

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE MULTICRITÉRIO APLICADA À TOMADA DE DECISÃO DE
INVESTIMENTO EM GERAÇÃO ELÉTRICA NO AMBIENTE DE CONTRATAÇÃO
REGULADO

por

Simone Ferigolo Venturini

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Julho de 2021.

ANÁLISE MULTICRITÉRIO APLICADA À TOMADA DE DECISÃO DE
INVESTIMENTO EM GERAÇÃO ELÉTRICA NO AMBIENTE DE CONTRATAÇÃO
REGULADO

por

Simone Ferigolo Venturini
Engenheira de Produção

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Aprovada por:

Prof. Dr. Júlio Cezar Mairesse Siluk (NIC / UFSM)

Prof.^a Dr.^a Adriane Prisco Petry (PROMEC / UFRGS)

Prof. Dr. Amir Roberto De Toni Junior (UFRGS)

Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 05, Julho 2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro para a elaboração deste trabalho.

RESUMO

No Brasil, parte da energia elétrica produzida é negociada no ambiente de contratação regulado, por meio de processo licitatório na modalidade de leilão, o que garante o fornecimento a longo prazo e a segurança energética do país. A decisão de em qual fonte de geração investir nesse ambiente é complexa e envolve critérios qualitativos e quantitativos. O processo analítico hierárquico - AHP é um método que auxilia na tomada de decisão em problemas complexos com critérios conflitantes e subjetivos. Neste trabalho as alternativas de fontes de geração de energia elétrica negociadas em leilões são organizadas em uma estrutura hierárquica. A estrutura é formada por quatro critérios: preço de venda da energia, despesas de capital - CAPEX, despesas de operação - OPEX e vulnerabilidade ambiental; aplicados as seis alternativas: geração hidrelétrica, eólica, fotovoltaica, termelétrica a biomassa (bagaço de cana), termelétrica a gás natural e termelétrica a carvão. A estrutura é ponderada por especialistas de mercado, de órgãos governamentais e por pesquisadores da área. As informações coletadas por meio do instrumento de pesquisa são compiladas na matriz de decisão que relaciona os pesos de cada critério e o desempenho de cada alternativa. A matriz de decisão fornece o vetor de decisão com o grau de importância de cada alternativa analisada. O resultado obtido indica que a fonte de geração fotovoltaica tem importância de 18,03% da atratividade para investimento, seguida da térmica a gás natural com 16,18%. As fontes de geração térmica a biomassa, eólica e hidrelétrica obtiveram importância de 15,41%, 14,56% e 14,05%, respectivamente. Por fim, a térmica a carvão com 13,63%. Com a análise de conteúdo foi possível identificar fatores que impactam a decisão do investimento em determinada fonte de energia. As variáveis emergentes da análise de conteúdo foram agrupadas nas dimensões regulatória, econômica, ambiental e técnica.

Palavras-chave: Processo Analítico Hierárquico; AHP; Análise Multicritério de Apoio à Decisão; Ambiente de Contratação Regulado; Tomada de decisão.

ABSTRACT

In Brazil, part of the electric energy produced is traded in the Regulated Contracting Environment - ACR, through a bidding process in the auction mode of sale of energy, which guarantees the long-term supply and energy security of the country. The choice of the production source to invest in this environment is complex and implies quality and quantity criteria. The Hierarchical Analytical Process - AHP is a multi-criteria decision-making method based on pair-wise comparisons that helps make decisions on complex problems involving conflicting and subjective criteria. In this work, the alternatives sources of electricity generation negotiated by auction are organized in a hierarchical structure. A hierarchical structure was structured, grouping four criteria: energy selling price, capital expenditure - CAPEX, operational expenditure - OPEX and environmental vulnerability and for six alternatives: hydroelectric power plant, wind power, photovoltaic power, biomass power (sugarcane bagasse), natural gas thermoelectric plant and coal-fired power plant. The structure is judgments by market specialists, government agencies and researchers in the area. The information collected through the research instrument is compiled in the decision matrix that lists the weights of each criterion and the performance of each alternative. The decision matrix provides the decision vector with the weights of importance of each alternative analyzed. The result obtained indicates that the source of photovoltaic power has importance of 18.03% of the attractiveness for investment, followed by the natural gas thermoelectric plant with 16.18%. The sources of thermal generation using biomass power, wind power and hydroelectric had importance of 15.41%, 14.56%, and 14.05%, respectively. Finally, the coal-fired power plant with 13.63%. The content analysis made it possible to identify factors that impact the decision to invest in an energy source. The variables emerging from the content analysis were grouped in the regulatory, economic, environmental, and technical dimensions.

Keywords: Analytic Hierarchy Process; AHP; Multi Criteria Decision Aid; Regulated Contract Environment; Decision making.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Questão da pesquisa	4
1.2. Objetivos da pesquisa	4
1.2.1. Objetivo geral	4
1.2.2. Objetivos específicos	5
1.3. Justificativa	5
1.4. Estrutura do trabalho	7
2. REFERENCIAL TEÓRICO	9
2.1. Estrutura do Setor Elétrico Brasileiro – SEB	9
2.2. Ambiente de Contratação Regulado – ACR	12
2.3. Leilões de Expansão da Geração	13
2.4. Análise Multicritério de Apoio à Decisão - MCDA	15
2.5. Processo Analítico Hierárquico – AHP	15
2.6. Método Borda	21
3. METODOLOGIA	23
3.1. Classificação Metodológica	23
3.2. Cenário da pesquisa	24
3.3. Método de Trabalho	26
4. ESTRUTURAÇÃO DO PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO	31
4.1. Descrição dos Critérios	31
4.1.1. Preço de Venda da Energia	33
4.1.2. Despesas de Capital – CAPEX	34
4.1.3. Despesas de Operação – OPEX	34
4.1.4. Vulnerabilidade Ambiental	35

4.2. Descrição das Alternativas	39
4.2.1. Usina hidrelétrica.....	39
4.2.2. Usina eólica	40
4.2.3. Usina solar fotovoltaica	41
4.2.4. Usina termelétrica a biomassa (Bagaço de cana)	41
4.2.5. Usina termelétrica a gás natural	42
4.2.6. Usina termelétrica a carvão	44
4.3. Estrutura Hierárquica	45
4.4. Formulação Matemática da Ferramenta AHP	46
4.5. Aplicação do Instrumento de Coleta de Dados.....	49
5. RESULTADOS	50
5.1. Análise de dados.....	50
5.2. Resultado do método Borda	51
5.3. Ponderação da estrutura hierárquica.....	52
5.4. Matriz de decisão.....	53
5.5. Análise de conteúdo	54
6. CONCLUSÃO.....	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
APÊNDICE A Análise Bibliométrica	69
APÊNDICE B Instrumento de coleta de dados – Formulário <i>Google forms</i>	75
APÊNDICE C Documentos da revisão sistemática da literatura	83
APÊNDICE D Transcrição da questão aberta	93
APÊNDICE E Transcrição dos comentários	94
APÊNDICE F Imagens das planilhas eletrônicas construídas no aplicativo Microsoft Excel®	95
ANEXO I Resultados dos leilões de geração no ambiente regulado.....	98

ANEXO II Estudos para a expansão da geração.....	102
---	------------

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Número de publicações por ano.....	5
Figura 1.2	Número de publicações por tipo.	6
Figura 2.1	Matriz elétrica brasileira [Adaptado de EPE 2020].	9
Figura 2.2	Estrutura institucional do setor elétrico brasileiro [Adaptado de CCEE, 2020]. ...	11
Figura 2.3	Modelo de estrutura hierárquica genérica no método AHP [Adaptado de Saaty, 1990].	16
Figura 2.4	Quadro da matriz de decisão [Adaptado de Almeida, 2011].	20
Figura 2.5	Exemplo da aplicação do método de Borda [Adaptado de Costa, 2010].	22
Figura 3.1	Resultados dos leilões por localização [Adaptado de ANEEL, 2021 dados de 2005/2019].	25
Figura 3.2	Energia vendida em MW nos leilões por fonte de geração [Adaptado de ANEEL, 2021 dados de 2005/2019].	25
Figura 3.3	Valores de investimento nos leilões por fonte de geração em bilhões de R\$/ano [Adaptado de ANEEL, 2021 dados de 2005/2019].	26
Figura 3.4	Metodologia de trabalho.	27
Figura 4.1	Evolução do nível de armazenamento dos reservatórios [Adaptado do Histórico de Operação do ONS, 2020c].	37
Figura 4.2	Participação das fontes na capacidade instalada da geração centralizada [Adaptado de MME; EPE, 2020].	40
Figura 4.3	Potencial de exportação de eletricidade gerada por bagaço [Adaptado de MME, EPE, 2020].	42
Figura 4.4	Distribuição percentual das reservas nacionais de gás natural por Unidades da Federação [Adaptado de Tolmasquim, 2016].	43
Figura 4.5	Perfil esquemático do processo de produção de energia elétrica a partir do gás natural [ANEEL, 2008].	44
Figura 4.6	Perfil esquemático do processo de produção de energia elétrica a partir do carvão mineral [ANEEL, 2008].	44

Figura 4.7 Estrutura hierárquica dos critérios e das alternativas.....	45
Figura 5.1 Área de atuação dos respondentes.	50
Figura A.1 Análise de citações por documento.....	71
Figura A.2 Análise de coocorrência de palavras chave.....	72
Figura A.3 Análise de coautoria por país.	73

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 Escala fundamental de Saaty. [Adaptado de SAATY, 1991].....	17
Tabela 2.2 Índice randômico. [Adaptado de SAATY, 2012].....	20
Tabela 3.1 Enquadramento metodológico da pesquisa.	23
Tabela 3.2 Formação dos respondentes.....	29
Tabela 4.1 Características dos critérios adotados.....	32
Tabela 4.2 Resultados dos leilões de geração no ambiente regulado. [Adaptado de ANEEL, 2020 dados de 2005/2019].....	33
Tabela 4.3 Resultados dos leilões de geração no ambiente regulado. [Adaptado de ANEEL, 2020 dados de 2005/2019].....	34
Tabela 4.4 Valores de Opex. [Adaptado de EPE, 2019]	35
Tabela 4.5 Fragilidades de cada fonte primária de geração.	36
Tabela 4.6 Variáveis de comparação pareada AHP.	46
Tabela 4.7 Valor da alternativa preço de venda da energia. [Adaptado de ANEEL, 2020 dados de 2005/2019].....	47
Tabela 4.8 Valor da alternativa Capex. [Adaptado de ANEEL, 2020 dados de 2005/2019]..	48
Tabela 4.9 Valor da alternativa Opex. [Adaptado de EPE, 2019].....	48
Tabela 5.1 <i>Ranking</i> global e desempenho das alternativas para o critério vulnerabilidade. ...	51
Tabela 5.2 Peso geral dos critérios.....	52
Tabela 5.3 Matriz de decisão global.....	53
Tabela 5.4 Variáveis adicionais que influenciam a atratividade de investimento em fontes de geração de energia elétrica.	54

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ACL	Ambiente de Contratação Livre
ACR	Ambiente de Contratação Regulado
ACV	Análise de ciclo de vida
AHP	Processo Analítico Hierárquico (<i>Analytic Hierarchy Process</i>)
Aneel	Agência Nacional de Energia Elétrica
BIO	Usina Termelétrica a Biomassa (Bagaço de cana-de-açúcar)
CAPEX	Despesas de Capital (CAPital EXpenditure)
CAR	Usina Termelétrica a Carvão
CCEAR	Contrato de Comercialização de Energia Elétrica no Ambiente Regulado
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CMSE	Conselho de Monitoramento do Setor Elétrico
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EOL	Usina Eólica
GEE	Gases de Efeito Estufa
GN	Usina termelétrica a gás natural
LFA	Leilão de Fontes Alternativas
LER	Leilão de Energia de Reserva
MCDA	Multi Criteria Decision Aid (Análise Multicritério de Apoio à Decisão)
MCP	Mercado de Curto Prazo
MME	Ministério das Minas e Energia
OPEX	Despesas de Operação e Manutenção (OPerational EXpenditure)
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PGC	Peso Geral do Critério Avaliado
SEB	Setor Elétrico Brasileiro
SEL	Secretaria Executiva de Leilões
SIN	Sistema Interligado Nacional

UFV	Usina Solar Fotovoltaica
UHE	Usina Hidrelétrica
UTE	Usina Termelétrica
VPC	Varição da Importância do Critério

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

A	Matriz de julgamento, Alternativa da matriz de decisão, Adimensionais
$*A$	Matriz normalizada, Adimensional
a	Vetores da matriz de decisão, Adimensional
b	Soma ponderada da matriz de julgamento, Adimensional
C	Critério da matriz de decisão, Adimensional
D	Desempenho da matriz de decisão, Adimensional
IC	Índice de consistência, Adimensional
IR	Índice de Consistência Randômico, Adimensional
RC	Razão de consistência, Adimensional
m	Número de linhas, Adimensional
n	Ordem da matriz de julgamento, número de colunas, Adimensionais
p	Peso dos critérios

Símbolos Gregos

λ_{max}	Maior autovalor da matriz de julgamentos, Adimensional
-----------------	--

Subíndices

max	Valor máximo, Adimensional
ij	Linha e coluna do elemento na matriz de decisão, Adimensional

1. INTRODUÇÃO

O aumento das fontes hidráulica, eólica e solar na geração de energia elétrica e o avanço da oferta de biomassa e biodiesel contribuem para que a matriz energética brasileira se mantenha em um patamar renovável superior em relação ao resto do mundo (EPE, 2020b). Em 2019, as fontes renováveis representaram 83,0% de participação na matriz elétrica brasileira, e de 26,7% na média mundial. A geração hidráulica cresceu 2,3% no Brasil, mantendo sua supremacia em relação às demais fontes. Em 2019, a oferta interna de energia elétrica teve um acréscimo de 1,4% em relação ao ano de 2018, com contribuição significativa das fontes renováveis (EPE, 2020b).

O Brasil conta com o Plano Decenal de Expansão - PDE com as perspectivas governamentais de expansão e de investimentos a longo prazo do setor energético. O PDE 2030 mostra a atratividade para novos investimentos em energias renováveis e em energias não renováveis para os próximos dez anos, orientando a tomada de decisão dos agentes privados (MME; EPE, 2020).

O processo de tomada de decisão de alta complexidade está cada vez mais presente no ambiente empresarial competitivo, sendo fundamental tomar decisões rápidas, bem direcionadas e abrangentes (Gomes e Gomes, 2014). No setor elétrico, este processo é complexo e envolve elementos quantitativos e qualitativos, aumentando sua dificuldade e a análise deve utilizar outros fatores além dos de ordem financeira (Soares, 2015).

Dessa forma a tomada de decisão dos investidores tem de levar em consideração fatores qualitativos e, muitas vezes subjetivos, alicerçados no conhecimento ou expertise dos tomadores de decisão. Jansen, Jin e Winter (2012), sugerem agregar previsões subjetivas realizadas por analistas profissionais, utilizando métodos que quantificam a expertise de especialistas. Para os autores, essas previsões têm baixo custo e são de fácil aplicabilidade e podem incorporar informações valiosas que vão além de dados puramente estatísticos.

O método Processo Analítico Hierárquico (AHP), desenvolvido pelo matemático Thomas L. Saaty (1977), tem a capacidade de realizar a conversão de dados qualitativos baseado na experiência de especialistas em valores quantitativos. Tais valores são processados e comparados, e avaliam a contribuição (peso) de cada critério na questão em análise e tomada de decisão.

O método Processo Analítico Hierárquico (AHP) é utilizado amplamente na área de energia elétrica e de energias renováveis. Os autores Rigo, et al. (2020) analisaram o sucesso

da implantação de projetos de geração distribuída de pequena escala de energia fotovoltaica utilizando o AHP. O modelo gerado permitiu ponderar os indicadores analisados e medir o sucesso dos projetos avaliados. A principal contribuição do estudo desses autores foi criar um modelo dinâmico que pode incorporar outros temas ou fatores contextuais não considerados no estudo. O estudo de Rediske et al. (2020) definiu os melhores locais para implantação de usinas fotovoltaicas de grande porte baseado nos resultados obtidos do método AHP combinado com os métodos TOPSIS e MAUT. O método AHP foi utilizado para obter o peso de cada fator, enquanto que o TOPSIS e MAUT foram utilizados para a ordenar as alternativas. Segundo os autores, a modelagem proposta em combinação com o *Geographic information system* - GIS é aplicável em investigações semelhantes em outras regiões.

Já os autores Bulhões et al. (2020), De Paiva, et al. (2019) e Weiss, et al. (2018) utilizam o método AHP para auxiliar na tomada de decisões e na seleção de regiões para implantação de parques eólicos no Estado da Bahia, escolha de equipamentos e manutenção em turbinas eólicas e geração de um mapa de zoneamento espacial para instalação de parques eólicos no extremo sul do Brasil. Bulhões et al. (2020) tem o objetivo de auxiliar agências governamentais, agências reguladoras e outras instituições nesta área para auxiliar na tomada de decisões e selecionar regiões prioritárias para implantação de parques eólicos, e assim servir de apoio para investimentos regionais. O estudo de Weiss, et al. (2018) combina os métodos *Delphi* e AHP para a geração dos mapas de zoneamento espacial com o objetivo de contribuir para o processos de licenciamento dos empreendimentos eólicos, possibilitando estimar a produção de energia nessas áreas.

De Azevedo et al. (2020), com o objetivo de identificar o potencial eólico *offshore* para a geração de eletricidade, aplicaram o AHP às informações geográficas da costa brasileira. O estudo aponta que a costa brasileira tem potencial eólico e estima uma geração média de 14TWh por ano. No estudo de Zanardo et al. (2018) é proposto um modelo para diagnosticar o nível de desempenho energético em empresas do setor industrial, em que a influência de cada indicador da análise foi realizada por meio da priorização do *Analytic Hierarchy Process*. O modelo foi desenvolvido com base em indicadores de desempenho, organizados em uma estrutura hierárquica. A modelagem foi testada em uma indústria e foi possível analisar o desempenho energético e propor adequações para a melhoria do desempenho energético da empresa.

Depreende-se dos trabalhos citados que o método Processo Analítico Hierárquico é aplicado nos processos de tomada de decisão que envolvem altos custos de investimento e sua utilização é aplicável em ambientes diversos que envolvem variáveis qualitativas e quantitativas, facilitando e tornando mais robusta a tomada de decisão.

O Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) é diferenciado na esfera mundial devido as suas particularidades geográficas, tais como a abundante oferta de bacias hidrográficas e a vasta extensão territorial (Mendes, 2019). A produção de energia elétrica no Brasil é um sistema calçado em hidro-termo-eólico de grande porte, com predominância em usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários (ONS, 2020a). As fontes renováveis representam 83,3% da oferta interna de eletricidade, sendo que a fonte hídrica responde por 64,9%. As demais fontes que complementam a matriz são o carvão, derivados do petróleo e nuclear (EPE, 2020b).

A energia gerada é escoada pelo Sistema Interligado Nacional (SIN), uma rede de transmissão com 141.756 km de extensão que interliga os subsistemas Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e a maior parte da região Norte (ONS, 2020b). Dessa forma, o SIN permite o intercâmbio da energia produzida em todas as regiões do Brasil, exceto nos sistemas isolados que estão localizados na região Norte, mas que têm sido gradativamente interligados e cerca de 2% do mercado nacional ainda permanece isolado (ANEEL, 2020). A operação do SIN é realizada de forma coordenada e centralizada pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), e objetiva alcançar ganhos sinérgicos com o menor custo financeiro (Mendes, 2019).

A reforma de 2004 implantou o Novo Modelo de Setor Elétrico, sustentado pelas leis nº 10.847 e nº 10.848, ambas sancionadas em 15 de março de 2004. A Lei nº 10.847 (BRASIL, 2004d) criou a Empresa de Pesquisa Energética - EPE com a finalidade de prestar serviços na área de estudos e pesquisas destinados a subsidiar o planejamento do setor energético. A EPE tem por finalidade prestar serviços ao Ministério de Minas e Energia (MME) na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético, cobrindo energia elétrica, petróleo e gás natural e seus derivados e biocombustíveis (EPE, 2021). A Lei nº 10.848 dispõe sobre a comercialização de energia, estabelece o leilão do tipo menor preço como critério para a participação nas licitações de empreendimentos e institui contratos de energia de longo prazo (BRASIL 2004e). A Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), pessoa jurídica de direito privado, sem fins lucrativos, instituída pelo decreto nº 5.177 de 12 de agosto de 2004 tem por finalidade viabilizar a comercialização de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional. Cabe a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) a regulação e fiscalização das atribuições da CCEE (BRASIL, 2004c).

São agentes da CCEE as empresas que atuam no setor de energia elétrica nas áreas de geração, distribuição e comercialização. Há ainda os consumidores livres e consumidores especiais, conceitos associados à demanda e também à fonte de geração de energia (CCEE, 2020d). O consumidor livre é aquele que pode escolher seu fornecedor de energia elétrica por meio de livre negociação. Já os consumidores especiais são aqueles com demanda

entre 500 kW e 30.000 kW e que têm o direito de adquirir energia de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) ou de fontes incentivadas especiais, como a eólica, a biomassa ou a solar (BRASIL, 1996).

Os agentes podem realizar contratos de compra e venda de energia elétrica em dois ambientes de mercado: o Ambiente de Contratação Regulada (ACR), do qual participam agentes de geração e distribuição; e o Ambiente de Contratação Livre (ACL), com geradores, distribuidores, comercializadores, importadores e exportadores, além dos consumidores livres e especiais. Os contratos acordados nesses ambientes são registrados na CCEE, que realiza a apuração dos montantes de energia consumidos ou produzidos por cada agente (CCEE, 2020b).

No Ambiente de Contratação Regulada a compra e a venda de energia elétrica são realizadas por meio de contratos firmados em leilões de energia promovidos pela CCEE sob a delegação da ANEEL (CCEE, 2020a). Os leilões buscam contratar energia pelo menor preço possível, buscando atrair investidores para expandir o parque gerador, a modicidade tarifária e reter a geração existente (ANEEL, 2020b).

Assim, a decisão de investir em projetos de longa duração e de alto capital investido requer fatores explícitos e mensuráveis para auxiliar os tomadores de decisão, de modo a refletir sobre os aspectos relacionados as incertezas desse segmento (Rigo, 2019).

1.1. Questão da pesquisa

Diante desse cenário, apresenta-se a seguinte questão: como utilizar os modelos de análise multicritério para identificar a atratividade em investimentos de geração de eletricidade no Ambiente de Contratação Regulado?

1.2. Objetivos da pesquisa

A fim de analisar a situação levantada, são indicados a seguir o objetivo geral e os objetivos específicos da pesquisa realizada.

1.2.1. Objetivo geral

O objetivo do trabalho é o de disponibilizar os resultados desta pesquisa sob a ótica da análise de multicritério para auxiliar os investidores na tomada de decisão sobre qual fonte de geração elétrica investir nesse ambiente.

1.2.2. Objetivos específicos

- a) Realizar uma revisão sistemática da literatura (RSL) sobre a utilização do método AHP no mercado de energia elétrica no Brasil;
- b) Identificar os fatores que impactam na atratividade de investimentos em geração de eletricidade;

1.3. Justificativa

A justificativa desta pesquisa está organizada sob dois enfoques: o acadêmico e o de mercado. Na perspectiva acadêmica foi feita uma revisão sistemática da literatura para verificar se o processo analítico hierárquico é explorado no setor elétrico, colaborando para a tomada de decisão nesse setor. A perspectiva de mercado, aborda aspectos da tomada de decisão no mercado de energia e no ambiente de contratação regulado.

No **APÊNDICE A** são apresentados os resultados da revisão sistemática em que foram procurados documentos que indicassem a utilização do Processo Analítico Hierárquico – AHP no mercado brasileiro de energia elétrica. Assim, as expressões “energia elétrica” e “análise hierárquica de processos” foram selecionadas e ampliadas com a inclusão de sinônimos. Para a realização da pesquisa bibliográfica, foi utilizado o portal de conteúdo científico *Scopus*. A pesquisa localizou 88 estudos, dos quais 55,68% foram publicados de 2016 a 2020. A Figura 1.1 traz o número de publicações por ano.

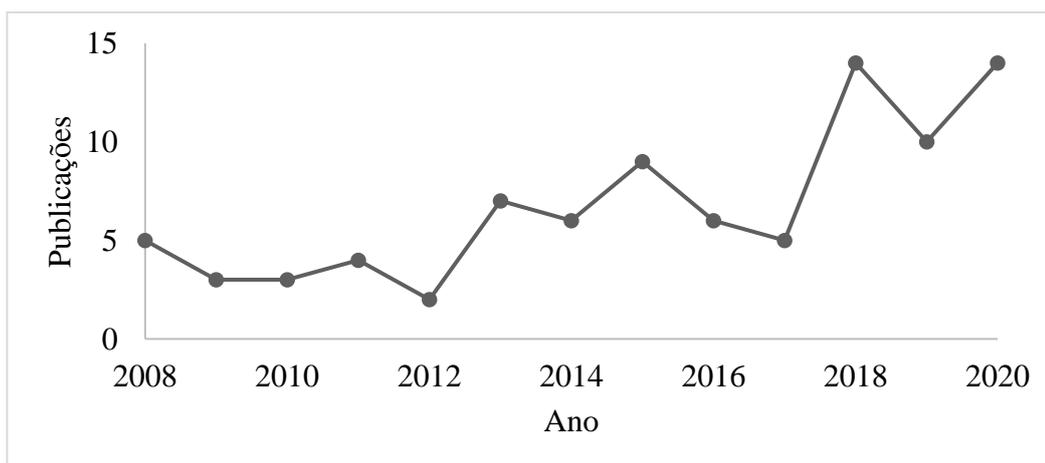


Figura 1.1 – Número de publicações por ano.

Foram publicados 50 documentos entre os anos de 2008 e 2017 e entre os anos de 2018 e 2020 foram publicados 38 documentos.

Na categorização dos documentos por tipo, 55,7% são artigos publicados em periódicos, 38,6% são artigos de anais de congressos ou conferências.

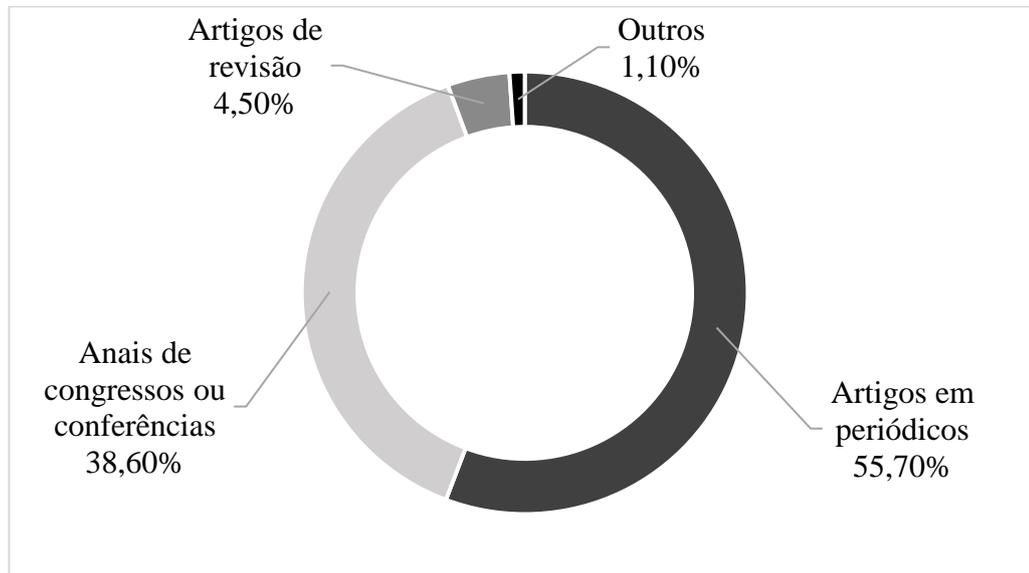


Figura 1.2 – Número de publicações por tipo.

As revistas com maior número de publicações são a *Chemical Engineering Transactions*, *Energy* e *Energy Policy*, com 3 publicações cada. As revistas *Clean Technologies and Environmental Policy*, *Electric Power Systems Research*, *Energies* e *IEEE Access*, possuem 2 publicações cada.

O estudo mais citado traz a aplicação do método AHP para obtenção da classificação de prioridades das barreiras que influenciam na implantação da logística reversa no contexto brasileiro (Bouzon et al., 2016). Esse estudo revela a importância de levar em consideração a opinião de especialistas e de gestores industriais. No trabalho realizado por Bernardon et al. (2011) foi utilizado o algoritmo de tomada de decisão AHP para definir a alocação de controladores remotos que registram os índices de confiabilidade da rede elétrica. Nesse estudo de caso são envolvidos sistemas reais de uma concessionária localizada no sul do Brasil.

Um estudo atual que utiliza o AHP para validar o processo decisório para as atividades de perfuração e de construção de poços de petróleo offshore, traz objetividade à subjetividade natural das decisões humanas individuais (França et al., 2020). Observa-se que os estudos que utilizam a AHP na área de energia no Brasil tratam de aplicações específicas sem utilização em decisões macros que envolvem mais de uma fonte de geração ou um nicho mais abrangente.

Na perspectiva de mercado, a expectativa para o próximo decênio é o crescimento gradual da economia brasileira, o que acarreta um aumento do nível de investimentos e o

aumento da produtividade da economia (MME; EPE, 2019). O planejamento energético deve priorizar o fornecimento de energia elétrica a partir de um balanço entre custos, risco de desabastecimento e impactos socioambientais. Além disso, os instrumentos formais de planejamento são importantes para reduzir as incertezas inerentes ao sistema de energia (ONS, 2020b).

As previsões de demanda para o sistema elétrico brasileiro fornecem elementos para estudos de capacidade, que tem por objetivo avaliar se o sistema atual é capaz de suprir a demanda prevista ou se é necessário planejar a expansão desse sistema. Esses estudos de capacidade levam em conta as condições de armazenamento atuais e futuras dos reservatórios de água e utilizam como métricas o risco de déficit, a garantia de suprimento e os custos marginais de operação (ONS, 2020b).

Dentre as ações de planejamento da expansão do sistema está a avaliação de novas fontes de geração, que podem aumentar a flexibilidade do sistema e garantir a manutenção das tarifas cobradas dos consumidores (ONS, 2020b). A expansão da oferta de geração é definida e, parte dela é negociada no Ambiente de Contratação Regulado – ACR, por meio de leilões de expansão da geração (ONS, 2020b).

A tomada de decisão em um cenário tão complexo não é uma tarefa simples e requer análises complexas pelos tomadores de decisão. A capacidade de tomar decisões claras, incisivas e oportunas, no ambiente empresarial, garante o aumento de ativos e a satisfação do grupo de trabalho. A ciência da tomada de decisões é uma arte, pois considera a opinião e a intuição dos envolvidos, e também é uma ciência, por ser disciplinada e analítica (Gross, 2010).

Tomar decisões em um ambiente complexo, baseado na experiência do especialista e em julgamentos suportados na expertise, garantem uma perspectiva mais ampla na decisão (Saaty, 2012). Assim, verifica-se que é necessário estudar métodos para auxiliar na tomada de decisão no ambiente de contratação regulado.

1.4. Estrutura do trabalho

O trabalho está estruturado em 6 Capítulos. O Capítulo 1 apresenta o contexto da pesquisa, a questão de pesquisa, o objetivo geral, os objetivos específicos, a justificativa e a estrutura do trabalho.

No Capítulo 2 é descrito o referencial teórico utilizado como base para este trabalho, onde são apresentados a estrutura do Setor Elétrico Brasileiro – SEB, o Ambiente de Contratação Regulado – ACR, os leilões de expansão da geração, os métodos de Análise

Multicritério de Apoio à Decisão – MCDA, o método Processo Analítico Hierárquico – AHP e o método Borda.

O Capítulo 3 contempla a classificação metodológica da pesquisa e o método de trabalho utilizado que é dividido em nove etapas.

No Capítulo 4 é apresentada a estruturação do Processo Analítico Hierárquico, com a descrição dos critérios e das alternativas, a estrutura hierárquica e o instrumento de coleta de dados.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados desta pesquisa, a análise dos dados coletados, os resultados da aplicação do método Borda, a ponderação da estrutura hierárquica, a matriz de decisão e a análise de conteúdo.

As conclusões deste trabalho, as limitações e sugestões para trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo 6.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo é apresentada a fundamentação teórica pertinente para a compreensão deste trabalho. O capítulo está dividido em duas seções, sendo que a primeira contempla a estrutura do Setor Elétrico Brasileiro - SEB, o Ambiente de Contratação Regulado – ACR e o mecanismo dos leilões de expansão da geração; e a segunda apresenta os métodos de Análise Multicritério de Apoio à Decisão – MCDA e do método Processo Analítico Hierárquico - AHP.

2.1. Estrutura do Setor Elétrico Brasileiro – SEB

O Setor Elétrico Brasileiro (SEB) possui dimensões e características que permitem considerá-lo único em âmbito mundial, pois é composto de um sistema hidrotérmico de grande porte, com forte predominância de usinas hidrelétricas e múltiplos proprietários (ONS, 2020a).

O Brasil possui mais de 170 GW de potência instalada, interconectada através do Sistema Interligado Nacional (SIN), sendo mais de 75% oriunda de fontes renováveis (ANEEL, 2020). Em 2019, a geração hidrelétrica respondeu por 64,9% do total gerado, seguida pela geração térmica a gás natural, a geração eólica e a geração térmica a biomassa com respectivamente 9,3%, 8,6% e 8,4% de participação na matriz (EPE, 2020). A Figura 2.1 traz a participação de cada tipo de fonte na matriz elétrica brasileira.

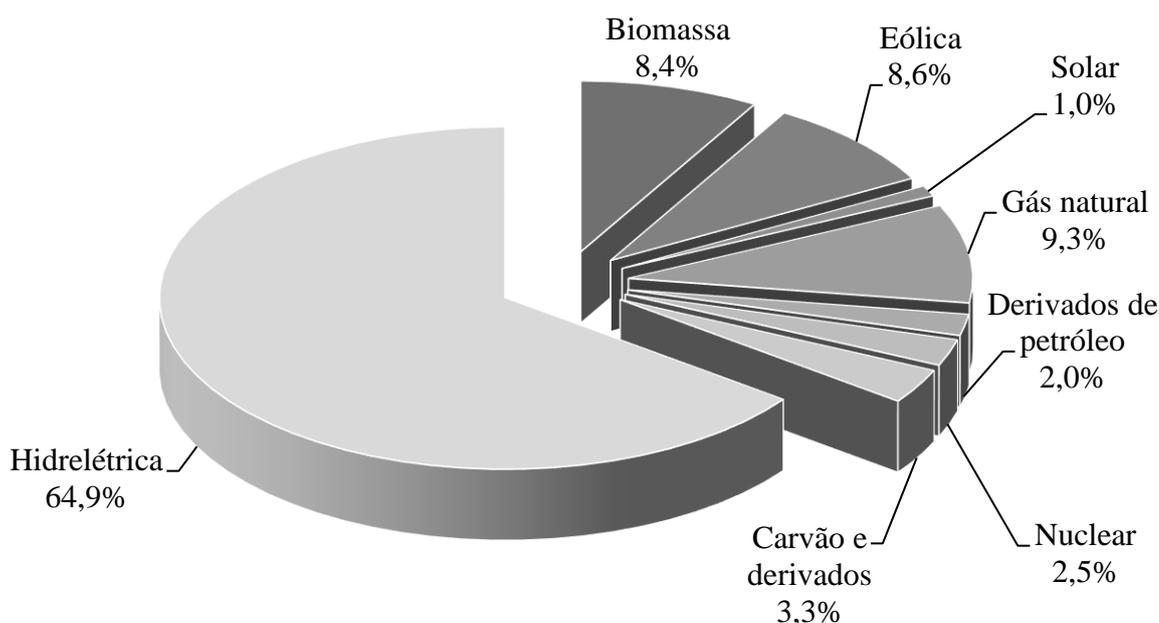


Figura 2.1 – Matriz elétrica brasileira [Adaptado de EPE 2020].

A geração do SIN é de predominância hidráulica, cujo regime hidrológico é totalmente dependente das chuvas. A geração solar está em crescimento, visto que no ano de 2018 teve uma participação de 0,5 % na matriz energética e no ano de 2019 passou para 1,0%.

As projeções da EPE indicam a expansão das fontes renováveis de energia, sobretudo as pequenas centrais hidroelétricas, as centrais de biomassa, as usinas eólicas e as plantas solares, porém, essas fontes alternativas possuem como característica a intermitência, ou seja, o fato de estarem sujeitas à interrupção na geração por conta de condições climáticas adversas. Já as usinas hidrelétricas a serem construídas não contribuem para o aumento da capacidade de armazenamento do sistema elétrico brasileiro, devido as imposições de restrições ambientais para a construção de grandes reservatórios (Alves, 2018).

A indústria de energia elétrica contemporânea tem como principal característica a livre concorrência na compra e venda de energia elétrica, sendo que as atividades de geração, transmissão e distribuição são desempenhadas, cada uma delas, de forma independente e autônoma. Os segmentos geração e comercialização, são aqueles que possuem livre concorrência, já os segmentos da transmissão e distribuição são considerados monopólios naturais sob regulação técnica e econômica dos agentes responsáveis (Silva, 2012).

O mesmo autor ressalta que para o funcionamento harmônico de um mercado, alguns requisitos devem ser atendidos: a eficiência econômica e a autossustentação da indústria de modo a garantir a expansão do sistema; a operação do sistema com elevado grau de confiabilidade e em conformidade com requisitos de qualidade exigidos pela sociedade; além de garantir a universalização dos serviços.

O arranjo institucional aprovado em 2004 teve por objetivo modificar a legislação vigente e reestruturar o setor elétrico. As Leis nº 10.847/04, 10.848/04 e o Decreto nº 5.163/04 criaram uma instituição responsável pelo planejamento energético (EPE), uma instituição com a função de avaliar permanentemente a segurança do suprimento de energia elétrica, O Conselho de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE) e uma instituição responsável pela comercialização de energia elétrica no Sistema Interligado, a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE).

A Figura 2.2 traz a estrutura completa com os demais agentes que fazem parte do SEB.

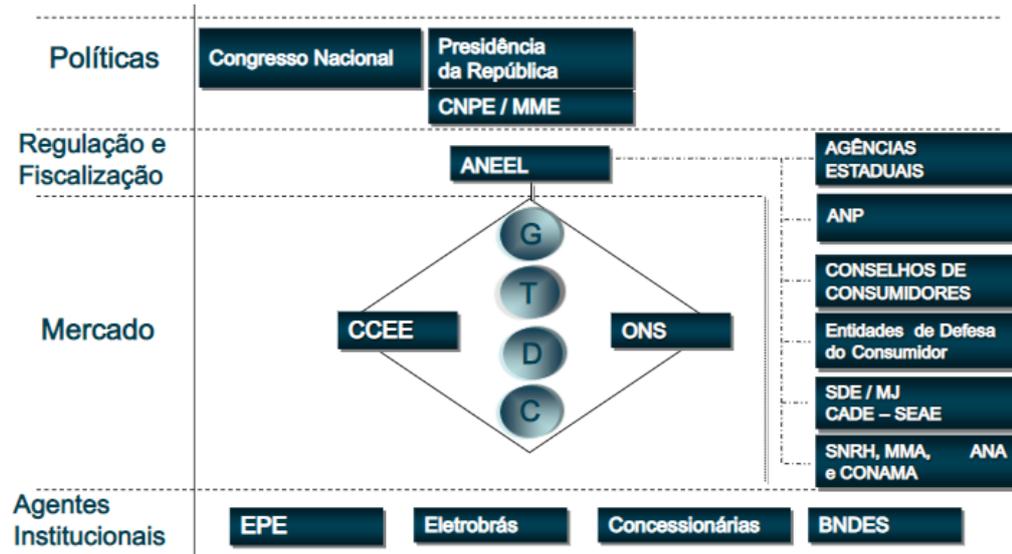


Figura 2.2 – Estrutura institucional do setor elétrico brasileiro [Adaptado de CCEE, 2020].

Além dos agentes de comercialização (C), de geração (G), de transmissão (T) e de distribuição (D), que compõe a seção de mercado, outros agentes fazem parte da estrutura setorial.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), de acordo com BRASIL (1996), tem por finalidade regular e fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, em conformidade com as políticas e diretrizes do governo federal. A regulação ocorre em termos técnicos e econômicos. De acordo com Silva (2012), a regulação técnica trata dos critérios de expansão da geração, transmissão e distribuição, qualidade do fornecimento de energia e qualidade dos serviços de transmissão. Já a regulação econômica se dá pelo controle dos preços dos serviços de transmissão e distribuição, controle dos preços dos consumidores do mercado regulados e preservação do equilíbrio econômico-financeiro dos agentes. A Lei Nº 10.848, de 15 de março de 2004 agregou as atribuições de aprovar as regras e os procedimentos de comercialização de energia elétrica, contratada de formas regulada e livre e promover processos licitatórios para atendimento às necessidades do mercado (BRASIL, 2004e).

A Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) é responsável em efetuar a contabilização dos montantes de energia elétrica comercializados, e a liquidação financeira dos valores decorrentes das operações de compra e venda de energia elétrica realizadas no mercado de curto prazo – MCP (BRASIL, 2004b).

Por sua vez, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), tem como principal atribuição o planejamento e a programação da operação e o despacho centralizado da geração sob a ótica do mínimo custo operativo, despachando as unidades geradores a fim de atender a

demanda com qualidade e confiabilidade. Também é responsável pela supervisão e a coordenação dos centros de operação de sistemas elétricos, a supervisão e o controle da operação do SIN e das interligações (BRASIL, 2004a).

A Empresa de Pesquisa Energética EPE, empresa pública, tem por atribuição prestar serviços na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético, tais como energia elétrica, petróleo e gás natural e seus derivados, carvão mineral, fontes energéticas renováveis e eficiência energética, dentre outras. Dentre os principais estudos do setor elétrico temos a projeção da demanda energética brasileira, a expansão das linhas de transmissão e os potenciais de geração de energia elétrica (BRASIL, 2004d).

Outra mudança oriunda da reforma, foi a definição de dois ambientes distintos para a celebração de contratos de compra e venda, o Ambiente de Contratação Regulada (ACR), do qual participam agentes de Geração, de Comercialização e de Distribuição de energia elétrica, e o Ambiente de Contratação Livre (ACL), do qual participam Agentes de Geração, Comercialização e Consumidores Livres. Este modelo tornou obrigatória a contratação de todo o mercado de longo prazo, devendo os agentes registrar e homologar os contratos na CCEE e Aneel, respectivamente. Todos os contratos devem ser negociados via leilões pelo critério de menor tarifa, abolindo assim o critério de maior preço.

2.2. Ambiente de Contratação Regulado – ACR

O Ambiente de Contratação Regulado - ACR é o segmento do mercado no qual se realizam as operações de compra e venda de energia elétrica entre agentes vendedores e agentes de distribuição, precedidas de licitação na modalidade de leilão, ressalvados os casos previstos em lei, conforme regras e procedimentos de comercialização específicos (BRASIL, 2004b). No ambiente de contratação regulado, são atendidos os consumidores de tarifas reguladas por meio de contrato regulado com o objetivo de assegurar a modicidade tarifária (Oliveira, 2009).

O ACR opera por meio de um modelo competitivo no qual as distribuidoras informam suas demandas energéticas ao MME, que em conjunto com a EPE, determinam os montantes de energia a serem contratados por meio de leilão (Murcia neto, 2016; EPE, 2020b). Diante da obrigação da contratação de energia via leilões, as distribuidoras só atuam no ACR para atender aos consumidores cativos (Alves, 2018).

A legislação brasileira, por meio da lei nº 10.848, de 15 de março de 2004, e do decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004, regulamenta a comercialização de energia elétrica e o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica e estabelece que as

concessionárias, as permissionárias e as autorizadas do serviço público de distribuição de energia do Sistema Interligado Nacional - SIN devem garantir, por meio de licitação, na modalidade de leilão, o atendimento à totalidade de seu mercado no ACR (ANEEL, 2020b). A mesma legislação estabelece os leilões de compra, com três tipos de contratação para o ambiente regulado: Contratação da energia de novos empreendimentos de geração, contratação da energia das usinas já existentes e a contratação de ajuste.

2.3. Leilões de Expansão da Geração

A realização de leilões para expansão da oferta de energia elétrica foi o mecanismo introduzido na reforma do setor elétrico e consolidado com a efetiva participação de várias instituições do Setor Elétrico Brasileiro. Os leilões constituem pilares do arranjo institucional introduzido em 2004 (EPE, 2020a).

O MME estabelece anualmente, por meio de portaria, a data dos leilões, que são realizados pela CCEE, por delegação da ANEEL. O preço é fixado segundo um preço-teto (R\$/MWh), previsto no edital de licitação. Os agentes vendedores que fornecerem o maior desconto, em relação ao preço-teto, são considerados vencedores do certame e logram um Contrato de Comercialização de Energia Elétrica no Ambiente Regulado - CCEAR (Tolmasquim, 2011).

A ANEEL organiza os leilões para contratar a compra de energia elétrica por parte das concessionárias, das permissionárias e das autorizadas do serviço público de distribuição de energia elétrica. Para realizar os leilões, a ANEEL conta com o apoio da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE. Os leilões de compra de energia elétrica têm três objetivos: (i) contratar energia pelo menor preço possível (modicidade tarifária); (ii) atrair investidores para construir novas usinas para expandir a geração, e (iii) reter a geração existente (ANEELa, 2020).

Os tipos de leilões existentes no setor elétrico brasileiro, conforme dados da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE, 2020e), são:

i) Leilão de Fontes Alternativas - LFA: o leilão de fontes alternativas foi instituído com o objetivo de atender ao crescimento do mercado no ambiente regulado e promover a participação de fontes renováveis eólica, biomassa e Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), na matriz energética brasileira.

ii) Leilão Estruturante: os leilões estruturantes destinam-se à compra de energia proveniente de projetos de geração indicados por resolução do Conselho Nacional de Política

Energética (CNPE) e aprovados pelo presidente da República. Esses leilões referem-se a empreendimentos que tenham prioridade de licitação e implantação, tendo em vista seu caráter estratégico e o interesse público, buscando assegurar a otimização do binômio modicidade tarifária e confiabilidade do sistema elétrico, bem como garantir o atendimento à demanda de energia elétrica, considerando o planejamento de longo, médio e curto prazos.

iii) Leilão de Energia de Reserva - LER: tem o objetivo de contratar energia de reserva para elevar a segurança do fornecimento de energia elétrica no SIN, com energia proveniente de usinas novas ou existentes, especialmente contratadas para esta finalidade.

iv) Leilão de Energia Nova - LEN: o leilão de energia nova tem como finalidade atender o aumento de carga das distribuidoras. Neste caso são vendidas e contratadas energia de usinas que ainda serão construídas. Este leilão pode ser de dois tipos: A-5 (usinas que entram em operação comercial em até cinco anos) e A-3 (em até três anos).

v) Leilão de Energia Existente - LEE: o leilão de energia existente foi criado para contratar energia gerada por usinas que estão em operação, cujos investimentos já foram amortizados e, portanto, com custos mais baixos.

vi) Leilão de Ajuste - LA: os leilões de ajuste visam a adequar a contratação de energia pelas distribuidoras, tratando eventuais desvios oriundos da diferença entre as previsões feitas pelas distribuidoras em leilões anteriores e o comportamento de seu mercado.

Como resultado da contratação para este ambiente de mercado, são celebrados contratos bilaterais denominados Contratos de Comercialização de Energia Elétrica no Ambiente Regulado (CCEAR) celebrados entre as unidades de geração e as concessionárias de distribuição de energia elétrica.

2.4. Análise Multicritério de Apoio à Decisão - MCDA

O processo de decisão está associado à necessidade de se atender a melhor escolha entre parâmetros adjacentes, pois trata-se de uma atividade complexa devido às incertezas sobre os aspectos envolvidos (Saaty e Vargas, 2012; Zavadskas, et al., 2014). As técnicas de Análise Multicritério de Apoio à Decisão (*Multi Criteria Decision Aid - MCDA*) podem ser utilizadas para problemas com no mínimo duas ações possíveis para solucioná-lo, pois englobam métodos com o objetivo de representar a complexa realidade por meio de modelagens qualitativas ou quantitativas, o que permite um melhor entendimento por parte dos atores envolvidos e serve como subsídio para a escolha final entre as opções disponíveis (Gomes e Gomes, 2014). Os métodos MCDA constituem-se de ferramentas úteis para estruturar e avaliar situações de decisão complexas, pois são capazes de avaliar o conhecimento de especialistas e produzir sistemas de ponderação baseados em valores e experiências (Carayannis, et al. 2018). Ainda, a MCDA não tem por objetivo excluir a subjetividade do problema, mas visa torná-lo nítida aos tomadores de decisão, guiando-os por caminhos lógicos para satisfazer os objetivos de todos os envolvidos (Ensslin, et al., 2001).

Segundo Mendes (2013), os métodos de abordagem multicritério mais aplicados, dividem-se nas famílias de métodos Borda, *Election Et Choice Tradusàint la réalité - ELECTRE*, *Prederence Ranking Organization Method for Enrichement Evaluations - PROMETHEE* e *Analytic Hierarchy Process* (Processo Analítico Hierárquico - AHP), os quais são derivados das escolas Americana, Francesa, ou híbrida, cada qual com suas próprias características (Gomes e Gomes, 2014; Soliman, 2014). O modelo AHP é o método MCDA mais utilizado (Wang, 2009). A AHP é utilizada para definir escalas de proporção de comparações analisadas aos pares, a partir de uma escala fundamental que reflete as preferências e sentimentos do analista (Saaty, 1987). Esta dissertação faz o uso dos conceitos da ferramenta Processo Analítico Hierárquico, que além de contribuir na determinação da decisão correta, o AHP auxilia na justificativa da escolha.

2.5. Processo Analítico Hierárquico – AHP

O método AHP fornece uma estrutura abrangente para lidar com o intuitivo, o racional e o irracional ao mesmo tempo em que as decisões são tomadas (Saaty, 1983). Na literatura o AHP é descrito como uma técnica utilizada para resolução de problemas complexos (Piran et al., 2018). A AHP foi desenvolvida por Saaty em 1971, e definida em Saaty (1987) como uma teoria geral da medida usada para prover escalas de proporção de comparações pareadas

discretas e contínuas. As comparações são tomadas a partir de medidas reais de uma escala fundamental que reflete as preferências e sentimentos do analista. A AHP compara critérios independentes e pondera alternativas de modo pareado (Piran et al., 2018).

Segundo Saaty (2008), Bhushan e Rai (2004) e Rigo (2019), a AHP tem três etapas para sua elaboração:

- i) estruturação da hierarquia de decisão, com o objetivo no topo, e em níveis intermediários com os critérios e as alternativas;
- ii) produção das matrizes de comparação pareada (julgamentos); e
- iii) cálculo dos valores dos pesos dos critérios e pontuação do desempenho das alternativas.

Primeiramente, o problema é dividido em uma hierarquia de objetivos, critérios e alternativas. Essa é a parte mais importante da tomada de decisões, pois estruturar o problema como uma hierarquia é fundamental para o processo da AHP, no qual é indicado uma relação entre elementos de um nível com os do nível imediatamente abaixo (Bhushan e Rai, 2004). Na Figura 2.3 é apresentada a estrutura hierárquica genérica de problemas de decisão (Saaty, 1990).

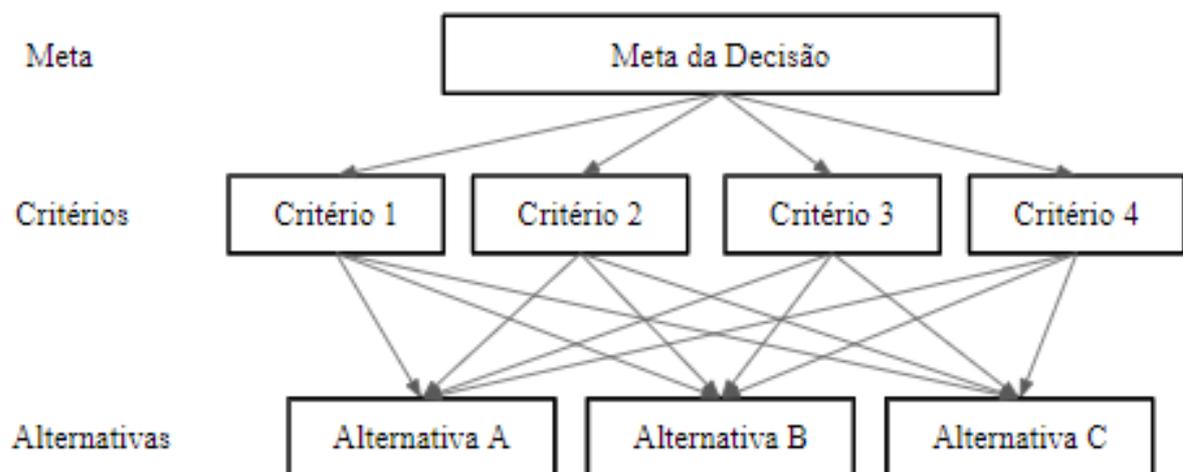


Figura 2.3 – Modelo de estrutura hierárquica genérica no método AHP [Adaptado de Saaty, 1990].

A estrutura hierárquica dá origem a uma árvore de decisão que permite aos usuários a melhor visualização da situação, pois possibilita o desmembramento do conjunto de informações em subgrupos (Saaty, 1990).

Na sequência, os julgamentos são coletados com especialistas ou tomadores de decisão envolvidos no problema que podem avaliar a comparação como igual, marginalmente forte, forte, muito forte e extremamente forte, pois a AHP é um tipo de comparação pareada com diferentes escalas para a importância relativa. Para isso, é utilizada a escala fundamental indicada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Escala fundamental de Saaty. [Adaptado de SAATY, 1991]

Intensidade	Definição	Texto explicativo
1	Importância igual	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância moderada de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade sobre outra
5	Importância forte	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação a outra
7	Importância muito forte	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação a outra; seu domínio é demonstrado na prática
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação a outra com o mais alto grau de afirmação
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre os valores adjacentes	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições

A partir das pontuações, as comparações em pares dos critérios são organizadas em uma matriz quadrada (Bhushan e Rai, 2004; Saaty, 2012). Para uma matriz de ordem n , o número de elementos necessários na matriz de julgamento é de $n.(n-1)/2$, e os resultados das comparações são ordenados de forma matricial de acordo com a Equação 2.1 (Saaty, 2012).

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{n1} & 1/a_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

em que:

$$a_{ij} > 0 \text{ (positiva)}$$

$$a_{ij} = a_{ji} = 1$$

$$a_{ji} = 1/a_{ij} \text{ (recíproca)}$$

$$a_{ij} = a_{ij} \times a_{ij} \text{ (consistência)}$$

Após a definição da matriz de julgamento A , faz-se a normalização dos valores a_{ij} da matriz. O cálculo é expresso pela Equação 2.2.

$$*a_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (2.2)$$

A matriz normalizada $*A$ de ordem n é representada na Equação 2.3.

$$*A = \begin{bmatrix} *a_{11} & \cdots & *a_{1n} & \vdots & \vdots & *a_{i1} & \cdots & *a_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Para realizar o cálculo do peso (p) de cada critério, é utilizada a Equação 2.4, aplicada na matriz normalizada $*A$. Os valores de p encontrados são representados na matriz da Equação 2.5:

$$p_i = \frac{\sum_{j=1}^n *a_{ij}}{n} \quad (2.4)$$

$$p = \begin{bmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_l \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

De acordo com Saaty (2012), para se obter a consistência de uma matriz recíproca, seu autovalor máximo (λ_{max}) deve ser aproximadamente igual a ordem da matriz (n). O autovetor revela a ordem de prioridade e o autovalor é a medida de consistência do julgamento. Para encontrar o autovalor máximo, primeiramente, é calculada a soma ponderada da matriz de

juízo, baseado na soma do valor das linhas da matriz recíproca A pelo valor do peso correspondente, expresso por b na Equação 2.6.

$$b_i = \sum_{j=1}^n a_{1j} \cdot p_j \quad (2.6)$$

Após o cálculo dos valores da soma ponderada da matriz de juízo b , dividem-se os resultados pelos vetores da matriz peso p , conforme a Equação 2.7.

$$c_i = \frac{b_i}{p_i} \quad (2.7)$$

O cálculo do autovalor máximo (λ_{max}) é expresso, então pela Equação 2.8, pelo cálculo da média dos resultados de cada linha.

$$\lambda_{max} = \frac{\sum_{j=1}^n c_j}{n} \quad (2.8)$$

O índice de consistência (IC) é calculado pela Equação 2.9, considerando n a ordem da matriz de juízo.

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2.9)$$

Segundo Saaty (2012), a relação de consistência (RC), apresentada na Equação 2.10, é a razão entre índice de consistência e um índice randômico médio. A relação de consistência com 0,10 ou menos é considerada aceitável (SAATY 2012).

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (2.10)$$

O índice randômico é obtido da Tabela 2.2, e leva em consideração a ordem das matrizes de juízo. Para cada ordem de matriz, existe um índice randômico correspondente.

Tabela 2.2 – Índice randômico. [Adaptado de SAATY, 2012]

Ordem da matriz (n)	Índice randômico (IR)
1	0,00
2	0,00
3	0,58
4	0,90
5	1,12
6	1,24
7	1,32
8	1,41
9	1,45
10	1,49
11	1,51

Após verificada a consistência da matriz de julgamento A (Equação 2.1) obtém-se a matriz de decisão que associa as alternativas, os critérios, os pesos atribuídos a cada critério e os desempenhos de cada alternativa em relação a cada um desses critérios. Na Figura 2.4 é apresentada a estrutura da matriz de decisão, em que A representa a alternativa, C representa o critério, D o desempenho, n o número de colunas e m o número de linhas.

Matriz de decisão	Critérios	C_1	C_2	...	C_n	Vetor de decisão - VD
	Peso geral - PGC	p_1	p_2	...	p_n	
Alternativas	A_1	$A_{11}...$	$A_{12}...$...	A_{1n}	D_{A1}
	A_2	$A_{21}...$	$A_{22}...$...	A_{2n}	D_{A2}

	A_m	A_{m1}	A_{m2}	...	A_{mn}	D_{Am}

Figura 2.4 – Quadro da matriz de decisão [Adaptado de Almeida, 2011].

A matriz de decisão pode ser denominada por tabela de desempenhos ou matriz de avaliação (Campos, 2011). O vetor de decisão (VD) é calculado pela soma da multiplicação do valor normalizado (desempenho) das alternativas para cada critério pelo peso geral (PGC) atribuído ao mesmo, de acordo com a Equação 2.11.

$$\begin{aligned}
 A_{11} \times p_1 + A_{12} \times p_2 \dots + A_{1n} \times p_n &= D_{A1} \\
 A_{21} \times p_1 + A_{22} \times p_2 \dots + A_{2n} \times p_n &= D_{A2} \\
 \vdots + \vdots + \dots + \vdots & \\
 A_{m1} \times p_1 + A_{m2} \times p_2 \dots + A_{mn} \times p_n &= D_{An}
 \end{aligned}
 \tag{2.11}$$

Assim, a última coluna da matriz de decisão é o vetor de decisão ou o resultado final do desempenho (D) de cada alternativa (A). A matriz de decisão consiste no resultado final da estruturação do problema multicritério e nela é possível identificar os desempenhos das alternativas para cada critério (Campos, 2011).

2.6. Método Borda

O método de abordagem multicritério Borda foi proposto por Jean Charles Borda em 1781, na França. O objetivo do método é o de estabelecer uma combinação das ordenações (*ranking*) individuais realizadas por cada decisor em um *ranking* global (Costa, 2014). O método contempla as seguintes etapas: i) Definição dos avaliadores; ii) Definição dos fatores a serem ordenados; iii) Obtenção dos julgamentos individuais dos decisores; iv) Associação do número de ordem ou *ranking* para cada fator, considerando os julgamentos individuais de cada avaliador; v) Soma dos números obtidos por cada alternativa, obtendo-se assim o número de ordem global; vi) Obtenção da ordenação final das alternativas, baseado nos números globais.

De acordo com Costa (2010), o método de Borda é aplicado em situações que têm mais de um parâmetro de avaliação. Como exemplo, o autor utiliza o processo de escolha de um veículo, onde o eleitor tem três alternativas para escolha (A1, A2 e A3), e seis critérios (C1, C2, C3, C4, C5 e C6) de avaliação. Os avaliadores devem avaliar as três alternativas para cada um dos critérios, atribuindo a nota 3 ao veículo que considere como melhor opção; a nota 2 ao veículo que considere como segunda melhor opção; e a nota 1 ao veículo que considere como terceira melhor opção. Assim, o veículo escolhido será aquele que obtiver a maior soma de pontos.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	Soma	Ranking
A1	3	1	3	1	1	3	12	2°
A2	2	2	2	2	3	2	13	1°
A3	1	3	1	3	2	1	11	3°

Figura 2.5 – Exemplo da aplicação do método de Borda [Adaptado de Costa, 2010].

A Figura 2.5 traz o exemplo de aplicação do método de Borda e destaca a escolha do veículo A2 como o de maior relevância na opinião coletiva dos avaliadores.

3. METODOLOGIA

A condução de pesquisas científicas deve estar balizada de acordo com pressupostos metodológicos para que possam ser consideradas válidas e apresentar resultados coerentes (Marconi e Lakatos, 2010). Desse modo, este Capítulo está dividido em duas seções: a primeira que trata da classificação metodológica da pesquisa e a segunda que aborda o método de trabalho e suas etapas.

3.1. Classificação Metodológica

As pesquisas científicas têm por objetivo o refinamento de teorias ou a resolução de problemas, utilizando para isso uma análise sistemática (Dresch, et al., 2015). A Tabela 3.1 traz o enquadramento metodológico desta pesquisa.

Tabela 3.1 - Enquadramento metodológico da pesquisa.

Classificação	Enquadramento
Natureza	Aplicada
Método Científico	Indutivo
Abordagem	Qualitativa Quantitativa
Objetivos	Exploratória Descritiva
Procedimentos	Bibliográfica Documental Modelagem Estudo de caso

A presente pesquisa é classificada quanto à natureza, como aplicada, visto que procura soluções para um problema real, cujos conhecimentos adquiridos podem ser aplicados em uma situação específica (Gil, 2017). Sob essa ótica, o método científico que orienta a pesquisa é o indutivo, visto que faz uso da observação e coleta de dados de casos concretos a fim de estruturá-los em um modelo (Cervo e Bervian, 2011).

Em relação à abordagem, a pesquisa é caracterizada como qualitativa e quantitativa. A pesquisa qualitativa estuda fenômenos não quantificados e procura compreender a dinâmica das

relações do objeto pesquisado (Gerhardt e Silveira, 2009). Já na abordagem quantitativa, são utilizados procedimentos que permitam mensurar os aspectos considerados relevantes para a modelagem (Marconi e Lakatos, 2010).

Em relação aos objetivos, a pesquisa enquadra-se como exploratória e descritiva: pesquisa exploratória, uma vez que busca explicitar o tema estudado e descrever suas relações (Gerhardt e Silveira, 2009; Gil, 2017), e descritiva, pois visa descrever as relações entre variáveis e, para isso utiliza o uso de técnicas padronizadas de coleta de dados, como questionário e observação sistemática (Cervo e Bervian, 2011).

Quanto aos procedimentos técnicos, a pesquisa utiliza quatro procedimentos: pesquisa bibliográfica, pesquisa documental, estudo de caso e modelagem. A pesquisa bibliográfica permite que o pesquisador examine o que já foi discutido sobre o tema e avalie estes resultados sob um novo enfoque (Dresch, et al., 2015). A pesquisa documental recorre a fontes diversificadas a fim de possibilitar um melhor entendimento do setor pesquisado, como relatórios e documentos oficiais (Gerhardt e Silveira, 2009). A modelagem serve de apoio para os investigadores, por meio de representações simplificadas da realidade, propiciando o melhor entendimento do ambiente que está sendo estudado (PIDD, 1998 apud Dresch et al., 2015). Por último, a pesquisa em questão se enquadra como um estudo de caso, visto que é analisado o impacto dos conceitos teóricos abordados em um determinado ambiente de contratação (Gil, 2017; Yin, 2015).

3.2. Cenário da pesquisa

O cenário da pesquisa é o ambiente de contratação regulado – ACR, que abrange as operações de compra e venda de energia por meio de processo licitatório da modalidade de leilão e abrange todo o território nacional. Cabe a ANEEL promover os leilões para a contratação de energia elétrica pelos agentes de distribuição do SIN, observados os procedimentos e as diretrizes fixados pelo MME (BRASIL, 2004b). Como resultado da contratação para este ambiente de mercado, são celebrados contratos bilaterais denominados Contratos de Comercialização de Energia Elétrica no Ambiente Regulado (CCEAR) celebrados entre as unidades de geração e as concessionárias de distribuição de energia elétrica.

A Figura 3.1 indica a localização das contratações ocorridas por leilão que ocorreram entre os anos de 2005 e de 2019 envolvendo as fontes de geração hidrelétrica, eólica, fotovoltaica, térmica a biomassa (bagaço de cana), térmica a gás natural e térmica a carvão.



● Biomassa ● Eólica ● Fotovoltaica ● Hidrelétrica ● Térmica: gás natural e carvão

Figura 3.1 – Resultados dos leilões por localização [Adaptado de ANEEL, 2021 dados de 2005/2019].

A geração hidrelétrica é preponderante na contratação em leilões, e responde pelo montante de 12.655 MW da energia vendida. O gráfico da Figura 3.2 traz os montantes de energia vendida no ambiente de contratação regulado por fonte de geração.

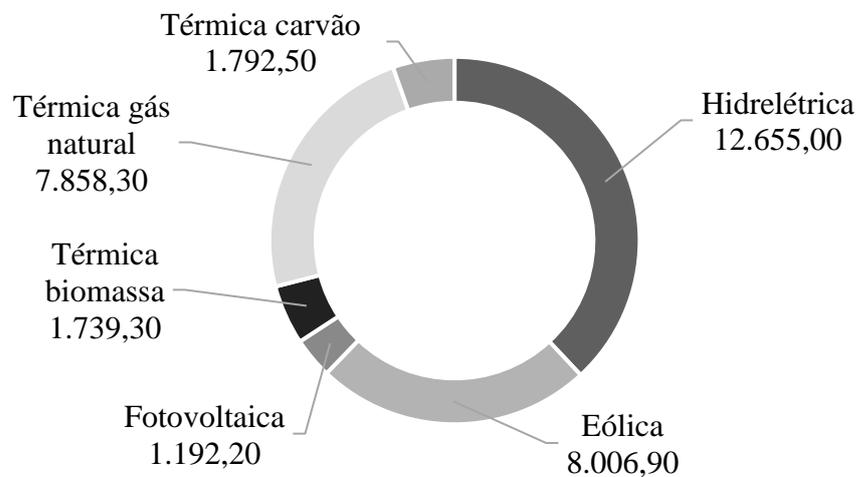


Figura 3.2 – Energia vendida em MW nos leilões por fonte de geração [Adaptado de ANEEL, 2021 dados de 2005/2019].

A geração eólica e a gás natural participam com 8.006,90 MW e 7.858,30 MW vendidos, respectivamente. As térmicas a carvão e biomassa totalizam 3.531,80 MW vendidos e a geração fotovoltaica representa 1.192,20 MW do total negociado no ACR.

O ambiente de contratação regulado é responsável por investimentos na ordem de bilhões de R\$ por ano. A Figura 3.3 indica os montantes investidos por ano, no período de 2005 a 2019, conforme dados da da ANEEL (ANEEL, 2020c).

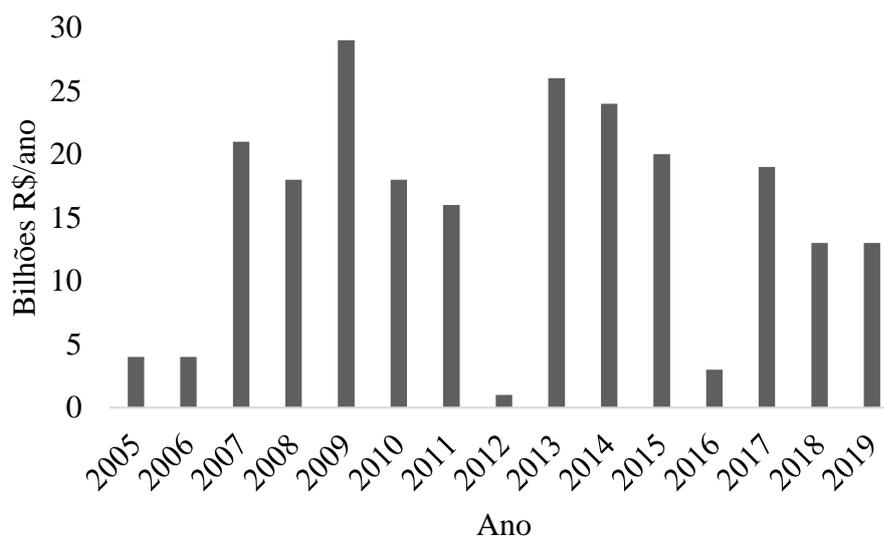


Figura 3.3 – Valores de investimento nos leilões por fonte de geração em bilhões de R\$/ano [Adaptado de ANEEL, 2021 dados de 2005/2019].

No ano de 2019 foram investidos 13 bilhões de reais nos empreendimentos negociados em leilões e o ano que recebeu maior investimento foi 2009 com 29 bilhões de reais. Em 2021, o Brasil deve realizar quatro leilões para contratação de novos projetos de geração de energia e um certame para modernizar usinas térmicas existentes, após ter cancelado licitações previstas no ano de 2020 devido às incertezas associadas à pandemia de coronavírus (Globo, 2020).

3.3. Método de Trabalho

O metodologia de trabalho em uma pesquisa científica estabelece as etapas utilizadas para o seu desenvolvimento (Gerhardt e Silveira, 2009). A definição adequada do método de trabalho propicia que a pesquisa seja conduzida de forma clara e facilita o reconhecimento de sua validade (Dresch, et al., 2015). Neste trabalho a pesquisa está dividida em nove etapas, indicadas na Figura 3.4.

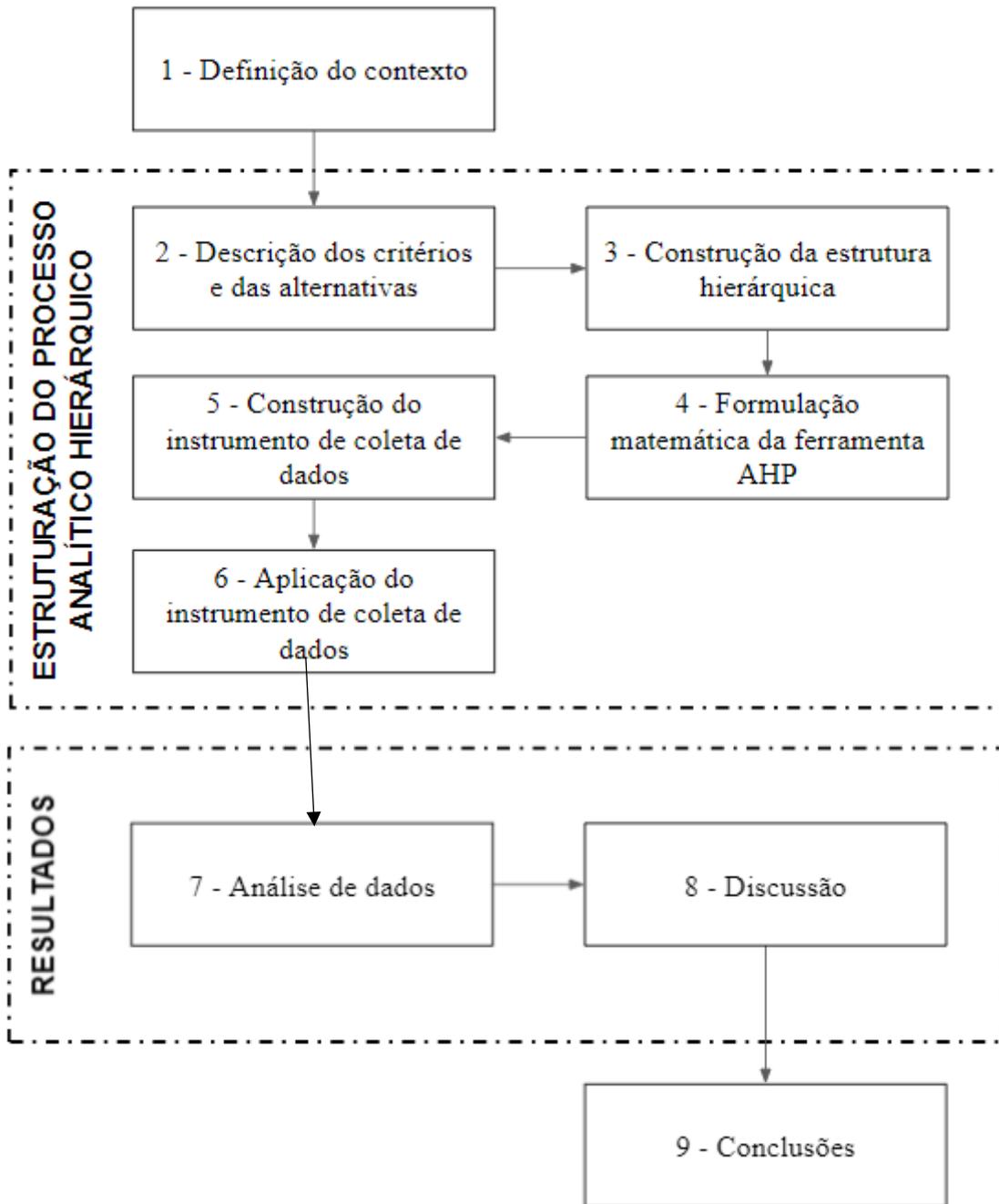


Figura 3.4 - Metodologia de trabalho.

A primeira etapa, intitulada definição do contexto, foi cumprida por meio de duas atividades: a revisão sistemática sobre o método Processo Analítico Hierárquico (AHP) aplicado no mercado de energia elétrica brasileiro; e a pesquisa documental de materiais de livre acesso público divulgados por órgãos oficiais, bem como os tipos de fontes geradoras de energia elétrica que participam de leilões de energia.

Para a revisão sistemática foi consultado o portal de conteúdo científico *Scopus*, e está descrita na seção 1.3 do Capítulo 1 e no **APÊNDICE A**, atendendo ao primeiro objetivo

específico apresentado na seção 1.2.2, definido como de realizar uma revisão sistemática da literatura (RSL) sobre a utilização do método AHP no mercado de energia elétrica no Brasil. A pesquisa documental compreendeu a consulta de leis e resoluções brasileiras e na consulta de teses e dissertações no portal de periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES. A pesquisa documental é apresentada nas seções 2.1, 2.2 e 2.3 do Capítulo 2, atendendo o segundo objetivo específico apresentado na seção 1.2.2, determinado como identificar os fatores que impactam na atratividade de investimentos em geração de eletricidade.

Na etapa 2, enunciada por descrição dos critérios e das alternativas, buscou-se elencar os critérios que têm influência na tomada de decisão de sobre qual fonte de geração elétrica investir. Foram listados quatro indicadores a saber: preço de venda da energia, despesa de capital - Capex, despesa de operação - Opex e vulnerabilidade ambiental. Além disso, foram consideradas seis fontes de geração elétrica como alternativas: as fontes renováveis: hidrelétrica, eólica, fotovoltaica, termelétrica a biomassa (bagaço de cana), e as fontes não renováveis: termelétrica a gás natural e termelétrica a carvão. Os critérios e as alternativas são descritos nas seções 4.1 e 4.2 do Capítulo 4.

Sequencialmente, a etapa 3 consiste na construção da estrutura hierárquica a partir das informações encontradas nas pesquisas bibliográfica e documental. A estrutura tem por objetivo indicar a relação entre os critérios e as alternativas para priorizar em qual fonte de geração elétrica investir no ambiente de contratação regulado. Os critérios representam o primeiro nível da hierarquia e as alternativas se agrupam no segundo nível. A estrutura hierárquica é apresentada na seção 4.3 do Capítulo 4.

Na etapa 4 é realizada a formulação matemática da ferramenta AHP e do método Borda, com a construção das matrizes de julgamento dos critérios e das alternativas com o uso do aplicativo Microsoft Excel[®]. As matrizes e demais tabelas construídas para inserção da opinião dos respondentes são apresentadas na seção 4.4 do Capítulo 4.

A etapa 5 consistiu em elaborar o instrumento de coleta de dados indicado no **APÊNDICE B**. O instrumento é um questionário que possui três objetivos: o primeiro é a ponderação dos critérios, em que os respondentes julgam qual a importância relativa de cada critério. Os critérios são analisados par-a-par com base no sistema de ponderação da AHP, a escala fundamental de Saaty, resultando em matrizes de pesos que são processadas por meio da formulação matemática da Seção 4.4 do Capítulo 4. O segundo objetivo é obter o *ranking* global do critério vulnerabilidade ambiental conforme o método Borda apresentado na Seção 4.4 do

Capítulo 4. O terceiro objetivo é, por meio de uma questão aberta, explorar outras particularidades não abordadas na estrutura hierárquica.

A aplicação do instrumento de coleta de dados, realizada na etapa 6, conta com o julgamento de especialistas e agentes do mercado de energia elétrica brasileiro, pesquisadores e organizações governamentais e não governamentais. Foram enviados questionários para especialistas e agentes de mercado, pesquisadores que possuem estudos na área e para órgãos governamentais e não governamentais (MME – Ministério de Minas e Energia, EPE - Empresa de Pesquisa Energética, CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica). O instrumento de coleta de dados foi elaborado com o uso do aplicativo *Google forms* e foi enviado para cada respondente via correspondência eletrônica. Na Tabela 3.2 é apresentada a formação dos respondentes.

Tabela 3.2 – Formação dos respondentes.

#	Formação
A	Doutorado em Engenharia Elétrica
B	Mestrado em Engenharia de Produção
C	Mestrado Profissional em Engenharia Urbana e Ambiental
D	Mestrado em Engenharia Mecânica
E	Graduação em Engenharia de Energia
F	Mestrado em Energia
G	Mestrado em Engenharia de Produção
H	Doutorado em Energia Solar Fotovoltaica
I	Doutorado em Engenharia Mecânica
J	Doutorado em Engenharia Elétrica
K	Doutorado em Engenharia Mecânica

A etapa 7, denominada análise de dados, foram compiladas as informações oriundas das respostas do instrumento de coleta de dados, pelo uso da formulação matemática do método AHP, pelo uso do método Borda e pela aplicação da técnica de análise de conteúdo proposta por Bardin (2011). A análise de conteúdo é a técnica de investigação das comunicações que permite, por meio de procedimentos sistemáticos e objetivos, inferir a informação contida na

mensagem (Bardin, 2011). Ela foi escolhida para avaliar o conteúdo das respostas da pergunta aberta utilizada no instrumento de coleta de dados.

A etapa 8 traz a discussão dos resultados obtidos. Por fim, a etapa 9 são destacadas as conclusões obtidas, as limitações da pesquisa e os indicativos para trabalhos futuros.

4. ESTRUTURAÇÃO DO PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO

Neste Capítulo é apresentada a estruturação do Processo Analítico Hierárquico - AHP. O Capítulo está dividido em cinco seções. A primeira seção descreve os critérios associados à atratividade de investimento em geração de eletricidade no Brasil. A segunda seção descreve as alternativas de fontes geradoras de energia elétrica no contexto brasileiro. A terceira seção traz a construção da estrutura hierárquica e a quarta traz a formulação matemática da ferramenta AHP. Por fim, a quinta seção aborda a aplicação do instrumento de coleta de dados.

4.1. Descrição dos Critérios

A construção da árvore de apoio à decisão foi estabelecida a partir de pesquisas exploratórias sobre os tipos de geração de energia elétrica disponíveis no Brasil e negociados por meio de leilões de geração no ambiente regulado. Definiu-se a adoção de quatro critérios de escolha, que são:

1. Preço de venda da energia;
2. Despesas de capital CAPEX;
3. Despesas de operação OPEX;
4. Vulnerabilidade ambiental.

Os critérios adotados foram extraídos de pesquisas realizadas em órgãos oficiais do SEB. Os critérios preço de venda da energia, despesas de capital – Capex e despesas de operação – Opex são utilizados no estudo e nas estimativas dos novos empreendimentos de geração de energia elétrica a serem negociados nos leilões de expansão da geração. Além disso, são norteadores para o equilíbrio financeiro do empreendimento durante seu período de geração. O critério vulnerabilidade ambiental foi extraído da literatura brasileira, por ter impacto em todas as fontes de geração de energia elétrica negociadas por meio de leilões. O setor energético brasileiro, é suscetível as alterações advindas do clima e do relevo característicos (Schaeffer, et al., 2012; Arroyo, 2012; ANEEL, 2012).

Os critérios escolhidos foram ratificados pelo grupo de pesquisadores do Laboratório de Ensaios Térmicos e Aerodinâmicos-LETA vinculado a Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS, composto por dois Engenheiros Mecânicos ligados a IES, um Engenheiro de

Produção ligado a uma empresa de eficiência energética, uma Engenheira de Energia ligada a IES e a uma empresa de eficiência energética e um Engenheiro Químico e especialista na área de mercado de energia, os quais validaram os critérios preço de venda da energia, despesas de capital - Capex, despesas de operação - Opex e vulnerabilidade ambiental.

A Tabela 4.1 traz a descrição dos critérios, a unidade e escala de avaliação e a direção de preferência.

Tabela 4.1 – Características dos critérios adotados.

Critério	Descrição	Direção de Preferência	Referência
Preço de venda da energia	Preço médio atualizado pelo Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo-IPCA.	Aumentar	(ANEEL 2020c)
Despesas de capital - Capex	Investimentos em capital de cada empreendimento.	Reduzir	(ANEEL 2020c)
Despesas de operação - Opex	Despesas de operação e manutenção de cada empreendimento.	Reduzir	(EPE 2019)
Vulnerabilidade ambiental	Flutuações de disponibilidade das fontes primárias para a geração de energia elétrica.	Reduzir	(ONS, 2020c); (ANEEL, 2012); (TOLMASQUIM, 2016); (EPE, 2020b)

Segundo Barin et al. (2010), os critérios quantitativos são representados por valores reais, isto é, dados numéricos de cada característica técnica e econômica avaliada para cada fonte de geração de energia elétrica. Os critérios qualitativos são aqueles em que não é possível quantificação ou apresentam dificuldade na sua quantificação. Dessa forma, são considerados quantitativos os indicadores Preço de venda da energia, Despesas de capital e Despesas de operação e qualitativo o indicador Vulnerabilidade ambiental. Os critérios quantitativos são extraídos dos dados publicados pela ANEEL e EPE (**ANEXOS I e II**) e o critério qualitativo é oriundo da literatura pesquisada.

O critério preço de venda da energia é analisado em ordem crescente de preferência (Por exemplo, sejam duas alternativas avaliadas à luz do critério “Preço de venda da energia”: uma alternativa será considerada preferível a outra se apresentar maior valor neste critério). Os

critérios despesas de capital, despesas de operação e vulnerabilidade são analisados em ordem decrescente de preferência.

Nas subseções seguintes serão descritos e discutidos os critérios considerados neste trabalho.

4.1.1. Preço de Venda da Energia

Para o critério preço de venda da energia, são tomados por base os preços consolidados nos leilões de geração promovidos pela CCEE, sob a delegação da ANEEL. Os valores são oriundos da Secretaria Executiva de Leilões - SEL, unidade organizacional pertencente à ANEEL (ANEEL, 2020c). São considerados os leilões de geração no ambiente regulado que ocorreram entre os anos de 2005 e de 2019 envolvendo as fontes de geração hidrelétrica, eólica, fotovoltaica, térmica a biomassa, térmica a gás natural e térmica a carvão. A Tabela 4.2 traz o valor médio atualizado pelo indicador econômico Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo - IPCA publicado pela ANEEL (**ANEXO I**).

Tabela 4.2 - Resultados dos leilões de geração no ambiente regulado. [Adaptado de ANEEL, 2020 dados de 2005/2019]

Fonte energética	Preço médio atual (R\$/MWh)
Hidrelétrica	173,04
Eólica	177,44
Fotovoltaica	253,73
Termelétrica a biomassa (bagaço de cana)	196,78
Termelétrica a gás natural	250,32
Termelétrica a carvão	260,14

O preço da venda da energia termelétrica a carvão é o mais representativo, sendo de 260,14 R\$/MWh e a geração hidrelétrica tem o menor preço de venda, que é de 173,04 R\$/MWh.

4.1.2. Despesas de Capital – CAPEX

O critério despesas de capital - Capex são os investimentos em capital declarados para cada empreendimento contratado nos leilões ocorridos entre os anos de 2005 e 2019, segundo publicação da ANEEL (2021) apresentada no **ANEXO I**. A Tabela 4.3 traz os valores da potência instalada e o valor do investimento atualizado para cada fonte energética, e traz o valor do Capex expresso em Reais por MegaWatt.

Tabela 4.3 - Resultados dos leilões de geração no ambiente regulado. [Adaptado de ANEEL, 2020 dados de 2005/2019]

Fonte energética	Potência instalada (MW)	Investimento atual (R\$)	Despesas de capital CAPEX (R\$/MW)
Hidrelétrica	35.585	135.979.017.902	3.821.245
Eólica	19.124	114.029.504.214	5.962.638
Fotovoltaica	4.893	29.044.762.028	5.935.982
Termelétrica a biomassa (bagaço de cana)	6.813	19.350.332.403	2.840.207
Termelétrica a gás natural	12.025	34.663.237.796	2.882.597
Termelétrica a carvão	2.100	13.547.299.121	6.451.094

A potência total instalada no período considerado é de 80.540MW e o valor do investimento atual é de 347 bilhões de reais. O valor das despesas de capital - Capex é obtido pela divisão entre o investimento atual e a potência instalada para cada fonte energética.

4.1.3. Despesas de Operação – OPEX

O critério despesas de operação - Opex engloba as despesas de operação e de manutenção de cada empreendimento, de acordo com os dados divulgados pela EPE no documento de Estudos para a Expansão da Geração - Custo Marginal de Expansão do Setor Elétrico Brasileiro Metodologia e Cálculo - 2019 (**ANEXO II**). Os valores de Opex de cada fonte são definidos pela EPE a partir das informações declaradas pelos empreendedores nos leilões de compra de energia, estudos de viabilidade, referências nacionais e internacionais, bem como informações prestadas por fabricantes contatados pela EPE e estimativas a partir de conversas com o mercado, devidamente criticados e avaliados (EPE, 2019).

A Tabela 4.4 traz os valores do valor do Opex expresso em R\$/MW/ano e R\$/MW/h para cada fonte energética.

Tabela 4.4 – Valores de Opex. [Adaptado de EPE, 2019]

Fonte energética	Preço médio atual (R\$/MW/ano)	Preço médio atual (R\$/MW/h)
Hidrelétrica	40.000,00	4,57
Eólica	90.000,00	10,27
Fotovoltaica	50.000,00	5,71
Termelétrica a biomassa (bagaço de cana)	90.000,00	10,27
Termelétrica a gás natural	140.000,00	15,98
Termelétrica a carvão	110.000,00	12,56

Para a fonte energética hidrelétrica (UHE) é considerado o valor de 40.000,00 R\$/MWh. Para a fonte eólica, foi considerado o valor de R\$ 90.000,00 referente às instalações *Onshore*. Para o Opex da termelétrica a gás natural é considerado o valor referente às usinas de ciclo combinado. Os valores de Opex apresentados refletem a soma dos valores fixos e variáveis das fontes não despacháveis: eólica e solar. O Opex para as fontes despacháveis, conforme a metodologia vigente, contempla os valores fixos e variáveis e o custo de combustível.

4.1.4. Vulnerabilidade Ambiental

O critério vulnerabilidade ambiental está relacionado às flutuações da disponibilidade da fonte de energia primária para a geração de energia elétrica devido às condições climáticas. O setor energético é vulnerável a impactos advindos de alterações no clima e eventos extremos, tanto na sua produção quanto no seu consumo (Schaeffer, et al., 2012). Segundo Arroyo (2012) é importante realizar estudos que ajudem a definir e analisar as vulnerabilidades do sistema energético diante de variações do climáticas e, com esse fundamento, propor medidas de adequação. A Tabela 4.5 traz a fragilidade inerente a cada fonte energética de acordo com a literatura pesquisada.

Tabela 4.5 - Fragilidades de cada fonte primária de geração.

Fonte energética	Vulnerabilidade ambiental	Fonte
Hidrelétrica	Escassez de chuvas	ONS, 2020c
Eólica	Intermitência dos ventos	Atlas eólico, 2001; ANEEL, 2012
Fotovoltaica	Intermitência da radiação solar	INPE, 2017; ANEEL, 2012
Termelétrica a biomassa (bagaço de cana)	Sazonalidade da safra cana-de-açúcar	BAGGI, 2017; MME; EPE, 2019
Termelétrica a gás natural	Disponibilidade de fornecimento	TOLMASQUIM, 2016
Termelétrica a carvão	Emissão de Gases de Efeito Estufa	EPE, 2020b

A quantidade de energia hidráulica depende de fatores como a topografia, do regime de chuvas e da tecnologia das instalações (EPE, 2007). Segundo a EPE, as projeções da precipitação mostram indícios de redução da pluviosidade em algumas áreas do país, tendo impacto na capacidade de geração hidrelétrica (MME; EPE, 2019). Os estudos de Lima et al. (2014), indicam a redução da ordem de 15% em média na geração hidrelétrica a partir de 2041.

Em contrapartida, o histórico de armazenamento dos reservatórios mantém-se estável. Nas usinas hidrelétricas, os reservatórios têm por finalidade acumular parte das águas disponíveis nos períodos chuvosos para compensar as deficiências nos períodos de estiagem, exercendo um efeito regularizador das vazões naturais (Lopes e Santos, 2002). O nível de água dos reservatórios refere-se ao nível ou cota de água de montante mínimo do reservatório para fins de operação normal da usina, definido através dos estudos energéticos, correspondendo ao nível que limita a parte inferior do volume útil (ANEEL, 2020a). A Figura 4.1 traz a evolução do nível de armazenamento dos reservatórios conforme os dados publicados pelo ONS entre o ano de 2000 ao ano de 2019.

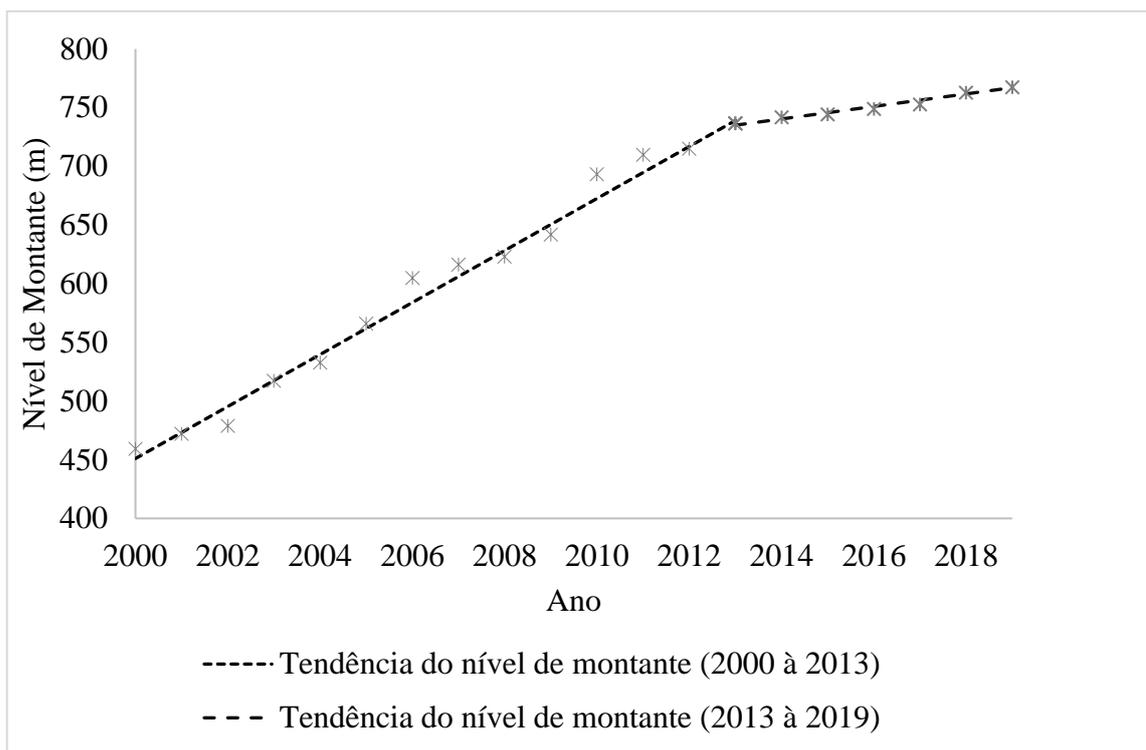


Figura 4.1 - Evolução do nível de armazenamento dos reservatórios [Adaptado do Histórico de Operação do ONS, 2020c].

Depreende-se do gráfico que até o ano de 2013 há uma tendência acentuada de aumento do nível de montante dos reservatórios. A partir do ano 2013 até o final de 2019 há uma menor inclinação com tendência de estabilidade dos níveis.

O fator intermitência dos ventos e da radiação solar é considerado como a fragilidade das usinas eólica e fotovoltaica, respectivamente. De acordo com a ANEEL (2012), fonte de energia intermitente é o recurso energético renovável que, para fins de conversão em energia elétrica pelo sistema de geração e, não pode ser armazenado em sua forma original. Essa característica das fontes renováveis eólica e fotovoltaica pode levar a riscos de mercado, devido à incerteza associada à geração de energia (Ravazi, *et al.*, 2019; Ramos, *et al.*, 2020).

O Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (2001), indica a complementaridade entre os potenciais eólico e hidráulico no Brasil. As áreas de aproveitamento eólico situam-se nas extremidades do sistema elétrico, distantes da geração hidrelétrica, assim, a inserção de energia eólica no sistema elétrico melhora seu desempenho. Por sua vez, o aproveitamento do potencial solar favorece o controle hídrico dos reservatórios nos períodos de menor incidência de chuvas, e possibilita planejamento e otimização de novos investimentos em geração, transmissão e distribuição da energia (INPE, 2017). De acordo com as projeções da EPE presentes no PDE 2029, as fontes eólica e fotovoltaica devem aumentar a participação na matriz elétrica brasileira

no horizonte do estudo, mantendo o perfil sustentável do sistema elétrico brasileiro e contribuindo para a perspectiva de custos de operação mais baixos. A participação da fonte eólica deverá corresponder a 17% da capacidade instalada de geração de energia elétrica no país em 2029, praticamente dobrando sua capacidade em relação ao ano de 2016 e a fonte solar fotovoltaica apresenta 7.000 MW de oferta centralizada adicional para 2029 (EPE, 2019).

No Brasil, o caldo da cana-de-açúcar é utilizado para a produção de açúcar e de etanol de primeira geração, e o bagaço é majoritariamente utilizado como combustível nas caldeiras para cogeração de energia para autoconsumo e para exportação de eletricidade para o SIN (EPE, 2016). A projeção da produção de cana-de-açúcar deve crescer aproximadamente 47% até 2030, chegando a 1,1 bilhão de toneladas. Dessa forma, a contribuição da biomassa de cana-de-açúcar para o cenário energético nacional poderá se tornar mais relevante, caso seu potencial técnico seja plenamente aproveitado (MME; EPE, 2019). A fonte de geração de energia elétrica a biomassa tem como características a não intermitência, as baixas emissões de GEE e a sazonalidade (Baggi, 2017). A produção de energia elétrica a partir da biomassa de cana de açúcar representa uma vantagem pois ocorre durante a safra, período que coincide com o período de seca no país, quando os níveis dos reservatórios das usinas hidrelétricas estão baixos (UNICA, 2020).

Para a termelétrica a gás natural, um dos principais desafios do aproveitamento dessa fonte é a disponibilidade do gás natural. As incertezas relacionadas a expansão da infraestrutura de transporte de gás vinculada à oferta do combustível, está condicionada a uma demanda que pode ou não ser firme no horizonte de longo prazo, o que pode afetar a expansão da geração termelétrica a gás natural e levar à necessidade de utilização de outros combustíveis, como o carvão mineral ou outras fontes de energia menos favoráveis em termos econômicos ou ambientais (Tolmasquim, 2016).

A preocupação em torno das mudanças climáticas, tornam a caracterização das emissões de gases de efeito estufa (GEE) advindas de diferentes tecnologias usadas para geração de energia elétrica como item fundamental na pauta de decisões, tanto por parte das empresas quanto por parte dos governos (ABCM, 2013). A termelétrica a carvão mineral é uma das tecnologias que apresenta emissão de gases de efeito estufa, em especial gás carbônico (CO₂), no seu processo de conversão de energia para a geração de eletricidade (EPE, 2016). As projeções advindas no PDE 2030, preveem a redução das emissões de GEE para o próximo decênio, devido a modernização de 350 MW de UTE a carvão na região sul, garantindo assim o atendimento à demanda energética do país de forma segura e sustentável (EPE, 2020c).

Os quatro critérios apresentados compõem o primeiro nível da árvore de decisão indicada na Figura 4.7 da Seção 4.3.

4.2. Descrição das Alternativas

As alternativas de fonte de geração de energia elétrica selecionadas de acordo com o Balanço Energético Nacional (EPE, 2020b) são as fontes renováveis: hidrelétrica, eólica, fotovoltaica, termelétrica a biomassa (bagaço de cana), e as fontes não renováveis: termelétrica a gás natural e termelétrica a carvão. Essas opções não representam todas as fontes de geração disponíveis no Brasil, no entanto, foram selecionadas como relevantes para este estudo.

4.2.1. Usina hidrelétrica

O fluxo das águas é o combustível da geração de eletricidade a partir da fonte hidrelétrica. As obras de uma usina hidrelétrica incluem o desvio do curso do rio e a formação do reservatório. A água do rio movimentada pelas turbinas que estão ligadas a geradores, possibilitando a conversão da energia potencial mecânica em energia elétrica. Para a construção de uma usina hidrelétrica, leva-se em conta os impactos ambientais, sociais e econômicos na região, além da viabilidade econômica do empreendimento (CCEE, 2020c).

O Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) possui predominância de geração hidrelétrica devido a diversidade hidrológica das bacias hidrográficas permitindo a complementariedade entre as regiões (Tolmasquim, 2016).

A Figura 4.2 indica a participação das fontes hidrelétrica, PCH, eólica, biomassa, solar e térmica na capacidade instalada da geração centralizada no Brasil (MME; EPE, 2020).

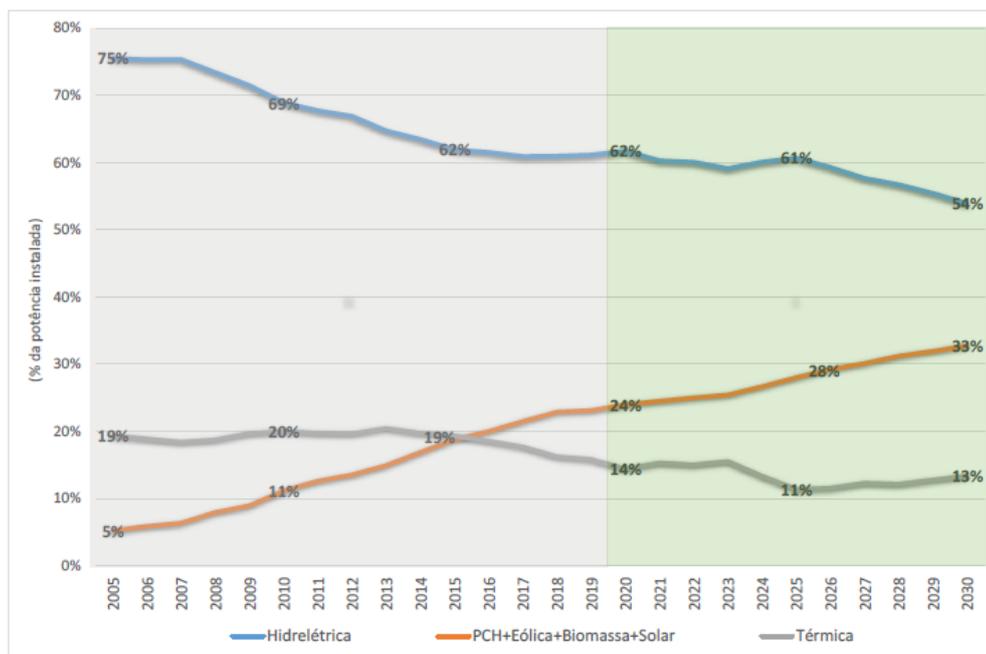


Figura 4.2 – Participação das fontes na capacidade instalada da geração centralizada
[Adaptado de MME; EPE, 2020].

Segundo as projeções indicadas no PDE a geração hidrelétrica terá uma redução de 62% para 54% no próximo decênio, indicando a diversificação e complementaridade entre as fontes de geração na matriz brasileira.

4.2.2. Usina eólica

Energia eólica é a energia cinética contida nas massas de ar em movimento. Seu aproveitamento ocorre por meio da conversão da energia cinética com o uso de turbinas eólicas ou aerogeradores para a geração de eletricidade (CCEE, 2020c).

Segundo dados do Plano Decenal de Expansão de Energia 2030, a capacidade instalada pela tecnologia eólica será de 11,8 GigaWatt, parte dela por contratos viabilizados por leilões, demonstrando que a oferta eólica é um dos principais indutores do crescimento da oferta de energia elétrica no próximo decênio (MME; EPE, 2020). Os parques eólicos estão presentes em doze estados brasileiros, sendo que 80% estão instalados na região nordeste devido a velocidade do vento ser estável e constante e não mudar de direção com frequência, seguida pela região sul com 95 parques em operação (ABEEÓLICA, 2021). O Brasil, no cenário mundial, está em 7º lugar no ranking de capacidade instalada de energia eólica, no ano de 2012 o Brasil era o 15º colocado (GWEC, 2021).

4.2.3. Usina solar fotovoltaica

A produção de energia elétrica com o sistema fotovoltaico baseia-se na transformação da radiação solar em eletricidade. Para tanto, é necessário adaptar um material semicondutor, geralmente o silício, que na medida em que é estimulado pela radiação, permita o fluxo eletrônico. As células fotovoltaicas têm, pelo menos, duas camadas de semicondutores: uma positivamente carregada e outra negativamente carregada, formando uma junção eletrônica. Quando a luz do sol atinge o semicondutor na região dessa junção, o campo elétrico existente permite o estabelecimento do fluxo eletrônico, antes bloqueado, e dá início ao fluxo de energia na forma de corrente contínua. Assim, quanto maior a intensidade de luz, maior o fluxo de energia elétrica (ANEEL, 2008).

A usina solar é um sistema fotovoltaico de grande porte planejado para produzir e vender energia elétrica (Almeida et al., 2016). As usinas fotovoltaicas (UFV) se diferenciam dos sistemas fotovoltaicos residenciais e indústrias pois fornecem energia em alta tensão para fins de distribuição e não para o autoconsumo, e são contratadas por meio de leilões de energia, com contratos celebrados no Ambiente de Contratação Regulada -ACR (Rediske, 2019).

Segundo dados do Plano Decenal de Expansão de Energia 2030, a expansão fotovoltaica é responsável pelo incremento de 5,3 GW no decênio, sendo que 1,7 GW encontra-se contratado e distribuído em 48 projetos localizados, nas regiões Nordeste e Sudeste. Os 3,6 GW restantes correspondem à expansão na região Sudeste (MME; EPE, 2020).

Segundo dados da ABSOLAR são gerados mais de 8,0 gigawatts de energia solar fotovoltaica no Brasil (ABSOLAR, 2021). Os Estados da Bahia, Piauí e Minas Gerais são responsáveis pela geração de 2.159,20 MW gerados pelos empreendimentos em operação comercial. O Estado de São Paulo está na quarta posição com 376,1 MW de geração.

4.2.4. Usina termelétrica a biomassa (Bagaço de cana)

Do ponto de vista energético e para fins de outorga de empreendimentos do setor elétrico, biomassa é todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica que pode ser utilizada na produção de energia elétrica. O recurso de maior potencial para geração de energia elétrica no Brasil é o bagaço da cana-de-açúcar. O setor sucroalcooleiro é responsável por gerar esse resíduo, que pode ser aproveitado na geração de eletricidade, principalmente em sistemas de cogeração (CCEE, 2020c).

Uma das principais vantagens da biomassa é que, embora de eficiência inferior à de outras fontes, seu aproveitamento pode ser feito diretamente, por meio da combustão em

caldeiras. Na produção de energia a partir da cana-de-açúcar, a biomassa é queimada diretamente em caldeiras e a energia térmica resultante é utilizada na produção do vapor. Este vapor pode acionar as turbinas usadas no trabalho mecânico requerido nas unidades de produção e as turbinas para geração de energia elétrica. Além disso, o vapor que seria liberado na atmosfera após a realização desses processos pode ser encaminhado para o atendimento das necessidades térmicas do processo de produção (ANEEL, 2008).

A Figura 4.3 apresenta a energia contratada no ACR e as projeções de exportação de eletricidade para os dois estudos: potencial técnico das usinas vencedoras de leilões de energia e com a curva baseada no histórico (MME; EPE, 2020).

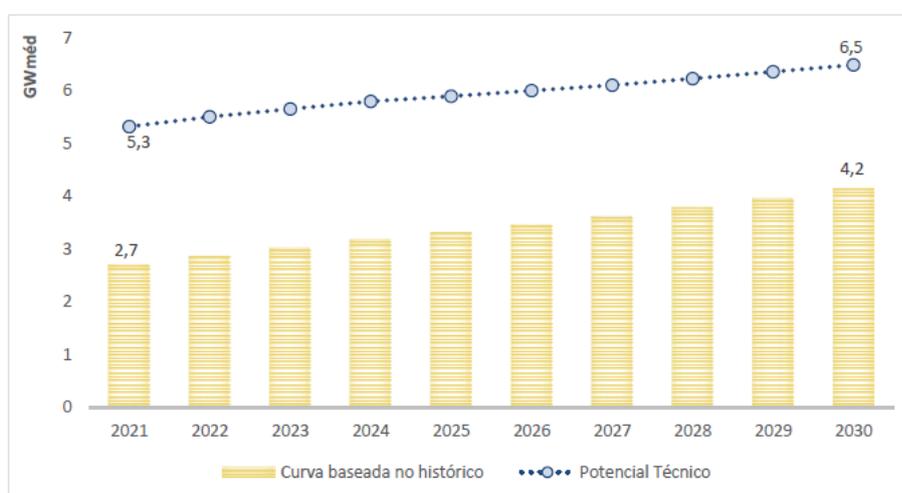


Figura 4.3 - Potencial de exportação de eletricidade gerada por bagaço [Adaptado de MME, EPE, 2020].

A projeção do potencial técnico para o ano de 2030 é de 6,5 GW médios, quase 2,3 GW médios maior que o atualmente projetado para a curva baseada no histórico. O GMW médio é calculado por meio da razão da energia produzida na quantidade de horas do período de um ano. Assim, a contribuição da biomassa de cana-de-açúcar para o cenário energético nacional poderá se tornar ainda mais relevante, caso seu potencial técnico seja plenamente aproveitado.

4.2.5. Usina termelétrica a gás natural

O potencial brasileiro de expansão das termelétricas a gás natural é estimado em até 27.000 MW, levando em conta prioritariamente a expansão de usinas em ciclo combinado. A maior parte das reservas brasileiras de gás natural está localizada no mar e está associada ao petróleo. A região Sudeste do Brasil concentra 79% das reservas, sendo 58,31% no estado do

Rio de Janeiro, 11,55% em São Paulo e 9,4% no Espírito Santo (Tolmasquim, 2016). A Figura 4.4 indica a participação de cada estado brasileiro na composição das reservas de gás natural disponíveis.

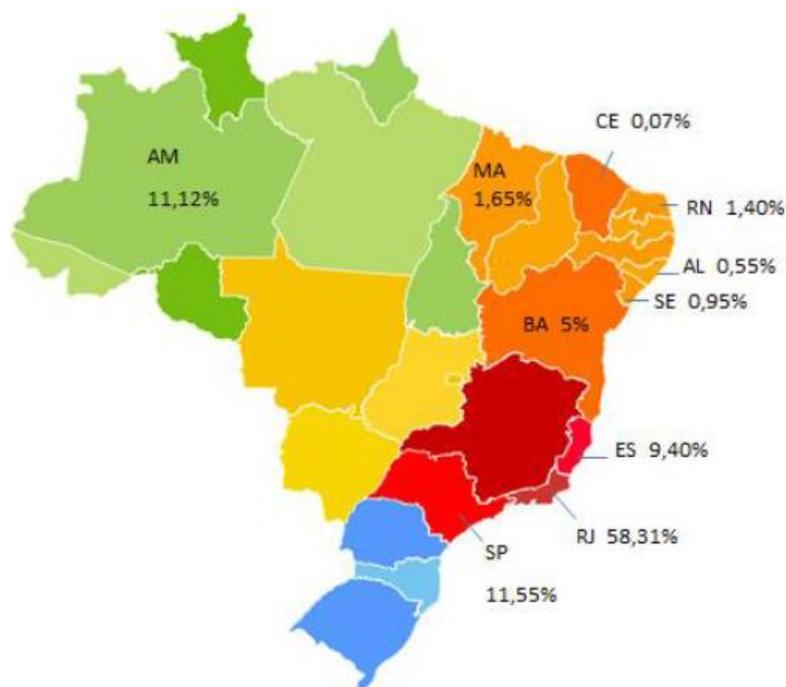


Figura 4.4 - Distribuição percentual das reservas nacionais de gás natural por Unidades da Federação [Adaptado de Tolmasquim, 2016].

A aplicação do gás natural na produção de energia elétrica é segregada em duas modalidades. Uma delas é a geração exclusiva da eletricidade e outra é a co-geração, utilizada em processos industriais, com a geração de calor e de vapor. Nas usinas termelétricas a gás natural, a primeira etapa do processo consiste na mistura de ar comprimido com o gás natural a fim de se obter a combustão. O resultado é a emissão de gases em alta temperatura, que provocam o movimento das turbinas ligadas aos geradores de eletricidade. A energia térmica é transformada em energia mecânica e, posteriormente, é convertida em energia elétrica (ANEEL, 2008).

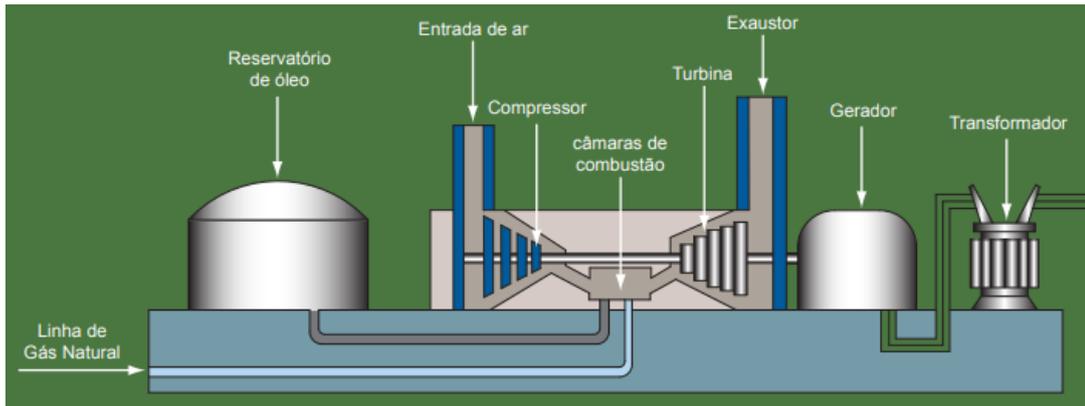


Figura 4.5 - Perfil esquemático do processo de produção de energia elétrica a partir do gás natural [ANEEL, 2008].

A Figura 4.5 indica os principais equipamentos de uma usina termelétrica a gás natural.

4.2.6. Usina termelétrica a carvão

O carvão mineral representa 26,9% da matriz energética mundial (IEA, 2020) enquanto na matriz brasileira representa 3,3% (EPE, 2020b). O PDE 2030 coloca o carvão mineral nacional como candidato à expansão de duas formas: nas usinas em operação, considerando a possibilidade de modernização das plantas e em novas plantas, mais modernas e eficientes (MME; EPE, 2020). A principal aplicação do carvão mineral no mundo é a geração de energia elétrica por meio de usinas termelétricas. Em segundo lugar vem a aplicação industrial para a geração de energia térmica (ANEEL, 2008). A Figura 4.6 traz o esquemático do processo de produção de energia elétrica a partir do carvão mineral.

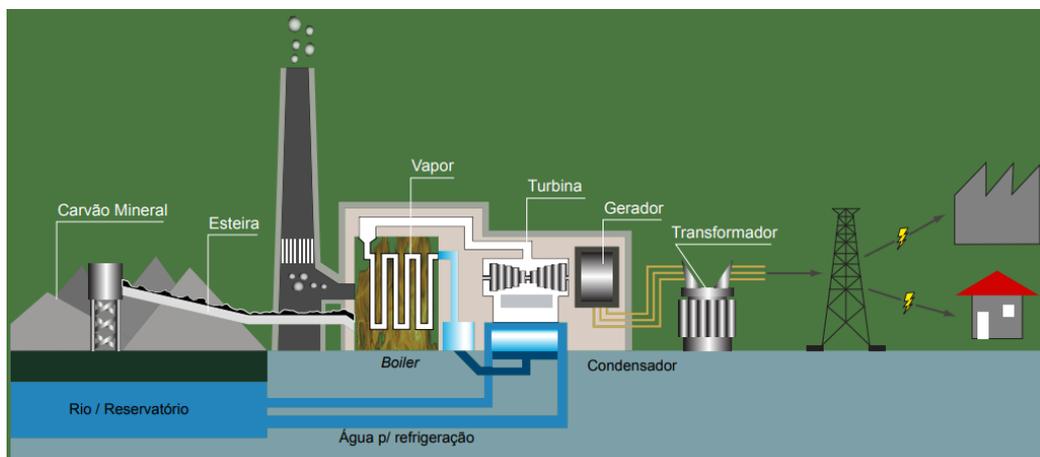


Figura 4.6 - Perfil esquemático do processo de produção de energia elétrica a partir do carvão mineral [ANEEL, 2008].

O processo de utilização do carvão em usinas termelétricas, considerando desde a extração até o preparo do carvão inicia com a extração do mineral do solo, fragmentação e armazenamento em pilhas para, posteriormente, ser transportado à usina, onde novamente será armazenado. Na sequência, é triturado e pulverizado, o que permitirá melhor aproveitamento térmico, e injetado na câmara de combustão por meio de queimadores. O calor liberado por esta queima é transformado em vapor superaquecido. A energia térmica do vapor é transformada em energia mecânica, que movimenta a turbina do gerador de energia elétrica (ANEEL, 2008).

4.3. Estrutura Hierárquica

Os critérios e as alternativas são agrupados em uma árvore de decisão que indica a relação entre os elementos de cada nível. Na Figura 4.7 é apresentada a estrutura hierárquica.

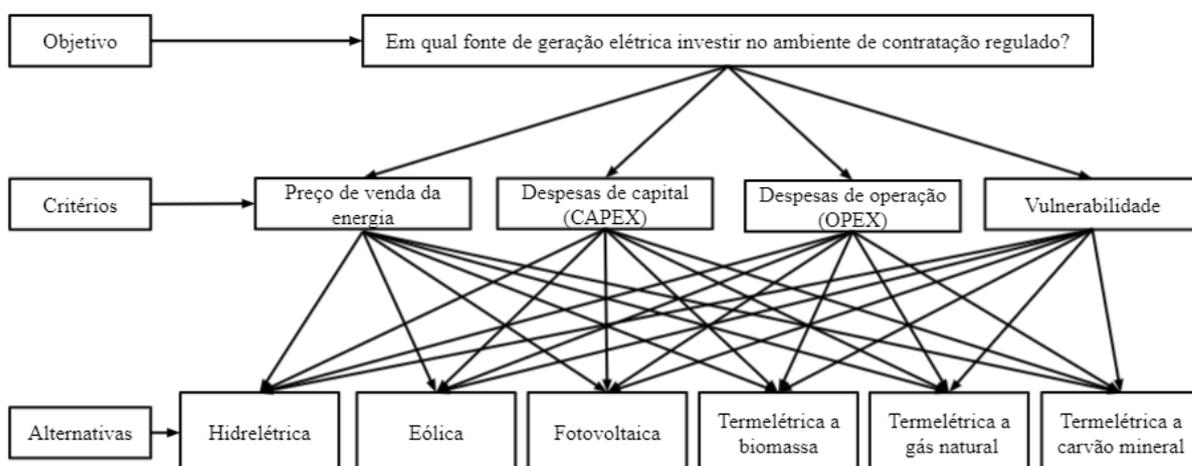


Figura 4.7- Estrutura hierárquica dos critérios e das alternativas.

A estrutura hierárquica é composta por três níveis: o objetivo, os critérios e as alternativas de fontes de geração elétrica. O primeiro nível traz o objetivo que é identificar a atratividade de investimento em geração de eletricidade no Ambiente de Contratação Regulado (ACR). O segundo nível traz os critérios de preço de venda da energia, de custo de capital, de custo de operação e de vulnerabilidade ambiental. No terceiro nível estão as alternativas de fontes de geração elétrica consideradas: hidrelétrica, eólica, fotovoltaica, térmica a biomassa, térmica a gás natural e térmica a carvão.

A estrutura tem o propósito de indicar a relação entre os critérios e as alternativas seguindo uma hierarquia sucessiva. Além disso, permite visualizar a interligação entre os critérios e as alternativas propiciando uma melhor compreensão dos parâmetros abordados para a decisão a ser tomada.

4.4. Formulação Matemática da Ferramenta AHP

Para a condução dos cálculos de ponderação dos critérios foram utilizadas as equações descritas na Seção 2.5 do Capítulo 2, correspondente a AHP. Como a estrutura hierárquica é composta por quatro critérios, foram redigidas seis questões de comparação pareada para o julgamento dos respondentes. As questões fazem parte do instrumento de coleta de dados indicado no **APÊNDICE B**.

Para cada comparação, o respondente tem quatro alternativas de julgamento dos critérios. Esse julgamento pode ser de critérios equivalentes (variável assume valor 1), critério pouco superior (variável assume valor 3), critério superior (variável assume valor 5) ou critério muito superior (variável assume valor 7), de acordo com a escala fundamental de Saaty da Tabela 2.1 da Seção 2.5. Cada respondente julga as seis variáveis indicadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Variáveis de comparação pareada AHP.

Comparação dos critérios	Variável (a_{ij})
1. Preço de venda da energia x Custo de capital	a_{12}
2. Preço de venda da energia x Custo de operação	a_{13}
3. Preço de venda da energia x Vulnerabilidade ambiental	a_{14}
4. Custo de capital x Custo de operação	a_{23}
5. Custo de capital x Vulnerabilidade ambiental	a_{24}
6. Custo de operação x Vulnerabilidade ambiental	a_{34}

A partir do julgamento das seis variáveis, inicia-se o processo de ponderação AHP por meio da construção da matriz de julgamentos A (Equação 4.1), a qual é de ordem $n = 4$ ($i, j = \{1, 2, \dots, 4\}$).

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & a_{14} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{14} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Com a aplicação das Equações 2.1 a 2.5 da Seção 2.5 é obtida a matriz de pesos dos critérios (Equação 4.2). Essa matriz é composta por uma coluna e quatro linhas, em que cada linha resulta no peso de um critério (p), onde o índice p ($p = \{1, 2, \dots, 4\}$) representa cada critério.

$$p = \begin{bmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_4 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

O cálculo do desempenho das alternativas, a luz dos critérios preço de venda, Capex e Opex é feito com os dados das Tabelas 4.2, 4.3 e 4.4, respectivamente. Os valores são linearizados e normalizados de acordo com a direção de preferência indicada na Tabela 4.1. Assim, o critério preço de venda é analisado em ordem crescente de preferência, ou seja, uma alternativa será considerada preferível a outra se apresentar maior valor, sendo os valores normalizados e, posteriormente, os critérios Capex e Opex são analisados em ordem decrescente de preferência, ou seja, a alternativa será considerada preferível em relação a outra se apresentar menor valor, assim os valores são linearizados e posteriormente normalizados. Para o desempenho do critério vulnerabilidade é utilizado o *ranking* global obtido pela aplicação do método Borda nos julgamentos individuais colhidos no instrumento de coleta de dados, e, conseqüentemente, a definição dos pesos desse critério para inclusão na matriz de decisão. O desempenho do critério vulnerabilidade é demonstrado na Tabela 5.1 da Seção 5.1.

O vetor de decisão é calculado pela soma da multiplicação do peso (p) de cada critério, obtido pela matriz de pesos (Equação 4.2) pelo desempenho que é o percentual ponderado na soma dos valores de cada alternativa. As Tabelas 4.7, 4.8 e 4.9 trazem os desempenhos (valores normalizados) das alternativas preço de venda, Capex e Opex.

Tabela 4.7 – Valor da alternativa preço de venda da energia. [Adaptado de ANEEL, 2020 dados de 2005/2019]

Alternativa	Valor do critério (R\$/MWh)	Valor normalizado - VNA (%)
Hidrelétrica	173,04	13,19
Eólica	177,44	13,53
Fotovoltaica	253,73	19,35
Termelétrica a biomassa (bagaço de cana)	196,78	15,00
Termelétrica a gás natural	250,32	19,09
Termelétrica a carvão	260,14	19,84

Tabela 4.8 – Valor da alternativa Capex. [Adaptado de ANEEL, 2020 dados de 2005/2019]

Alternativa	Valor do critério (R\$/MW)	Linearização	Valor normalizado - VNA (%)
Hidrelétrica	3.821,25	7,30	18,03
Eólica	5.962,64	4,68	11,55
Fotovoltaica	5.935,98	4,70	11,60
Termelétrica a biomassa (bagaço de cana)	2.840,21	9,82	24,25
Termelétrica a gás natural	2.882,60	9,68	23,89
Termelétrica a carvão	6.451,09	4,32	10,68

Tabela 4.9 – Valor da alternativa Opex. [Adaptado de EPE, 2019]

Alternativa	Valor do critério (R\$/MW/ano)	Linearização	Valor normalizado - VNA (%)
Hidrelétrica	40.000	13,00	29,96
Eólica	90.000	5,78	13,31
Fotovoltaica	50.000	10,40	23,96
Termelétrica a biomassa (bagaço de cana)	90.000	5,78	13,31
Termelétrica a gás natural	140.000	3,71	8,56
Termelétrica a carvão	110.000	4,73	10,89

Para assegurar a fidúcia do processo de ponderação dos critérios, calcula-se a Relação de Consistência (RC) da matriz de julgamentos A, com o uso das Equações 2.6 a 2.10 da Seção 2.5. Como a matriz é de ordem 4, o Índice Randômico (IR) utilizado para o cálculo da Relação de Consistência é de 0,90 (Tabela 2.2).

Após obtida a ponderação da estrutura hierárquica de cada respondente, é realizada a média geométrica dos pesos obtidos para cada critério, obtendo-se o peso geral. A média geométrica é indicada quando os respondentes pertencem a grupos heterogêneos compostos por partes interessadas de diferentes campos, como colaboradores, pesquisadores, entre outros

(Grošelj et al. 2015). Além disso, o método de média geométrica é utilizado para agregação no modelo proposto por Saaty (1987) visto que tem o propósito de aglutinar a dominância das alternativas em termos de preferência ou de julgamento, ou seja, representa por um único valor um conjunto de dados para tomada de decisão (Bernasconi et al., 2014). Na média geométrica valores discrepantes são ponderados, diferentemente do que ocorre na média aritmética. A média geométrica sintetiza os julgamentos e preserva a reciprocidade (Aczél e Saaty, 1983). Sua utilização é, em suma, apropriada e reflete adequadamente as informações de preferência contidas nas matrizes de comparação pareadas locais (Krejčí e Stoklasa, 2018).

No **APÊNDICE G** são apresentadas as planilhas eletrônicas construídas no aplicativo Microsoft Excel[®] de acordo com a formulação proposta nesta seção.

4.5. Aplicação do Instrumento de Coleta de Dados

A coleta de dados é elaborada via formulário *Google forms* e enviada por correspondência eletrônica aos respondentes. O questionário é composto por dois blocos com questões de múltipla escolha e um bloco com uma questão aberta. O primeiro bloco é o julgamento dos critérios comparados par a par e o segundo bloco é a ordenação das alternativas à luz do critério vulnerabilidade. Por fim, o instrumento de coleta de dados traz uma questão aberta e uma seção para comentários e sugestões. O **APÊNDICE B** apresenta o instrumento de coleta de dados construído.

5. RESULTADOS

Este Capítulo apresenta os resultados obtidos neste estudo e está dividido em cinco seções. A primeira seção apresenta os resultados da aplicação do instrumento de coleta de dados. A segunda seção traz a ordenação (*ranking*) do critério vulnerabilidade ambiental, obtido pelo método Borda. A terceira seção apresenta a ponderação da estrutura hierárquica calculada de acordo a ferramenta AHP. A quarta seção apresenta a matriz de decisão e a análise de conteúdo da questão aberta é apresentada na quinta seção.

5.1. Análise de dados

Os dados utilizados neste estudo foram coletados por meio do instrumento de coleta de dados indicado no **APÊNDICE B**, entre os dias 26/02/2021 e 26/03/2021. O questionário teve por objetivo obter a importância relativa de cada critério, comparando-os aos pares, obter a ordenação (*ranking*) do critério vulnerabilidade ambiental e, por meio de uma questão aberta, coletar os critérios considerados importantes de acordo com a percepção e experiência de cada respondente. A Figura 5.1 traz a área de atuação dos respondentes.

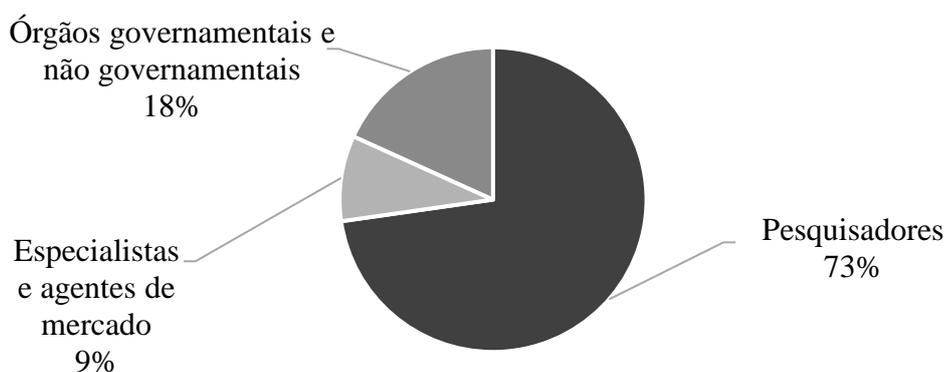


Figura 5.1 – Área de atuação dos respondentes.

O grupo de pesquisadores corresponde a 73% dos respondentes, as organizações governamentais e não governamentais contribuíram com 18% das respostas e os especialistas e agentes do mercado de energia elétrica brasileiro com 9%.

5.2. Resultado do método Borda

O método Borda gerou o *ranking* global do critério vulnerabilidade ambiental, a partir das ordenações individuais de cada respondente, por meio da questão da Seção 4 do instrumento de coleta de dados (**APÊNDICE B**). O critério vulnerabilidade ambiental está relacionado às flutuações da disponibilidade da fonte de energia primária para a geração de energia elétrica devido às condições climáticas, conforme indicado na Tabela 4.5 da seção 4.1.4.

O critério vulnerabilidade foi analisado em ordem crescente de preferência, a tecnologia que obtiver maior valor, a partir da ordenação dos respondentes, terá a posição mais alta no ranking global e, conseqüentemente, o valor normalizado (desempenho) será o maior valor. A Tabela 5.1 traz o resultado do *ranking* global de cada fonte de geração de energia elétrica segundo a opinião dos respondentes. O valor normalizado é o desempenho das alternativas à luz do critério vulnerabilidade.

Tabela 5.1 – *Ranking* global e desempenho das alternativas para o critério vulnerabilidade.

Fonte energética	Posição no <i>ranking</i> global	Valor normalizado - VNA (%)
Hidrelétrica	5°	9,52
Eólica	1°	28,57
Fotovoltaica	2°	23,81
Termelétrica a biomassa (bagaço de cana)	3°	19,05
Termelétrica a gás natural	4°	14,29
Termelétrica a carvão	6°	4,76

A usina térmica a carvão mineral foi considerada a tecnologia que tem maior vulnerabilidade ambiental, sendo a sexta posição do *ranking* global com valor normalizado (desempenho) de 4,76%.

A usina de geração eólica foi considerada a tecnologia com menor vulnerabilidade ambiental, ocupando a primeira posição no *ranking* global das alternativas para o critério vulnerabilidade com desempenho de 28,57%. Para essa tecnologia foi considerado a fragilidade intermitência dos ventos.

A usina solar fotovoltaica ocupa a quinta posição com 23,81% de desempenho. Os valores normalizados que correspondem ao desempenho de cada fonte energética, são utilizados na definição do vetor de decisão (*VD*) utilizando a matriz de decisão indicada na Tabela 5.3.

5.3. Ponderação da estrutura hierárquica

A ponderação da estrutura hierárquica foi calculada de acordo com a formulação matemática da Seção 4.4. O preenchimento da matriz de matriz de julgamento *A* foi realizada individualmente a partir do julgamento de cada respondente, obtendo-se pesos *p* de cada critério.

As razões de consistência (*RC*) calculadas foram iguais ou menores a 0,10, então a consistência de cada opinião foi considerada aceitável (Saaty, 2012). Caso os valores calculados fossem maiores que 0,10 seriam necessários mais especialistas para modificar os pesos subjetivos, a fim de obter uma maior concordância (Wang et al., 2009).

Na sequência, foi calculado o peso geral (*PGC*) de cada critério pelo uso da média geométrica, entre os valores dos pesos obtidos a partir do julgamento de cada respondente, para o preenchimento da matriz de decisão (Tabela 5.3). A Tabela 5.2 traz os pesos gerais obtidos para cada critério.

Tabela 5.2 – Peso geral dos critérios.

Critério	Peso geral - PGC (%)
Preço de venda da energia	51,81
Despesas de capital – Capex	12,68
Despesas de operação – Opex	11,36
Vulnerabilidade ambiental	16,00

De acordo com o julgamento dos respondentes o critério preço de venda da energia tem maior importância e corresponde a 51,81%, seguido da vulnerabilidade ambiental com 16,00%. Os critérios despesa de capital e despesa de operação obtiveram valores de 12,68% e 11,36%, respectivamente.

5.4. Matriz de decisão

A matriz de decisão relaciona as alternativas, os critérios, o peso atribuído a cada critério e o desempenho de cada alternativa em relação a cada critério e o resultado que corresponde a soma do produto entre o peso de cada critério e o desempenho das alternativas naquele critério (Lima, 2019).

Os valores dos desempenhos das alternativas indicados nas Tabelas 4.7, 4.8 e 4.9 (Seção 4.4) e na Tabela 5.1 (Seção 5.1.1) são relacionados com o peso geral dos critérios obtidos pelos julgamentos dos respondentes descritos na Tabela 5.2 desta seção, de acordo com a formulação da Seção 2.5 do Capítulo 2. A Tabela 5.3 traz a matriz de decisão global.

Tabela 5.3 – Matriz de decisão global.

Matriz de decisão global					
Critérios	Preço de venda	Capex	Opex	Vulnerabilidade	Vetor de decisão - VD (%)
Peso geral – PGC (%)	51,81	12,68	11,36	16,00	
Valor normalizado (desempenho) das alternativas – VNA (%)					
Hidrelétrica – UHE	13,19	18,03	29,96	9,52	14,05
Eólica – EOL	13,53	11,55	13,31	28,57	14,56
Fotovoltaica – UFV	19,35	11,60	23,96	23,81	18,03
Térmica biomassa – BIO	15,00	24,25	13,31	19,05	15,41
Térmica a gás natural – GN	19,09	23,89	8,56	14,29	16,18
Térmica a carvão mineral – CAR	19,84	10,68	10,89	4,76	13,63

De acordo com os julgamentos dos respondentes, a ordem hierárquica de importância das alternativas é: fotovoltaica (18,03%), térmica a gás natural (16,18%), biomassa (15,41%), eólica (14,56%), hidrelétrica (14,05%) e carvão mineral (13,63%).

Da análise da hierarquização das ações, observa-se que a alternativa com maior importância foi a alternativa geração fotovoltaica com 18,03% se destacando dentre as alternativas. A alternativa com menor importância é a térmica a carvão mineral com 13,63%.

5.5. Análise de conteúdo

A questão aberta da seção 5.5 do Instrumento de Coleta de Dados (**APÊNDICE B**) teve por objetivo coletar a perspectiva dos respondentes sobre os aspectos que influenciam na atratividade de investimento em fontes de geração de energia elétrica no Brasil no ambiente de contratação regulado. A questão buscou indagar que outros aspectos podem ser considerados para atender ao objetivo, os quais são identificados como variáveis.

A categorização das variáveis foi realizada a partir das respostas dos questionários aplicados utilizando-se para isso a técnica de análise de conteúdo e contagem de frequência. A análise de conteúdo permite descrever de forma sistemática o conteúdo da mensagem, seja ela de fonte bibliográfica ou coletada por meio de entrevistas (Bardin, 2011). Optou-se por realizar-se uma codificação aberta, assim, tanto as variáveis como seu agrupamento, denominado “dimensões” emergiram dos dados analisados. A Tabela 5.4 apresenta as variáveis identificadas nessa pesquisa, categorizadas por dimensões.

Tabela 5.4 – Variáveis adicionais que influenciam a atratividade de investimento em fontes de geração de energia elétrica.

Dimensão	Variável	Contagem
Regulatória	Aspectos regulatórios	1
	Incentivos	1
	LCOE (<i>Levelized Cost of Energy</i>)	1
Econômica	Importação	3
	Custo dos insumos	2
	Geração de empregos	2
Ambiental	Localização do empreendimento	2
	Variações climáticas	3
Técnica	Perdas de conversão	2
	Capacidade de geração da fonte	2
	Disponibilidade de equipamento	3

Na dimensão regulatória foram identificadas 2 variáveis: aspectos regulatórios e incentivos. Ambas obtiveram a mesma frequência, sendo citadas uma vez. A variável **aspectos**

regulatórios aparece para indicar que as legislações vigentes podem influenciar a atratividade de investimento em fontes de geração de energia elétrica no Brasil, haja vista a complexidade das fontes na matriz energética e seus avanços. A variável **incentivos** indica que os subsídios, incentivos e encargos para cada fonte de energia também influenciam na atratividade dos investimentos.

A **dimensão econômica** trouxe quatro variáveis: o custo nivelado de energia - LCOE (*Levelized cost of energy*), a importação, o custo dos insumos e a geração de empregos. O **custo nivelado de energia - LCOE** (*Levelized cost of energy*) é definido como a divisão dos custos totais do projeto, incluindo o capital investido (Capex), e os custos operacionais (Opex), pela produção de eletricidade ao longo de toda a operação da usina (Solar, 2021).

A segunda variável da dimensão econômica trata da **importação**. Essa variável foi mencionada três vezes pelos respondentes e abrange aspectos como a taxa variação cambial do dólar e riscos de importação. Já a variável **custo dos insumos**, citada por dois respondentes, contempla os encargos devidos para cada fonte. A última variável dessa dimensão, **geração de empregos**, trata das funções criadas para atender esse processo e pode ser dividida em três esferas: o planejamento e a elaboração do projeto, a construção e a operação das usinas. A variável também contempla o desenvolvimento de novas empresas e indústrias relacionadas a cada uma das fontes de energia disponíveis.

Na **dimensão ambiental** foram definidas duas variáveis: localização do empreendimento e variações climáticas. A variável **localização do empreendimento** refere-se ao local de instalação do empreendimento. Assim, percebe-se que, dependendo do local em que o investidor pretende instalar o sistema, a capacidade de geração de cada fonte de energia varia. Essa questão é reforçada pelo respondente G: “se for no litoral, a fonte eólica provavelmente terá maior capacidade de geração, se for na região norte talvez a solar apresente maior capacidade”. A segunda variável da dimensão ambiental trata das **variações climáticas**. Essa variável foi citada por três especialistas e trata da suscetibilidade das fontes de geração de energia às variações climáticas, bem como o perfil de geração em termos horários e de sazonalidade.

A **dimensão técnica** agrupou as variáveis perdas de conversão, capacidade de geração da fonte e disponibilidade de equipamentos. A variável **perdas de conversão** se refere a eficiência de conversão e, conseqüentemente, às perdas ocorridas durante a geração, a transmissão e a distribuição daquela fonte. A variável **capacidade de geração da fonte** trata do quanto uma determinada fonte de energia é capaz de produzir, contemplando também as híbridas. Por fim, a última variável, **disponibilidade de equipamentos e estrutura**, se refere a

disponibilidade dos equipamentos necessários e das redes de transmissão. Além disso, essa variável também contempla as tecnologias necessárias para a construção dos empreendimentos de geração.

A partir das percepções dos respondentes, foi possível identificar fatores que impactam a decisão de investimentos em uma determinada fonte de energia. Em primeiro lugar, estão os fatores econômicos e técnicos, com nove e sete citações, respectivamente. Após, classificou-se a dimensão ambiental, com cinco citações. Por fim, a dimensão regulatória teve duas citações no total. Essa diversidade de dimensões indica que há fatores sistêmicos que impactam na decisão dos investidores. As variáveis sugeridas podem ser incluídas na estrutura hierárquica, o que possibilita o aprimoramento da tomada de decisão dos investidores.

6. CONCLUSÃO

Esta pesquisa utilizou técnicas de Análise Multicritério de Apoio à Decisão para identificar a atratividade nos investimentos em geração de eletricidade no Ambiente de Contratação Regulado, segmento do mercado brasileiro no qual se realizam as operações de compra e venda de energia elétrica entre agentes vendedores e agentes de distribuição por meio de leilões. O objetivo do trabalho é o de disponibilizar os resultados desta pesquisa sob a ótica da análise de multicritério para auxiliar os investidores na tomada de decisão sobre qual fonte de geração elétrica investir nesse ambiente. O método utilizado foi o Processo Analítico Hierárquico (*Analytic Hierarchy Proces*) - AHP, no qual foi construída uma estrutura composta por critérios e alternativas relacionadas às fontes de geração de energia elétrica negociadas nos leilões para expansão da oferta de energia elétrica no Brasil.

A partir da pesquisa documental, foi construída a árvore de decisão que indica a relação entre os quatro critérios relacionados à atratividade de investimento em geração de eletricidade e as seis alternativas de fontes de geração elétrica: hidrelétrica, eólica, fotovoltaica, térmica a biomassa (bagaço de cana), térmica a gás natural e térmica a carvão. O primeiro nível da estrutura hierárquica corresponde ao objetivo que identifica a atratividade de investimento em geração de eletricidade no Ambiente de Contratação Regulado. No segundo nível são representados os critérios e no terceiro nível são representadas as alternativas.

A partir da estrutura hierárquica foi realizada a modelagem matemática para a ponderação dos critérios. A ponderação foi realizada a partir da perspectiva dos respondentes, entre eles agentes do mercado de energia elétrica brasileiro, pesquisadores e organizações governamentais. A coleta de dados foi realizada entre os meses de fevereiro e março de 2021, por meio da aplicação do instrumento de coleta de dados.

Para os respondentes, o critério que mais impacta na atratividade dos investimentos em geração de eletricidade é o preço de venda da energia, com importância de 51,81%, seguido pela vulnerabilidade de cada fonte de energia, com a importância de 16%. Para as alternativas despesas de capital – Capex e despesas de operação - Opex o impacto foi de 12,68% e 11,36%, respectivamente.

A matriz de decisão resultou na fonte de geração fotovoltaica como sendo a melhor tecnologia a receber investimentos no contexto analisado, com preferência em torno de 18%. As demais alternativas obtiveram um padrão similar de comportamento, variando entre 16% para a térmica a gás natural, 15% para a térmica a biomassa e para a geração eólica, e 14% para a geração hidrelétrica e a térmica a carvão mineral.

Com a análise de conteúdo, a partir das percepções dos respondentes, foi possível identificar fatores que impactam a decisão do investimento em determinada fonte de energia, que não foram utilizados neste estudo. Foram citadas variáveis como aspectos regulatórios, disponibilidade de equipamentos, custo nivelado de energia – LCOE, importação, geração de empregos e capacidade de geração, entre outros. As variáveis foram agrupadas nas dimensões regulatória, econômica, ambiental e técnica. Na dimensão ambiental, a variável variações climáticas obteve três ocorrências. Essa variável foi considerada na construção da estrutura hierárquica e obteve a importância de 16%, segundo o julgamento dos respondentes.

Esta pesquisa teve como contexto a venda de energia por contratação via processo licitatório da modalidade de leilão no ambiente de contratação regulado (ACR). Este estudo não contemplou as transações de venda e compra de energia no ambiente de contratação livre (ACL) ou mercado livre de energia. Outra limitação dessa pesquisa se refere as respostas do instrumento de coleta de dados aplicado, o qual trouxe respostas de pesquisadores e de organizações governamentais, de modo que representa a visão do grupo que produziu os dados analisados.

Sugere-se como trabalhos futuros a inclusão da análise de ciclo de vida – ACV e a vida útil econômica dos empreendimentos como critérios de entrada da AHP, agregando os impactos do empreendimento em todo o período de operação. As variáveis identificadas na análise de conteúdo podem ser incluídas na estrutura hierárquica, o que possibilita o aprimoramento da tomada de decisão. Outro fator que pode auxiliar no processo de tomada de decisão é o impacto do tempo de operação de cada empreendimento, considerando o custo nivelado de energia LCOE (*Levelized cost of energy*). Os aspectos econômicos, pela utilização de indicadores e *expertise* de agentes de mercado podem contribuir para resultados mais firmes por parte dos investidores. Por fim, sugere-se combinar os méritos do Processo Analítico Hierárquico - AHP com modelos de rede neural, modelos estatísticos e algoritmos genéticos, possibilitando uma tomada de decisão mais robusta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABCM. 2013. **Estudo Comparativo de Emissões de Gases de Efeito Estufa**. https://www.carvaomineral.com.br/arquivos/Estudo_Comparativo_GEE_final.pdf, Acesso em 09-03-2021.
- ABEEÓLICA. 2021. **Energia Eólica: Os Bons Ventos Do Brasil**. <http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2018/07/Infoventopt.pdf>, Acesso em 09-04-2021.
- ABSOLAR. **Energia Solar Fotovoltaica No Brasil**. <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>, Acesso em 15-04-2021.
- Aczél, J; Saaty, T. L. Procedures for Synthesizing Ratio Judgments, **Psychol**, vol. 27, p. 93–102, 1983.
- Almeida, R. G. et al. Proposição de Uma Metodologia Para Análise de Viabilidade Econômica de Uma Usina Fotovoltaica. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, vol 1(34). 2016, <https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/viewFile/1355/665>.
- Alves, A. C. **Inovações regulatórias para contratação de usinas termelétricas a gás natural : o caso do leilão a-6 de 2017**, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.
- Amarante, O. A. C., Brower, M., Zack, J., SÁ, A. L. 2001. Atlas do potencial eólico brasileiro.
- ANEEL. 2012. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 493**. Brasil. <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012493.pdf>.
- ANEEL. 2008. **Atlas de Energia Elétrica Do Brasil**. https://www.aneel.gov.br/documents/656835/14876406/2008_AtlasEnergiaEletricaBrasil3ed/297ceb2e-16b7-514d-5f19-16cef60679fb, Acesso em 09-09-2020.
- ANEEL. 2020a. **Glossário**. https://www.aneel.gov.br/glossario?p_p_id=display_WAR_glossariocontratosdisplayportlet_INSTANCE_Gu2vEKt9G2Ij&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-

&p_p_col_pos=1&p_p_col_count=3&_display_WAR_glossariocontratosdisplayportlet_INS, Acesso em 15-04-2021.

ANEEL. 2020b. **Leilões de Geração**. <https://www.aneel.gov.br/geracao4>, Acesso em 09-09-2020.

ANEEL. 2020c. **Resultados Dos Leilões de Geração No Ambiente Regulado**. <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiYmMzN2Y0NGMtYjE5Ny00OTNlWlI1YzctZjI0ZTUwMDg5ODE3IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOiR9>, Acesso em 09-09-2020.

Arroyo, E M V. **Proposta metodológica para avaliação da vulnerabilidade da geração termelétrica a carvão mineral no Brasil às mudanças climáticas**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

Azevedo, S. S. P. et al. Assessment of Offshore Wind Power Potential along the Brazilian Coast. **Energies**, vol. 12, 2020.

Baggi, B. S. **Dependência entre o preço da energia elétrica e suas fontes de geração não renováveis, e previsão de preços por simulação de Monte Carlo**. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Maringá, 2017.

Bardin, L. **Análise de Conteúdo**. 70^a. ed. Livraria Martins Fontes, São Paulo, 2011.

Barin, A., L. N. C., et al. 2009. Storage Energy Management with Power Quality Concerns the Analytic Hierarchy Process and the Fuzzy Logic. **Brazilian Power Electronics Conference, COBEP2009**. p. 225–31, 2009.

Barin, A., Canha L. N., Magnago, K. F., Abaide A. R. Seleção de Fontes Alternativas de Geração Distribuída Utilizando Uma Análise Multicriterial Baseada No Método AHP e Na Lógica Fuzzy. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**. vol. 21(5), p. 477–86, 2010.

Barin, A., Canha, L. N., Abaide, A. R., Magnago, K. F. Selection of Storage Energy Technologies in a Power Quality Scenario - The AHP and the Fuzzy Logic. **IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)**. p. 3615–3620, 2009.

- Bernardon, D. P. et al. AHP Decision-Making Algorithm to Allocate Remotely Controlled Switches in Distribution Networks. **IEEE Transactions on Power Delivery** vol. 26(3), p. 1884–92, 2011.
- Bernardon, D. P. et al. Automatic Restoration of Power Supply with Possibility of Islanded Operation of Distribution Network. **Proceedings of the Universities Power Engineering Conference**. p. 13–17, 2013.
- Bernardon, D. P. et al. Real-Time Reconfiguration of Distribution Network with Distributed Generation. **Electric Power Systems Research**, vol. 107, p. 59–67, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2013.09.011>.
- Bernardon, D. P. et al. Allocation of Remotely Controlled Switches for Reliability Assessment in Distribution Networks. **Proceedings of the Universities Power Engineering Conference**. 2015.
- Bernasconi, M, Choirat C., Seri R. Empirical Properties of Group Preference Aggregation Methods Employed in AHP: Theory and Evidence. **European Journal of Operational Research** vol. 232(3), p. 584–92, 2014.
- Bhushan, N.; Rai, K. **Strategic Decision Making: Applying the Analytic Hierarchy Process**. London, Springer. 2004.
- Bouzon, M., Govindan K., Rodriguez C. M, Lucila M. S. Campos. Identification and Analysis of Reverse Logistics Barriers Using Fuzzy Delphi Method and AHP. **Resources, Conservation and Recycling**. vol. 108, p. 182–97, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec>.
- BRASIL. 1996. LEI N° 9.427 DE 26 DE DEZEMBRO DE 1996.
- BRASIL. 2004a. DECRETO N° 5.081, DE 14 DE MAIO DE 2004. Brasil. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/d5081.htm.
- BRASIL. 2004b. DECRETO N° 5.163, DE 30 DE JULHO DE 2004. Brasil.
- BRASIL. 2004d. LEI N° 10.847 DE 15 DE MARÇO DE 2004. Brasil. <https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=LEI&numero=10847&ano=2004&ato=a>

62k3Zq1UeRpWTff3.

BRASIL. 2004e. LEI Nº 10.848, DE 15 DE MARÇO DE 2004. Brasil.

Bulhões, R. L., Santana, E. S., Santos, A. A. B. Use of Analytic Hierarchy Process for Wind Farm Installation Region Prioritization—Case Study, **Energies**. vol 13, 2020.

Campos, V. R. **Modelo de Apoio à Decisão Multicritério Para Priorização de Projetos Em Saneamento**. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, 2011.

Carayannis, E. G., Ferreira, J. M., Marjan S. Jalali, Ferreira, A. F. MCDA in Knowledge-Based Economies: Methodological Developments and Real World Applications. **Technological Forecasting and Social Change**. vol. 131, p. 1–3, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.01.028>.

CCEE. 2020a. Ambiente Livre e Ambiente Regulado. https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/como-participar/ambiente-livre-ambiente-regulado?_afLoop=398874555414920&_adf.ctrl-state=cp7ji6w4w_175#!%40%40%3F_afLoop%3D398874555414920%26_adf.ctrl-state%3Dcp7ji6w4w_179, Acesso em 09-09-2020.

CCEE. 2020b. Comercialização. https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/onde-atuamos/comercializacao?_afLoop=282360181808484&_adf.ctrl-state=snyu3li38_18#!%40%40%3F_afLoop%3D282360181808484%26_adf.ctrl-state%3Dsnyu3li38_22, Acesso em 09-09-2020.

CCEE. 2020c. Fontes. https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/onde-atuamos/fontes?_afLoop=148119381664738&_adf.ctrl-state=10cfjp5c6o_1#!%40%40%3F_afLoop%3D148119381664738%26_adf.ctrl-state%3D10cfjp5c6o_5, Acesso em 09-09-2020.

CCEE. 2020d. Quem São Os Agentes. https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/quem-participa/quem_sao_os_agentes?_adf.ctrl-state=cp7ji6w4w_35&_afLoop=397293653848641#!%40%40%3F_afLoop%3D397293653848641%26_adf.ctrl-state%3Dcp7ji6w4w_39, Acesso em 09-09-2020.

- CCEE. 2020e. Tipos de Leilões. https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/como_ccee_atua/tipos_leiloes_n_logado?_afzLoop=144841786180537&_adf.ctrl-state=ug8ecrggv_34#!%40%40%3F_afzLoop%3D144841786180537%26_adf.ctrl-state%3Dug8ecrggv_38, Acesso em 09-09-2020.
- Cervo, A. L.; Bervian, P. A. **Metodologia Científica: Para Uso Dos Estudantes Universitários**. 2011.
- Costa, H. 2010. Caderno Técnico Sobre o Método Multicritério Borda. <http://www.decision.uff.br/sites/>.
- Costa, Helder Gomes. 2014. Sistemas De Votação Pelo Método De Borda. **Relatórios de Pesquisa de Engenharia de Produção B**. vol. 1, p. 1–10.
- Dresch, A.; Lacerda, D. P.; Júnior, J. A. V. A. **Design Science Research : Método de Pesquisa Para Avanço Da Ciência e Tecnologia**. Porto Alegre: Bookman. 2015.
- Ensslin, L.; Montibeller, G.N.; Noronha, S.M. **Apoio à Decisão: Metodologia Para a Estruturação de Problemas e Avaliação Multicritério de Alternativas**. Florianópolis, Insular. 2001.
- EPE. 2007. Plano Nacional de Energia 2030. *PLoS ONE* 4: 324, Acesso em 09-09-2020.
- EPE. 2016. O Compromisso Do Brasil No Combate Às Mudanças Climáticas : Produção e Uso de Energia. Epe: 97. <http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/NT COP21 iNDC.pdf>., Acesso em 09-09-2020.
- EPE. 2019. Estudos Para Expansão Da Geração-Custo Marginal de Expansão Do Setor Elétrico Brasileiro Metodologia e Cálculo. Brasil. <http://www.epe.gov.br>, Acesso em 09-09-2020.
- EPE. 2020a. Leilões. <https://www.epe.gov.br/pt/leiloes-de-energia/leiloes>, Acesso em 09-09-2020.
- EPE. 2020b. Relatório Síntese: BEN 2020 - Ano Base 2019.
- EPE. 2021. Quem Somos. <https://www.epe.gov.br/pt/a-epe/quem-somos>, Acesso em 22-03-2021.

- EPE, MME; 2020c. Plano Decenal de Expansão de Energia 2030 – Demanda de Eletricidade.
- França, J. E.M., Hollnagel, Santos, E. I. J.A., Haddad, A. N. FRAM AHP Approach to Analyse Offshore Oil Well Drilling and Construction Focused on Human Factors. **Cognition, Technology and Work**, vol. 22(3), p. 653–65, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10111-019-00594-z>.
- Gerhardt, T. E.; Silveira, D. T. **Métodos de Pesquisa**. Plageder, 2009.
- Gil, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 6th ed. São paulo: Atlas, 2017.
- Globo. Governo Marca Leilões de Energia Para 2021 Diante de Retomada No Consumo. 2020. <https://extra.globo.com/economia/governo-marca-leiloes-de-energia-para-2021-diante-de-retomada-no-consumo-24787508.html>, Acesso em 22-03-2021.
- Gomes, L. F. A. M.; GOMES, C. F. S.; 2014. *Tomada de Decisão Gerencial: Enfoque Multicritério*. 5th ed. São Paulo: Atlas.
- Grošelj, P., Stirn, L. Z., Ayrilmis, N., Kuzman, M. K. Comparison of Some Aggregation Techniques Using Group Analytic Hierarchy Process. **Expert Systems with Applications**, vol. 42(4), p. 2198–2204, 2015.
- Gross, J. C. 2010. **Multicritério de Apoio à Decisão**. Indaial: UNIASSSELVI.
- GWEC. 2021. América Do Norte e América Latina Aumentaram as Instalações de Energia Eólica Em 62% Em 2020. <https://gwec.net/north-and-latin-america-increased-wind-power-installations-by-62-in-2020/>, Acesso em 15-04-2021.
- Jansen, J., Jin, X., Winter J. Forecasting and Nowcasting Real GDP: Comparing Statistical Models and Subjective Forecasts. **DNB Working Paper**. vol. 276(50), p. 289–95. 2012 http://www.rug.nl/staff/l.spierdijk/panzar_rosse.pdf.
- Krejčí, J., Stoklasa, J. Aggregation in the Analytic Hierarchy Process: Why Weighted Geometric Mean Should Be Used Instead of Weighted Arithmetic Mean. **Expert Systems with Applications**, vol. 114, p. 97–106, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.06.060>.

- Lima, J. W. M.; Collischonn, W.; Marengo, J. A. **Efeitos Das Mudanças Climáticas Na Geração de Energia Elétrica**. Hunter Books Editora. São paulo: AES Tietê, 2014.
- Lima, G. S. Aplicação de metodologia multicritério de apoio à decisão para priorização de ações de intervenção ao parque estadual do cocó. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Ceará, 2019.
- Lopes, J. E. G., Santos, R. C. P. Capacidade de Reservatórios. 2002. [http://www.leb.esalq.usp.br/leb/disciplinas/Fernando/leb1440/Aula_6/Capacidade de Reservatorios.pdf](http://www.leb.esalq.usp.br/leb/disciplinas/Fernando/leb1440/Aula_6/Capacidade_de_Reservatorios.pdf).
- Marconi, M. de A.; Lakatos, E. M. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 7th ed. São paulo, Atlas, 2010.
- Mendes. N. D. S. **Previsão das vazões afluentes diárias por rede neural para a operação do sistema interligado nacional**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2019
- Mendes, L. F. R. **Análise multicritério para universalização dos serviços elétricos em domicílios rurais isolados da região norte fluminense**. Dissertação de mestrado, Universidade Candido Mendes, 2013.
- MME; EPE, 2019. 2019. Plano Decenal de Expansão de Energia 2029.
- Murcia Neto, E. **Contratos por Disponibilidade de Usinas Termelétricas: Uma Análise Dos Resultados Econômicos de Operação**. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, 2016.
- Oliveira, F. A. **Estratégia de comercialização de energia elétrica através da otimização de portfólios de contratos utilizando projetos de experimentos de mistura**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Itajubá, 2009.
- ONS. 2020a. O sistema interligado nacional. <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>.
- ONS. 2020b. Plano Da Operação Energética – PEN. http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/ONS_PEN2020_24_final

(6).pdf.

ONS. 2020c. Resultados Da Operação: Histórico Da Operação. http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/dados_hidrologicos_niveis.aspx.

De Paiva, Davi F., Natan Santos, Bortoni, E. C., Yamachita, R. A. Decision Making on Generator for Wind Turbines Using the AHP Methodology. **2019 IEEE Milan PowerTech, PowerTech**. 2019.

Piran, F. S.; Lacerda, D. P.; Camargo, L. F R. **Análise e Gestão Da Eficiência**. 1st ed. Rio de Janeiro, Elsevier. 2018.

Ramos, D. S. et al. New Commercial Arrangements and Business Models in Electricity Distribution Systems: The Case of Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 2020. 117. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109468>.

Ravazi, S. E. et al. Impact of Distributed Generation on Protection and Voltage Regulation of Distribution Systems: A Review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** vol. 105, p. 157–67, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.050>.

Rediske, G. **Modelagem para avaliação de locais adequados para a instalação de usinas fotovoltaicas**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, 2019.

Rediske, G. et al. 2020. Multi-Criteria Decision-Making Model for Assessment of Large Photovoltaic Farms in Brazil. **Energy**. vol. 197, p. 117-167. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117167>.

Rigo, P. D. et al. 2020. A Model for Measuring the Success of Distributed Small-Scale Photovoltaic Systems Projects. **Solar Energy**. vol. 205, p. 241–53. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.04.078>.

Rigo, P. D. 2019. Modelo de diagnóstico para projetos de micro e minigeração distribuída de energia fotovoltaica. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, 2019.

- Saaty, T. L.; Vargas, L. G. **Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process**. New York, Springer, 2012.
- Saaty, T. L. A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures. **Journal of Mathematical Psychology**, vol. 15, p. 34–81, 1977.
- Saaty, T. L. Priority Setting in Complex Problems. **IEE Transactions on Engineering Management**. vol. 30(3), p. 140–55, 1983.
- Saaty, T. L. How to Make a Decision : The Analytic Hierarchy Process. **European Journal of Operational Research**. vol. 48, p. 9–26, 1990.
- Saaty, T. L. **Método de Análise Hierárquica**. São paulo, McGraw-Hill, 1991.
- Saaty, T. L. Decision Making with the Analytic Hierarchy Process. **International Journal of Services Sciences**. vol. 1(1), p. 83–98, 2008.
- Saaty, T. L. **Decision Making for Leaders: The Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World**. 3rd ed. Revise ed. Pittsburgh, RWS Publications, 2012.
- Saaty, T. L. The analytic hierarchy process-what and how it is used. **Mathematical Modelling**, vol. 9(3), p. 161–176, 1987.
- Schaeffer, R. et al. 2012. Energy Sector Vulnerability to Climate Change: A Review. **Energy**, vol. 38(1), p. 1–12, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2011.11.056>.
- Silva, E. L. da. 2012. **Formação de Preços Em Mercados de Energia Elétrica**. 2^a. Florianópolis, Edição do autor.
- Soares, B. N. **Metodologia Para Priorização de Investimentos Em Redes de Distribuição de Energia Elétrica Com Foco Em Ganhos Operacionais e Financeiros**. Dissertação de mestrado, , Universidade Federal de Santa Maria, 2015.
- Solar, Canal. 2021. O Que é o LCOE e Como Utilizar Nos Projetos Fotovoltaicos? <https://canalsolar.com.br/o-que-e-o-lcoe-e-como-utilizar-nos-projetos-fotovoltaicos/>.
- Soliman, M. **Avaliação Da Competitividade Em Indústrias de Transformação de Plástico**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, 2014.

- Tolmasquim, M. T. **Novo Modelo Do Setor Elétrico Brasileiro**. Rio de Janeiro, Synergia, 2011.
- Tolmasquim, M. Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear. 2016. [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-173/Energia Termelétrica - Online 13maio2016.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-173/Energia%20Termel%C3%A9trica%20-%20Online%2013maio2016.pdf).
- van Eck, N. J. Waltman, L. 2010. Software Survey VOSviewer.Pdf. p. 523–38. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20585380/>.
- Wang, J. J. et al. Review on Multi-Criteria Decision Analysis Aid in Sustainable Energy Decision-Making. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 13, p. 1545–51, 2009.
- Weiss, C.V.C., Tagliani, P.R.A., Espinoza, J.M.A., de Lima, L.T., Gandra, T.B.R. 2018. “Spatial Planning for Wind Farms: Perspectives of a Coastal Area in Southern Brazil No Title.” *Clean Technologies and Environmental Policy*.
- Yin, R. K. **Estudo de Caso: Planejamento e Métodos**. Bookman, 2015.
- Zanardo, R. P., Siluk, J. C. M., Savian, F. S., Schneider, P. S. Energy Audit Model Based on a Performance Evaluation System. **Energy**. vol. 154, p. 544–52, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.179>.
- Zanchetta, L. P. Pfitscher, L. L. Studies on the Reconfiguration on Distributed Networks with Distributed Generation. **Proceedings of the Universities Power Engineering Conference 2015-Novem**. 2015.
- Zavadskas, E. K., Turskis, Z., Kildiene, S. State of Art Surveys of Overviews on MCDM/MADM Methods. **Technological and Economic Development of Economy**. vol. 20(1), p. 165–79, 2014.

APÊNDICE A – Análise Bibliométrica

A pesquisa é justificada academicamente com dados angariados da análise bibliométrica realizada em setembro de 2020 na base de dados *Scopus*. Essa base foi escolhida devido a sua relevância e usabilidade. A questão de pesquisa que suscitou a definição dos termos de busca foi: *O método AHP é utilizado para analisar o mercado de energia elétrica brasileiro?* Assim, as expressões “energia” e “processo analítico hierárquico” foram selecionadas e ampliadas com a inclusão de sinônimos, visando analisar o processo analítico hierárquico e sua relação com mercado de energia elétrico brasileiro que estão sendo estudadas no meio acadêmico.

O operador booleano que denota adição e “AND” foi utilizado para unir os dois termos escolhidos e o operador booleano que denota a alternativa *ou* “OR” foi utilizado para conectar os termos semelhantes. O caractere “*” foi utilizado para buscar termos derivados – por exemplo, o termo “*energ**” retorna resultados contendo os termos *energy* e *energetic*. A pesquisa pelos termos foi realizada nos títulos, resumos e palavras chave dos documentos e limitou-se aos estudos publicados em inglês e no Brasil. Como resultado, gerou-se o seguinte comando (*string*) de busca: [(*energ** OR *electric**) AND (“analytic hierarchy process” OR AHP) AND (LIMIT-TO AFFILCOUNTRY “Brazil”)].

A pesquisa localizou 88 estudos, dos quais 55,68% foram publicados de 2018 a 2020. O pico de publicações ocorreu em 2018, em que estão alocados 14 estudos e no ano de 2020 tem-se 14 estudos publicados. Esses resultados sugerem que o tema é relevante e continua sendo investigado. Em relação a categorização dos documentos por tipo, 55,7% dos estudos são de artigos em periódicos, seguido de anais de congressos ou conferências, que correspondem a 38,6 % dos estudos. Estes números sugerem que os artigos em periódicos são uma fonte importante de informação para este tema. Quando os documentos foram divididos por área do conhecimento, observou-se que as áreas Energia, Engenharia e Meio Ambiente foram as mais representativas, contendo 21,50%, 19,0% e 14,7% dos documentos, respectivamente. As áreas Ciência da Computação e Negócios, Gestão e Contabilidade, correspondem a 11,0% e 6,1% dos documentos, respectivamente. A instituição de ensino brasileira com maior número de documentos publicados é a Universidade Federal de Santa Maria – UFSM com dezenove documentos, seguida das Universidade Federal do Rio de Janeiro e Universidade de São Paulo – USP com dez e nove documentos publicados, respectivamente. A Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS tem três documentos publicados nos anos de 2014, 2017 e 2018.

O estudo mais citado traz o estudo da identificação e análise de barreiras na logística reversa utilizando o método *Fuzzy Delphi* em conjunto com a ferramenta AHP (Bouzon et al. 2016). Esse estudo faz uma revisão de literatura e utiliza os questionários do método AHP para obter a opinião de especialista na área da logística reversa no contexto brasileiro. No trabalho realizado por Bernardon et al. (2014) foi utilizado o método AHP para determinar a melhor sequência de comutação de controladores da rede de distribuição, que são acionados remotamente, incorporando a geração distribuída. Alguns estudos utilizam a AHP em processos decisórios para definir a localização para a instalação de parques eólicos e fotovoltaicos (RIGO et al., 2020; REDISKE et al., 2020). O estudo mais recente traz o uso do método AHP para analisar a perfuração e construção de poços de petróleo *offshore* com foco nos fatores humanos (França et al. 2020).

A fim de determinar as relações entre os documentos encontrados, foram realizadas análises de rede das citações dos documentos, coocorrência de palavras chave e coautoria por país. O *software* utilizado para a construção e visualização dos mapas da análise bibliométrica foi o *VOSviewer*¹ (van ECK and Waltman, 2010).

A análise da rede das citações por documento retornou como resultado que 66 documentos estão conectados entre si. Esses documentos foram agrupados em 2 clusters, conforme destacado na Figura A.1.

¹ <https://www.vosviewer.com>

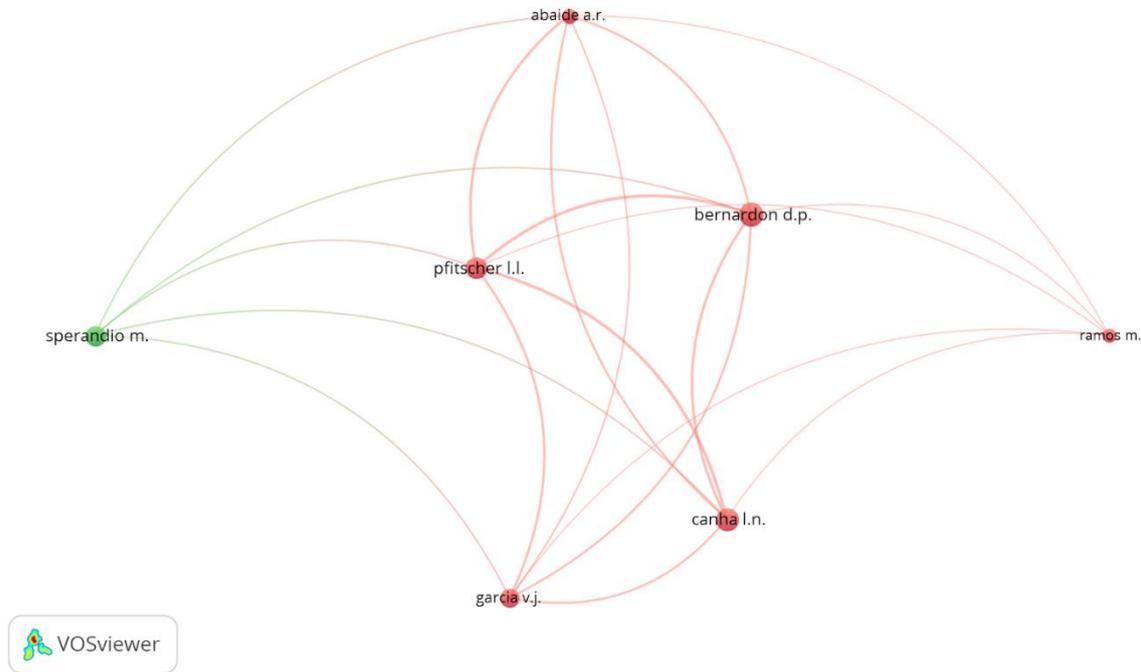


Figura A.1 – Análise de citações por documento.

Entre os estudos listados, estão aqueles que utilizam o modelo matemático AHP para a configuração e controle de redes de distribuição de baixa tensão e análise da inclusão de fontes de geração distribuída, destacados no grupo (*cluster*) em vermelho. Zanchetta e Pfitscher (2015) propõem a utilização do AHP para a reconfiguração das redes de distribuição em operação normal e considerando a inclusão de fontes de geração distribuída, apresenta a análise de carga e geração, bem como seu impacto nos resultados da reconfiguração da rede. Com o objetivo de estabelecer a alocação de dispositivos controlados remotamente em sistemas de distribuição de energia elétrica, Bernardon et al. (2011) utiliza o método AHP para definir o local da instalação desses interruptores. Outro estudo de Bernardon et al. (2013) desenvolve uma metodologia de restabelecimento do fornecimento de energia elétrica por meio de interruptores telecomandados, sendo que a melhor opção para a transferência de carga através de chaves telecomandadas, após contingências, será definida com base no método AHP. Os estudos de Abaide, et al. (2009a, 2009b) utilizam a análise multicritério para definir o sistema de armazenamento de energia mais adequado em relação a um cenário que prioriza a qualidade da energia e a forma de operação desses sistemas, para tal, aplica o método AHP em conjunto com a lógica *fuzzy*.

O próximo grupo, destacado em verde, concentra estudos que buscam avaliar a aplicação do AHP em problemas que envolvem o tempo de restauração da energia elétrica em redes de distribuição e o reflexo dessas ações no índice de confiabilidade da concessionária de energia elétrica (BERNARDON *et al.*, 2015).

A segunda análise de rede realizada foi de coocorrência de palavras chave. Como parâmetros foi definido o mínimo de 4 ocorrências da palavras chave. A Figura A.2 traz os resultados da análise.

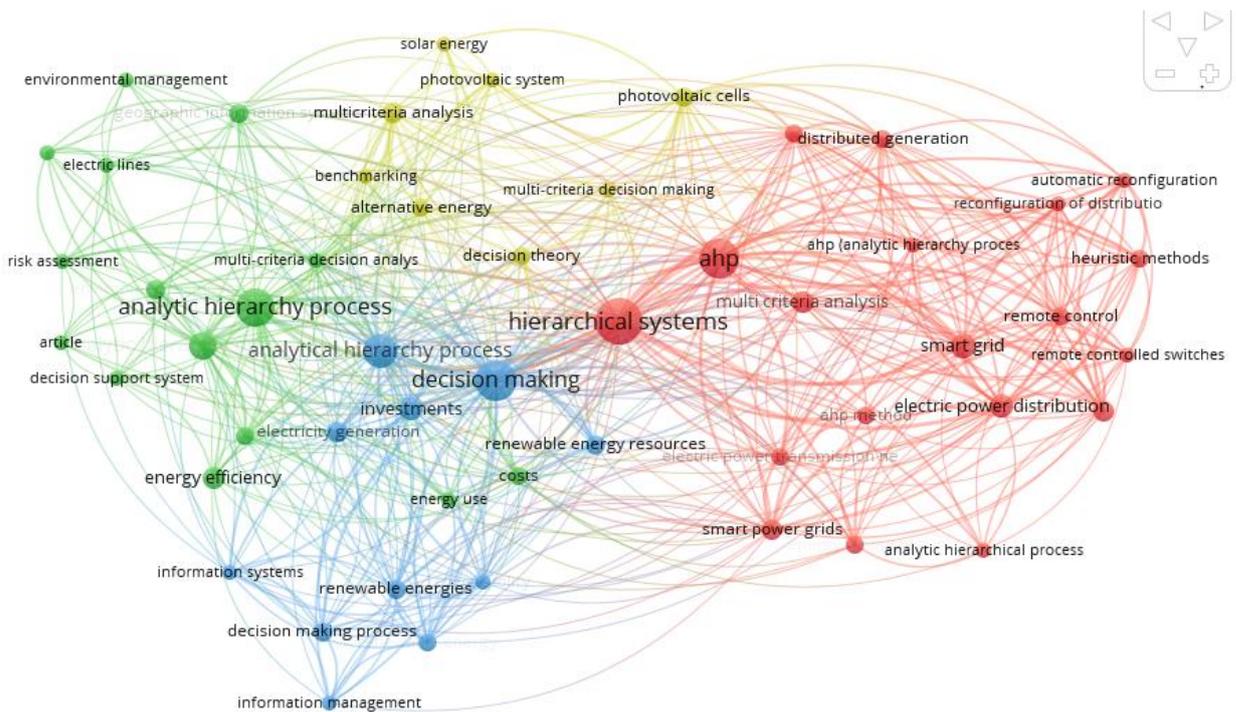


Figura A.2 – Análise de coocorrência de palavras chave.

Como resultados, foram obtidas 54 palavras agrupadas em 4 grupos (*clusters*). No primeiro grupo, destacado em vermelho, observa-se que os termos equivalentes a “processo analítico hierárquico” (*analytical hierarchical process e AHP*) estão agrupados junto aos termos “distribuição de energia elétrica”, “rede inteligente” e “geração distribuída” (*electric power distribution, smart grid e distributed generation*, respectivamente). Esse agrupamento indica que o processo analítico hierárquico é utilizado no planejamento e controle de redes de distribuição e da geração distribuída.

O segundo grupo, destacado em verde, traz as palavras “análise de decisão multicritério” (*multi-criteria decision analys*) e “sistemas de apoio à decisão” (*decision support system*) agrupadas

ao termo “processo analítico hierárquico” (*analytical hierarchy process*). Isso indica que o método subjetivo vem sendo utilizado na tomada de decisão.

O terceiro grupo, destacado em azul, indica a relação entre processos decisórios e energias renováveis. Nesse grupo, os termos “tomada de decisão” e “processo de tomada de decisão” (*decision making* e *decision making process*, respectivamente) estão agrupados aos termos “fontes de energias renováveis” (*renewable energy resources*) e “energias renováveis” (*renewable energies*). Além disso, indica relação com a área de investimento pelo termo “investimentos” (*investments*).

O quarto grupo, destacado em amarelo, é composto por oito palavras. Nesse grupo, observa-se que o termo “tomada de decisão multicritério” (*multi-criteria decision making*) está vinculado as palavras “sistemas fotovoltaicos” (*photovoltaic system*) e “energia solar” (*solar energy*). Esse agrupamento pode apontar a utilização conjuntamente análise multicritério em sistemas de geração fotovoltaicos.

A terceira análise de rede buscou as relações de coautoria em países diferentes. Definiu-se o mínimo de 43 documentos por país como parâmetro. Os resultados da análise são apresentados na Figura A.3.

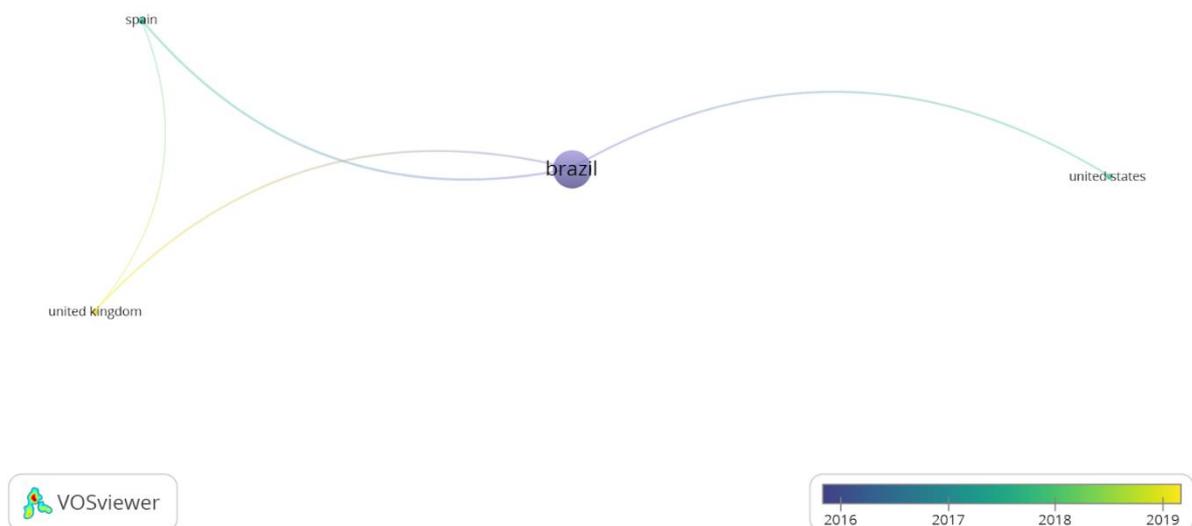


Figura A.3 – Análise de coautoria por país.

A rede de coautoria retornou 4 países agrupados: Brasil, Espanha, Reino Unido e Estados Unidos.

A bibliometria e as análises de rede realizadas permitiram verificar que esta pesquisa é relevante academicamente. Observou-se que a questão de pesquisa é aderente aos estudos analisados. Além disso, os grupos e documentos e palavras chave identificados auxiliarão no desenvolvimento da revisão de literatura apresentada como parte dos resultados desta pesquisa.

APÊNDICE B – Instrumento de coleta de dados – Formulário *Google forms*

Seção 1 de 5

Instrumento de pesquisa

Gostaria de convidá-lo (la) a participar de uma pesquisa científica cujo objetivo é identificar a atratividade de investimentos em geração de eletricidade no Brasil. Especialistas como você irão contribuir com opiniões no sentido de melhorar a tomada de decisão, baseada em uma metodologia multicritério.

O questionário possui dois blocos com questões de múltipla escolha e um bloco com uma questão aberta. As perguntas devem ser respondidas de acordo com sua percepção e experiência.

Sua participação será mantida em sigilo, e suas respostas são fundamentais para a elaboração do mestrado da Enga Simone Venturini, em andamento no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PROMEC da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, no Laboratório de Ensaios Térmicos e Aerodinâmicos - LETA.

E-mail *

E-mail válido

Este formulário está coletando e-mails. [Alterar configurações](#)

Aceita participar:

Sim

Seção 2 de 5

Você deverá comparar 4 critérios ligados à atratividade de investimento em geração de eletricidade com fontes de geração hidráulica, eólica, fotovoltaica, térmica a biomassa, térmica a gás natural e térmica a carvão, no ambiente de contratação regulado - ACR, para um horizonte de 10 anos. Os critérios “Preço de venda da eletricidade”, “Despesas de capital-CAPEX”, “Despesas de operação-OPEX” e “Vulnerabilidade ambiental” serão comparados aos pares. Julgue cada critério de acordo com sua percepção e experiência.

Descrição (opcional)

O "Preço de venda da eletricidade*" é o valor médio atualizado pelo Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo-IPCA, expresso em Reais por MegaWatt-hora (R\$/MWh).

Descrição (opcional)

O "CAPEX*" traz os investimentos em capital de cada empreendimento, expresso em Reais por MegaWatt-hora (R\$/MWh).

Descrição (opcional)

O "OPEX*" engloba as despesas de operação e manutenção de cada empreendimento, expresso em Reais por MegaWatt-hora (R\$/MWh).

Descrição (opcional)

O Critério Vulnerabilidade ambiental refere-se às flutuações de disponibilidade das fontes primárias para a geração de energia elétrica devido as condições climáticas.

Descrição (opcional)

Título

* Valores de referência retirados de "Resultados dos leilões de geração no ambiente regulado" para o período 2005 à 2019 (Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrJoiYmMzN2Y0NGMtYjEyNy00OTNLW11YzctZjI0ZTUwMDg5ODU3IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBiMSIsImMiOiR9>).

Após a seção 2 Continuar para a próxima seção

Seção 3 de 5

Análise de importância dos critérios



A atratividade de investimento em geração de eletricidade para um horizonte de 10 anos, no ambiente de contratação regulado - ACR, será estimada por meio de comparações par a par dos 4 critérios selecionados. Julgue a importância relativa de cada item. A tabela abaixo traz os valores dos indicadores "Preço de venda da eletricidade", "CAPEX" e "OPEX":

Título da imagem

Preço de venda da energia	R\$/MWh	CAPEX	R\$/MWh	OPEX	R\$/MWh
Hidrelétrica	173,04	Hidrelétrica	0,44	Hidrelétrica	4,57
Eólica	177,44	Eólica	0,68	Eólica	10,27
Fotovoltaica	253,73	Fotovoltaica	0,68	Fotovoltaica	5,71
Térmica a biomassa	196,78	Térmica a biomassa	0,32	Térmica a biomassa	10,27
Térmica a gás natural	250,32	Térmica a gás natural	0,33	Térmica a gás natural	15,98
Térmica a carvão mineral	260,14	Térmica a carvão mineral	0,74	Térmica a carvão mineral	12,56



1 - Você vai clicar em apenas uma das opções abaixo que compara a importância do Preço de venda da energia em relação ao Capex: *

- O Preço de venda da energia tem importância muito forte em relação ao Capex.
- O Preço de venda da energia tem importância forte em relação ao Capex.
- O Preço de venda da energia é moderadamente importante em relação ao Capex.
- São equivalentes.
- O Capex é moderadamente importante em relação ao Preço de venda da energia.
- O Capex tem importância forte em relação ao Preço de venda da energia.
- O Capex tem importância muito forte em relação ao Preço de venda da energia.

2 - Você vai clicar em apenas uma das opções abaixo que compara a importância do Preço de venda da energia em relação ao Opex: *

- O Preço de venda da energia tem importância muito forte em relação ao Opex.
- O Preço de venda da energia tem importância forte em relação ao Opex.
- O Preço de venda da energia é moderadamente importante em relação ao Opex.
- São equivalentes.
- O Opex é moderadamente importante em relação ao Preço de venda da energia.
- O Opex tem importância forte em relação ao Preço de venda da energia.
- O Opex tem importância muito forte em relação ao Preço de venda da energia.

3 - Você vai clicar em apenas uma das opções abaixo que compara a importância do Preço de venda da energia em relação a Vulnerabilidade ambiental: *

- O Preço de venda da energia tem importância muito forte em relação a Vulnerabilidade.
- O Preço de venda da energia tem importância forte em relação a Vulnerabilidade.
- O Preço de venda da energia é moderadamente importante em relação a Vulnerabilidade.
- São equivalentes.
- A Vulnerabilidade é moderadamente importante em relação ao Preço de venda da energia.
- A Vulnerabilidade tem importância forte em relação ao Preço de venda da energia.
- A Vulnerabilidade tem importância muito forte em relação ao Preço de venda da energia.

4 - Você vai clicar em apenas uma das opções abaixo que compara a importância do Capex em relação ao Opex: *

- O Capex tem importância muito forte em relação ao Opex.
- O Capex tem importância forte em relação ao Opex.
- O Capex é moderadamente importante em relação ao Opex.
- São equivalentes.
- O Opex é moderadamente importante em relação ao Capex.
- O Opex tem importância forte em relação ao Capex.
- O Opex tem importância muito forte em relação ao Capex.

5 - Você vai clicar em apenas uma das opções abaixo que compara a importância do Capex em relação a Vulnerabilidade ambiental: *

- O Capex tem importância muito forte em relação a Vulnerabilidade ambiental.
- O Capex tem importância forte em relação a Vulnerabilidade ambiental.
- O Capex é moderadamente importante em relação a Vulnerabilidade ambiental.
- São equivalentes.
- A Vulnerabilidade ambiental é moderadamente importante em relação ao Capex.
- A Vulnerabilidade ambiental tem importância forte em relação ao Capex.
- A Vulnerabilidade ambiental tem importância muito forte em relação ao Capex.

6 - Você vai clicar em apenas uma das opções abaixo que compara a importância do Opex em relação a Vulnerabilidade ambiental: *

- O Opex tem importância muito forte em relação a Vulnerabilidade ambiental.
- O Opex tem importância forte em relação a Vulnerabilidade ambiental.
- O Opex é moderadamente importante em relação a Vulnerabilidade ambiental.
- São equivalentes.
- A Vulnerabilidade ambiental é moderadamente importante em relação ao Opex.
- A Vulnerabilidade ambiental tem importância forte em relação ao Opex.
- A Vulnerabilidade ambiental tem importância muito forte em relação ao Opex.



Seção 4 de 5

Faça o Ranking do indicador Vulnerabilidade, sabendo-se que as fontes de geração são influenciadas pelas fragilidades, descritas na tabela abaixo:

Descrição (opcional)

Pergunta *

Fragilidades de cada fonte primária de geração	
Hidrelétrica	Escassez de chuvas
Eólica	Intermitência dos ventos
Fotovoltaica	Intermitência da radiação solar
Térmica a biomassa	Sazonalidade da safra cana-de-açúcar
Térmica a gás natural	Disponibilidade de fornecimento
Térmica a carvão mineral	Emissão de Gases de Efeito Estufa

A escala de comparação varia de “menor vulnerabilidade” (variável assume valor 1) a “maior vulnerabilidade” (variável assume valor 6).

	1	2	3	4	5	6
HIDRELÉTRI...	<input type="radio"/>					
EÓLICA	<input type="radio"/>					
FOTOVOLTAI...	<input type="radio"/>					
BIOMASSA A...	<input type="radio"/>					
GÁS NATURAL	<input type="radio"/>					
CARVÃO MI...	<input type="radio"/>					

Após a seção 4 Continuar para a próxima seção

Seção 5 de 5

Pergunta aberta



Descrição (opcional)

Do seu ponto de vista, além dos critérios julgados na seção anterior, que outro critério pode ser ^{*} considerado para identificar a atratividade de fontes de geração de eletricidade no Brasil?

Texto de resposta longa
.....

Deixe seus comentários e sugestões no espaço abaixo.

Texto de resposta longa
.....

Durante a pesquisa estaremos a disposição para sanar quaisquer dúvidas e esclarecimentos pelo contato de e-mail simone.venturini@ufrgs.br. O grupo de estudos agradece sua participação!

Descrição (opcional)

APÊNDICE C – Documentos da revisão sistemática da literatura

Este apêndice apresenta os documentos oriundos da revisão sistemática de literatura sobre o método Processo Analítico Hierárquico (AHP) aplicado no mercado de energia elétrica brasileiro.

Ano	Título	Periódico	Autoria
2020	FRAM AHP approach to analyse offshore oil well drilling and construction focused on human factors	Springer	França J.E.M., Hollnagel E., dos Santos I.J.A.L., Haddad A.N.
2020	A model for measuring the success of distributed small-scale photovoltaic systems projects	Elsevier	Rigo P.D., Siluk J.C.M., Lacerda D.P., Rediske G., Rosa C.B.
2020	A combined optimization and decision-making approach for battery-supported HMGS	Journal of the Operational Research Society	Marcelino C., Baumann M., Carvalho L., Chibeles-Martins N., Weil M., Almeida P., Wanner E.
2020	Assessment of offshore wind power Potential along the Brazilian coast	Energies	De Azevedo S.S.P., Pereira A.O., Jr., Da Silva N.F., De Araújo R.S.B., Júnior A.A.C.
2020	Use of analytic hierarchy process for wind farm installation region prioritization-case study	Energies	Bulhões R.L., De Santana E.S., Santos A.Á.B.
2020	Localization study for the implementation of a solar power plant in Brazil using Dish-Stirling systems	American Institute of Physics	Lessandro T.R., Bruno C.P., Elaine A.A.
2020	Multi-criteria decision-making model for assessment of large photovoltaic farms in Brazil	Elsevier	Rediske G., Siluk J.C.M., Michels L., Rigo P.D., Rosa C.B., Cugler G.
2020	A multicriteria proposal for large-scale solar photovoltaic impact assessment	Taylor and Francis	Pimentel Da Silva G.D., Magrini A., Branco D.A.C.

2020	Multicriterial model for selecting a charcoal kiln	Elsevier	Zola F.C., Colmenero J.C., Aragão F.V., Rodrigues T., Junior A.B.
2020	Landslide susceptibility mapping for transmission lines: dynamic monitoring, analysis and alerts for extreme natural events	Environmental Earth Sciences	Junqueira A.M., Andrade M.R.M., Mendes T.S.G., Simoes S.J.C.
2020	Selecting Projects on the Brazilian RD Energy Sector: A Fuzzy-Based Approach for Criteria Selection	IEEE	Souza D.G.B., Silva C.E.S., Soma N.Y.
2020	Applying multi-criteria analysis to select the most appropriate broiler rearing environment	Information Processing in Agriculture	Lima K.A.O., Nääs I.A., Moura D.J., Garcia R.G., Mendes A.S.
2020	Mathematical modeling for the measurement of the competitiveness index of Brazil south urban sectors for installation of photovoltaic systems	Energy Policy	Rosa C.B., Wendt J.F.M., Chaves D.M.S., Thomasi V., Michels L., Siluk J.C.M.
2020	Multiattribute Spatial Decision-Making for Qualitative Information Processing as Applied to the Renewable Energy Generating Sites Prospection	Institute of Electrical and Electronics Engineers	Silva L.M.L.D., Ekel P., Vieira D., Soares G.L.
2019	Hierarchy of hydraulic and energy conservation actions at water supply systems	Taylor and Francis	Klemann Raminelli L., Costa dos Santos D.
2019	An analysis of the applications of Analytic Hierarchy Process (AHP) for selection of energy efficiency practices in public lighting in a sample of Brazilian cities	Elsevier	Salvia A.L., Brandli L.L., Leal Filho W., Locatelli Kalil R.M.
2019	Quantitative Assessment of Life Cycle Sustainability (QUALICS): Framework and its application to assess electrokinetic remediation	Elsevier	da S Trentin A.W., Reddy K.R., Kumar G., Chetri J.K., Thomé A.

2019	A Self-Healing Technique for a Smart Distribution Grids with Distributed Energy Resources	IEEE	Vargas T.D.N., De Freitas W.L., De Mello A.P.C.
2019	Evaluation of the success of a small-scale photovoltaic energy system	IEEE	Donaduzzi Rigo P., Mairesse Siluk J.C., Pacheco Lacerda D., Thomasi V., Rediske G., Brum Rosa C.
2019	Multi-criteria risk assessment: Case study of a large hydroelectric project	Elsevier	Ribas J.R., Arce M.E., Sohler F.A., Suárez-García A.
2019	Decision making on generator for wind turbines using the AHP methodology	IEEE	De Paiva D.F., Santos N., Bortoni E.C., Yamachita R.A.
2019	Synthesis of heat exchanger networks with economic and environmental assessment using fuzzy-Analytic Hierarchy Process	Elsevier	Mano T.B., Guillén-Gosálbez G., Jiménez L., Ravagnani M.A.S.S.
2019	Knowledge Management in Electricity Generation Strategic Decisions: The Dawn of the Renewable Age	IEEE	Baracho F.R.A.C., Baracho R.M.A., Bonatti R.A., Silva C.H.F.
2019	Energy efficiency in the food industry: A systematic literature review	Instituto de Tecnologia do Parana	Pradella A.M., de Freitas Rocha Loures E., da Costa S.E.G., de Lima E.P.
2018	Mitigating Risks by Weighting Intangibles when Investing in Renewables	IEEE	Baracho F.R.A.C., Abrantes Baracho R.M., Bonatti R.A., Silva C.H.F.
2018	Cashew apple bagasse as new feedstock for the hydrogen production using dark fermentation process	Elsevier	Silva J.S., Mendes J.S., Correia J.A.C., Rocha M.V.P., Micoli L.

2018	Assessment of ISO 9001:2015 implementation factors based on AHP: Case study in Brazilian automotive sector	International Journal of Quality and Reliability Management	Almeida D., Pradhan N., Muniz Jr J.
2018	A multi-criteria decision analysis method for regulatory evaluation of electricity distribution service quality	Utilities Policy	Barbosa A.D.S., Shayani R.A., Oliveira M.A.G.D.
2018	Energy audit model based on a performance evaluation system	Energy	Zanardo R.P., Siluk J.C.M., de Souza Savian F., Schneider P.S.
2018	Geoindicator-based assessment of Santa Catarina (Brazil) sandy beaches susceptibility to erosion	Elsevier	Bonetti J., Rudorff F.D.M., Campos A.V., Serafim M.B.
2018	Spatial planning for wind farms: perspectives of a coastal area in southern Brazil	Clean Technologies and Environmental Policy	Weiss C.V.C., Tagliani P.R.A., Espinoza J.M.A., de Lima L.T., Gandra T.B.R.
2018	Alkaline hydrogen peroxide pretreatment of lignocellulosic biomass: status and perspectives	Springer	Dutra E.D., Santos F.A., Alencar B.R.A., Reis A.L.S., de Souza R.F.R., Aquino K.A.S., Morais M.A., Jr., Menezes R.S.C.
2018	Multi-criteria selection of distributed mini generation systems using rice husk	Instituto de Tecnologia do Parana	da Costa A.K., Farret F.A., Trennepohl F.A.
2018	Application of the project based learning approach in the maintenance of aeronautical turbine accessories of general electric aviation	University of Minho	Gushiken S.R.Y., Fonseca M.P., Figueiredo M.A.D., Figueiredo L.C., Crespo G.B., Dos Santos H.
2018	A review on multi-criteria decision-making for energy efficiency in automotive engineering	Elsevier	Castro D.M., Parreiras F.S.

2018	Investments in renewables decision making based on tangible and intangible criteria	International Multi-Conference on Complexity, Informatics and Cybernetics	Baracho R.M.A., Bonatti R.A., Teixeira L.M.D., Ferreira L.G.F., Baracho F.R.A.C., De Lima B.C., Silva C.H.F.
2018	Site Selection for Hydropower Development: A GIS-Based Framework to Improve Planning in Brazil	American Society of Civil Engineers (ASCE)	Romanelli J.P., Silva L.G.M., Horta A., Picoli R.A.
2018	Spatial Planning of Electric Vehicle Infrastructure for Belo Horizonte, Brazil	Journal of Advanced Transportation	Costa E., Paiva A., Seixas J., Costa G., Baptista P., Gallachóir B.Ó.
2017	A resilience engineering approach for sustainable safety in green construction	International Centre for Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems SDEWES	Rosa L.V., França J.E.M., Haddad A.N., Carvalho P.V.R.
2017	Assessment of economic, social and environmental sustainability of sugarcane-based energy activity in Mato Grosso do Sul: A pluri-criterion analysis	Revista em Agronegócio e Meio Ambiente	Dos Reis J.G.M., Vendrametto O., Costa Neto P.L.D.O., Machado S.T.
2017	Multi-criteria analysis to prioritize energy sources for ambience in poultry production	Fundação APINCO de Ciência e Tecnologia Avícolas	Collatto D.C., Mansilha R.B., Chiwiacowsky L.D., Lacerda D.P.
2017	Conceptual alternatives for energetic integration of landfill effluents	International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems	Amado E.A., Patiño A.F.L., Saffer M., Zanardo R.P., Schneider P.S.
2017	Multi-criteria analysis to select the most appropriate rearing environment for broiler production	American Society of Agricultural and Biological Engineers	Lima K., Nääs I.A., Moura D.J., Garcia R.G.

2016	Least-cost path analysis and multi-criteria assessment for routing electricity transmission lines	IET Generation, Transmission and Distribution	de Lima R.M., Osis R., de Queiroz A.R., Santos A.H.M.
2016	Facing the data analysis complexity for the energetic efficiency management at great copper mining, in Codelco Chuquicamata, Chile	Institute of Electrical and Electronics Engineers	Lagos C., Fuertes G., Carrasco R., Gutierrez S., Vargas M., Rodrigues R.
2016	Full assessment energy-sources for inclusive energy-resources planning	Elsevier	Udaeta M.E.M., Galvão L.C.R., Rigolin P.H.D.C., Bernal J.L.D.O.
2016	Development of an experimental platform for analysis of self-healing method	International Universities Power Engineering Conference	Schmitz M., Bernardon D.P., Santos C., Boaski M.A., Schmitz W.I., Porto D., Ramos M.
2016	Exploring the impact of sub-sea technology development on the Southern Brazilian shelf	Symposium on Automation and Computation for Naval, Offshore and Subsea	De Paula Kirinus E., Pereira J.T.B., Marques W.C., Matzenauer H.B., Poester V.R., Gandra T.B.R.
2016	Identification and analysis of reverse logistics barriers using fuzzy Delphi method and AHP	Resources, Conservation and Recycling	Bouzon M., Govindan K., Rodriguez C.M.T., Campos L.M.S.
2015	Allocation of remotely controlled switches for reliability assessment in distribution networks	IEEE	Bernardon D.P., Abaide A.R., Canha L.N., Sperandio M., Garcia V.J., Neto N.K., Pressi R.A.
2015	Studies on the reconfiguration on distributed networks with distributed generation	IEEE	Zanchetta L.P.; Pfitscher L.L.
2015	Effects of the pretreatment method on high solids enzymatic hydrolysis and ethanol fermentation of the cellulosic fraction of sugarcane bagasse	Elsevier	da Silva Martins L.H., Rabelo S.C., da Costa A.C.

2015	Tool for environmental performance assessment of city bus transit operations: Case studies	Springer	Sellitto M.A., Borchardt M., Pereira G.M., Bubicz M.E.
2015	Analytic Hierarchy Process Applied to the Choice of a Long-Life Tomato (<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill) Drying System	Talor and Francis	Jorge A., Kubaski E.T., Colmenero J.C., Sequinel T., Sequinel R., Tebcherani S.M.
2015	Adaptive beaconless opportunistic routing for multimedia distribution	Springer	Pimentel L., Rosário D., Seruffo M., Zhao Z., Braun T.
2015	Intelligent system for automatic reconfiguration of distribution network with distributed generation	IEEE	Mello A.P., Sperandio M., Bernardon D.P., Pfitscher L.L., Canha L.N., Ramos M., Porto D., Pressi R.
2015	A decision support system for prioritizing investments in an energy efficiency program in favelas in the city of Rio de Janeiro	Journal of Multi-Criteria Decision Analysis	Ribas J.R., da Silva Rocha M.
2015	Evaluating the implementation of GSCM in industrial supply chains: Two cases in the automotive industry	Chemical Engineering Transactions	Sellitto M.A., Bittencourt S.A., Reckziegel B.I.
2014	Multi-objective optimization of electromagnetic fields from urban overhead power lines	IEEE	Salas S.S., Fonseca A.G., Guerra F.A., Solera R.
2014	Real-time reconfiguration of distribution network with distributed generation	Electric Power Systems Research	Bernardon D.P., Mello A.P.C., Pfitscher L.L., Canha L.N., Abaide A.R., Ferreira A.A.B.
2014	Use of decision support models to analyze technological alternatives for municipal solid waste treatment in South Region of Brazil	Engenharia Sanitaria e Ambiental	de Lima J.D., Jucá J.F.T., Reichert G.A., Firmo A.L.B.

2014	CAOR: Context-Aware adaptive opportunistic routing in mobile ad-hoc networks	IEEE	Zhao Z., Braun T., Rosário D., Cerqueira E.
2014	Planning for Intra-city and regional transport multimode systems	Civil-Comp Press	Silva R.B., Cavalcanti Netto M.A., Rezende A.E.
2014	Methodology for prioritizing investments in distribution networks electricity focusing on operational efficiency and regulatory aspects	Proceedings of the Universities Power Engineering Conference	Soares B.N., Da Rosa Abaide A., Bernardon D.
2013	Automatic restoration of power supply with possibility of islanded operation of distribution network	Proceedings of the Universities Power Engineering Conference	Bernardon D.P., Canha L.N., Abaide A.R., Garcia V.J., Sperandio M., Pfitscher L.L., Lopes G.S., Possebon E.
2013	Reconfiguration of distribution network considering distributed generation and multivariables criteria	Proceedings of the Universities Power Engineering Conference	Mello A.P.C., Bernardon D.P., Pfitscher L.L., Canha L.N., Garcia V.J., Sperandio M.
2013	Automatic restoration of power supply considering islanded operation of distribution network	International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives	Bernardon D.P., Canha L.N., Abaide A.R., Garcia V.J., Sperandio M., Pfitscher L.L., Lopes G.S., Possebon E.
2013	Hypertonicity increases NO production to modulate the firing rate of magnocellular neurons of the supraoptic nucleus of rats	Neuroscience	da Silva M.P., Ventura R.R., Varanda W.A.
2013	Intelligent system for automatic reconfiguration of distribution network in real time	Electric Power Systems Research	Pfitscher L.L., Bernardon D.P., Canha L.N., Montagner V.F., Garcia V.J., Abaide A.R.
2013	Defining a quality index for electric power utilities using multiple criteria decision support and time series analysis	Gestão e Produção	Passos A.C., Souza R.C.

2013	Intelligent system for multivariable reconfiguration of distribution networks	IEEE	Mello A.P., Bernardon D.P., Pfitscher L.L., Sperandio M., Toller B.B., Ramos M.
2012	A multicriteria approach for measuring the carbon-risk of oil companies	Energy Strategy Reviews	Castelo Branco D.A., Rathmann R., Borba B.S.M.C., de Lucena A.F.P., Szklo A., Schaeffer R.
2012	Multiple criteria model for the management of complex engineering network of projects	Institute of Industrial Engineers	Pereira V., Gabriele P., Lordelo S., Farias Filho J.R., Costa H.G.
2011	Automatic reestablishment of power supply in distribution systems using AHP method	International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives	Bernardon D.P., Sperandio M., Garcia V.J., Pfitscher L.L., Reck W., Daza E.F.B., Ramos M., Comassetto L.
2011	AHP decision-making algorithm to allocate remotely controlled switches in distribution networks	IEEE	Bernardon D.P., Sperandio M., Garcia V.J., Canha L.N., Abaide A.D.R., Daza E.F.B.
2011	An AHP multiple criteria model applied to transmission expansion of a Brazilian southeastern utility	IEEE	Aranha Neto E.A.C., Coelho J., Camargo C.C.B., Rodigheri A., Reis M.M., Cimino Jr. L., Ribeiro R.G., Reinig A.O.
2011	Environmental performance assessment in transportation and warehousing operations by means of categorical indicators and multicriteria preference	Chemical Engineering Transactions	Sellitto M.A., Borchardt M., Pereira G.M., Gomes L.P.
2010	Environmental studies for selection: How AHP (Analytical Hierarchical Process) can help	International Conference on Large High Voltage Electric Systems	Menezes P.C.P., Matos D.F., Damázio J.M., Cruz C.B., Pires S.H.M., Garcia K.C., Medeiros A.M., Paz L.R.L.
2010	Comparative analysis of the application of sustainability concepts in coffee bean production in Brazil	Elsevier	Nääs I.D.A., Dos Reis J.G.M., De Araújo H.C., Costa Neto P.L.D.O., Abe J.M.

2010	Multi-criteria evaluation of the expansion of natural gas distribution network by the urban dynamics	Journal of Urban and Environmental Engineering	Massara V.M., Udaeta M.E.M.
2009	Selection of storage energy technologies in a power quality scenario - The AHP and the fuzzy logic	IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)	Barin A., Canha L.N., Da Rosa Abaide A., Magnago K.F.
2009	Storage energy management with power quality concerns the analytic hierarchy process and the fuzzy logic	Brazilian Power Electronics Conference	Barin A., Canha L.N., Abaide A.D.R., Magnago K.F., Machado R.Q.
2009	The assessment of ecodesign applications using the analytic hierarchy process: A case study in three furniture companies	Chemical Engineering Transactions	Borchardt M., Pereira G.M., Sellitto M.A.
2008	Adaptive hybrid partitioning for OLAP query processing in a database cluster	International Journal of High Performance Computing and Networking	Bernardon D.P., Sperandio M., Garcia V.J., Pfitscher L.L., Reck W., Daza E.F.B., Ramos M., Comassetto L.
2008	Investigation on propulsive alternatives for fluvial convoys adapted to the transport of ethanol and oil derivatives in the Tiete-Parana waterway	International Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean	Pereira N.N., Brinati H.L.
2008	Decision-making using a paraconsistent analytic hierarchy process	International Conference on the European Electricity Market	Bernardon D.P., Sperandio M., Garcia V.J., Canha L.N., Abaide A.D.R., Daza E.F.B.
2008	Functionality of the approach of hierarchical analysis in the full cost accounting in the IRP of a metropolitan airport	Energy Policy	Aranha Neto E.A.C., Coelho J., Camargo C.C.B., Rodigheri A., Reis M.M., Cimino Jr. L., Ribeiro R.G., Reinig A.O.
2008	Natural gas pipeline expansion in the energy and urban planning using the analytic hierarchy process and the urban dynamics	Journal of Urban and Environmental Engineering	Massara V.M., Udaeta M.E.M., Kanayama P.H., Galvão L.C.R.

APÊNDICE D – Transcrição da questão aberta

Este apêndice apresenta a transcrição da questão aberta obtidos no instrumento de coleta de dados. Os respondentes foram identificados por letras em ordem alfabética.

Respondente	Questão aberta
A	Aspectos Regulatórios; Capacidade de geração por fontes híbridas; Discussões à respeito dos 3Ds (Descarbonização, Descentralização e Digitalização do setor elétrico)
B	Custo Nivelado de Energia (Levelized Cost of Energy - LCOE). Este é o fator de melhor escolha quando se quer comparar entre fontes de geração de energia elétrica. Consiste em avaliação econômica de todo o custo para construir e operar uma usina durante sua vida útil, dividida por toda a produção de eletricidade da usina durante a vida útil do projeto.
C	Perfil de geração (horário e sazonal) em comparação com as necessidades do sistema.
D	Subsídios, incentivos e encargos para cada fonte de energia.
E	Disponibilidade de equipamentos, tecnologia e matéria prima nacional na construção dos empreendimentos de geração. Riscos de importação.
F	Custo do insumo, por exemplo renováveis o preço do insumo não varia, porém são mais suscetíveis às variações climáticas. foi colocado a vulnerabilidade climática, mas seria interessante colocar a vulnerabilidade de fornecimento do carvão e gás natural. Podem variar se são importados ou não, se o preço é em dólar, enfim, nesse caso seria uma vulnerabilidade econômica.
G	O objetivo do trabalho é identificar qual a melhor fonte para se investir, todos critérios elencados são importantes, mas acredito que está faltando um critério que forneça a informação de capacidade de geração de cada fonte. No caso as fontes são suas alternativas de escolha, dependendo do local que o investidor pretende instalar o sistema a capacidade de geração de cada fonte varia, se for no litoral, a fonte eólica provavelmente terá maior capacidade de geração, se for na região norte talvez a solar apresente maior capacidade. A capacidade de geração é muito importante na tomada de decisão.
H	Geração de empregos, avaliação das perdas técnicas e não técnicas em transmissão e distribuição para cada fonte, eficiência de conversão, desenvolvimento de empresas/indústrias relacionadas a fonte, oscilações da rede, etc.
I	A área ocupada pela "power plant"
J	PLD
K	Disponibilidade de recurso em relação à rede de transmissão existente, disponibilidade de energia nos momentos de escassez do sistema, diversificação do sistema elétrico.

APÊNDICE E – Transcrição dos comentários

Este apêndice apresenta a transcrição dos comentários obtidos no instrumento de coleta de dados. Os respondentes foram identificados por letras em ordem alfabética.

Respondente	Comentários
A	Oi Simone, parabéns pela pesquisa neste contexto de mudança de paradigma mundial do setor elétrico. Penso que as fontes não competem entre si, há um arranjo de portfólio para otimizar a geração frente aos múltiplos fatores de análise, como tu bem colocaste no trabalho. Imagino que o avanço da solar fotovoltaica, principalmente no âmbito descentralizado, virá acompanhado do avanço em sistemas de armazenamento. A eólica já está estabelecida em minigeração e/ou parques eólicos com características de geração centralizada, em função do custo-benefício. O gás natural é analisado em uma ótica interessante quando pensamos no pré-sal. A fonte hídrica é nossa base de matriz e continuará sendo, o que impactou sua crescente foram leis ambientais mais rígidas e inviabilidade financeira para sua expansão garantir o aumento do consumo, neste momento em específico (~2010) a solução foi o acionamento das termoeletricas o que encarece o sistema, principalmente ao encontrar uma crise fiscal nos estados (impacto na tarifa de energia). Diante disso surge com força o contexto da MMSGD (solar principalmente). Enfim, fiz apenas um apanhado de informações para evidenciar o quão complexo e interligado estão as fontes na matriz elétrica e seus avanços. Sucesso na pesquisa.
B	-
C	Entendo que o CAPEX deva ser analisado em termos de R\$/MW (na tabela consta R\$/MWh). Adicionalmente, creio que comparar Preço de energia, CAPEX e OPEX, seja pouco efetivo, pois o preço da energia depende dos outros dois.
D	O preço de venda da eletricidade não estaria diretamente relacionado a vulnerabilidade ambiental? Na hora de julgar a importância dos dois critérios, fiquei em dúvida, pois a vulnerabilidade ambiental impacta a geração e consequentemente o preço de venda da eletricidade altera.
E	-
F	-
G	-
H	As primeiras perguntas do questionário ficaram muito difíceis de responder, pois parecia uma prova de "vestibular" e não uma análise de entender o mercado. Sugiro deixar as respostas menos tendenciosas ao erro e/ou medo de responder.
I	-
J	-
K	O CAPEX e o OPEX compõem o preço da energia, e sua importância relativa depende do papel da fonte de geração considerada. Por exemplo, uma fonte com baixo CAPEX e alto OPEX pode ser útil na composição do sistema para momentos críticos de escassez, pois se paga pouco enquanto ela não opera, e ela opera por pouco tempo. Portanto, a comparação relativa entre a importância das três métricas podem não ser muito adequada.

APÊNDICE F – Imagens das planilhas eletrônicas construídas no aplicativo Microsoft Excel®

Este apêndice apresenta as imagens das planilhas eletrônicas utilizadas para a realização dos cálculos explicitados na Seção 4.4.

Matriz de julgamento A (exemplo)

A - Matriz de julgamento dos critérios				
	Preço de Venda	CAPEX	OPEX	Vulnerabilidade
Preço de Venda	1	5,00	5	1
CAPEX	0,2	1	0,33	0,33
OPEX	0,20	3	1	0,20
Vulnerabilidade	1,00	3,00	5,00	1
Soma	2,4	12,0	11,3	2,5

Matriz normalizada *A

*A - Matriz normalizada				
Critérios	Preço de Venda	CAPEX	OPEX	Vulnerabilidade
Preço de Venda	0,42	0,42	0,44	0,39
CAPEX	0,08	0,08	0,03	0,13
OPEX	0,08	0,25	0,09	0,08
Vulnerabilidade	0,42	0,25	0,44	0,39
Soma	1,0	1,0	1,0	1,0

Matriz de pesos p (exemplo)

p - Matriz Pesos	
Autovetor (méd geo)	Pesos (%)
2,24	43,18%
0,39	7,46%
0,59	11,37%
1,97	38,00%
5,18	100,00%
$\lambda_{\text{máx}} =$	4,1817

Desempenho (percentual ponderado na soma dos valores de cada alternativa) do critério preço de venda

Hidrelétrica	173,04	13,19%
Eólica	177,44	13,53%
Fotovoltaica	253,73	19,35%
Térmica biomassa	196,78	15,00%
Térmica gás natural	250,32	19,09%
Térmica carvão mineral	260,14	19,84%

Desempenho (percentual ponderado na soma dos valores de cada alternativa) do critério Capex

Hidrelétrica	3.821,25	7,30	18,03%
Eólica	5.962,64	4,68	11,55%
Fotovoltaica	5.935,98	4,70	11,60%
Térmica biomassa	2.840,61	9,82	24,25%
Térmica gás natural	2.882,60	9,68	23,89%
Térmica carvão mineral	6.451,09	4,32	10,68%

Desempenho (percentual ponderado na soma dos valores de cada alternativa) do critério Opex

Hidrelétrica	40.000,00	13,00	29,96%
Eólica	90.000,00	5,78	13,31%
Fotovoltaica	50.000,00	10,40	23,96%
Térmica biomassa	90.000,00	5,78	13,31%
Térmica gás natural	140.000,00	3,71	8,56%
Térmica carvão mineral	110.000,00	4,73	10,89%

Desempenho (percentual ponderado na soma dos valores de cada alternativa) do critério vulnerabilidade

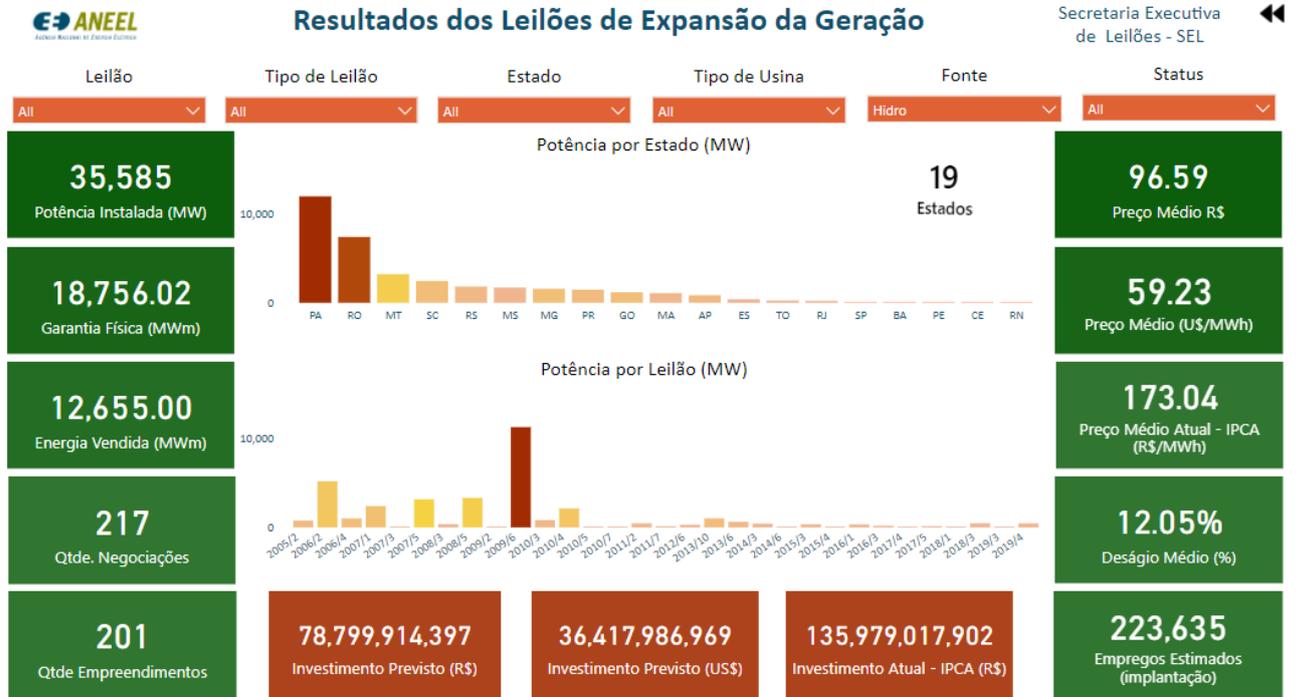
Hidrelétrica - Escassez de chuvas	2	9,52%	5º
Eólica - Intermitência dos ventos	6	28,57%	1º
Fotovoltaica - Intermitência da radiação solar	5	23,81%	2º
Térmica biomassa - Sazonalidade safra cana	4	19,05%	3º
Térmica gás natural - Disponib. de fornecimento	3	14,29%	4º
Térmica carvão mineral - Emissão de GEE*	1	4,76%	6º

Matriz de decisão global

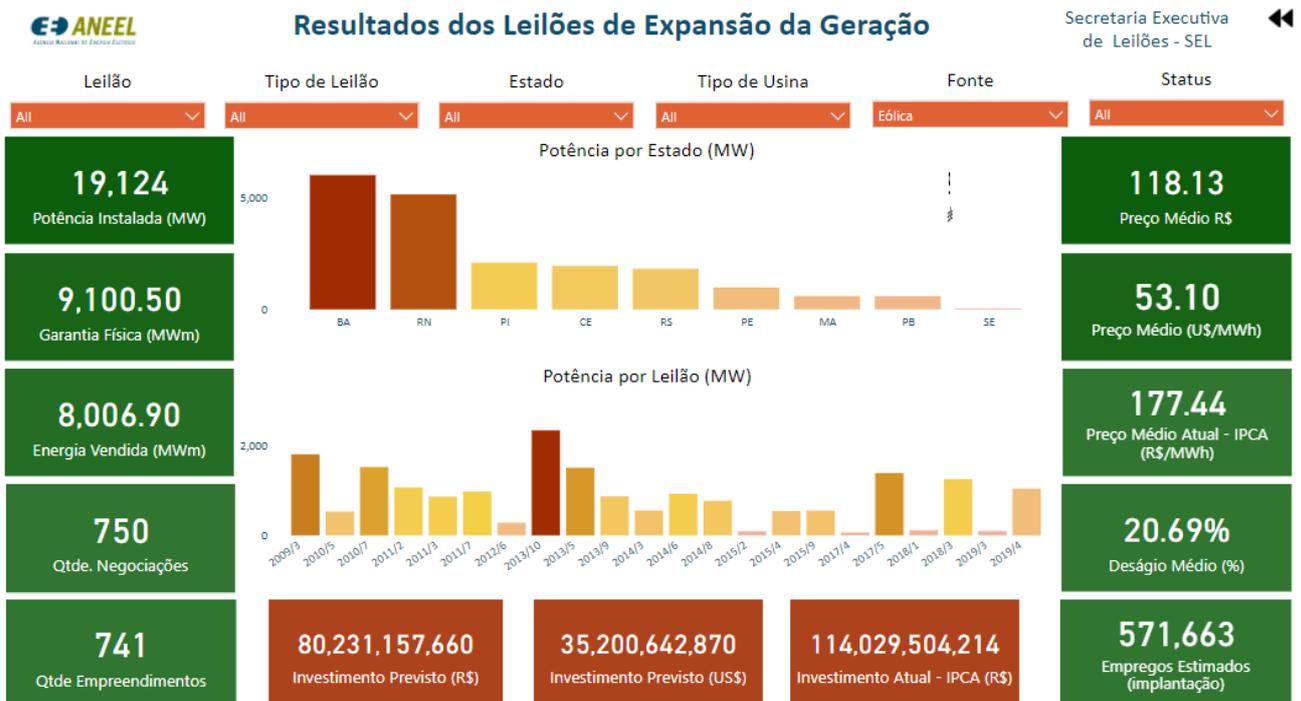
Matriz de decisão global					
Critérios	Preço de	CAPEX	OPEX	Vulnerabi	Vetor de decisão global
Pesos gerais	51,81%	12,68%	11,36%	16,00%	
Hidrelétrica	13,19%	18,03%	29,96%	9,52%	14,05%
Eólica	13,53%	11,55%	13,31%	28,57%	14,56%
Fotovoltaica	19,35%	11,60%	23,96%	23,81%	18,03%
Térmica biomassa	15,00%	24,25%	13,31%	19,05%	15,41%
Térmica gás natural	19,09%	23,89%	8,56%	14,29%	16,18%
Térmica carvão mineral	19,84%	10,68%	10,89%	4,76%	13,63%
	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	

ANEXO I – Resultados dos leilões de geração no ambiente regulado.

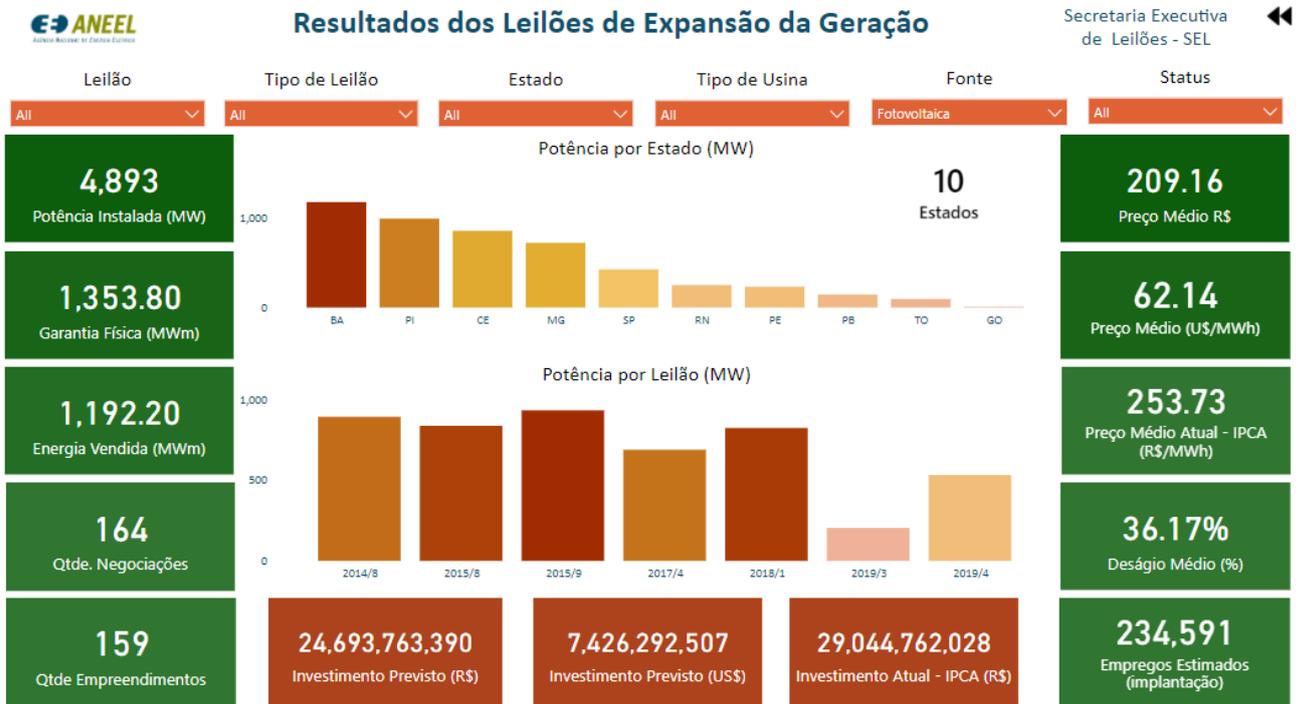
Fonte Hidrelétrica:



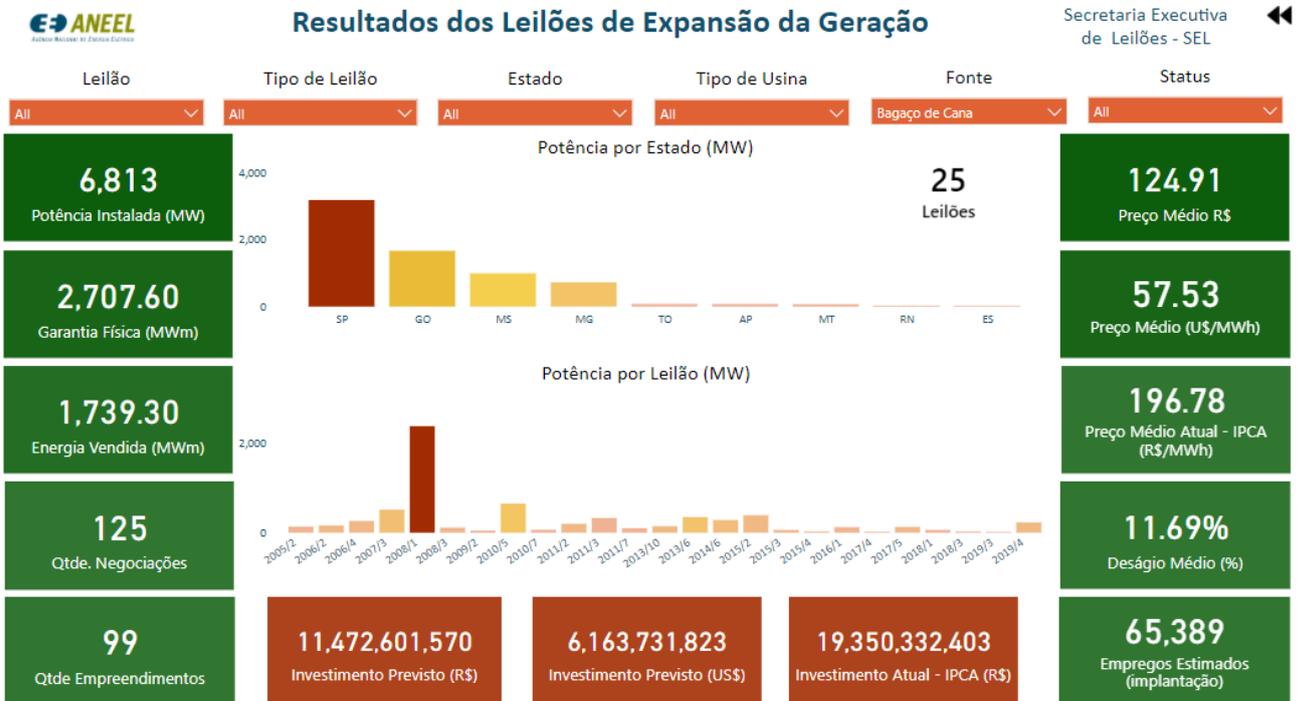
Fonte Eólica:



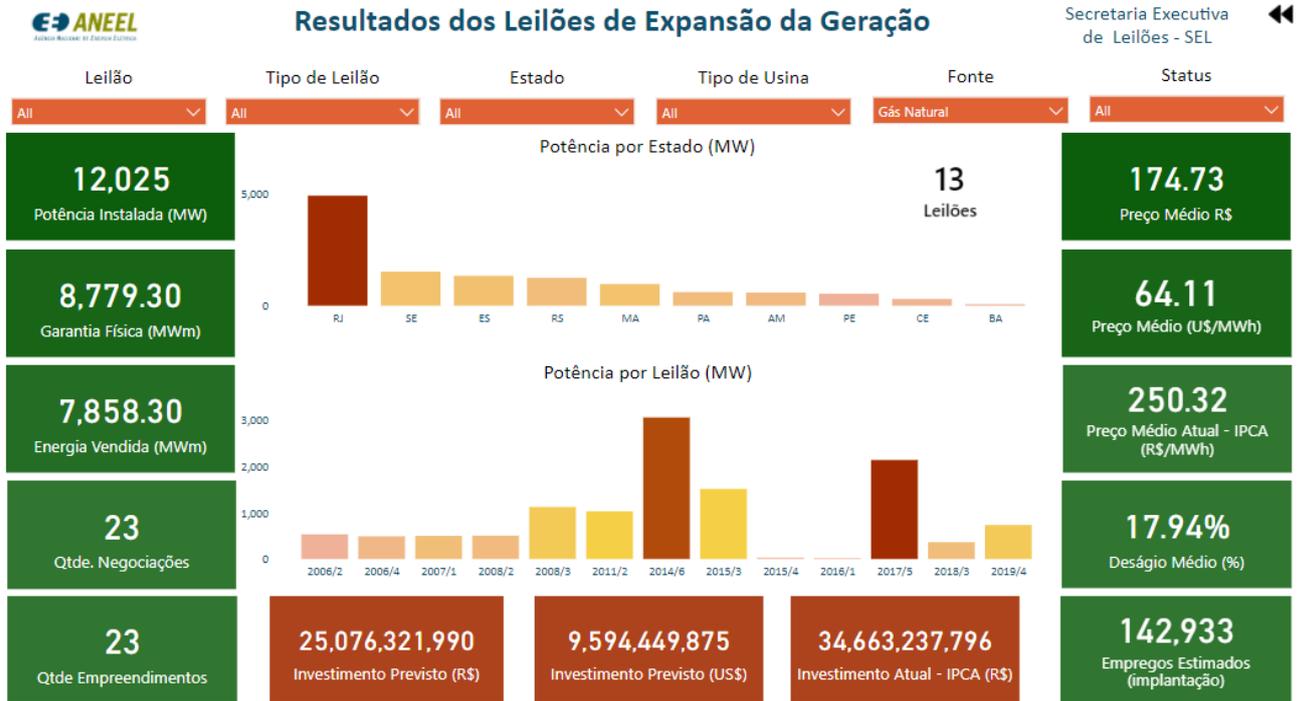
Fonte Fotovoltaica:



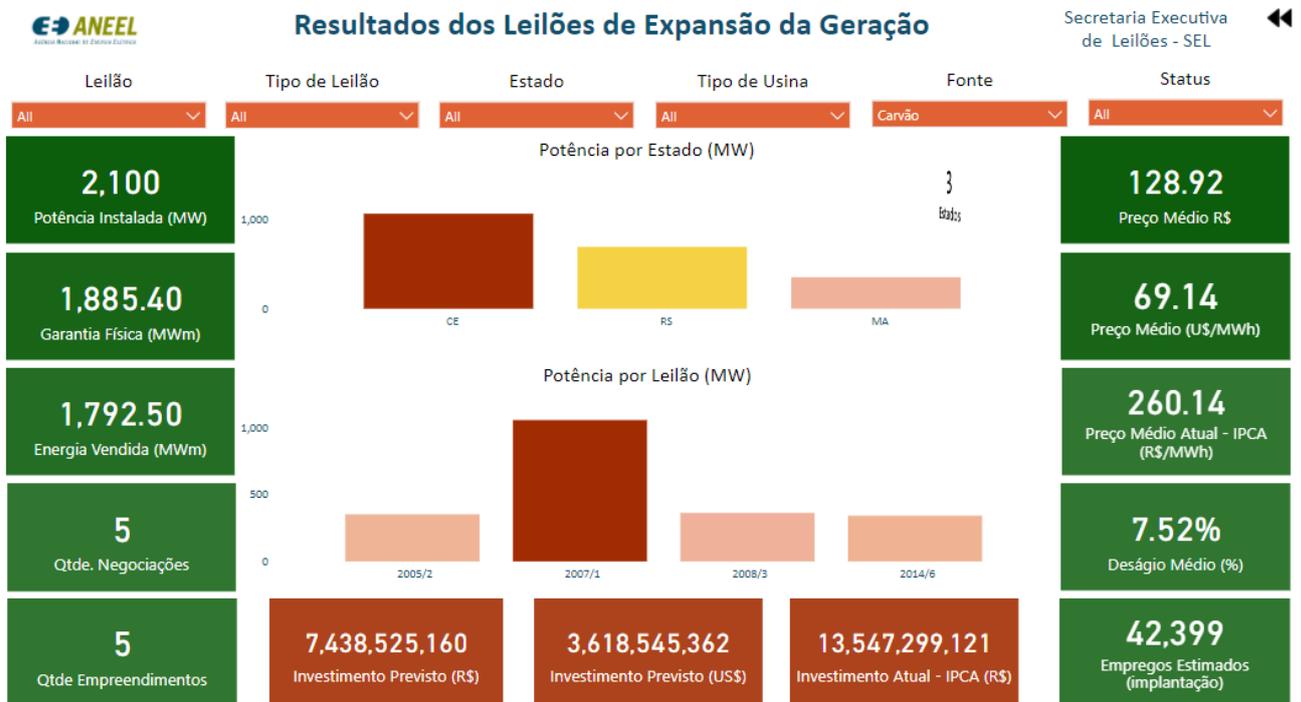
Térmica a biomassa (bagaço de cana):



Térmica a gás natural:



Térmica a carvão mineral:





Fonte: (ANEEL 2020c). Disponível em:

<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiYmMzN2Y0NGMtYjE5Ny00OTNlLW1lYzctZjI0ZTUwMDg5ODE3IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYjYtYmMzNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSI9ImMiOjR9>. Acesso em setembro/2020.

Comentários:

- Para o cálculo do Capex foi tomado o valor do investimento em R\$ dividido pelo MW, por fonte de geração.
- Período dos leilões: 2005 a 2019.



ANEXO II – Estudos para a expansão da geração.

Ministério de Minas e Energia



Tabela 4 – Parâmetros Econômicos por tipo de oferta

Tipo de Oferta	Vida útil econômica (anos)	Faixas de CAPEX, mín e máx (R\$/kW)	CAPEX Referência, sem JDC (R\$/kW)	O&M (R\$/kW/ano)	Encargos/Impostos (R\$/kW/ano)	Juros Durante a Construção - JDC (%)
Usinas Hidrelétricas (UHEs)	30	Variável (vide tabela anterior)	Variável (vide tabela anterior)	R\$ 30,00 / 50,00	Variável (vide tabela anterior)	Variável (vide tabela anterior)
Fotovoltaica	20	2.700 a 4.300	R\$ 3.500	R\$ 50,00	R\$ 180,00	3,9
Eólica <i>Onshore</i>	20	3.500 a 5.500	R\$ 4.800	R\$ 90,00	R\$ 190,00	6,4
Eólica <i>Offshore</i>	20	7.800 a 15.500	R\$ 10.000	R\$ 300,00	R\$ 380,00	11,6
Biomassa (Bagaço de Cana)	20	2.000 a 5.500	R\$ 4.000	R\$ 90,00	R\$ 190,00	6,4
Biomassa (Cavaco de Madeira)	20	4.000 a 8.000	R\$ 6.000	R\$ 120,00	R\$ 250,00	10,7
Biogás ²	20	3.000 a 10.000	R\$ 7.500	R\$ 500,00	R\$ 300,00	6,4

Ministério de Minas e Energia



Tipo de Oferta	Vida útil econômica (anos)	Faixas de CAPEX, mín e máx (R\$/kW)	CAPEX Referência, sem JDC (R\$/kW)	O&M (R\$/kW/ano)	Encargos/Impostos (R\$/kW/ano)	Juros Durante a Construção - JDC (%)
Gás Natural (Ciclo Combinado)	20	2.900 a 4.700 (apenas a UTE)	R\$ 3.800 (inclui terminal de regas ³)	R\$ 140,00	R\$ 240,00	11,6
Gás Natural (Ciclo Aberto)	20	2.300 a 3.900	R\$ 2.700	R\$ 240,00	R\$ 210,00	7,2
Gás Natural (Ciclo Combinado Pré-Sal)	20	2.900 a 4.700 (apenas a UTE)	R\$ 5.000 (inclui CAPEX de gasoduto ⁴)	R\$ 160,00	R\$ 280,00	11,6
Carvão Nacional	25	6.500 a 10.800	R\$ 8.000	R\$ 110,00	R\$ 630,00 ⁵	13,9
PCH (CAPEX Baixo)	30	Variável	R\$ 5.000	R\$ 90,00	R\$ 180,00	7,3
PCH (CAPEX Médio)	30	Variável	R\$ 7.500	R\$ 90,00	R\$ 230,00	7,3
PCH (CAPEX Alto)	30	Variável	R\$ 10.000	R\$ 90,00	R\$ 300,00	7,3

Fonte: (EPE 2019). Disponível em: <

https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-423/topico-482/NT_CME_EPE_DEE-NT-057_2019-r0.pdf>. Acesso em setembro/2020.

Comentários:

- Para o cálculo do Opex foi tomado o valor do O&M em R\$/kW/ano e multiplicado por 1000 para obter o valor em R\$/MW/ano, por fonte de geração.