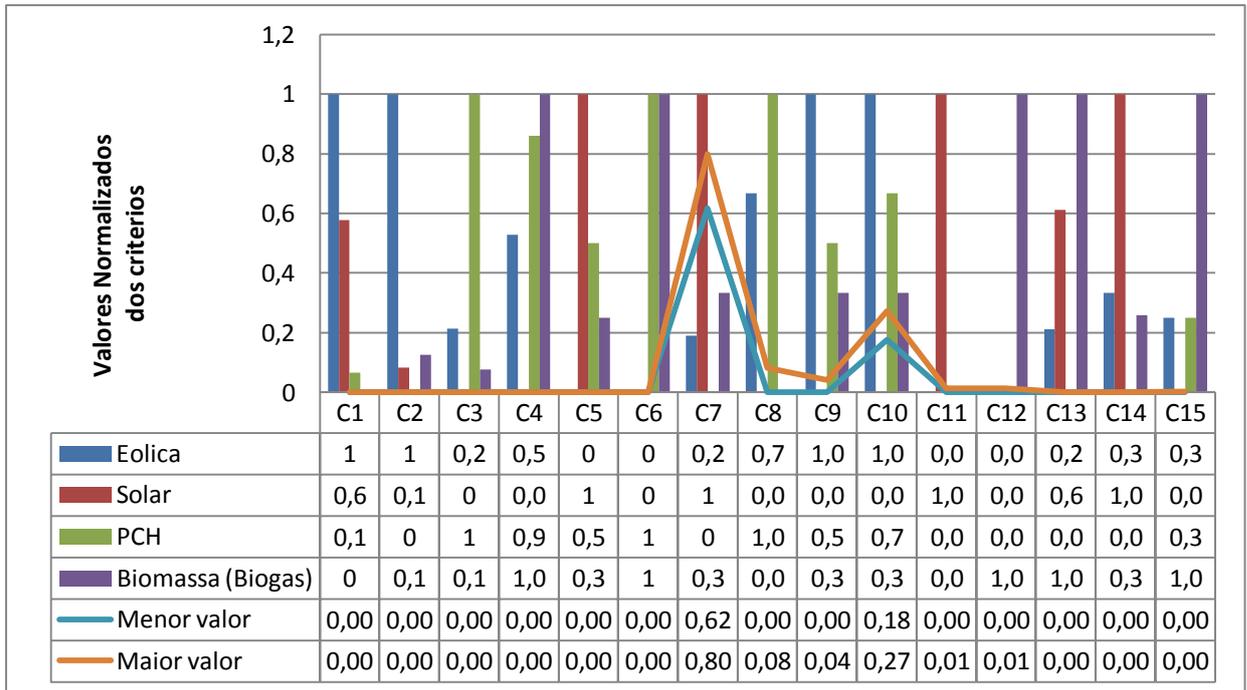
O gráfico da Figura 59 mostra que, para o grupo com perfil de decisão C – retorno do investimento, a situação do caso anterior (perfil de decisão B – Impacto socioeconômico) se repete, porém, com valores de consequências dos critérios diferentes, levando, mais uma vez, a tecnologia Solar (FV) para o penúltimo lugar entre as tecnologias de geração de energia elétrica consideradas.

Figura 59 Perfil de decisão do grupo C – Retorno do investimento.
Fonte: elaborada pelo autor.



Para o grupo com perfil de decisão D – Impacto socioambiental, é possível verificar, por meio do gráfico da Figura 60, que, ocorre uma situação similar aquela do perfil de decisão A – Geração de energia elétrica. Embora a tecnologia Solar (FV) tenha uma situação favorável quanto ao critério C7, isto não foi suficiente, frente à situação dos demais critérios, para melhorar sua classificação (última opção).

Figura 60 Perfil de decisão do grupo D – Impacto socioambiental.
Fonte: elaborada pelo autor.



Para que a disparidade entre os resultados obtidos com o modelo e a escolha predominante da tecnologia solar (FV), na aplicação da REN ANNEL 428/687 (ANNEL, 2015), seja explicada, é necessária uma avaliação quanto aos critérios considerados e a temporalidade das aplicações. O modelo permite esta avaliação por meio da comparação entre as tecnologias, considerando a agregação dos diversos critérios, o que reflete o real desempenho, sob a ótica da sustentabilidade e considerando a vida útil de cada tecnologia.

Por outro lado, como proposta para explicar a predominância da tecnologia solar (FV), são consideradas suas características específicas, as quais impactam, fortemente, na percepção do(s) decisor(es) quanto a esta tecnologia, como a melhor opção.

A expressiva evolução da energia solar impacta, fortemente, na visão das pessoas. Globalmente, o investimento em energia solar bateu recorde no ano de 2017, 18% a mais do que no ano anterior e recebeu mais investimentos do que outro tipo de fonte energética, segundo a Organização das Nações Unidas (ONU) (ONUBR, 2018). Foram mais de US\$ 160,8 bilhões de recursos, segundo o relatório da organização, publicados em abril deste ano.

O Brasil é um dos países que têm uma incidência solar de 5,4 quilowatt-hora/metro quadrado – mais do que Estados Unidos, China e Alemanha, por exemplo. No entanto, em termos de capacidade instalada de geração fotovoltaica, o Brasil tem apenas 1 GW. A China,

por exemplo, tem 130 GW. No entanto, o cenário parece estar se revertendo. Em 2016, o número de microgeradores de energia solar cresceu 407% em relação ao ano anterior, segundo dados da ANEEL (ANEEL, 2014). A expansão acentuada aconteceu principalmente em residências (80%). Para 2024, o órgão estipula que serão 886,7 mil unidades consumidoras que receberão créditos dessa energia, totalizando uma potência instalada de aproximadamente 3,2 GW.

O barateamento dos painéis, as características de simplicidade dos sistemas, a facilidade quanto à instalação, manuseio e manutenção, juntamente com a enorme difusão de empresas do setor (IDEAL, 2018), levou a esse crescimento exponencial dos sistemas fotovoltaicos, trazendo como consequência o aumento de incentivos, específicos, para essa tecnologia, que têm crescido e gerado forte interesse nos consumidores que desejam gerar sua própria energia. Não por acaso, diversas companhias do setor estão investindo na área. Um desses exemplos é a distribuidora Celesc (CELESC, 2018). Com o Projeto Bônus Fotovoltaico, a empresa contemplou 1250 residências no estado de Santa Catarina com um subsídio parcial para a instalação de sistemas fotovoltaicos. Outro exemplo é que, dentro do Comitê de Inovação e Sustentabilidade da CDHU (2018) - Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano do Estado de São Paulo - também surgiu à discussão de usar o sol como fonte energética. Como o foco da empresa é a construção de moradias de interesse social, atendendo, predominante, as famílias com renda entre um e três salários mínimos, a grande vantagem do projeto, é justamente o impacto na conta de energia dos mutuários, como relata o superintendente de Orçamento, Programação e Controle da organização, Silvio Vasconcellos (AMCHAM, 2018).

Com base nestes fatos que apontam para um cenário de forte crescimento na utilização da tecnologia solar (FV), será realizada, a seguir, uma nova aplicação do modelo considerando a proposição de uma nova dimensão, de natureza comportamental, baseada, fundamentalmente, na percepção das pessoas de que, a partir de algumas características facilmente identificáveis, a tecnologia solar (FV) seria a melhor escolha, para qualquer situação.

4.2.15 Percepção sobre a tecnologia (FV)

Esta abordagem enfatiza uma dimensão comportamental para a qual são propostos dois novos critérios, de parametrização complexa, pois consideram algo intangível que é a percepção do(s) decisor(es) e possuem um impacto significativo apenas no curto prazo. O

modelo desenvolvido (com os novos critérios) é aplicado, com o intuito de que seja verificada a situação da energia solar (FV) enquanto tecnologia dominante nas aplicações de GREED, no âmbito da resolução normativa ANEEL nº 482/687.

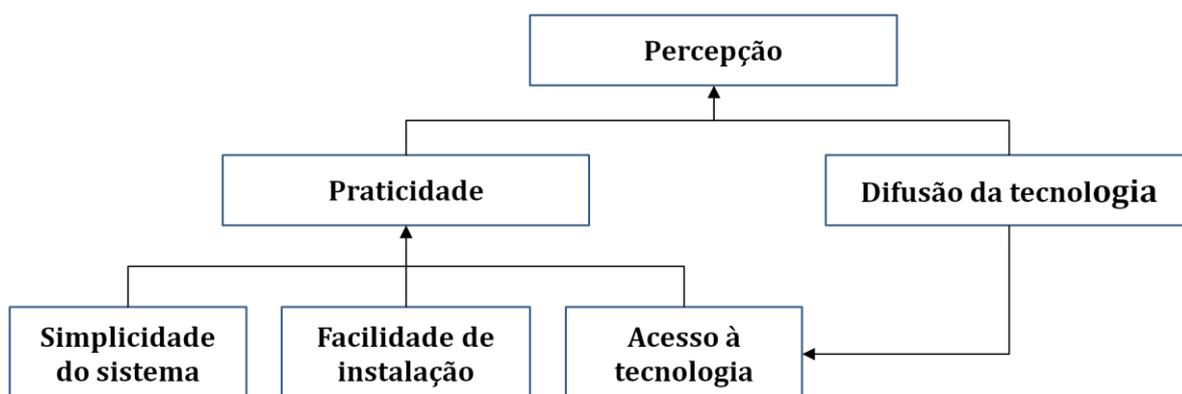
A consideração destes critérios, objetiva representar uma nova dimensão que venha a justificar a tecnologia solar (FV) como escolha predominante dos usuários. Essa nova dimensão propõe considerar a percepção do(s) decisor(es), quanto a popularização da tecnologia solar (FV), como o diferenciador na escolha de uma planta de energia. É proposta a verificação desta percepção com base nas características objetivas de simplicidade do uso da energia solar.

Parte-se do princípio de que os conceitos de simplicidade e facilidade podem inspirar o(s) decisor(es) quando da sua recomendação sobre a melhor tecnologia. São eles:

4.2.15.1 *Praticidade da tecnologia*

Diz respeito à percepção de praticidade quanto à tecnologia, que é representada por meio da simplicidade do sistema, facilidade de instalação e acesso a tecnologia de um sistema de geração de energia elétrica, de pequeno porte, seja quanto à aplicação rural ou urbana. A Figura 61 apresenta a estrutura do critério proposto, em termos de níveis lógicos de influencia quanto a percepção do(s) decisor(es) para as vantagens da tecnologia. Pode-se observar uma correlação entre a praticidade e a difusão tecnológica, que pode ser constatada por meio dos vários sites de apoio aos interessados na tecnologia, onde estão disponíveis inúmeras informações sobre a tecnologia, inclusive onde é possível o interessado simular seu próprio sistema obtendo quantidade e tamanho das placas solares, custo, energia gerada, etc.

Figura 61 Critérios referentes a percepção do(s) decisor(es)



Esse critério pode apresentar forte impacto no(s) decisor(es) desde que corresponde ao atrativo do que é mais simples e prático de executar e lidar. Para este critério foi estabelecido um critério construído para o qual, foi elaborada uma escala de valor para a sua avaliação qualitativa, tipo Likert (LIKERT, 1932) de cinco pontos. A Tabela 25 apresenta os níveis definidos para as consequências referentes a esse critério e a Tabela 26 a classificação das tecnologias.

Tabela 25 Escala de avaliação, tipo Likert, para o critério Praticidade da Tecnologia.
Fonte: elaborada pelo autor.

Nível	Descrição
1	Sistema complexo, alta complexidade de instalação, maior dificuldade quanto ao local de instalação, mão de obra especializada e muito pouco acesso à tecnologia
2	Sistema menos complexo, média complexidade de instalação, maior dificuldade quanto ao local de instalação, mão de obra especializada e pouco acesso à tecnologia
3	Sistema menos complexo, média complexidade de instalação, flexibilidade quanto ao local de instalação, menor exigência quanto à mão de obra e acesso e pouco acesso à tecnologia
4	Sistema simples, simplicidade de instalação, flexibilidade quanto ao local de instalação, mão de obra especializada e pouco acesso à tecnologia
5	Sistema simples, simplicidade de instalação, flexibilidade quanto ao local de instalação, menor exigência quanto à mão de obra e maior acesso a tecnologia

Tabela 26 Níveis de avaliação para o critério Praticidade da Tecnologia.
Fonte: elaborada pelo autor

Tecnologia de Geração	Nível
Eólica	1
Solar (FVT)	5
Hidráulica (PCH)	2
Biomassa	3

4.2.15.2 Difusão da tecnologia

Pode ser representada pelo número de empresas envolvidas com a tecnologia de geração, que estão disponíveis no mercado. Esse critério pode apresentar forte impacto no(s)

decisor(es), por conta do acesso facilitado a informações e da percepção de que é uma tecnologia já bem estabelecida e, portanto, implica em uma maior garantia do empreendimento. É um critério natural, a otimizar, cuja consequência é representada por uma variável determinística medida em termos unidades. Os valores para cada tecnologia são bem estabelecidos na literatura: em Oyama (2017) para eólica, em SOLAR (2018) para solar, em CERPCH (2018) para hidrelétrica (PCH) e BGS (2018) e FORNECE (2018) para Biomassa (biogás). Os parâmetros referentes ao critério Difusão Tecnológica são apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 Número de empresas envolvidas com as tecnologias de geração de energia elétrica no Brasil.

Tecnologia de Geração	Número de Empresas (und)
Eólica	3
Solar (FVT)	817
Hidráulica (PCH)	21
Biomassa	9

Para considerar os novos critérios a matriz de consequências é então modificada sendo acrescentados os critérios Praticidade da Tecnologia (C16) e Difusão da Tecnologia (C17). A Tabela 28 apresenta a nova matriz de consequências.

Tabela 28 Matriz de consequências para o problema de escolha de tecnologia de geração de energia eólica no âmbito da REN ANNEL, nº687 (ANNEL, 2015). Fonte: elaborada pelo autor

Tecnologias GREED	Crítérios																
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17
Eólica	3,23	85	35	43	1	0	12	1	7	4	20	0	7,7	3,3	0,6	1	3
Solar (FVT)	2,34	19	20	24	5	0	46	10	1	3	25	0	10,9	6,9	0,3	5	817
Hidráulica (PCH)	1,20	13	90	55	3	1	4	10	4	1	50	0	6	1,5	0,6	2	21
Biomassa	1,12	22	25,3	60	2	1	18	0	3	2	20	1	14	2,9	1,5	3	9

4.2.16 Aplicação do método FITradeoff – módulo escolha

Aplicação do método, considerando os novos critérios, dentro do modelo multicritério desenvolvido, a partir do módulo de escolha do FITradeoff SAD. Para esta seção continuam sendo considerados os conceitos e características da GREED apresentados no item 4.2.10. Neste caso, porém, convém ressaltar que as pessoas interessadas em adquirir sistemas de GREED fazem parte do grupo de influência dos compradores da tecnologia e que é (são) o(s) próprio(s) decisor(es).

4.2.16.1 Perfil de decisão E: Impacto perceptivo sobre a tecnologia

Este perfil de decisão simula os interesses de um/grupo de decisor(es) (compradores) baseados na percepção de que tecnologia solar (FV) é a melhor opção, considerando, apenas, sua maior simplicidade, praticidade e disponibilidade de informações. Essa percepção reforça o senso comum, criando um círculo virtuoso que, cada vez mais impulsiona o número de pessoas e empresas interessadas na tecnologia, aumentando o crescimento das aplicações no âmbito da REN ANEEL 482/687.

Este perfil de decisão simula os interesses do(s) decisor(es) que está(ão) fortemente influenciados com a enorme predominância da energia solar (FV) na aplicação da GREED no Brasil. Tal sucesso pode ser justificado por meio das próprias características dos sistemas solar (FV) em termos, principalmente, de simplicidade, facilidade e versatilidade.

Esta abordagem enfatiza os critérios relacionados à percepção do(s) decisor(es), ou seja, Praticidade e Difusão da tecnologia. O ranqueamento (*ranking*) final obtido para os pesos dos critérios está apresentado em (e) que representam a situação atual

$$w_{17} > w_{16} > w_5 > w_6 > w_1 > w_2 > w_{11} > w_3 > w_4 > w_9 > w_{10} > w_7 > w_8 > w_{12} \quad (e) \\ > w_{15} > w_{14} > w_{13}$$

A partir das informações obtidas com o ordenamento inicial, a alternativa Eólia foi desconsiderada, e o subconjunto de alternativas potencialmente ótimas foi reduzido para {Solar, Hidrelétrica (PCH) e Biomassa (biogás)}, como solução para este perfil de decisão. Após 2 (duas) perguntas ao(s) decisor(es) a tecnologia Hidrelétrica (PCH) foi excluída do subconjunto de alternativas potencialmente ótimas. As Figuras 62 e 63 apresentam os resultados disponíveis pelo FITradeoff nesta fase do processo, onde os desempenhos das

alternativas restantes, em cada critério, podem ser comparados. Após mais 1 (uma pergunta), a quarta, a Biomassa (biogás) já não era considerada uma alternativa concorrente, e a solução possível foi a Energia Solar.

Figura 62 Resultados do FITradeoff durante a elicitación para o Perfil de decisão E.
 Fonte: Gerado pelo FITradeoff SAD - Gráfico de barras.

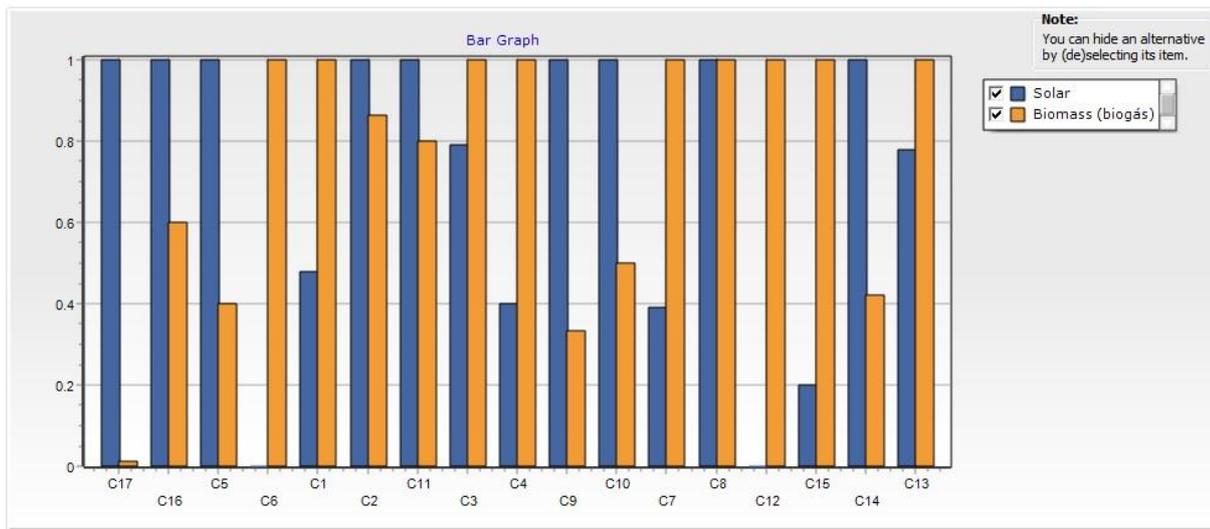
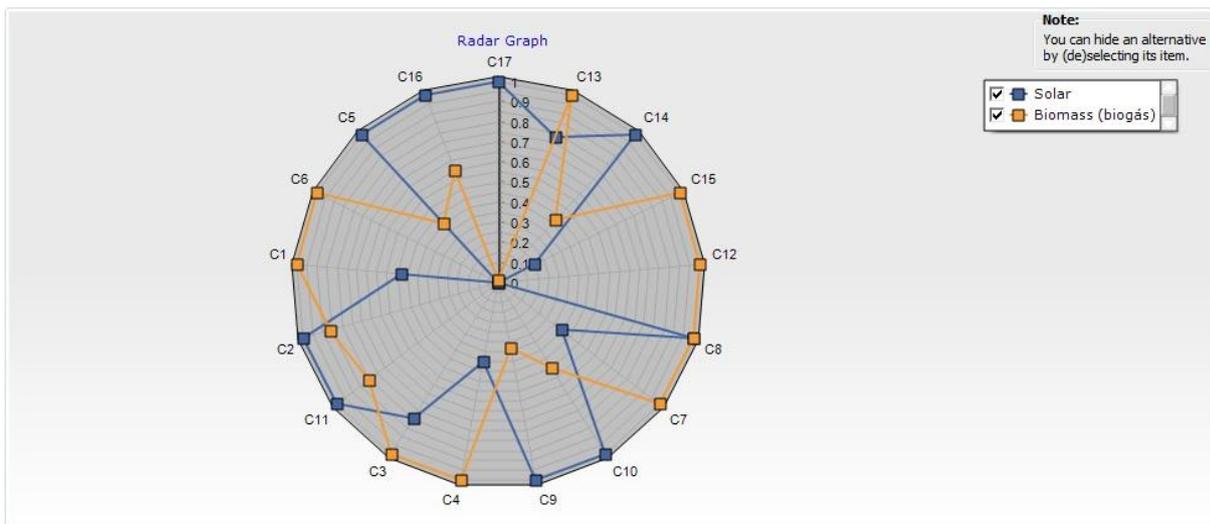


Figura 63 Resultados do FITradeoff durante a elicitación para o Perfil de decisão E.
 Fonte: Gerado pelo FITradeoff SAD - Gráfico radar.



4.2.17 Aplicação do método FITradeoff – módulo ordenação

Aplicação do método, dentro do modelo multicritério desenvolvido, considerando os novos critérios, a partir do módulo de ordenação do FITradeoff SAD. Para esta seção continuam sendo considerados os conceitos de enquadramento e características da GREED apresentados no item 6.10.1 e 6.10.2.

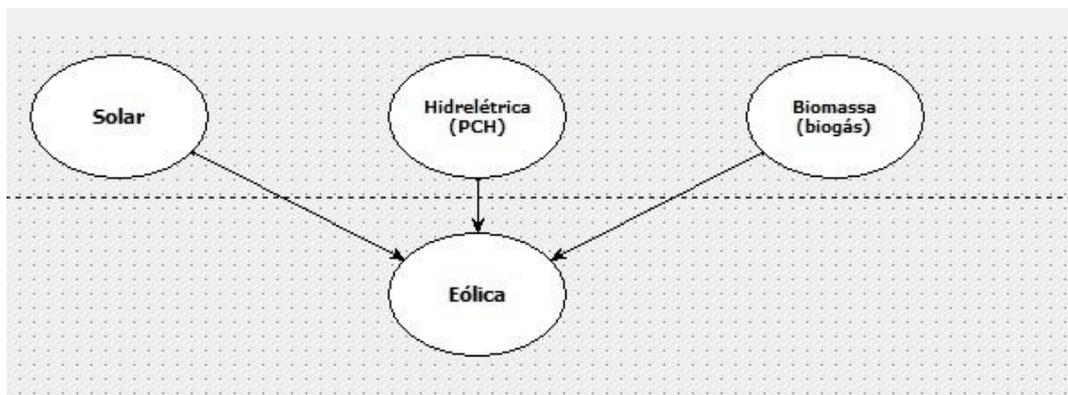
4.2.17.1 Perfil de decisão E: Impacto perceptivo sobre a tecnologia

Considerando a mesma abordagem utilizada na seção 6.8.5.1, o ranqueamento (*ranking*) final obtido para os pesos dos critérios está apresentado em (e).

$$w_{17} > w_{16} > w_5 > w_6 > w_1 > w_2 > w_{11} > w_3 > w_4 > w_9 > w_{10} > w_7 > w_8 > w_{12} > w_{15} > w_{14} > w_{13} \quad (e)$$

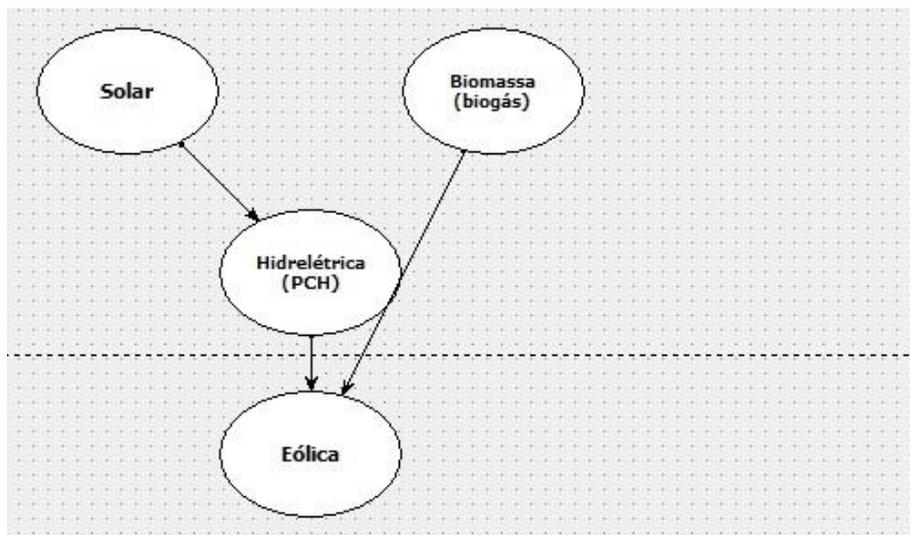
Após o ordenamento dos pesos, apenas a energia eólica foi classificada como sendo a pior, porém, ainda não havia definição sobre a posição das demais alternativas, como mostra a Figura 64.

Figura 64 Informações disponíveis após o ranqueamento (*ranking*) dos critérios para o(s) decisor(es) com perfil de decisão tipo E. Imagem gerada por meio do FITradeoff SAD.



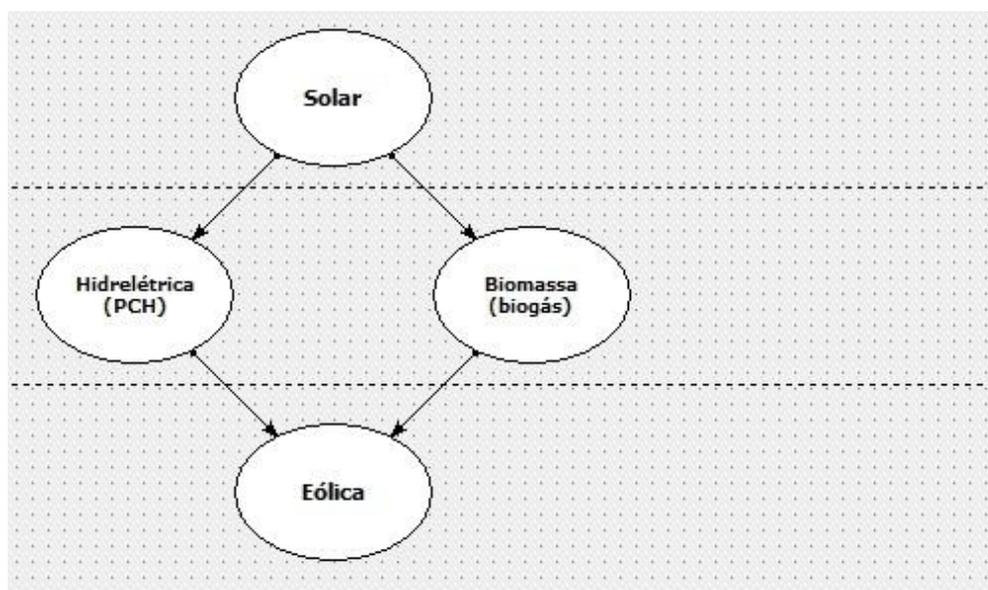
Após duas perguntas feitas ao(s) decisor(es) as tecnologias Solar (FV) e Biomassa (biogás) se destacaram com relação as demais como mostra a Figura 65.

Figura 65 Informação parcial disponível após 2 (duas) perguntas ao(s) decisor(es) com perfil de decisão tipo E. Imagem gerada pelo FITradeoff SAD.



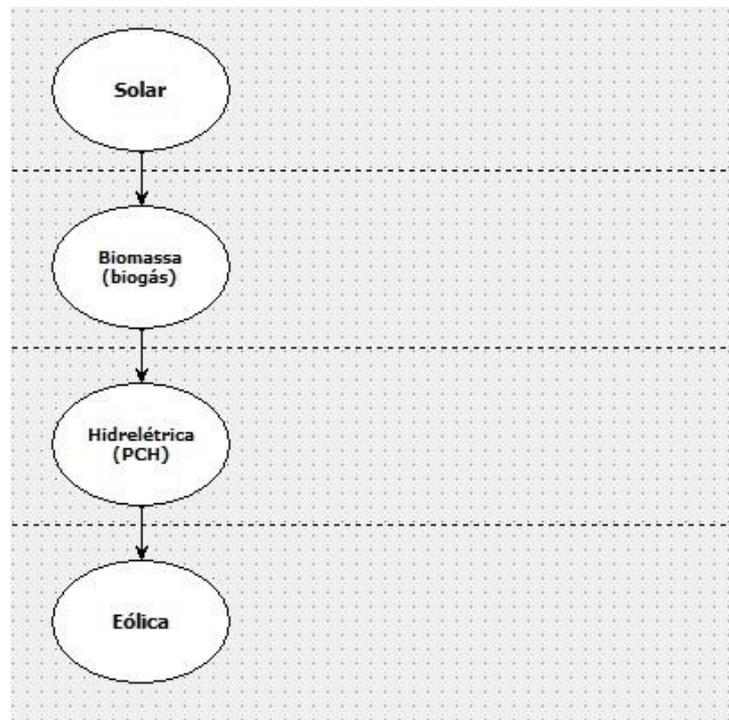
Com mais 1 (uma) pergunta para o(s) decisor(es) a energia solar já é considerada como a melhor alternativa, como mostra a Figura 66.

Figura 66 Informação parcial disponível após 3 (três) perguntas ao(s) decisor(es) com perfil de decisão tipo E. Imagem gerada pelo FITradeoff SAD.



Para a ordenação das demais tecnologias foram feitas, no total, 26 perguntas ao(s) decisor(es) (Figura 67).

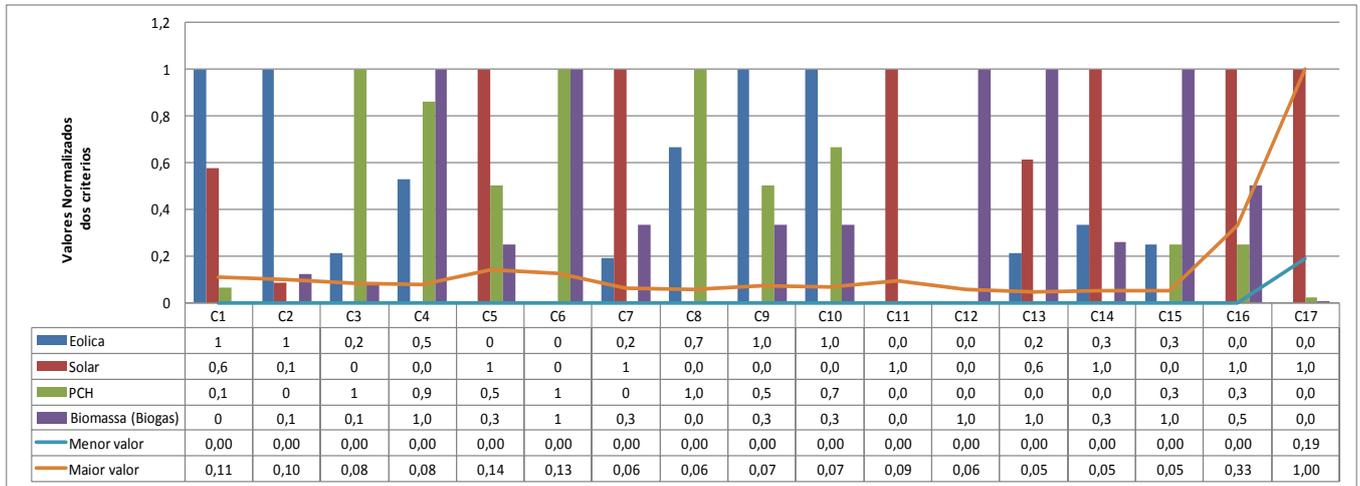
Figura 67 Ordem completa para as tecnologias de geração de energia elétrica após 26 (vinte e seis) perguntas ao(s) decisor(es) com perfil de decisão tipo E.
Imagem gerada pelo FITradeoff SAD.



4.2.18 Discussão dos resultados

Ficou comprovado que quando se considera a percepção do(s) decisor(es), a energia solar (FV) é sempre a vencedora. Esse resultado é ilustrado por meio da Figura 68, onde é possível verificar que para os critérios C16 e C17, que correspondem exatamente a percepção do(s) decisor(es) (Praticidade e Difusão da tecnologia), e em que a tecnologia Solar (FV) possui as consequências de maior valor, as faixas de pesos (menor - maior), correspondentes, são as mais altas. A melhor situação é para a consequência do critério C17, onde se tem uma faixa entre 0,19 e 1 para os pesos. Ainda, no processo de elicitação, outros critérios com boas consequências da tecnologia Solar (FV), também se situaram numa faixa de pesos que impulsionaram a eleição desta tecnologia, como é o caso dos critérios C1, C5, C11 e também C13 e C14.

Figura 68 Perfil de decisão do grupo E – Impacto perceptivo sobre a tecnologia.
Fonte: elaborada pelo autor



A opção pela energia solar (FV) baseada na percepção do(s) decisor(es), como principal estrutura preferencial, possibilita uma situação de escolha em que não são consideradas consequências importantes quando da opção por um sistema de geração de energia elétrica. Este fato é fortemente realçado quando se considera o longo prazo referente à vida útil desses sistemas.

A Figura 68 ilustra a consequência quanto à quantidade de energia gerada (C3 e C4) que é direta, em função dos critérios considerados. Já os impactos ambiental e socioeconômico (C7 a C15), apesar dos parâmetros dos critérios considerados, necessitam de uma contextualização específica para cada situação, de modo que seja possível uma melhor definição para as consequências

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÕES

O trabalho em questão contribuiu para o estabelecimento dos métodos MCDM/A como ferramentas úteis para lidar com a avaliação de tecnologias elétricas, pois oferecem uma maneira de agregar desempenhos em diferentes critérios, gerando um valor global para comparar as opções disponíveis, ajudando o(s) decisor(es) a equilibrar os diversos aspectos envolvidos na decisão.

O modelo MCDM/A proposto neste trabalho permite uma maneira estruturada e, também, flexível de usar as informações disponíveis sobre os problemas e incorporar preferências. Ele pode ser usado para estruturar e auxiliar os processos de tomada de decisão no campo da energia, dadas as questões inerentes, como a complexidade ligada ao conceito de sustentabilidade e a diversidade de interesses envolvidos.

O modelo proposto difere dos demais, pois busca reduzir as demandas cognitivas sobre o(s) decisor(es), facilitando sua participação durante o processo, ao exigir menos informações cognitivamente exigentes do(s) decisor(es), ou seja, perguntas mais simples e menos sujeitas a respostas inconsistentes, tentando fazer menos perguntas como resultado de lidar com um problema de programação linear e permitindo a visualização gráfica dos resultados atuais.

A partir dos perfis de decisão considerados, têm-se alguns resultados interessantes que deram origem à compilação das seguintes conclusões de ordem prática.

- A elicitação desenvolvida para cada um dos grupos de pressão permite analisar as opções de geração de energia elétrica e leva em consideração diferentes perfis de decisão. Ao utilizar o processo de levantamento de preferências, é possível não apenas definir a alternativa vencedora, mas também: i) realizar uma avaliação comparativa entre as tecnologias consideradas, a fim de permitir uma visão geral da problemática de acordo com a influência dos diferentes grupos de pressão e ii) explicar as consequências da escolha de uma tecnologia em termos de desempenho dos critérios não priorizados pelo grupo de pressão;

- Diante dos resultados encontrados, os critérios construídos contribuíram para a robustez do modelo, desde que, representando aspectos importantes do problema tornaram a análise mais abrangente, independentemente da pouca disponibilidade de dados bem estabelecidos;
- O modelo proposto serve para apoiar o planejamento, avaliação e/ou definição de políticas públicas voltadas à implementação de sistemas energéticos, uma vez que permite considerar os diversos interesses dos grupos envolvidos. Na prática, o escopo do modelo pode ser expandido usando um número maior de especialistas em grupos de pressão representativos para conduzir independentemente o processo de elicitação e realizar análises adicionais;
- A interface do FITradeoff SAD permite que os resultados atuais encontrados para cada espaço, atualizado, de pesos sejam visualizados, e esta informação gráfica pode contribuir para gerar intuições (*insights*) sobre o problema, comparando os desempenhos das alternativas potencialmente ótimas remanescentes em cada critério.

Os resultados obtidos com o modelo proposto, baseado no método FITradeoff aplicado aos estudos de caso, ou seja, a Matriz Elétrica Brasileira e a GREED no âmbito da Resolução Normativa ANEEL nº 482, mostraram que o modelo tem potencial para auxiliar o(s) decisor(es) diante de problemas multicritério relacionados ao planejamento energético.

O questionamento inicial do trabalho quanto ao porque da predominância absoluta da tecnologia solar (FV) na aplicação da Resolução Normativa ANEEL nº 482 (ANEEL, 2012) foi objetivado por meio da proposta de inclusão no modelo de critérios que dizem respeito a uma dimensão de caráter comportamental e que numa análise mais racional, provavelmente não seria considerada.

As características de simplicidade e praticidade dos sistemas solar (FV), que alavancam sua popularidade, não são suficientes para avaliar adequadamente uma tecnologia de geração de energia elétrica com base nas várias dimensões da sustentabilidade, principalmente quando se considera o longo prazo. O modelo MCDM/A proposto neste trabalho demonstrou que a opção pela energia solar (FV) baseada, apenas, na percepção do(s) decisor(es), como principal estrutura preferencial, encobre consequências importantes. Uma

consequência, muito importante, que não foi considerada neste trabalho diz respeito ao descarte do material fotovoltaico após a vida útil do sistema.

Quando não se considera a percepção do(s) decisor(es), verifica-se a partir dos resultados das simulações realizadas com o apoio do FITradeoff SAD (item 4.2.11) que a tecnologia Solar não apenas não era a mais recomendada, como era a pior ou a segunda pior opção entre os decisor(es) que formam os diferentes grupos de interesse. Ou seja, para grupo cuja principal preocupação foi a geração de energia (perfil de decisão A) a tecnologia solar foi recomendada como última opção. Para o grupo mais preocupado com as questões socioeconômicas (perfil de decisão B), o FITradeoff SAD recomendou a tecnologia solar como penúltima opção. Já para o grupo com maior interesse nos resultados financeiros (perfil de decisão C), a tecnologia solar foi recomendada como penúltima opção. Finalmente para o grupo cujos principais interesses estão voltados para o meio ambiente e bem estar das pessoas (perfil de decisão D), a tecnologia solar foi última opção recomendada.

O modelo proposto permite avaliar que, com a escolha da tecnologia solar (FV), notadamente quando se considera o longo prazo (referente à vida útil desses sistemas), têm-se consequências negativas na quantidade de energia gerada (eficiência de geração e fator de capacidade), impacto ambiental (emissão de CO₂ na fabricação das células fotovoltaicas) e impacto socioeconômico (geração de empregos na operação e manutenção). A situação da tecnologia solar (FV), para os diferentes perfis de decisão considerados foi demonstrada com a ajuda dos Gráficos (57 a 60) da seção 4.2.14.

A partir dos resultados encontrados com o modelo e que são apresentados, conjuntamente e de forma estratégica, na Figura 56 (seção 4.2.14), é possível verificar as diferentes estruturas de preferência do(s) decisor(es), para cada grupo de influência e como tais estruturas influenciam na escolha entre as alternativas consideradas. Com base na exposição dos resultados no gráfico da Figura 56, verifica-se, por exemplo, os interesses comuns entre os grupo, que podem auxiliar numa decisão quanto a acomodar mais de uma tecnologia em um dado programa de fomento, ou mesmo o caso contrario, que pode ser verificado segundo as estruturas de preferência dos perfis de decisão dos grupos de influencia C (retorno do investimento) e D (impacto ambiental), caso fosse exigido na tomada de decisão a escolha de uma única tecnologia. Neste caso, qualquer das tecnologias Hidrelétrica (PCH) ou Biomassa (biogás) poderia ser avaliada como conveniente para ambos os grupos.

A Resolução Normativa ANEEL N° 482/687 (ANNEE, 2012) e (ANNEE, 2015) pode ser adequada para diferentes configurações de aplicação, dependendo das especificidades

consideradas. A contextualização de cada aplicação leva ao estabelecimento de restrições e direcionamentos que caracterizam a análise desejada, por exemplo: se urbana ou rural, se individual ou em condomínio, além de serem consideradas as condições locais quanto a disponibilidade do combustível e espaço útil. Portanto, o modelo desenvolvido poder ser utilizado de forma generalizada, para qualquer configuração onde se deseja analisar a micro e mini geração de energia elétrica distribuída.

5.2 RECOMENDAÇÕES

5.2.1 Extensão do modelo MCDM/A desenvolvido

Para o estudo de caso da matriz brasileira, os resultados obtidos para o modelo proposto sob as considerações de cada perfil de decisão são consistentes com a atual matriz brasileira. A avaliação realizada fornece informações que podem ser usadas pelo MME ao estabelecer políticas de energia. Um estudo futuro potencial poderia ser a construção de um modelo MCDM/A no qual as estruturas de preferência o(s) decisor(es), representando os quatro perfis de decisão distintos, sejam agregadas para obter uma visão sobre a melhor composição de tecnologias para a matriz elétrica brasileira.

5.2.2 Verificação dos critérios referentes a percepção do(s) decisor(es)

Desenvolvimento de um trabalho de prospecção com o intuito de comprovar a proposta desse trabalho sobre a percepção dos usuários quanto a tecnologia solar (FV). Utilização, por exemplo, da técnica DELPHI.

5.2.3 Energia solar (FV) no longo prazo

Desenvolvimento de um estudo para avaliar as consequências do uso da tecnologia solar (FV) em comparação com as demais energias consideradas na Resolução Normativa ANEEL nº 482 (ANNEEL, 2012) ao longo da vida útil dos sistemas. Para tanto deverão ser consideradas as consequências referentes à quantidade de energia gerada, retorno financeiro,

impactos socioeconômicos e ambientais, considerando também, nestes últimos, a problemática do descarte do material fotovoltaico após a vida útil do sistema de geração.

Também é importante um trabalho de prospecção tecnológica com o intuito de comprovar a proposta desse trabalho sobre a percepção dos usuários quanto a tecnologia solar (FV)

5.2.4 Proposta para um programa governamental

Considerando os programas já existentes no Brasil cuja preocupação é a geração de emprego e renda e, tendo como referencia a GREED no contexto da REN NEEL 482/687, é proposto um programa de incremento ao Programa Luz para Todos voltado para modelos de negócios sustentáveis, visando ao publico de baixa renda. O detalhamento da proposta encontra-se no Anexo I.

REFERÊNCIAS

ABBASI, N. The likely adverse environmental impacts of renewable energy sources. **Applied Energy**, p. 121-144, 2000.

ACKERMANN, T.; ANDERSSON, G.; SÖDER, L. Distributed generation: a definition. **Electric Power Systems Research**, 2000. p.195–204.

AGENDA21. **AGENDA 21 BRASILEIRA - Resultado da Consulta Nacional**. Brasília. 2002.

AKEMI, B.; MONTENEGRO, R.; SOUSA, E. C. **Análise de viabilidade econômica na geração distribuída de energia elétrica partir de células fotovoltaicas**: um estudo comparativo com o advento da resolução normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. XVI ENGEMA - Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente. São Paulo: [s.n.]. 2014.

AL GARNI, H. et al. A multicriteria decision making approach for evaluating renewable power generation sources in Saudi Arabia. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 16, p. 137–150, 2016.

ALANNE, K.; SAARI, A. Distributed energy generation and sustainable development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2006. p.539–558.

ALIPOUR M, A. S. H. R. O. M. A new hybrid decision framework for prioritizing funding allocation to Iran's energy sector. **Energy**, p. 121:388–402, 2017.

ALKMIM, M. H. **Controle de Vibrações em Turbina Eólica Utilizando Absorvedor Passivo de Coluna de Líquido Sintonizado**. [S.l.]. 2015. UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - Departamento de Engenharia Mecânica.

AMCHAM. Economia&Negócios. **O ESTADÃO**, 2018. Disponível em: <<https://economia.estadao.com.br/blogs/ecoando/energia-solar-cresce-407-em-um-ano-no-brasil-impulsionada-por-paineis-em-residencias>>. Acesso em: Outubro 2018.

AMÉRICA do Sol. **Simulador Solar**, 2018. Disponível em: <www.americadosol.org/simulador/>. Acesso em: Março 2018.

ANDRADE, G. N. Evaluation of Power Plants Technologies Using Multicriteria Methodology Macbeth. **IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS**, v. 14, NO. 1, Jan 2016.

ANEEL. **PRODIST - Módulo 3**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/modulo-3>>. Acesso em: Junho 2017.

ANEEL. **RESOLUÇÃO Nº 394**, 1998. Disponível em: <<http://biblioteca.aneel.gov.br/index.html>>. Acesso em: Janeiro 2018.

ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 83**, 2004. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2004083.pdf>>. Acesso em: Junho 2017.

ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Brasília. 2008. 3ª Edição.

ANEEL. **Micro e Mineração Distribuída**. Brasília. 2014. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>.

ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 673**, 2015. Disponível em:
<<http://biblioteca.aneel.gov.br/index.html>>. Acesso em: Janeiro 2018.

ANEEL. **http://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida**, Novembro 2017. Acesso em: 2017.

ANEEL. **BIG - Banco de Informações de Geração**, 2017. Disponível em:
<<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/FontesEnergia.asp>>. Acesso em: 30 Junho 2017.

ANEEL. **Nota Técnica nº 0056/2017-SRD/ANEEL**. [S.l.]. 2017.

ANEEL. **BIG - Banco de Informações de Geração**, 2018. Disponível em:
<<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: Janeiro 2018.

ANEEL. **BIG - Banco de Informação de Geração**, 2018. Disponível em:
<<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: Janeiro 2018.

ANEEL. Matriz de energia elétrica. **BIG - Banco de Informacoes de Geração**, 2018. Disponível em:
<<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: Novembro 2018.

ANNEEL. **Resolução Normativa Nº 482**. Brasília. 2012. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>.

ANNEEL. **Cadernos Temáticos**. Brasília. 2014. Disponível em:
<http://www2.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/caderno-tematico-microeminigeracao.pdf>.

ANNEEL. **Resolução Normativa Nº 687**. Brasília. 2015. Disponível em:
<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>.

ANP. **Anuário Estatístico 2016**. ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. [S.l.]. 2016. <http://www.anp.gov.br/wwwanp/publicacoes/anuario-estatistico/2441-anuario-estatistico-2016>.

ANP. **Anuário Estatístico 2016**. ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. [S.l.].

ANP.GOV. ANP divulga dados de reservas de petróleo e gás em 2017. **ANP - Agência Nacional do Petróleo**, 2017. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/noticias/anp-e-p/4394-anp-divulga-dados-de-reservas-de-petroleo-e-gas-em-2017>>. Acesso em: 04 março 2018.

AQUILA, G. et al. An overview of incentive policies for the expansion of renewable energy generation in electricity power systems and the Brazilian experience. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 70, p. 1090–1098, 2016.

ARE. **RURALI ELECTRIFICATIN WITH RENEWABLE ENERGY - Technologies, quality standards and business models**. Alliance for Rural Electrification. Belgium. 2011.

ATLAS. Secreteria de Energia e Mineração - Governo do Estado de São Paulo. **Atlas Solar**, 2018. Disponível em: <<http://www.energia.sp.gov.br/2013/04/atlas-solar-levantamento-do-potencial-esta-disponivel-para-consulta-pela-internet/>>. Acesso em: 2018.

ATMACA E, B. H. Evaluation of power plants in Turkey using Analytic Network Process (ANP). **Energy**, p. 44(1):555–563, 2012.

AVILA, S. M. et al. VIBRATION CONTROL OF THE SET TOWER AND WIND TURBINE UNDER THE WIND INFLUENCE. **20th International Congress of Mechanical Engineering**, Gramado, 2009.

BALARIM, C. R. **Avaliação expedita do custo de implantação de micro centrais hidrelétricas**. Botucatu: Faculdade de Ciências Agrônômicas, 1996. Dissertação de Mestrado.

BALEŽENTIS, T.; STREIMIKIENE, D. Multi-criteria ranking of energy generation scenarios with Monte Carlo simulation. **Applied Energy**, v. 185, p. 862–871, 2017.

BANERJEE, S. B. Organisational strategies for sustainable development: developing a research agenda for the new Millennium. **Australian Journal of Management**, 27, n. Special issue, 2002. 105-117.

BARBOSA, W. P.; FILHO, A. C. S. D. A. **GERAÇÃO DISTRIBUÍDA: VANTAGENS E DESVANTAGENS. II** Símposio de estudos e pesquisa em ciências Ambientais na Amazonia. [S.l.]: [s.n.].

BECCALI, M.; CELLURA, M.; MISTRETTA, M. Decision-making in energy planning. Application of the Electre method at regional level for the diffusion of renewable energy technology. **Renewable Energy**, v. 28, p. 2063–2087, 2003.

BENEDITO, R. D. S. **CARACTERIZAÇÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ELETRICIDADE POR MEIO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE, NO BRASIL, SOB OS ASPECTOS TÉCNICO, ECONÔMICO E REGULATÓRIO**. São Paulo: UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP, 2009. Dissertação para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

BERMANN, C. Impasses e controvérsias da hidreletricidade. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. v. 21, n. 59, p. 139-153, 2007. Disponível em: <http://www.revistas.usp.br/eav/article/view/10211/11812>.

BERTOI, E. F. **“Análise dos incentivos à microgeração distribuída sob a perspectiva da viabilidade econômica dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede”**. Porto Alegre. 2012. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BGS. Equipamentos para biogás. **BGS**, 2018. Disponível em: <http://bgsequipamentos.com.br/produto/listar/?id_c=2&m=2>. Acesso em: 2018.

BRANCO. Geradores. **Branco**, 2018. Disponível em: <https://www.branco.com.br/la/pt_br/produtos/geradores.html>. Acesso em: 2018.

BURTON, J.; HUBACEK. Is small beautiful? A multicriteria assessment of small-scale energy technology applications in local governments. **Energy Policy**, v. 59 (2), p. 200-205, 2007.

BÜYÜKÖZKAN G, G. S. An integrated DEMATEL-ANP approach for renewable energy resources selection in Turkey. **International Journal of Production Economics**, 2016. 182:435–448.

CASES, R. E. &. **Clean Energy Project Analysis**. Canada: [s.n.], 2005.

CASES, R. E. &. **Clean Energy Project Analysis: RETScreen Engineering & Cases**. Third Edition. ed. Canada: [s.n.], 2005. WIND.9 p.

CASSINI, S. T. (.). **Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás**. ABES, Rima – Projeto PROSAB. Rio de Janeiro. 2003. (210).

CASSINI, S. T. et al. **Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás**. ABES, Rima – Projeto PROSAB. Rio de Janeiro. 2003. (210).

CASTELLS, M. Materials for an exploratory theory of the network society. **British Journal of Sociology**, 2000. p.5–24.

CDHU. **Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano do Estado de São Paulo**, 2018. Disponível em: <<http://www.cdhu.sp.gov.br/web/guest/home>>. Acesso em: Outubro 2018.

CDSID. **FiTradeoff**, 2018. Disponível em: <<http://fitradeoff.org/>>. Acesso em: 2018. contact@fitradeoff.org.

CELESC. Sustentabilidade é questão de atitude! **Celesc - A Energia dos Catarinenses**, 2018. Disponível em: <<http://www.celesc.com.br/portal/>>. Acesso em: Outubro 2018.

CEPEL. Potencial Eólico - Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. **CRESEB**, 2018. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=atlas_eolico&>. Acesso em: 2018.

CEPEL-CRESESB. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2004.

CERPCH. MICROCENTRAIS HIDRELÉTRICAS. **CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS**, Itajubá, 2018. Disponível em: <<https://cerpch.unifei.edu.br/fabricantes/>>. Acesso em: Outubro 2018. Série Energias Renováveis.

CHERNI J, D. I. H. F. J. P. S. R. Energy supply for sustainable rural livelihoods. A multi-criteria decision support.. **Energy Policy** , v. 35(1), p. 1493–502, 2007.

CLASON, D. L.; DORMODY, T. J. Analyzing Data Measured by Individual Likert-Type Items. **Journal of Agricultural Education**, 1994. v. 35, n. 4, p. 54-71.

CRISTÓBAL, S. Multi-criteria decision-making in the selection of a renewable energy project in Spain: The Vikor method. **Renewable energy**, p. 36(2):498–502, 2011.

CRUZ, D. T. **Micro e minigeração eólica e solar no Brasil: Propostas para desenvolvimento do setor**. ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. São Paulo. 2015.

CUMMINS, R. A.; GULLONE, E. **Why we should not use 5-point Likert scales the Case for subjective quality of life measurement**. Second International Conference on Quality of Life in Cities. Singapore: [s.n.]. 2000. p. 74-93.

- CUSTÓDIO, R. D. S. **Energia Eólica para a Produção de Energia Elétrica**. 2ª. ed. [S.l.]: Synergia, 2007.
- DA SILVA, D. M. N. I. S. S. Electricity supply security and the future role of renewable energy sources in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, p. 59 328–341, 2016.
- DANIELLE C. MORAIS, L. H. A. A. P. C. S. C. A. R. L. K. USING VALUE-FOCUSED THINKING IN BRAZIL. **Pesquisa Operacional**, v. 33(1), p. 73-88, 2013.
- DE ALMEIDA AT, C. C. A. M. F. R. D. A.-F. A. G. T. Multicriteria and multiobjective models for risk, reliability and maintenance decision analysis (Vol.231). [S.l.]: Spring, 2015.
- DE ALMEIDA AT, D. A. J. C. A. D. A.-F. A. A new method for elicitation of criteria weights in additive models: Flexible and interactive tradeoff.. **European Journal of Operational Research** , 2016. 250(1):179–191.
- DE ALMEIDA, A. T. **Processo de Decisão nas Organizações**. São Paulo: Atlas, 2013.
- DE ALMEIDA, A. T. **Processo de Decisão nas Organizações**. São Paulo: Atlas, 2013.
- DE ALMEIDA-FILHO AT, D. A. A. C. A. **A flexible elicitation procedure for additive model scale constants**. *Annals of Operations Research*. [S.l.]: [s.n.]. 2017. p. 1–19.
- DE MELO CA, D. M. J. G. B. S. Nonconventional renewable energy governance in Brazil: Lessons to learn from the German experience. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, p. 61 222-234, 2016.
- DE MELO, C.; DE MARTINO, J. G.; BAJAY, S. Nonconventional renewable energy governance in Brazil: Lessons to learn from the German experience. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** , v. 61, p. 222–234, 2016.
- DECRETO Nº 4.873, 2003. Disponível em: <<http://www.camara.gov.br/sileg/integras/483367.pdf>>. Acesso em: Julho 2017.
- DEPUTADOS, C. D. Legislação, 2015. Disponível em: <<http://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2015/lei-13097-19-janeiro-2015-780071-publicacaooriginal-145954-pl.html>>. Acesso em: Novembro 2017.
- DEXTER GAUNTLETT; KERRY-ANN ADAMSON. **Renewable Distributed Energy Generation**. PIKERESRESEARCH. [S.l.]. 2012.
- DONES, R.; HECK, T. A. H. S. Greenhouse Gas Emissions from Energy Systems, Comparison and Overview. **Encyclopaedia of Energy** , 2004. 3: 77-95.
- DOUGLAS, O. et al. **Análise das atuais políticas de incentivo à mini e microgeração distribuída e da certificação de aerogeradores de pequeno porte no Brasil**. IX CONEN - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Fortaleza: [s.n.]. 2016.
- EDENHOFER, O. **IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation**. Cambridge University Press. New York, p. 187-190. 2011.

EDWARDS; BARRON. SMARTS and SMARTER: Improved Simple Methods for Multiattribute Utility Measurement. **Organizational Behavior and Human Decision Processes**, v. 60, p. 306-325, 1994.

EGAN, J. **The Egan Review: skills for sustainable communities**. Office of the Deputy Prime Minister. London, p. 108. 2004.

EIA. **Levelized Cost of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2013**. EIA - U.S. Energy Information Administration. [S.l.]. 2013. URL: http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/electricity_generation.pdf, 2013.

ELETROBRAS. **Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**, 1999. Disponível em: <<http://eletrobras.com/pt/Paginas/Manuais-e-Diretrizes-para-Estudos-e-Projetos.aspx>>. Acesso em: Janeiro 2018.

ELETROBRAS. **Resenha Energética Brasileira**, 2017. Disponível em: <<http://www.eletronuclear.gov.br/Imprensa-e-Midias/Paginas/MME-lan%C3%A7a-Resenha-Energ%C3%A9tica-Brasileira-2018.aspx>>. Acesso em: Setembro 2018.

ELIKINGTON, J. **Cannibals with forks: the triple bottom line of 21st century business**. Oxford: Capstone Publishing, 1997.

ENERCON. **Wobben Windpower**, 2017. Disponível em: <<http://www.wobben.com.br/produtos/importados/e-70-e4-2300-kw/>>. Acesso em: 10 Dezembro 2017.

ENERGIA RENOVÁVEL TOLMASQUIM, MAURÍCIO T. **ENERGIA RENOVAVEL, Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2016. ENERGIA RENOVAVEL.

ENERGIA RENOVAVEL, TOLMASQUIM, MAURÍCIO T. **ENERGIA RENOVAVEL Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2016. ENERGIA RENOVAVEL.

ENERGIA TERMELÉTRICA, T. M. T. **ENERGIA TERMELÉTRICA Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2016.

ENERGIA, P. energia renovaveis. **Skystream 3.7**, 2018. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/skystream-micro-aerogerador-residencial-sistema-desconta-energia-produzida/>>. Acesso em: 2018.

ENEVOLDSEN, I.; MØRK, K. J. Effects of a Vibration Mass Damper in a Wind Turbine Tower. **Journal of Structural Mechanics**, 1996. 155–187.

EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2023**. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Brasília, p. 372. 2014.

EVANS, V. S. E. T. E. **Comparing the sustainability parameters of renewable, nuclear and fossil fuel electricity generation technologies**. Montreal: [s.n.]. 2010.

EXTERNE. **Externalities of Energy**. European Commission. [S.l.]. 2005.

FADIGAS, E. A. F. A. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos, Conversão e Viabilidade técnico-econômica**. São Paulo: USP, Escola Politécnica, s.d.

FIALHO, F. **Gestão da sustentabilidade na era do conhecimento**. Florianópolis: Visual books, 2008.

FORNECE. Fornecedores de BIODIGESTORES. **Quem fornece.com**, 2018. Disponível em: <<https://www.quemfornece.com/br/fornecedores/biodigestores>>. Acesso em: Outubro 2018.

FREITAS, B. M. R. D.; HOLANDA, L. Micro e Minigeração no Brasil: Viabilidade Econômica e Entraves do Setor. **FGV Energia**, Maio 2015.

FREITAS, B. M. R. D.; HOLLANDA, L. **Micro e Minigeração no Brasil: Viabilidade Econômica e Entraves do Setor**. FGV. [S.l.]. 2015.

FREJ, E. A. **Modelo Multicritério para Seleção de Fornecedores e Análise da Problemática de Ordenação com FITradeoff**. [S.l.]: PPGEP-UFPE, 2017. Tese de Mestrado.

FREJ, E. A.; DE ALMEIDA, A. T.; COSTA, A. P. C. S. **Ranking Alternatives with Flexible and Interactive Tradeoff Elicitation**. CDSID. Recife. 2017. working paper.

FRITSCH, U. R. **ENERGY AND LAND USE**. IRENA. [S.l.]. 2017.

FROELICH, C. International publications about sustainability: a review of articles using the technique of qualitative content analysis. **Rev. Adm. UFSM**, Santa Maria, v. 7, p. 178-195, 2014. ISSN 2.

FROELICH, C. SUSTENTABILIDADE: DIMENSÕES E MÉTODOS DE MENSURAÇÃO DE RESULTADOS. **Revista de Gestão do Unilasalle (ISSN 2316-5537)**, Canoas, v. v. 3, n. 2, Setembro 2014. <http://www.revistas.unilasalle.edu.br/index.php/desenvolve>.

G.P.VIAJANTE. ESTIMATIVA DE OBTENÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO VENTO.

GARCIA, R. Como será o mercado de carbono do Brasil, que foi adiado para 2017. **Observatório do Clima**, 2017. Disponível em: <<http://www.observatoriodoclima.eco.br/como-sera-o-mercado-de-carbono-do-brasil/>>. Acesso em: 27 Novembro 2017.

GOETZBERGER, A.; HOFFMANN, V. U. **Photovoltaic Solar Energy Generation**. Berlim: Springer, 2005.

GREENPEACE. **[r]evolução energética - A CAMINHO DO DESENVOLVIMENTO LIMPO**. GREENPEACE. [S.l.], p. 69-73. 2013.

GUITARRARA, G. B. **Estimativa de vazão para a implantação de micro-centrais hidrelétricas com utilização do SIG**. São Carlos: [s.n.], 2012. 33-36 p. Escola de Engenharia de São Carlos - USP.

GW., F. **Range sensitivity of attribute weights in multiattribute value models**. Organizational Behavior and Human Decision Processes. [S.l.]: [s.n.]. 1995. p. 62(3):252–266.

HADDAH, B.; ABDELKRIM, L.; FERREIRA, P. A multi-criteria approach to rank renewables for the Algerian electricity system. **Renewable Energy**, v. 107, p. 462–472, 2017.

HASSAN, O. Application of value-focused thinking on the environmental selection of wall structures. **Journal of Environmental Management**, 2004. 70: 181–187.

HOLTMEYER, M. L. Considerations for decision-making on distributed power generation in rural areas. **Energy Policy**, p. 208-715, 2013.

IAEA. Uranium fuels the present and future. **International Atomic Energy Agency**, 2010. Disponível em: <<https://www.iaea.org/newscenter/news/uranium-fuels-present-and-future>>. Acesso em: Setembro 2018.

IDEAL. Mapa de Empresas do Setor FV. **America do Sol**, 2018. Disponível em: <<http://www.americadosol.org/fornecedores/>>. Acesso em: Outubro 2018.

IEA. **Distributed Generation in Liberalised Electricity Market**. Paris: OECD/IEA, 2002.

IRENA. **RENEWABLE ENERGY BENEFITS - Decentralised solutions in the agri-food chain**. International Renewable Energy Agency. [S.l.]. 2016.

IWARO, J.; MWASHA, A. A review of building energy regulation and policy for energy conservation in developing countries. **Energy Policy**, p. 7744-7755, 2010.

JOHNS, R. **LIKERT ITEMS AND SCALES**. [S.l.], p. 1-11. 2010. SURVEY QUESTION BANK: Methods Fact Sheet 1.

JP., M. The benefits of global scaling in multi-criteria decision analysis. **Judgment and Decision Making**, 2009. 4(6):492–508.

KAJANUS M, K. J. & K. M. The use of value focused thinking and the A'WOT hybrid method in tourism management. **Tourism Management**, p. 25: 499–506, 2004.

KAYA T, K. C. Multicriteria renewable energy planning using an integrated fuzzy VIKOR & AHP methodology: The case of Istanbul.. **Energy**, p. 35(6):2517–2527, 2010.

KEENEY R, V. W. D. **Practical Value Models**. In: Edwards W, Miles RF, von Winterfeldt D, editors. *Advances in Decision Analysis: From Foundations to Applications*, Cambridge. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. p. 232–252 p.

KEENEY RL & MCDANIELS, T. A Framework to Guide Thinking and Analysis Regarding Climate Change Policies. **Risk Analysis**, p. 21(6): 989–1000, 2001.

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

KEENEY, R. **Value-focused thinking: a path to creative decision analysis**. [S.l.]: Harvard University Press, 1992.

KEENEY, R. Modeling Values for Telecommunications Management. **IEEE Transactions on Engineering Management**, p. 48(3): 370–379, 2001.

KEENEY, R. Value-Focused Thinking:The Foundation for Decision Quality. **Oil and Gas Facilities**, p. 26-29, August 2012.

KEENEY, R. L. MEASUREMENT SCALES FOR QUANTIFYING ATTRIBUTES. **Behavioral Science**, San Francisco, 26, 1981.

KEENEY, R. L. Decision Analysis: An Overview. **Operations Research**, 30, Sep. - Oct. 1982. pp. 803-838.

KOMOR, P.; MOLNAR, T. **BACKGROUND PAPER ON DISTRIBUTED RENEWABLE ENERGY GENERATION AND INTEGRATION**. BONN. 2015. UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC) .

KUMAR A, S. B. S. A. D. Y. H. X. K. P. B. R. A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** , p. 69:596-609, 2017.

KYPREOS, P. R. E. S. Internalisation of external cost in the power generation sector: Analysis with Global Multi-regional MARKAL model. **Energy Policy**, 2007. p. 828-843.

LEI Nº 10.438, 2002. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/lei200210438.pdf>>. Acesso em: Julho 2017.

LIKERT, R. A technique for the measurement of attitudes. **Archives of Psychology**, 1932. 140(1), 44-53.

LIMA, L. F.; GUIMARÃES, S. C. **POTÊNCIA EXTRAÍDA DE TURBINAS EÓLICAS BASEADA NACOMPARAÇÃO DE DIFERENTES TIPOS DE VELOCIDADE DOS VENTOS**. IX CEEL. Uberlândia: [s.n.]. 2011.

LOBATO, F. C. **DIAGNÓSTICO AUTOMÁTICO DE FALHAS EM TURBINAS HIDRÁULICAS DE PEQUENAS CENTRAIS HIDROELÉTRICAS UTILIZANDO TÉCNICAS PREDITIVAS DE MANUTENÇÃO E REDES NEURAIS ARTIFICIAIS**. Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP – FEIS. [S.l.]. 2008. Tese de Mestrado.

LOBEL, R. Knowledge@Wharton. **Wharton**, 2012. Disponível em: <<http://knowledgetoday.wharton.upenn.edu/2012/05/sunspots-germany-proves-solar-energy-is-no-mirage/>>. Acesso em: Setembro 2018.

LYSEN, E. H. Introduction to Wind Energy. **CWD - Consultancy Services Wind Energy Developing Countries**, 1983.

M. GIANINNI, R. M. D. V. G. G. **Estudo prospectivo do mercado de energia eólica de pequeno porte no Brasil**. Brazil Windpower. Rio de Janeiro: [s.n.]. 2013.

MACEDO, M. R. **GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE PEQUENO PORTE COMO ALIADA DO NEGÓCIO DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL**. Curitiba: [s.n.], 2013. Dissertação de Mestrado.

MAHAPATRA, S. Rural electrification: Optimising the choice between decentralised renewable energy sources and grid extension. **Energy for Sustainable Development**, p. 146-154, 2012.

MALKAWI S, A. D. A multi-criteria optimization analysis for Jordan's energy mix. **Energy** **2017;127:680–696**, p. 127:680–696, 2016.

MASCARENHAS, M. P.; WENDEL, A. C. S. Triple Bottom Line da Sustentabilidade: Uma Análise em Empresas Nacionais Produtoras de Óleos e Gorduras. **REUNIR – Revista de Administração, Contabilidade e Sustentabilidade**, v. 3, nº1, p. 62-79, 2013. ISSN ISSN: 2237-3667.

MASSA Cinzenta. **Pequena Central Hidrelétrica – PCH**, 2010. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/pequena-central-hidreletrica-pch/>>. Acesso em: 4 Dezembro 2017.

MATHEW, S. **Wind Energy - Fundamentals, Resource Analysis and Economics**. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2006.

MDL. Mecanismo de Desenvolvimento Limpo. **Ministério de Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicação**, 2013. Disponível em: <http://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/mecanismo_de_desenvolvimento_limpo/Mecanismo_de_Developolvimento_Limpo.html>. Acesso em: 2017.

MDS.GOV. Ministério do Desenvolvimento Social. **Plano Brasil sem Miséria**, 2015. Disponível em: <<http://mds.gov.br/assuntos/brasil-sem-miseria/o-que-e>>. Acesso em: 2017.

MELLO, J. C. C. B. S. D. **Escolha multicritério de uma opção de geração distribuída**. XXIII Encontro Nac. de Eng. de Produção. Ouro Preto: [s.n.]. 2003.

MENEGUIN, F. B. O que é o mercado de carbono e como ele opera no Brasil? **Brasil Economia e Governo**, 28 Novembro 2012. Disponível em: <<http://www.brasil-economia-governo.org.br/2012/08/13/o-que-e-o-mercado-de-carbono-e-como-ele-opera-no-brasil/>>. Acesso em: 28 Novembro 2017.

MERRICK JRW, G. M. A. P. & H. J. Understanding Organizational Safety Using Value-Focused Thinking. **Risk Analysis**, p. 25(4): 1029–1041, 2005.

MIRANDA, V. S. D. P. A Lei Alemã de Fontes Renováveis de Energia em Confronto com a Resolução Normativa nº 482/2012 da Aneel. **Série Aperfeiçoamento de Magistrados 17**, RIO DE JANEIRO, 2012. pg. 128-137. Desenvolvimento Sustentável.

MME. Brasil tem quinta maior reserva de urânio. **Ministério de Minas e Energia**, 2017. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/brasil-tem-5-maior-reserva-de-uranio>. Acesso em: 22 maio 2018.

MONTIBELLER, G. ECODESENVOLVIMENTO E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL - CONCEITOS E PRINCÍPIOS. **Textos de Economia**, Florianópolis, v.4, n.1, 1993. 131-142. <https://periodicos.ufsc.br/index.php/economia/article/download/./6263%253E.%252>.

MOURA, E. **METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE EM TELHADOS - APLICAÇÃO AO CAMPUS DA UFPE**. UFPE. [S.I.]. 2009. Tese de Doutorado.

MOUSAVI M, G. H. M. S. A soft computing based-modified ELECTRE model for renewable energy policy selection with unknown information.. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** , p. 68:774–787, 2017.

MW., M. J. & G. Using value-focused thinking to improve watersheds. **Journal of the American Planning Association**, 2004. 70(3): 313–327.

NAKABAYASHI, R. K. **MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA NO BRASIL: CONDIÇÕES ATUAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS**. [S.l.]: Universidade de São Paulo - Instituto de Energia e Meio Ambiente, 2014. Tese de Mestrado.

NATIONS, U. **Our Common Future**. [S.l.]: [s.n.], 1987. 1-174 p. Report of the World Commission On Environment and Development.

NEATS. Educação para Sustentabilidade. **The Triple Bottom Line**, 2011. Disponível em: <<http://blog.pucsp.br/educasustentabilidade/2011/08/06/the-triple-bottom-line/>>. Acesso em: Abril 2018.

NEOSOLAR. **CALCULADORA SOLAR FOTOVOLTAICA**, 2018. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/simulador-solar-calculadora-fotovoltaica>>. Acesso em: Março 2018.

NOBBS, B. Characterisation of noise in homes affected by wind turbine noise. **Proceedings of Acoustics**, Fremantle, 2012. Australian Acoustical Society.

NOSSO FUTURO COMUM. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1991. COMISSÃO MUNDIAL SOBRE O MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO.

OECD. **Core set of indicators for environmental performance reviews: a synthesis report by the group on the environment**. ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. Paris. 1993.

ONS. **Operador Nacional do Sistema Elétrico**, 2004. Disponível em: <<http://ons.org.br/pt/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>>.

ONUBR. Desenvolvimento Sustentável. **Nações Unidas do Brasil**, 2018. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/energia-solar-agregou-mais-capacidade-de-geracao-eletrica-que-combustiveis-fosseis-em-2017/>>. Acesso em: Outubro 2018.

OVERVIEW and Comparison of Global Concentrating Solar Power Incentives Schemes by Means of Computational Models. [S.l.]: [s.n.].

OYAMA, D. **DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA SELEÇÃO DE ÁREAS DE ENSAIOS E TESTES DE AEROGERADORES**. PPGEM - UFPE. Recife, p. 36. 2017. Tese de doutorado - UFPE.

PAC.GOV. Programa de Aceleração do Crescimento. **LUZ PARA TODOS**, 2017. Disponível em: <<http://www.pac.gov.br/infraestrutura-social-e-urbana/luz-para-todos>>. Acesso em: 2017.

PACHECO, E. A. **QUANTIFICAÇÃO DO RUÍDO DE COMBUSTÃO EM UM MOTOR CICLO OTTO USANDO DIFERENTES COMBUSTÍVEIS DE COMPETIÇÃO ATRAVÉS DA TÉCNICA COMBUSTÍVEIS DE COMPETIÇÃO ATRAVÉS DA TÉCNICA**. Curitiba: [s.n.], 2002. Universidade Federal do Paraná.

PAPADOPOULOU, E. V. M. **Photovoltaic Industrial Systems - An Environmental Approach**. Greece: Springer, 2011. pg. 70-73 p.

PAWLOWSKI, A. How many dimensions does sustainable development have? **Sustainable Development**, 16, 2008. 81–90.

- PAWŁOWSKI, A. How Many Dimensions Does Sustainable Development Have? **Sustainable Development**, v. 16, p. 81-90, 2008.
- PEPERMANS, G. et al. Distributed generation: definition, benefits and issues. **Energy Policy**, 2005. p. 787–798.
- PEREIRA, E. B. **Atlas brasileiro de energia solar**. INPE. São José dos Campos. 2006.
- PERES, S.; PALHA, M. D. L. A. **Inventário da Biomassa Produtora de Biogás de Pernambuco**. Recife: Gráfica & Copiadora Nacional, 2016.
- PETRÓBRAS. **Nossas Reservas Provadas em 2014**. [S.l.]. 2015. <http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/nossas-reservas-provadas-em-2014.htm>.
- PINTO, C. D. S. Pegada ecológica. **Espacios**, v. 37, p. E-3, 2016. <http://www.revistaespacios.com/a16v37n25/163725e3.html>.
- POHEKAR SD, R. M. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—a review.. **Renewable and sustainable energy reviews** , p. 8(4):365–381., 2004.
- POHEKAR; RAMACHANDRAN, M. Application of multi-criteria decision-making to sustainable energy planning—a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 8(4), p. 365–381, 2004.
- POLIZEL, L. H. **Metodologia de prospecção e avaliação de pré-viabilidade expedita de geração distribuída (GD): caso eólico e hidráulico**. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2007. Dissertação (Mestrado).
- PV*SOL. **solarise**, 2018. Disponível em: <http://www.solarize.com.br/site_content/22-software-pv-sol>. Acesso em: Março 2018.
- PVSYST. **PVsys - PHOTOVOLTAIC SOFTWARE**, 2018. Disponível em: <<http://www.pvsyst.com/en/>>. Acesso em: Março 2018. Versão 6.68.
- R. M. DUTRA, V. G. G. Evaluation of The New Brazilian Regulation Concerning Low Voltage Distribution Network: An Opportunity For Small Wind Turbines, Bremen, 2012.
- RAFAJ, P.; KYPREOS, S. Internalisation of external cost in the powergeneration sector: Analysis with Global Multi-regional MARKAL model. **Energy Policy**, v. 35, No 2, p. 828-843, 2007.
- RAHMAN, M. et al. Multicriteria-based decision aiding technique for assessing energy policy elements-demonstration to a case in Bangladesh. **Applied Energy**, v. 164, p. 237–244, 2016.
- RALPH L. KEENEY, H. R. **Decisions with Multiple Objectives - Preferences and Value Tradeoffs**. New York: Cambridge University Press, 1993.
- REDCLIFT, M. **Sustainable development: exploring the contradictions**. London: Metheun, 1987.
- REN21. **RENEWABLES 2016 - GLOBAL STATUS REPORT**. Paris. 2016. Disponível em< http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_Full_Report.pdf>.

RIABACKE M, D. M. E. L. State-of-the-art prescriptive criteria weight elicitation. **Advances in Decision Sciences**, p. ID276584,1–24., 2012.

ROJAS, J. C.; YUSTA, J. M. Methodologies, technologies and applications for electric supply planning in rural remote area. **Energy for Sustainable Development**, p. 66-76, 2014.

ROY, B. **Multicriteria Methodology for Decision Aiding**. [S.l.]: Springer Science+Business Media Dordrecht, 1996.

RÜTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos**. Florianópolis: UFSC / Labsolar, 2004.

SACHS, I. **Estratégias de transição para o século XXI: Desenvolvimento Meio Ambiente**. São Paulo: Studio Nobel e Fundação de Desenvolvimento Administrativo (FUNDAP), 1993.

SACHS, I. **Caminhos para o Desenvolvimento Sustentável**. Rio de Janeiro: Garamond, 2002. p. 85-89 p.

SAN CRISTÓBAL, J. Multi-criteria decision-making in the selection of a renewable energy project in Spain: The Vikor method. **Renewable Energy**, v. 36(2), p. 498–502, 2011.

SANTANA, C. M. **ANALYSIS OF VIBRATION AND NOISE OF AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE BY APPLICATION OF TEST AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE FREQUENCY SPECTRUM**. 22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013). Ribeirão Preto, p. 2996-3005. 2013.

SHAFIEE, S.; TOPAL, E. When will fossil fuel reserves be diminished? **Energy Policy**, v. 37, p. 181–9, 2009.

SHENG H, N. F. & S. K. Understanding the values of mobile technology in education: a value-focused thinking approach. **Data Base for Advances in Information Systems**, 2010. 41: 25–44.

SILVA, D.; DE MARCHI, N. I.; SEIFERT, S. Electricity supply security and the future role of renewable energy sources in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p. 328–341, 2016.

SKYSTREAM. Skystream 3,7. **xzeres wind**, 2018. Disponível em: <<http://www.windenergy.com/products/skystream/skystream-3.7>>. Acesso em: 2018.

SOARES, A.; KANG, T.; ALMEIDA, A. Evaluating electric power generation technologies: A multicriteria analysis based on the FITradeoff method. **Energy**, Setembro 2018.

SOLAR, P. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. **Portal Solar**, 2018. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/energia-solar-fotovoltaica.html>>. Acesso em: 2018.

SOLERGO. **HIPERENERGY**, 2018. Disponível em: <<http://hiperenergy.com.br/>>. Acesso em: Março 2018.

SOUZA, R. D. **Os Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica**. Ribeirão Preto: [s.n.], s.d. Disponível em: <www.blue-sol.com.br>. Acesso em: Março 2018. Livro digital.

SPANGENBERG, J.; BONNIOT, O. Sustainability indicators: a compasso n the road towards sustainability, 81, 1998. Wuppertal Institute for Climate.

STEIN, E. W. A comprehensive multi-criteria model to rank electric energy production technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2013. p. 640-654.

STEINHAUSER, D. D. A. A. **Biogas from Waste and Renewable Resources**. [S.l.]: Wiley-VCH, 2008.

STRANTZALI E, A. K. Decision making in renewable energy investments: a review.. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** , p. 55:885–898, 2016.

STRANTZALI, E.; ARAVOSSIS, K. Decision-making in renewable energy investments: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 55, p. 885–898, 2016.

SUL-KI, Y.; YOUNG SIN, H.; HEO, E. Selecting sustainable renewable energy source for energy assistance to North Korea. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 554-563, 2011.

SUNNY. **SUNNY DESIGN WEB**, 2018. Disponível em: <www.sunnydesignweb.com/sdweb/#/Home>. Acesso em: Março 2018.

SWERA. **Solar and Wind Energy Resource Assessment**, 2012. Disponível em: <[https://openei.org/wiki/Solar_and_Wind_Energy_Resource_Assessment_\(SWERA\)](https://openei.org/wiki/Solar_and_Wind_Energy_Resource_Assessment_(SWERA))>. Acesso em: 2017.

TIDBALL, J. B. N. R. E. A. **Cost and Performance Assumptions for Modeling Electricity Generation Technologies**. NREL - National Renewable Energy Laboratory. Colorado. 2010.

TL., K. R. & M. A Framework to Guide Thinking and Analysis Regarding Climate Change Policies. **Risk Analysis** , p. 21(6): 989–1000, 2001.

TOLMASQUIM, M. T. **ENERGIA TERMELÉTRICA Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2016 NR.

TOLMASQUIM, M. T. **ENERGIA RENOVAVEL Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2016 R. ENERGIA RENOVAVEL.

UNCED. **CONFERENCE ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. Rio 92**, 1992. Disponível em: <<http://www.un.org/geninfo/bp/enviro.html>>. Acesso em: 2017.

UNCED. Sustainable Development Knowledge Platform. **United Nations Conference on Sustainable Development, Rio+20**, 2012. Disponível em: <<https://sustainabledevelopment.un.org/rio20>>. Acesso em: 2017.

VIEIRA, A. R. **ANÁLISE DO POTENCIAL DE POLÍTICAS DESUBSÍDIO PARA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA FOTOVOLTAICA NAS RESIDÊNCIAS BRASILEIRAS**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 2013. Trabalho de Conclusão de Curso do Departamento de Ciências Econômica.

VILLARINI, M. **Overview and Comparison of Global Concentrating Solar Power**. Computational Science and Its Applications - ICCSA 2011. [S.l.]: Heidelberg, Springer-Verlag Berlin. 2011. p. p.258-269. Lecture Notes in Computer Science.

- VOLKART K, B. C. B. P. H. S. S. W. S. M. Interdisciplinary assessment of renewable, nuclear and fossil power generation with and without carbon capture and storage in view of the new Swiss energy policy. **International Journal of Greenhouse Gas Control** , 2016. 54:1–14.
- WANG, J. et al. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, p. 2263–2278, 2009.
- WEBER M, B. K. Behavioral influences on weight judgments in multiattribute decision making.. **European Journal of Operational Research** , 1993. 67(1):1–12.
- WEBER, M. Decision making with incomplete information. **European Journal of Operational Research**, 1987. 28(1): 44-57.
- WEI, S. P. E. D. M. K. Putting renewables and energy efficiency to work: How many jobs can the clean energy industry generate in the US? **Energy Policy**, 2010. p. 919–93.
- WEISSER, D. A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies. **Energy**, Vienna, v. 32, iss., p. 9,17, 2007.
- WERBACH, A. **Estratégia para sustentabilidade: uma nova forma de planejar sua estratégia empresarial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.
- WOLSINK, M. A. S. M. **WINDTURBINE NOISE: A NEW ENVIRONMENTAL THREAT ?** Department of Environmental Science, University of Amsterdam. [S.l.]. 1993.
- ZHANG L, Z. P. N. S. F. J. Z. D. Z. L. Evaluating clean energy alternatives for Jiangsu, China: An improved multi-criteria decision making method.. **Energy** , p. 90:953–964, 2015.
- ZOGRAFIDOU, E. et al. Optimal design of the renewable energy map of Greece using weighted goal-programming and data envelopment analysis. **Computers & Operations Research**, v. 66, p. 313–326, 2016.
- ZYLBERSZTAJN, D.; LINS, C. **Sustentabilidade e geração de valor: a transição para o século XXI**. **Esclvier**, Rio de Janeiro, 2010.

ANEXO - AUTOPRODUÇÃO DE ENERGIA ELETRICA

A eletrificação rural e remota, para a população de baixa renda, é uma preocupação crescente em todo o mundo como pode ser verificado por meio dos trabalhos da Are (2011), que fomenta a eletrificação rural com energia renovável, incentivando tecnologias, padrões de qualidade e modelos de negócios sustentáveis. Bem como, a Irena (2016), uma organização intergovernamental que apoia os países em sua transição para um futuro de energia sustentável e serve de plataforma principal para a cooperação internacional, um centro de excelência, e um repositório de políticas, tecnologia, recursos e conhecimento financeiro sobre fontes renováveis energia. Pesquisadores como (CHERNI J, 2007), (HOLTMEYER, 2013), (ROJAS e YUSTA, 2014) e (MAHAPATRA, 2012), entre outros trabalham a questão do desenvolvimento rural sustentável sob o viés da GREED.No Brasil foram desenvolvidos diversos projetos em energia eólica fotovoltaica (FV) para possibilitar o acesso à eletricidade em comunidades isoladas, através de Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes (SIGFI) e, mais recentemente, Microssistemas Isolados de Geração e Distribuição de Energia Elétrica (MIGDI). No entanto, em sistemas conectados à rede, destaca-se o Projeto de Geração de Renda e Energia, localizado na cidade de Juazeiro (BA), realizado pela Brasil Solar, com um acordo de cooperação financeira com o Fundo Socioambiental CAIXA. Em dois condomínios do Programa Minha Casa Minha Vida, foram instalados sistemas fotovoltaicos sobre 1.000 residências, totalizando 2,1 MWp, envolvendo a comunidade local na instalação dos sistemas. Para atingir os objetivos do projeto uma resolução autorizativa específica foi aprovada. A energia gerada pelo projeto abastecerá as áreas comuns dos condomínios e o excedente será comprado pela própria Caixa Econômica Federal. Parte da receita constituirá um fundo para melhorias nos condomínios e o restante, distribuída para os moradores.

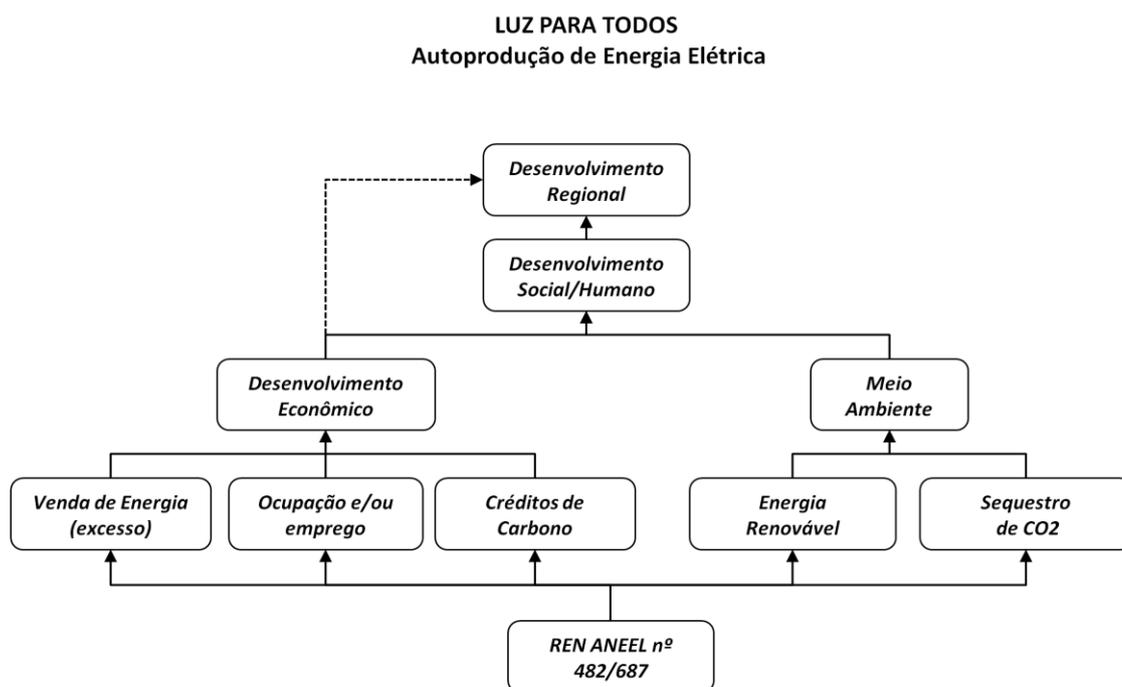
O governo federal já possui iniciativas de cunho geral, no sentido de diminuir a pobreza como o Programa Brasil sem Miséria (MDS.GOV, 2015) e o Programa Luz para Todos (PAC.GOV, 2017) – que promove o acesso de famílias residentes em áreas rurais à energia elétrica, de forma gratuita, acabando com a exclusão elétrica no país, através da extensões de rede, implantação de sistemas isolados e realização de ligações domiciliares. O Programa tem priorizado os beneficiários do Programa Brasil sem Miséria, escolas rurais, quilombolas, tribos indígenas, assentamentos ribeirinhos, pequenos agricultores, famílias em

reservas extrativistas afetadas por empreendimentos do setor elétrico e poços de água comunitários.

Além disso têm-se o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MDL, 2013) que consiste no desenvolvimento de projetos que reduzam a emissão de gases de efeito estufa. Eles, são implementados em países menos desenvolvidos e em desenvolvimento, os quais podem vender as reduções de emissão de GEE, denominadas Reduções Certificadas de Emissão (RCEs) para os países desenvolvidos, auxiliando-os assim a cumprir as suas metas e compromissos de redução de GEE assumidos junto ao Protocolo de Quioto.

Considerando então, que o Programa Luz para Todos (PAC.GOV, 2017), já estabeleceu o acesso à rede elétrica aos domicílios, importante fase na implementação da Resolução Normativa 482 da ANEEL (ANNEE, 2012), é possível verificar a importância de, dentro do Programa Brasil sem Miséria (MDS.GOV, 2015) e do enquadramento no MDL (MDL, 2013), da proposição de um Programa de Governo, para o Brasil, voltado para a diminuição das desigualdades regionais, econômicas e sócias. A Figura 42 apresenta a estrutura de desenvolvimento pensada para o programa.

Figura 69 Consequências resultantes da utilização da REN ANEEL nº 482 como incremento ao Programa Luz para Todos. Fonte: elaborada pelo autor.



A principal modificação para implementação do programa Autoprodução de Energia Elétrica para Todos (AEET) é a necessidade de modificação do sistema da política regulatória atual, com o mecanismo de compensação, Net Metering, que não permite a venda da energia gerada, para o mecanismo da tarifa premio, Feed-in Tariff – FIT, já adotada em tantos países como já analisado na seção 4.2.1, página 20.

Outro ponto a ser considerado é a forma de financiamento que deve ser diferenciada para esta proposta.