

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

DANIEL MARQUES ROBERTI

**MÉTODOS DE APOIO À TOMADA DE DECISÃO
APLICADOS NO PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DA
MATRIZ DE ENERGIA ELÉTRICA: UMA REVISÃO
SISTEMÁTICA DA LITERATURA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2017

DANIEL MARQUES ROBERTI

**MÉTODOS DE APOIO À TOMADA DE DECISÃO
APLICADOS NO PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DA
MATRIZ DE ENERGIA ELÉTRICA: UMA REVISÃO
SISTEMÁTICA DA LITERATURA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Elétrica da Coordenação de Engenharia Elétrica - CO-ELT - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Fernando José Avancini Schenatto

Coorientador: Prof. Me. Géremi Gilson Dranka

PATO BRANCO

2017

TERMO DE APROVAÇÃO

O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **MÉTODOS DE APOIO À TOMADA DE DECISÃO APLICADOS NO PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DA MATRIZ DE ENERGIA ELÉTRICA: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA** do acadêmicos **Daniel Marques Roberti** foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N° 161 de 2017.

Fizeram parte da banca examinadora os professores:

Prof. Dr. Fernando José Avancini Schenatto

Prof. Me. César Augusto Portolann

Prof. Fillipe Lucchin Paukner

Dedico este trabalho aos meus pais, Jacinto e Selma.

A vida é como andar de bicicleta. Para ter equilíbrio, você tem que se manter em movimento...

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, especialmente aos meus pais e irmã, pelos esforços realizados e incentivos, me auxiliando na conquista dos meus objetivos.

Aos meus professores Fernando e Géremi pela disponibilidade, orientação e apoio durante a realização deste trabalho.

E aos amigos que estiveram sempre presentes, nos momentos de estudo e descontração, durante os longos anos de graduação.

RESUMO

Progressos significativos foram verificados nos últimos anos para caracterizar e modelar o problema da tomada de decisão na área da energia elétrica, considerando a inclusão de aspectos institucionais, políticos, técnicos, ecológicos, sociais, econômicos e sustentáveis. No entanto, menos atenção foi dada à avaliação de externalidades no planejamento de energia. Com base neste quadro, o principal objetivo deste trabalho é fornecer uma revisão da literatura, considerando a aplicação de métodos multi-critérios em problemas de decisões. Em segundo lugar, caracterizar os métodos de apoio multicritério à decisão. Em terceiro lugar, a análise está focada na busca dos métodos utilizados na literatura, nas regiões com maior número de aplicações e na área de aplicação dos métodos. Além disso, ao longo desta revisão, é esperado apresentar as principais lacunas relacionadas ao planejamento da expansão da geração de energia elétrica considerando os critérios técnicos, ambientais, sociais e econômicos. O quadro sugerido visa fornecer a identificação de diferentes abordagens no contexto do planejamento do processo de tomada de decisão energética.

Palavras-chave: Geração de energia elétrica, auxílio à tomada de decisão, multicritério, planejamento da expansão.

ABSTRACT

Significant progress has been verified in the last years to characterize and model the problem of decision making in the electric energy area, considering the inclusion of institutional, political, technical, ecological, social, economic and sustainable aspects. Nevertheless, less attention has been paid to externalities valuation in the energy planning. Based on this framework, the main objective of this work is to provide a literature review, considering the application of multi-criteria methods in decisions problems. Second, to characterize the methods of multicriteria aid to the decision. Third, the analysis is focused in finding the methods used in literature, in the regions with the greatest number of applications and the application area of the methods. Moreover, throughout this review it is expected to show the main gaps related to the electric power generation expansion planning considering the criterias technical, enviromental, social and economic . The suggested framework is aimed to provide the identification of different approaches in context of planning energy decision-making process.

Keywords: Electric power generation, aid to the decision making, multicriteria, expansion planning.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|------------|---|----|
| Figura 1: | Oferta de energia elétrica no mundo por Região. | 21 |
| Figura 2: | Custo Particular e Externo para Diferentes Fontes de Geração. | 25 |
| Figura 3: | Níveis de um processo de planejamento. | 28 |
| Figura 4: | Classificação dos métodos de análise de decisão. | 30 |
| Figura 5: | Fluxograma que descreve um processo genérico de análise de decisão por meio da metodologia AMD. | 33 |
| Figura 6: | Classificação dos métodos de Apoio Multicritério à Decisão. | 37 |
| Figura 7: | Hierarquia dentro do método AHP. | 40 |
| Figura 8: | Estrutura do enquadramento metodológico do trabalho. | 48 |
| Figura 9: | Fluxograma para o processo de identificação e triagem, elegibilidade e inclusão dos artigos. | 49 |
| Figura 10: | Procedimento para a busca dos artigos nas bases de pesquisa. | 51 |
| Figura 11: | Distribuição das fontes de geração dentro da área de Escolha do Local. | 58 |
| Figura 12: | Distribuição dos artigos por ano de publicação, ocorrência acumulativa. | 65 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|------------|---|----|
| Tabela 1: | Critérios e seus indicadores para a valoração das externalidades. | 16 |
| Tabela 2: | Oferta Interna de Energia Elétrica no Brasil, nos países membros da OCDE e no Mundo, em termos percentuais. | 20 |
| Tabela 3: | Escala de Saaty para comparação dos critérios no método AHP. | 39 |
| Tabela 4: | Resumo das premissas utilizados para a realização da pesquisa. | 51 |
| Tabela 5: | Resultado da busca nas bases de pesquisa com a <i>string</i> | 54 |
| Tabela 6: | Resumo das técnicas de apoio multicritério a decisão. | 56 |
| Tabela 7: | Distribuição dos artigos por aplicação. | 57 |
| Tabela 8: | Distribuição dos artigos por ano de publicação. | 65 |
| Tabela 9: | Distribuição dos artigos por revista de publicação. | 66 |
| Tabela 10: | Distribuição dos artigos por região do estudo de caso. | 68 |
| Tabela 11: | Artigos selecionados no processo de amostragem. | 71 |
| Tabela 12: | Artigos selecionados na fase de elegibilidade. | 89 |

LISTA DE SIGLAS

AD - Análise de Decisão

ADOU - Análise de Decisão de Objetivo Único

AHP - *Analytical Hierarchy Process*

AMD - Apoio Multicritério à Decisão

ANP - *Analytic Network Process*

CO₂ - Dióxido de Carbono

DA - *Decision Analysis*

DM - *Decision Makers*

DS - Desenvolvimento Sustentável

DSS - *Decision Support Systems*

DT - *Decision Tree*

ELECTRE - *Elimination Et Choix Traduisant la Réalité*

FER - Fontes de Energia Renovável

GEE - Gases de Efeito Estufa

GIS - *Geographic Information Systems*

IAEA - *International Atomic Energy Agency*

ID - *Influence Diagram*

IEA - *International Energy Agency*

IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

MADM - *Multiple Attribute Decision Making*

MAUT - *Multi-Attribute Utility Theory*

MCDA - *Multi-Criteria Decision Analysis*

MCDM - *Multiple Criteria Decision Making*

MODM - *Multiple Objective Decision Making*

NO_x - Óxidos de Nitrogênio

O&M - Operação e Manutenção

OCDE - Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico

ONU - Organização das Nações Unidas

PE - Planejamento Energético

PIB - Produto Interno Bruto

PROMETHEE - *Preference Ranking Organization Method For Enrichment Evaluation*

RES - *Renewable Energy Sources*

SAD - Sistema de Apoio à Decisão

SCDR - *Science Direct*

SCOP - Scopus

SEforALL - *Sustainable Energy for All*

SIG - Sistema de Informação Geográfica

SIN - Solução Ideal Negativa

SIP - Solução Ideal Positiva

SO₂ - Dióxido de Enxofre

SODM - *Single Objective Decision Making*

TD - Tomador de Decisão

TDMA - Tomada de Decisão Multi-Atributo

TDMO - Tomada de Decisão Multi-Objetivo

TOPSIS - *Technique for Order Preference by Smilarity to Ideal Solution*

WEBS - *Web of Science*

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 14 |
| 1.1 OBJETIVOS | 17 |
| 1.1.1 Objetivo Geral | 17 |
| 1.1.2 Objetivos Específicos | 17 |
| 1.2 JUSTIFICATIVA | 17 |
| 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO | 18 |
| 2 REVISÃO DA LITERATURA | 19 |
| 2.1 MATRIZ DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA MUNDIAL | 19 |
| 2.2 EXTERNALIDADES NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA | 22 |
| 2.3 PLANEJAMENTO ENERGÉTICO DA ELETRICIDADE | 27 |
| 2.4 ANÁLISE DE DECISÃO - AD | 29 |
| 2.4.1 Apoio Multicritério à Decisão - AMD | 32 |
| 2.4.1.1 Métodos de Agregação | 37 |
| 2.4.1.2 Métodos de Superação | 42 |
| 2.4.1.3 Métodos Iterativos | 45 |
| 2.4.1.4 AMD Fuzzy | 45 |
| 3 METODOLOGIA | 47 |
| 3.1 ENQUADRAMENTO METODOLÓGICO | 47 |
| 3.2 MÉTODO E PROCEDIMENTOS DE PESQUISA | 48 |
| 3.2.1 Revisão Sistemática da Literatura | 48 |
| 3.2.1.1 Premissas para a revisão sistemática | 50 |
| 3.2.2 Meta-análise | 52 |
| 3.2.3 Discussão de Portfólio | 52 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 54 |
| 4.1 META-ANÁLISE | 55 |
| 4.1.1 Distribuição dos Artigos por Técnica Aplicada | 55 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.1.2 | Distribuição dos Artigos por Área de Aplicação | 56 |
| 4.1.2.1 | Escolha de local | 57 |
| 4.1.2.2 | Avaliação de cenários | 59 |
| 4.1.2.3 | Planejamento Energético | 61 |
| 4.1.2.4 | Análise de Tecnologias | 62 |
| 4.1.2.5 | Priorização de Fontes de Energias Renováveis (FER) | 63 |
| 4.1.2.6 | Avaliação da Sustentabilidade | 63 |
| 4.1.3 | Distribuição dos Artigos por Ano de Publicação | 64 |
| 4.1.4 | Distribuição dos Artigos por Periódico | 66 |
| 4.1.5 | Distribuição dos Artigos por Região do Estudo de Caso | 67 |
| 4.2 | DISCUSSÃO DE PORTFÓLIO | 68 |
| 5 | CONCLUSÃO | 78 |
| | APÊNDICE A - ARTIGOS SELECIONADOS NA FASE DE ELEGIBILIDADE | 89 |
| | ANEXO A - PAÍSES MEMBROS DA OCDE | 107 |

1 INTRODUÇÃO

A energia é indispensável para a sobrevivência e desenvolvimento da espécie humana, de modo que a falta ou escassez de um determinado recurso energético, promove ao homem o desafio de se adaptar e procurar alternativas para substituir o recurso escasso (REIS; SANTOS, 2014). Dentre as formas de energia, a eletricidade “se tornou uma das mais versáteis e convenientes formas de energia, passando a ser recurso indispensável e estratégico para o desenvolvimento socioeconômico de muitos países” (ANEEL, 2002, p. 1). Existe uma tendência no mundo, a da evolução das indústrias e tecnologias, a qual é fomentada em grande parte pela competitividade econômica das organizações e nações do mundo. Essa característica tem como uma de suas consequências o aumento contínuo da demanda de energia elétrica no mundo (TRAPP; RODRIGUES, 2016).

Segundo o Banco Mundial (2016), atualmente 1,1 bilhões de pessoas no mundo não possuem acesso à energia elétrica. De acordo com Reis e Santos (2014) realizar o fornecimento de energia elétrica a essa parcela da população é um dos maiores desafios do século XXI. Buscando possíveis soluções para o problema supracitado, novas organizações têm sido criadas, sobretudo nas últimas décadas, como por exemplo, a organização “Energia Sustentável para Todos” (do inglês, *Sustainable Energy for All* - SEforALL) a qual tem como principal objetivo garantir o acesso à energia elétrica para toda a população mundial e também dobrar a participação das fontes renováveis na matriz energética mundial até 2030, contribuindo para o desenvolvimento sustentável, tendo como principais parceiros o Banco Mundial e a ONU¹ (Sustainable Energy for All, 2016).

Conforme as diretrizes apresentadas pela Agência Internacional de Energia Atômica (do inglês, *International Atomic Energy Agency* - IAEA) e pela Agência Internacional de Energia (do inglês, *International Energy Agency* - IEA) os indicadores para o desenvolvimento sustentável são divididos em três principais grupos: ambiental, econômico e social (IAEA, 1999; VERA; LANGLOIS, 2007). A geração de energia elétrica contribui causando impactos nas três dimensões supracitadas (REIS; SANTOS,

¹A ONU (Organização das Nações Unidas) se trata de uma entidade internacional formada por países voluntários que visam a paz e o desenvolvimento mundial (ONU, 2016).

2014). E no ano de 2015, 65,1% da energia elétrica gerada no mundo era oriunda de combustíveis fósseis², o que não contribui para o desenvolvimento sustentável³ (MME, 2016).

Diminuir o consumo e/ou aumentar a parcela contribuinte dos combustíveis fósseis menos agressivos ao meio ambiente, ampliar a utilização de tecnologias, combustíveis e recursos renováveis, prover o desenvolvimento das tecnologias visando o aumento da eficiência para extrair o máximo possível dos recursos e estabelecer políticas energéticas que incentivem as fontes renováveis de geração de energia elétrica, são recomendações que de acordo com Reis e Santos (2014) permitem a formação de uma estrutura necessária para o desenvolvimento de projetos sustentáveis.

Ainda, o custo dos combustíveis não renováveis, quando comparado com os renováveis, é considerado baixo, uma vez que os custos e/ou benefícios das externalidades⁴ não são incorporados (COELHO, 1999). Segundo Coelho (1999) em muitos casos, costuma-se levar em consideração apenas os custos já monetizados, como os custos de capital e de operação e manutenção. Entretanto, também é fundamental considerar o custo sistêmico total⁵ do empreendimento. Por outro lado, expressar em termos monetários todas as externalidades, tais como qualidade ambiental, saúde humana, biodiversidade, entre outros, é uma tarefa complexa (TRAPP; RODRIGUES, 2016).

Também o fato de diversos atores (indivíduos, instituições, comunidades locais, investidores, agências governamentais, grupos ambientais, etc.) estarem envolvidos no processo da tomada de decisão e que de acordo com Pessoa (2016) “cada um deles com seu sistema de valor e objetivos que algumas vezes representam interesses individuais” contribui tornando o processo de tomada de decisão uma tarefa complexa. Nesse aspecto, tomar uma decisão sem levar em consideração os fatores motivacionais dos indivíduos atingidos não é socialmente aceitável (MIRAKYAN; GUIO, 2013).

Dentro de um processo de planejamento existem inúmeros cenários ima-

²Combustíveis fósseis (gás natural, carvão, petróleo e seus derivados) se originam da decomposição de seres vivos e necessitam de um comburente, oxigênio p. ex., para entrar em combustão e produzir um aumento significativo da temperatura, conseqüentemente aumento de volume, realizando trabalho (IEA, 2015)

³Existem diversas definições para o desenvolvimento sustentável, sendo uma delas a capacidade de atender as necessidades atuais sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem suas próprias necessidades Brundtland (1987).

⁴ou custos externos.

⁵O custo sistêmico total é representado pela soma de todos os custos tradicionais (custo de capital, O&M, combustível, etc.) e das externalidades. É apresentado em termos de monetários (TRAPP; RODRIGUES, 2016).

Tabela 1: Critérios e seus indicadores para a valoração das externalidades.

| Critério | Indicador |
|-----------------|--|
| Tecnológico | Eficiência, eficiência energética, relação de energia primária, segurança, flexibilidade, maturidade, outros. |
| Econômico | Custo-benefício, custos de investimento, custo de operação e manutenção, custo do combustível, valor presente líquido (VPL), tempo de retorno do investimento (<i>payback</i>), taxa interna de retorno (TIR), vida útil, custo anual equivalente, outros. |
| Ambiental | Emissão de NO _x (óxidos de nitrogênio), emissão de CO ₂ (dióxido de carbono), emissão de SO ₂ (dióxido de Enxofre), uso da terra, ruído, outros. |
| Social | Aceitação social, criação de empregos, benefícios sociais, outros. |

Adaptado de Wimmer *et al.* (2015).

gináveis, uma vez que cada cenário possível visa ilustrar o impacto de diferentes combinações que envolvem os critérios técnicos, econômicos, ambientais e sociais, e seus indicadores. Os critérios e seus indicadores, são apresentados na Tabela 1.

A partir das informações provenientes de cada cenário é necessário tomar uma decisão. Entretanto, definir qual decisão tomar permanece sendo um problema, visto que a resolução pode ser tomada de forma subjetiva (DIAKOULAKI; KARANGELIS, 2007). Isso ocorre devido à dificuldade de definir um cenário que satisfaça todos os interesses dos diferentes atores do processo. Nesse contexto, resolver o problema referente aos interesses individuais, os quais impedem a “solução ótima” e leva à procura de uma solução plausível, faz-se necessário (DIAKOULAKI; KARANGELIS, 2007; PESSOA, 2016).

A avaliação de situações em que há problemas no que se refere a múltiplos aspectos em conflito pode ser realizada utilizando-se o Apoio Multicritério à Decisão (AMD) (do inglês, *Multi-Criteria Decision Analysis - MCDA*), (DIAKOULAKI; KARANGELIS, 2007; PESSOA, 2016; MIRAKYAN; GUIO, 2013; AZZOPARDI *et al.*, 2013; WANG *et al.*, 2009). O AMD, classifica, ordena, descreve ou seleciona alternativas inclusas num processo de decisão. Diferentes métodos multicritério foram desenvolvidos durante os últimos anos de modo que a seleção do método mais adequado depende das particularidades das distintas possibilidades e do modelo de avaliação (DIAKOULAKI; KARANGELIS, 2007). De acordo com Mardani *et al.* (2016a), uma forma de solucionar o problema é encontrar um método para mensurar o que é possível ser medido. Ainda, a neces-

sidade de considerar nos processos de decisão no planejamento energético da eletricidade critérios tanto qualitativos como quantitativos, torna indispensável a opinião de especialistas e uma estrutura organizada para as questões técnicas, ambientais, econômicas, políticas e sociais (MARDANI *et al.*, 2016a; MIRAKYAN; GUIO, 2013; TAHA; DAIM, 2013).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo desse trabalho é analisar a utilização de métodos de apoio à decisão multicritério no planejamento da expansão das matrizes de energia elétrica das nações.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Selecionar um portfólio bibliográfico sobre o tema em análise;
- Caracterizar os métodos de apoio à decisão multicritério;
- Descrever e identificar a utilização de métodos de apoio a decisão no contexto do planejamento da matriz de energia elétrica;
- Classificar os artigos selecionados no processo de revisão sistemática quanto a região, objetivo e resultados da pesquisa;
- Apresentar motivações, limitações e possíveis lacunas na aplicação dos métodos de apoio à decisão no planejamento da expansão da matriz elétrica.

1.2 JUSTIFICATIVA

Considerando que empreendimentos de geração de energia elétrica estão sujeitos a longos períodos de duração, inúmeros indivíduos afetados, fortes incertezas e investimentos intensivos de capital, defendem realização de uma revisão sistemática da literatura buscando observar a utilização dos métodos de apoio à decisão no planejamento da expansão da matriz de energia elétrica.

Como principal contribuição, o estudo pretende apresentar uma visão global do que tem sido realizado acerca dos métodos de apoio a decisão no planejamento da expansão da matriz de energia elétrica no mundo.

Desse modo, a avaliação comparativa entre as diversas tecnologias disponíveis para a produção de eletricidade, considerando as diferentes dimensões do problema como por exemplo: confiabilidade, segurança, modicidade tarifária e sustentabilidade, tem como vantagem fundamentar a proposição de diretrizes relacionadas à expansão da matriz elétrica de um país (DESTER, 2012).

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 2 será realizado um estudo teórico sobre as externalidades na geração de energia elétrica, bem como na divisão e caracterização dos métodos de apoio multicritério à decisão conforme o princípio de como o método considera os critérios e subcritérios no momento da avaliação e classificação das alternativas.

No capítulo 3 será descrito o enquadramento metodológico, as etapas da pesquisa, também o método da coleta e análise dos dados.

No capítulo 5 serão apresentados os resultados obtidos com a revisão sistemática dos dados, classificando os trabalhos frente aos métodos AMD empregados, ano de publicação, área de estudo, periódico. Também uma discussão a respeito das soluções e modelagens efetuadas por alguns estudos.

No capítulo 6 serão abordados as conclusões a respeito do trabalho elaborado e indicação de trabalhos futuros.

No apêndice A será exposto a lista dos trabalhos selecionados, com dados referentes a revista de publicação, o autor, o ano de publicação e o título do trabalho.

No anexo A será apresentado os países membros do grupo OCDE para conhecimento.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo é descrito a matriz de energia elétrica mundial, a qual é composta pelas mais diversas fontes de geração, porém, existe uma predominância pela utilização de combustíveis fósseis. Também é apresentado o conceito de externalidades relacionadas ao processo de produção de energia elétrica e em como elas afetam a sociedade tanto nos aspectos econômicos, quanto sociais e ambientais.

Ao realizar a consideração das externalidades no planejamento eletro energético acaba dificultando o processo de tomada de decisão, o que leva a utilização de métodos de apoio à tomada de decisão. Dessa maneira, é realizada uma revisão acerca dos diferentes métodos de apoio a decisão considerando multicritérios no momento do planejamento da expansão da matriz de geração de energia elétrica.

2.1 MATRIZ DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA MUNDIAL

A matriz de energia elétrica compreende as distintas tecnologias que compõem o cenário atual da geração de uma determinada nação (ou região) para o uso nas mais distintas atividades exercidas pelo homem. Ao se realizar a discriminação de qual é o percentual representativo de cada tecnologia de produção de energia elétrica é possível identificar qual foi a premissa utilizada no passado para o planejamento elétrico (IAEA, 1999; EIA, 2016).

A distribuição percentual da oferta de energia elétrica no Brasil, nos países OCDE¹ (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico) e no mundo, considerando as diferentes fontes de geração de energia elétrica disponíveis são apresentadas na Tabela 2. No ano de 2015, constata-se que 65,1% da energia elétrica gerada no mundo era oriunda de combustíveis fósseis. Ressalta-se que a contribuição do petróleo e seus derivados na geração de energia elétrica reduziu significativamente de 1973 para 2015, de 24,6% para 3,5%, em função da crise mundial do petróleo e sua alta de preços (STRANTZALI; ARAVOSSIS, 2016), o qual em 1973 passou de US\$

¹A OCDE é uma organização internacional, com 35 países membros (anexo A), que atua de maneira a promover a troca de informações visando colaborar com o crescimento econômico dos países membros e promover políticas para melhores condições de vida economicamente e socialmente para as pessoas de todo o mundo (OCDE, 2017).

2,90 o barril para US\$ 11,65 e em 1979 de aproximadamente US\$ 12 para US\$ 40 (IPEA, 1999). Aliado a esse fator, houve a conferência de Estocolmo em 1972, na qual abordou-se questões e planejou-se ações relacionadas a degradação do meio ambiente e melhoria dos direitos humanos (Senado Federal, 1999).

Além disso, as fontes renováveis de geração de energia elétrica apresentaram crescimento significativo ao longo dos últimos anos. A contribuição da geração de energia eólica na matriz elétrica mundial, por exemplo, está se equiparando à parcela do petróleo. No caso do Brasil, a maior parte da geração de energia elétrica provém de fontes renováveis, representando 71,58% da potência instalada da matriz de energia elétrica atualmente (ANNEL, 2017).

Tabela 2: Oferta Interna de Energia Elétrica no Brasil, nos países membros da OCDE e no Mundo, em termos percentuais.

| Fonte | Brasil | | OCDE | | Mundo | |
|-----------------------|------------|------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| | 1973 | 2015 | 1973 | 2015 | 1973 | 2015 |
| Óleo | 7,2 | 4,2 | 25,4 | 2,2 | 24,6 | 3,5 |
| Gás Natural | 0,5 | 12,9 | 11,6 | 24,1 | 12,2 | 22,4 |
| Carvão | 1,7 | 3,1 | 37,9 | 31,6 | 38,3 | 39,2 |
| Urânio | 0 | 2,4 | 4,2 | 18,7 | 3,3 | 10,5 |
| Outras não-renováveis | 0 | 2 | 0 | 0,4 | 0,1 | 0,2 |
| Hidráulica | 89 | 64 | 20,5 | 12,9 | 21 | 17,3 |
| Outras renováveis | 1,2 | 11,5 | 0,3 | 10,2 | 0,6 | 6,8 |
| Biomassa Sólida | 1,2 | 8 | 0,2 | 2,8 | 0,5 | 1,9 |
| Eólica | 0 | 3,5 | 0 | 5 | 0 | 3,3 |
| Solar | 0 | 0,01 | 0 | 1,9 | 0 | 1,2 |
| Geotérmica | 0 | 0 | 0,1 | 0,5 | 0,1 | 0,3 |
| Total (%) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Percentual Renovável | 90,6 | 75,5 | 20,8 | 23,1 | 21,5 | 24,1 |
| Total (TWh) | 65 | 616 | 4472 | 10681 | 6115 | 24192 |

Fonte: Adaptado de MME (2016).

A Figura 1 exibe a distribuição da oferta de energia elétrica no mundo por região no ano de 2014. Pode-se observar que os continentes da Ásia e Oceania, somados correspondem por 68 países, dominam a geração e consumo de energia elétrica no mundo. Situados nesses continentes estão a China e a Índia, primeiro e

quarto, respectivamente, maiores consumidores de energia elétrica no mundo (MME, 2015).

Uma característica referente a China e Índia é a taxa crescimento do PIB² elevada, com expectativa de encerrar o ano de 2017 com crescimento do PIB chinês de 6,9% e indiano de 7,0%, quando comparado com o ano de 2016 (ECONOMICS, 2017). Outra característica referente a esses dois países é que ambos possuem uma matriz de geração de energia elétrica predominantemente oriunda de combustíveis fósseis (EIA, 2016).

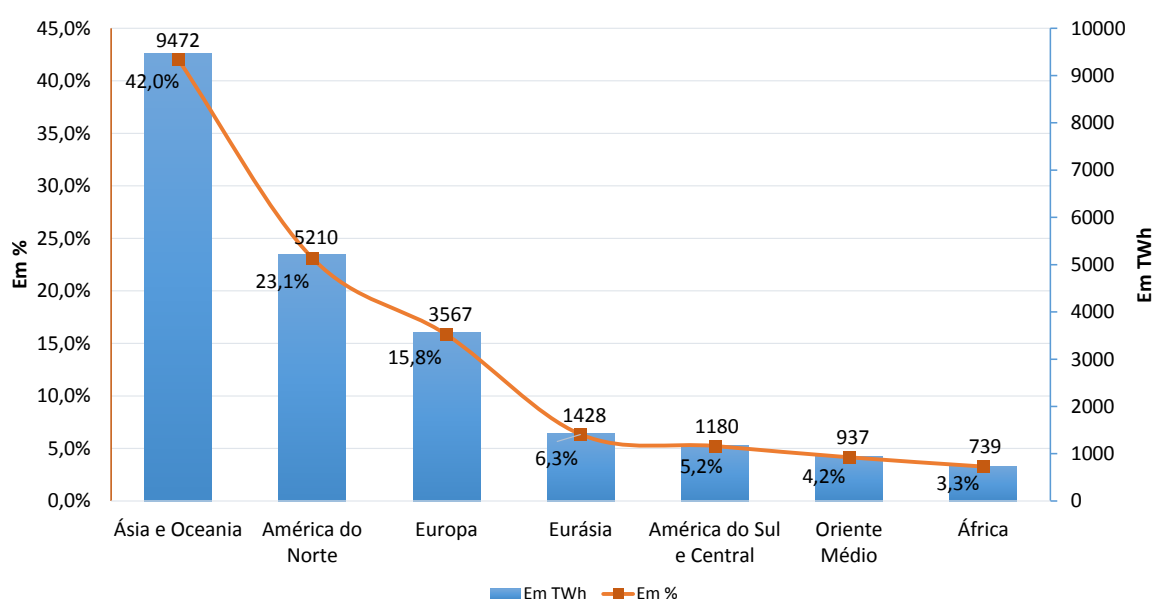


Figura 1: Oferta de energia elétrica no mundo por Região.
Fonte: Adaptado de TSP (2014).

Cabe ressaltar que o crescimento econômico é um importante fator no aumento da demanda por energia elétrica, em que o PIB é um dos seus principais indicadores (EIA, 2016).

A segunda região que mais gera energia elétrica no mundo é a América do Norte, formada por apenas 4 países, onde está situada a maior potência econômica e segundo maior consumidor de energia elétrica do mundo, os Estados Unidos. País esse que, em 2015, gerou 68% da energia elétrica por meio de combustíveis fósseis (EIA, 2016).

Por meio da Tabela 2 e da Figura 1 é possível identificar que a matriz de

²O Produto Interno Bruto (PIB) representa a soma de tudo o que foi produzido no país no durante um período de tempo especificado (Ministério da Fazenda, 2014).

geração de energia elétrica mundial não contribui com o desenvolvimento sustentável, uma vez que os combustíveis fósseis possuem reserva limitada e os impactos ambientais são significativos, ou seja, não é buscado um equilíbrio entre as dimensões ambientais, sociais, tecnológicas e econômicas (MME, 2016).

A necessidade de substituição dos combustíveis fósseis por fontes mais sustentáveis tem crescido progressivamente, devido as preocupações globais com as mudanças climáticas (POLICY *et al.*, 2008). Além disso desafios adicionais são impostos a todo o sistema de energia elétrica devido à crescente penetração das Fontes de Energia Renovável (FER) (do inglês, *Renewable Energy Sources* - RES) intermitentes, especialmente a energia solar e a energia eólica (POLICY *et al.*, 2008).

De acordo com Policy *et al.* (2008) a avaliação dos projetos de energia, é essencial para entender o contexto em que o projeto será implementado, principalmente porque geralmente são parte de uma rede que se estende nos níveis nacionais ou até mesmo internacionais (importação ou exportação de energia elétrica), dessa maneira, um grande número de fatores externos pode afetar o desempenho do projeto e devem ser levados em consideração.

Os projetos de expansão da geração de energia podem ter objetivos diferentes, por exemplo, desenvolver novas capacidades de energia para atender a demanda crescente ou reduzir a dependência de importação de energia elétrica; para suportar áreas não atendidas; para diversificar a combinação de fontes de geração para melhorar a confiabilidade técnica e a segurança do fornecimento de energia; aumentar a eficiência e a qualidade do sistema energético; reduzir as emissões poluentes e os gases de efeito estufa, entre outros (POLICY *et al.*, 2008). Estes objetivos são considerados como afetando diretamente o benefício econômico.

Por outro lado, as fontes de geração de energia elétrica possuem características intrínsecas à construção física e/ou forma de conversão de energia primária (térmica, potencial, eólica, entre outras) em energia elétrica, existindo custo externos que afetam a avaliação do projeto, conhecido como externalidades (BOLOGNINI, 1996).

2.2 EXTERNALIDADES NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Uma definição generalista para externalidade, utilizada por Prado (2007), é de que ela ocorre quando o agente responsável por uma atividade interfere o bem-estar, modificando o ambiente, de um agente externo (terceira parte), o qual não está diretamente relacionado com a atividade, porém, essa atividade acabou influenciando-

o, sendo que esse agente externo não é remunerado/indenizado.

Para Funchal (2008),

Um custo ou benefício que não está incluso no preço de mercado de um bem ou serviço porque este não é incluído no preço da produção ou do consumo. A externalidade é produzida quando uma atividade econômica de um agente tem um efeito positivo ou negativo na função de bem-estar de outro agente, e o agente ativo não é compensado nem compensa o agente passivo dos impactos impostos a este (FUNCHAL, 2008, p. 85).

É percebido que o custo social total inerente a um processo produtivo pode ser dividido em duas parcelas, custo privado (o custo de produção) e custo externo (externalidades). As externalidades podem ser separadas em dois grandes grupos, os ambientais (emissões de dióxido de enxofre SO_2) e os não ambientais (impactos sociais).

As externalidades relacionadas com a produção de energia elétrica, podem ser entendidas como sendo os impactos externos, danos ou benefícios, causados pela tomada de decisão de se inserir ou não uma nova tecnologia na matriz de energia elétrica, em que os custos geralmente não são incorporados ao preço pago pela pessoa/organização que a implementou, sendo indiretamente repassados a uma terceira parte ou para a sociedade afetada (BOLOGNINI, 1996; REIS; SANTOS, 2014; TRAPP; RODRIGUES, 2016; COELHO, 1999).

As externalidades podem ocorrer de duas formas: externalidade positiva, quando o efeito é benéfico; ou externalidade negativa, em que o efeito é prejudicial (COELHO, 1999; BOLOGNINI, 1996).

Buscando exemplificar os dois tipos de externalidades na produção de energia elétrica, considerando uma usina termelétrica movida a combustível fóssil (carvão, derivados do petróleo, outros), durante o processo de queima do combustível para aquecer a caldeira, ocorre a liberação de gases poluentes na atmosfera, entre eles o SO_2 . Esse gás causa danos à saúde das pessoas que vivem próximas a unidade geradora, exemplificando uma externalidade negativa (PRADO, 2007). Por outro lado, ao aumentar a concentração de SO_2 no ambiente, culturas como trigo, cevada, aveia, batata apresentam maior rendimento, elucidando uma externalidade positiva (MARKANDYA, 2012).

Conforme descrito por Markandya (2012), as externalidades mais importantes para se avaliar, são as que estão diretamente relacionadas com os impactos

causados pelas emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), mudanças climáticas, saúde humana, uso de terras e desgaste dos materiais empregados na construção (oxidação). A base para a avaliação econômica das externalidades é buscar identificar os custos sociais finais de um produto, somando todos os custos relacionados com o processo produtivo, abrangendo os custos externos da produção (FUNCHAL, 2008).

A atribuição de valor monetário às externalidades não possui um método globalmente utilizado, uma vez que atribuir valores monetários aos impactos externos sobre o clima, saúde humana, entre outros impactos é reconhecido como complexo e em alguns casos como impreciso (MARKANDYA, 2012; TRAPP; RODRIGUES, 2016). Conseqüentemente, nos estudos de viabilidade econômica dos projetos de geração, os valores dos custos referentes às externalidades geralmente não são inclusos e quando incluídos, os valores atribuídos normalmente são reduzidos (REIS; SANTOS, 2014; TRAPP; RODRIGUES, 2016). Em alguns casos, são levados em consideração apenas os custos externos previstos na legislação do país (COELHO, 1999).

Um exemplo de como isso ocorre, é que conforme a legislação vigente em um determinado país, são estabelecidos índices que devem ser cumpridos pela organização investidora, por exemplo padrões de emissão de gases poluentes. Caso o empreendimento ultrapasse esses valores, devem ser tomadas ações para reduzir a emissão. Uma solução seria a instalação de dispositivos para filtrar os gases, dessa forma uma parcela dos custos externos é internalizada (EKINS *et al.*, 1996).

Markandya (2012) realizou um estudo estimando as externalidades da geração de energia elétrica na União Europeia (para o ano de 2005). Por meio dessas estimativas o estudo foi utilizado como base para o planejamento de políticas energéticas, uma vez que fornece uma visão global acerca dos custos reais de produção de energia elétrica. A Figura 2 apresenta o custo privado (azul) e o custo externo (alaranjado) de algumas fontes de geração de energia elétrica. No estudo foi possível identificar que algumas das fontes de geração ao levar em consideração apenas o custo privado da geração, faz com que elas se tornem mais atrativas economicamente, porém, ao somar o custo externo, elas acabam se tornando mais dispendiosas.

Como mencionado, a produção de energia elétrica possui características intrínsecas quanto à tecnologia de geração. No geral, cada uma dessas formas de produção possuem impactos socioeconômicos e ambientais próprios, conseqüentemente suas externalidades também são distintas (ELLIOTT *et al.*, 2010; TRAPP; RODRIGUES, 2016).

Segundo Coelho (1999), geralmente, nos casos de empreendimentos de

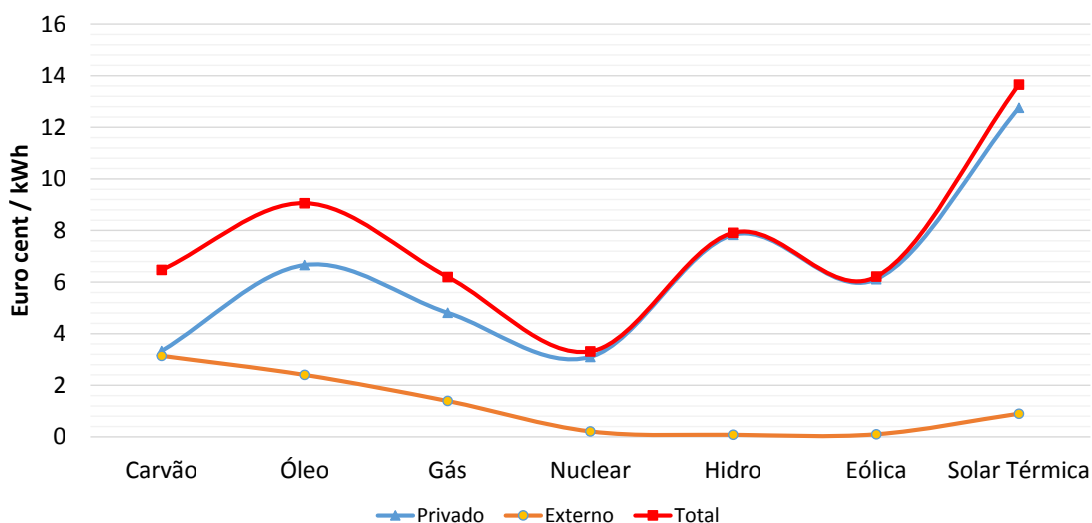


Figura 2: Custo Particular e Externo para Diferentes Fontes de Geração.
Fonte: Adaptado de Markandya (2012).

geração de energia elétrica, apenas os custos de capital, de operação e manutenção (O&M) e de combustível (termoelétricas) são incluídos. Por conseguinte, os custos das formas de geração de energia elétrica convencionais são inferiores aos das fontes renováveis. Além de que, a internalização dos custos externos no preço da energia elétrica é um importante instrumento político para o desenvolvimento sustentável no uso da energia elétrica (ELLIOTT *et al.*, 2010).

Conforme as diretrizes apresentadas pela Agência Internacional de Energia Atômica (do inglês, *International Atomic Energy Agency* - IAEA) e pela Agência Internacional de Energia (do inglês, *International Energy Agency* - IEA) os indicadores avaliativos do Desenvolvimento Sustentável (DS) de um empreendimento são divididos em três principais grupos: ambiental, econômico e social (IAEA, 1999; VERA; LANGLOIS, 2007). Para Wimmeler *et al.* (2015) é necessário levar em consideração também o critério tecnológico. Como o autor descreve é preciso encontrar o ponto de equilíbrio entre os quatro indicadores.

Para Reis e Santos (2014) a geração de energia elétrica contribui causando impactos nas três dimensões descritas pela IAEA e IEA. Dentre as fontes de geração convencionais, as grandes hidrelétricas são responsáveis pelo alagamento de grandes áreas férteis, prejudicando a agropecuária, cidades, belezas naturais, lugares históricos, causando a migração da população, dentre outros impactos. Para as usinas termelétricas, os principais impactos estão relacionados com a emissão de gases

poluentes, com a necessidade de se utilizar água para o sistema de condensação (dependendo da tecnologia da unidade), baixa eficiência energética, entre outros.

Inúmeros pesquisadores tem realizado estudos referentes às externalidades e seu valor monetário no processo de geração de energia elétrica, o que não implica, que no momento da avaliação dos cenários, esses estudos são utilizados com fundamentação (CARLSON, 2002; KOSUGI *et al.*, 2009; RAFAJ; KYPREOS, 2007; TRAPP; RODRIGUES, 2016).

De acordo com Trapp e Rodrigues (2016) ao incorporar as externalidades (positivas e negativas) nos processos de planejamento, a criação de modelos tarifários diferentes dos existentes atualmente seria uma consequência, ou seja, todos esses impactos passariam a ser agregados no preço da energia elétrica, dessa forma a sociedade, como um todo, teria ciência do custo real da energia elétrica.

Rafaj e Kypreos (2007) descrevem os impactos econômicos, ambientais e estruturais da internalização das externalidades no custo total de geração de energia elétrica. O autor utiliza três cenários³ para o seu estudo (cenário base, cenário de externalidades locais e cenário de externalidades global) e concluem que a utilização da metodologia de internalização de externalidades promove a rápida inclusão de políticas de controle e de centrais geradoras de baixa emissão de poluentes, alcançando entre 70% e 85% na redução de NO_x e de SO₂. Com a análise dos cenários os autores verificam que as fontes geradoras de energia elétrica a gás natural de ciclo combinado, nuclear e de fontes renováveis aumentam consideravelmente sua parcela na matriz de geração de energia elétrica. De acordo com os resultados do estudo, o custo total para a geração de energia elétrica nos cenários das externalidades, relacionados com as mudanças estruturais, aumentaram em aproximadamente 2% comparado ao cenário base.

A valoração das externalidades na geração de energia elétrica mais estudadas são referentes aos tipos de geração convencionais, tais como: carvão, petróleo e seus derivados, potencial hidráulico, eólica, solar e geotérmica. De acordo com Prado (2007) existe uma tendência na não valoração das externalidades ao se realizar a avaliação das tecnologias já existentes e utilizadas massivamente. Essa característica acaba impossibilitando novas fontes de geração serem inclusas na matriz de energia elétrica.

³Cenário base: sem inclusão das externalidades; Cenário de externalidades locais: incluem somente externalidades resultantes das emissões de poluentes locais, emissão de NO_x e de SO₂; Cenário de externalidades global: cenário local mais a inclusão de gases que causam mudança climática global (CO₂) (ELLIOTT *et al.*, 2010)

Dessa forma a consideração das externalidades, contribui no desenvolvimento das fontes renováveis de geração de energia elétrica. Uma vez que as externalidades quando quantificadas, fornecem uma indicação dos danos/benefícios associados as diferentes alternativas quanto a forma de geração de energia elétrica, auxiliando na classificação das alternativas e sendo uma ferramenta econômica para representar os custos sociais e ambientais associadas a determinada alternativa (RAFAJ; KYPREOS, 2007).

De acordo com Furtado (1996), a especificação somente dos custos e benefícios referentes à empresa proprietária do empreendimento é importante, porém, a análise custo-benefício do empreendimento deve considerar todos os custos relacionados com a atividade, independente de qual parte está pagando por eles. Dessa forma uma análise real e eficaz é realizada referente à internalização dos custos externos no planejamento energético da eletricidade.

2.3 PLANEJAMENTO ENERGÉTICO DA ELETRICIDADE

O conceito de planejamento energético é fornecido na literatura por inúmeras definições (MIRAKYAN; GUIO, 2013). Para Mirakyan e Guio (2015) o planejamento energético

É uma abordagem para encontrar soluções ambientalmente amigáveis, institucionalmente sólidas, socialmente aceitáveis e econômicas da melhor combinação de opções de oferta e demanda de energia para uma área definida, para suportar o desenvolvimento sustentável regional a longo prazo. É um processo de planejamento transparente e participativo, uma oportunidade para os planejadores apresentarem questões complexas e incertas de forma estruturada, holística e transparente, para que as partes interessadas revejam, compreendam e apoiem as decisões de planejamento (MIRAKYAN; GUIO, 2015, p. 2).

No trabalho realizado por Mirakyan e Guio (2013), o qual consistiu de uma revisão dos métodos e ferramentas aplicados no planejamento energético de cidades e regiões (nível subnacional), é proposto um procedimento genérico para o planejamento energético, composto por quatro fases (fase I: preparação e orientação; fase II: desenho do modelo e análise detalhada; fase III: priorização e decisão; fase IV: Implementação e monitoramento). Os autores concluem que existem poucos métodos e ferramentas que possam ser aplicados na fase de preparação e orientação, no entanto é visível que os estudos revisados por eles reconhecem a importância de tal fase.

Para a fase II, desenho do modelo e análise detalhada, existem diversas ferramentas. Na fase III, priorização e decisão, registraram-se progressos significativos quanto aos métodos utilizados. Mesmo existindo métodos para cada uma das etapas, os autores expõem que ainda não foram combinados métodos para gerenciar todos os processos e tarefas do planejamento energético.

Para Mirakyan e Guio (2015) o processo de planejamento pode ser dividido em três níveis, conforme ilustrado na Figura 3.

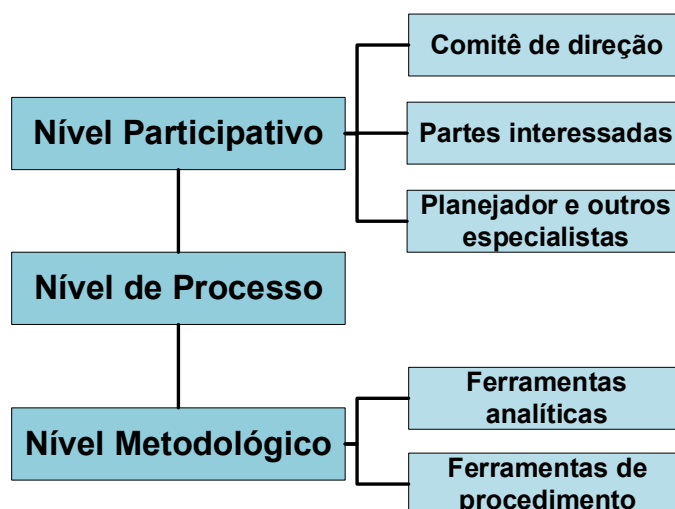


Figura 3: Níveis de um processo de planejamento.

Fonte: Adaptado de Mirakyan e Guio (2013).

A expansão dos planos integrados de energia a longo prazo, devido aos vários aspectos (por exemplo, a importância ambiental, econômica, política, institucional, tecnológica e social) do planejamento energético, para garantir o suprimento de energia elétrica da demanda cada vez maior, faz com que a análise de diferentes projetos relacionados à geração, transmissão e distribuição de energia elétrica seja uma tarefa complexa (POLATIDIS *et al.*, 2006; MIRAKYAN; GUIO, 2013; MARDANI *et al.*, 2016a).

As características inerentes às fontes de energia renováveis, tais como, produção descentralizada, custos localizados e de curto prazo, benefícios a longo prazo, envolvimento de diversos atores, cada um com seu sistema de valor, e inúmeros critérios implica numa necessidade da avaliação do local e da melhor alternativa com prudência (POLATIDIS *et al.*, 2006).

Inúmeros modelos, teóricos e experimentais, e ferramentas foram propostos pela literatura para auxiliar os tomadores de decisão (TD) (do inglês, *Decision Ma-*

kers - DM) nas diferentes etapas do planejamento energético no geral (MARDANI *et al.*, 2016a). Conforme enfatizado por Mardani *et al.* (2016a) o planejamento energético apresenta algumas complexidades associadas ao processo, principalmente devido aos riscos emergentes como mudanças climáticas, percepções do risco ambiental, avaliação do risco para a saúde humana, análise do custo do ciclo de vida e avaliação do ciclo de vida. Diakoulaki e Karangelis (2007) apontam outras complexidades, relacionado com os longos períodos de duração os investimentos intensivos de capital.

Ainda, a necessidade de considerar nos processos de decisão no planejamento energético da eletricidade (planejamento elétrico) critérios tanto qualitativos como quantitativos, torna indispensável a opinião de especialistas e uma estrutura organizada para as questões técnicas, ambientais, econômicas, políticas e sociais (MARDANI *et al.*, 2016a; MIRAKYAN; GUIO, 2013; TAHA; DAIM, 2013).

De acordo com os autores Strantzali e Aravossis (2016) a inclusão nos estudos de planejamento elétrico das Fontes de Energia Renovável é uma tarefa complicada e deve superar barreiras econômicas, sociais, técnicas, ambientais e institucionais. Kumar *et al.* (2017) mencionam que diferentes soluções podem ser obtidas conforme a prioridade estabelecida pelos TD envolvidos no processo.

A incerteza e a deficiência de informação para controlar os riscos e complexidades elevam a dificuldade para os tomadores de decisão do planejamento elétrico (MARDANI *et al.*, 2016a; DIAKOULAKI; KARANGELIS, 2007). A avaliação de situações em que há problemas no que se refere a múltiplos aspectos em conflito pode ser realizada utilizando-se do método de Análise de Decisão (AD) (do inglês, *Decision Analysis - DA*) (HUANG *et al.*, 1995; ZHOU *et al.*, 2006; MIRAKYAN; GUIO, 2013; AZZOPARDI *et al.*, 2013). Por essa razão essa temática também é abordada neste capítulo, a seguir.

2.4 ANÁLISE DE DECISÃO - AD

Buscando garantir que o processo de decisão frente a incertezas e *trade-offs*⁴ encontre a melhor solução, a literatura indica o processo de Análise de Decisão (ZHOU *et al.*, 2006). Conforme Huang *et al.* (1995) a garantia da decisão ocorre uma vez que a AD fornece uma metodologia formal para a avaliação sistemática em situações de decisão complexa, tratamento das incertezas, análises de preferência e avaliação da “melhor” alternativa ou ação a ser tomada. A tomada de decisão em muitos casos é um processo iterativo, em alguns casos podem ser necessários numerosos ciclos

⁴Trade-off esta relacionado com o processo de escolher entre duas alternativas, em que optando por uma, conseqüentemente, prejudica ou até mesmo elimina a outra (MEIRELES, 2001).

para a solução (STRANTZALI; ARAVOSSIS, 2016; ZHOU *et al.*, 2006).

Os primeiros estudos que se tem conhecimento a respeito da AD, foram realizados na década de 1970, tratam da tomada de decisão na exploração do petróleo e gás Kaufman (1963). De acordo com Huang *et al.* (1995), na sequência elas foram aplicadas tanto na indústrias privadas (desenvolvimento de novos produtos, avaliação de investimentos, entre outros) quanto no setor público (estratégias de controle de emissão, desenvolvimento de aeroportos, entre outros).

De acordo com Huang *et al.* (1995), Zhou *et al.* (2006), os métodos de análise de decisão podem ser classificados em três grandes grupos, conforme apresentado na Figura 4. Sendo eles: Análise de Decisão de Objetivo Único (ADOU) (do inglês, *Single Objective Decision Making - SODM*); Sistema de Apoio à Decisão (SAD) (do inglês, *Decision Support Systems - DSS*); e o método de Análise de Decisão Multicritério (do inglês, *Multi-Criteria Decision Analysis - MCDA*), porém mais conhecido na literatura brasileira como Apoio Multicritério à Decisão (AMD).

Na abordagem da Análise Decisão de Objetivos Únicos os métodos mais encontrados na literatura são os métodos clássicos da Árvore de Decisão (do inglês, *Decision Tree - DT*) e do Diagrama de Influência (do inglês, *Influence Diagram - ID*).

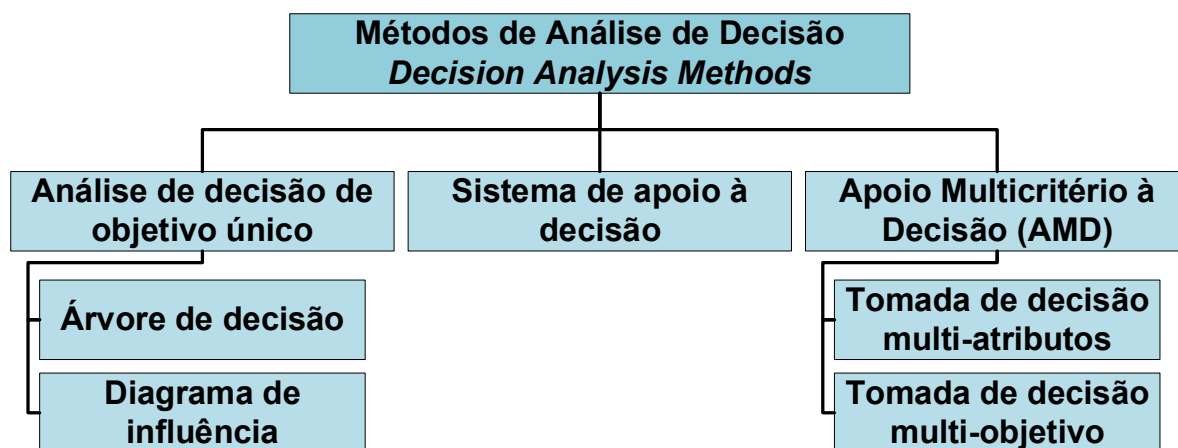


Figura 4: Classificação dos métodos de análise de decisão.

Fonte: Adaptado de Zhou *et al.* (2006).

O método de Apoio Multicritério à Decisão, também conhecido na literatura como método da Tomada de Decisão de Critérios Múltiplos (do inglês, *Multiple Criteria Decision Making - MCDM*), classifica, ordena, descreve ou seleciona alternativas inclusas num processo de decisão levando em consideração os mais variados critérios

relacionados com as questões técnicas, sociais, ambientais, econômicas e institucionais (AZZOPARDI *et al.*, 2013; DIAKOULAKI; KARANGELIS, 2007; PESSOA, 2016; WANG *et al.*, 2009). O AMD pode ser dividido em dois outros grupos: Tomada de Decisão Multi-Atributo (TDMA) (do inglês, *Multiple Attribute Decision Making* - MADM) e Tomada de Decisão Multi-Objetivo (TDMO) (do inglês, *Multiple Objective Decision Making* - MODM) (HUANG *et al.*, 1995; POHEKAR; RAMACHANDRAN, 2004; TAHA; DAIM, 2013; ZHOU *et al.*, 2006).

De acordo com (TAHA; DAIM, 2013) o métodos TDMO é caracterizado pela existência de objetivos múltiplos e conflitantes, os quais são otimizados com a presença de um conjunto de restrições (viáveis e disponíveis). Geralmente são aplicados para a avaliação de sustentabilidade (KUMAR; KATOCH, 2015; BEGIĆ; AFGAN, 2007), escolha da melhor diversificação para a matriz de energia elétrica (GRÁGEDA *et al.*, 2016; SANTOS *et al.*, 2017; BRAND; MISSAOUI, 2014). Os autores classificam o método como sendo mais complexo do que os métodos TDMA, os quais avaliam um conjunto de alternativas contra um conjunto de critérios. A literatura classifica os métodos TDMA como sendo os mais populares e mais utilizados nos processos de decisão (WANG *et al.*, 2009).

Do ponto de vista de considerar um critério único no processo de tomada de decisão, torna possível encontrar uma solução verdadeiramente melhor em que o objetivo é maximizar os benefícios minimizando custos (MARDANI *et al.*, 2016a; POHEKAR; RAMACHANDRAN, 2004). Apesar de que nos processos reais de planejamento elétrico não é adequado tomar uma decisão considerando apenas um critério (MARDANI *et al.*, 2016a; TAHA; DAIM, 2013). No entanto, Kumar *et al.* (2017) afirmam que a literatura geralmente fez a avaliação do planejamento elétrico observando apenas um cenário único e propõe o uso de diferentes cenários para alcançar a melhor solução.

Portanto, em situações que existem múltiplos critérios em conflito, o método AMD pode ser aplicado para auxiliar no processo de decisão. (DIAKOULAKI; KARANGELIS, 2007; PESSOA, 2016; MIRAKYAN; GUIO, 2013; WANG *et al.*, 2009). A abordagem AMD tem como objetivo melhorar a qualidade das decisões e facilitar as decisões coletivas (MARDANI *et al.*, 2016a). Uma vez que ao existirem diversos participantes no processo de decisão, em que alguns possam ter interesses individuais, a dificuldade da modelagem do problema aumenta significativamente (KUMAR *et al.*, 2017; PESSOA, 2016).

2.4.1 APOIO MULTICRITÉRIO À DECISÃO - AMD

Os métodos AMD podem fornecer soluções para os problemas envolvendo diversas partes interessadas, objetivos múltiplos e geralmente conflitantes (POHEKAR; RAMACHANDRAN, 2004; STRANTZALI; ARAVOSSIS, 2016). Cavallaro (2009) considera a análise multicritério como “uma ferramenta de suporte técnico-científica que é capaz de justificar suas escolhas de forma clara e consistente, especialmente no setor de energia renovável”.

Para Mardani *et al.* (2016a)

O método de apoio multicritério à decisão (AMD) fornece uma metodologia sistemática que auxilia os decisores na combinação desses insumos com as informações de benefício/custo e as perspectivas das partes interessadas para classificar todas as alternativas de projetos (MARDANI *et al.*, 2016a, p. 1).

Pohekar e Ramachandran (2004), Strantzali e Aravossis (2016) enfatizam que a solução é altamente dependente das preferências do tomador de decisões. Também o fato de diversos atores (indivíduos, instituições, comunidades locais, investidores, agências governamentais, grupos ambientais, etc.) estarem envolvidos e normalmente possuírem interesses diferentes, afeta direta ou indiretamente o processo de tomada de decisão (KUMAR *et al.*, 2017; PESSOA, 2016; STRANTZALI; ARAVOSSIS, 2016). Considerando os diferentes critérios, pontos de vista e prioridades entre os atores envolvidos no processo de tomada de decisão, o compromisso mútuo deve ser alcançado Pohekar e Ramachandran (2004), Strantzali e Aravossis (2016). Os métodos AMD tem sido amplamente utilizados no planejamento da energia elétrica, análise de impacto ambiental, avaliação de projetos e análise de políticas energéticas (STRANTZALI; ARAVOSSIS, 2016).

Geralmente, o processo de decisão que utiliza a técnica AMD como suporte é caracterizado por envolver m alternativas avaliadas e n critérios, em que cada critério tem um peso atribuído (p_n é o peso do critério C_n), conforme Equação 1. A matriz (ordem $m \times n$) de decisão agrupada é apresentada na Equação 2, em que x_{ij} indica o desempenho da i -ésima alternativa em relação ao j -ésimo critério.

$$\begin{array}{cccc}
 \text{Alternativas} & A_1 & A_2 & \cdots & A_m \\
 \text{Critérios} & C_1 & C_2 & \cdots & C_n \\
 \text{Pesos} & p_1 & p_2 & \cdots & p_n
 \end{array} \tag{1}$$

$$X = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \cdots & C_n \\ A_1 & \left(\begin{matrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{matrix} \right) \end{matrix} \quad (2)$$

Como descrito, devido ao processo de decisão envolver inúmeros critérios, várias partes interessadas, problemas ambientais, econômicos, entre outros, é necessário gerar cenários que descrevem as possíveis soluções do problema. A Figura 5, descreve o processo genérico de análise de decisão.

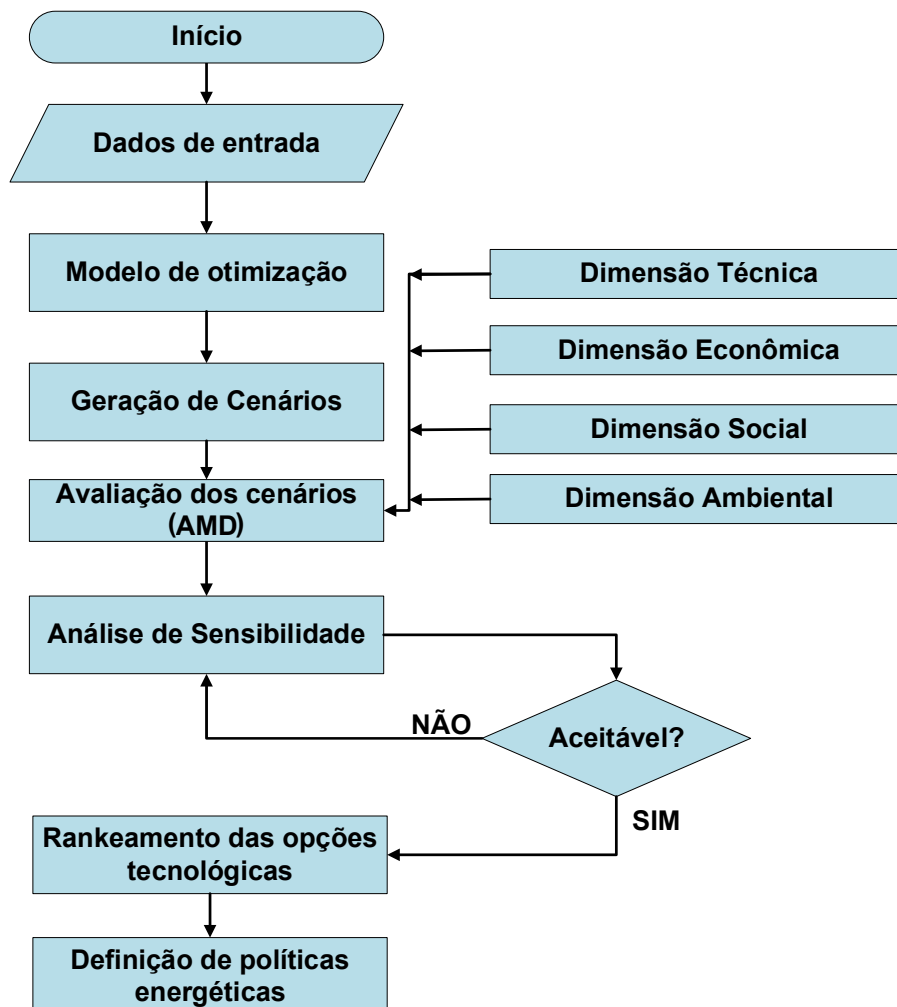


Figura 5: Fluxograma que descreve um processo genérico de análise de decisão por meio da metodologia AMD.

Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2009).

Na sequência da geração dos cenários é realizada a avaliação destes por meio de técnicas AMD, elas utilizam nas suas avaliações os critérios com seus pesos. Após o processo de análise dos cenários é realizada a análise de sensibilidade⁵. Caso aceitável, é realizada a ordenação das opções tecnológicas e então a definição das políticas energéticas (WANG *et al.*, 2009).

A técnica AMD tem ganhado popularidade e tem sido amplamente utilizada em questões relacionadas ao planejamento elétrico da expansão, realizando ações de comparação entre cenários energéticos (DIAKOULAKI; KARANGELIS, 2007). A preferência pelo método ocorre devido a sua capacidade de promover soluções para problemas que envolvem conflitos e múltiplos objetivos, em virtude da flexibilidade que proporciona aos TD's (POHEKAR; RAMACHANDRAN, 2004; POLATIDIS *et al.*, 2006; STRANTZALI; ARAVOSSIS, 2016; WANG *et al.*, 2009). Também pela característica do método de fornecer aporte para uma sistematização de alternativas frente aos critérios e interesses conflitantes (HARALAMBOPOULOS; POLATIDIS, 2003; HUANG *et al.*, 1995; LOOTSMA *et al.*, 1990; SISKOS; HUBERT, 1983).

No que diz respeito ao setor de energia elétrica, as abordagens AMD são apropriadas, uma vez que as atividades relacionadas a esse setor possuem algumas características como investimentos intensivos em capital, fontes de incerteza, longos períodos de tempo, e os já mencionados, critérios em conflito e diversas partes interessadas (MARDANI *et al.*, 2016a; DIAKOULAKI; KARANGELIS, 2007).

Recentemente, alguns trabalhos revisaram as técnicas AMD em diversas áreas relacionadas à energia, como a energia renovável e sustentável (MARDANI *et al.*, 2015), economia de energia (MARDANI *et al.*, 2016b), energia sustentável (WANG *et al.*, 2009), sistemas integrados de energia renovável (LIU, 2014) e tem sido amplamente utilizado para a avaliação de sustentabilidade (CINELLI *et al.*, 2014).

De acordo com Cinelli *et al.* (2014), o AMD é indicado para realizar avaliações de sustentabilidade devido ao seu poder de considerar diferentes perspectivas, valores, incertezas, considerações intra e inter geracionais.

Mardani *et al.* (2016a) revisou 196 artigos publicados de 1995 a 2015 relacionados a aplicação das técnicas AMD para auxiliar nos problemas de decisão no gerenciamento de energia. O artigo classificou os artigos em 13 áreas principais. As áreas mais pesquisadas são: avaliação de impactos ambientais, correspondendo por 31 artigos (15,82%) e gestão de energia com 21 artigos (10,71%). Os autores

⁵A Análise de Sensibilidade é uma ferramenta para calcular a variação do peso de um critério a partir de mudança isolada do peso de outro critério (MATTOS; VASCONCELLOS, 1989).

concluem também que o AMD híbrido e AMD Fuzzy foram utilizados em 55 artigos (28,06%), o método Processo de Hierarquia Análítica (do inglês *Analytical Hierarchy Process* - AHP) foi utilizado em 49 artigos (25,00%). A revista "Renewable and Sustainable Energy Reviews" representou o primeiro lugar, com 32 publicações (16,33%), entre as 72 revistas consideradas. Kumar *et al.* (2017) afirma que o uso das técnicas híbridas está aumentando no planejamento de energia.

No trabalho realizado por Zhou *et al.* (2006), no qual mais de 270 referências relacionadas com análise de decisão em modelos de energia e meio ambiente. O autor estabeleceu categorias de classificação para 7 áreas de aplicação (I: análise de política energética; II: planejamento de energia elétrica; III: escolha de tecnologia; IV: avaliação de projetos, V: análise da política ambiental relacionada com a energia; VI: controle e gestão ambiental relacionados com a energia; VII: categoria diversa).

Strantzali e Aravossis (2016) apresentam uma revisão do estado da arte em métodos de apoio à decisão aplicados em energia renovável e sustentável no campo do planejamento elétrico. O artigo classificou 183 artigos por ano de publicação, técnica de tomada de decisão, tipo de energia, critérios utilizados, distribuição geográfica e áreas de aplicação de 1983 a 2014. Os autores concluem que as áreas com a maior parte dos trabalhos analisados estão relacionadas com o planejamento regional para cobertura de demanda de energia (21%) e avaliação de tecnologias e projetos de geração de energia (20%). Os documentos de revisão relacionados aos métodos de apoio à decisão representaram 8% dos artigos revistos por Strantzali e Aravossis (2016).

Taha e Daim (2013) apresentam uma revisão da literatura sobre os métodos AMD e suas aplicações para a análise de energia renovável. O trabalho classificou em ano; área de aplicação e método utilizado. Em seguida, o AMD em energia renovável é dividido em quatro categorias: planejamento e política de energia renovável, avaliação e análise de energias renováveis, seleção de tecnologia e projetos, e ambientais.

De acordo com a pesquisa realizada por Pohekar e Ramachandran (2004) na qual foram revisados 90 artigos relacionados com a aplicação dos métodos AMD no planejamento elétrico, constatou-se que a técnica mais utilizada para resolver problemas de tomada de decisão relacionadas a sistemas de energia renovável é o AHP, principalmente devido a sua estrutura simples (TAHA; DAIM, 2013). Na sequência o Método de Organização de Classificação Preferencial Para Avaliação de Enriquecimento, mais conhecido pela sua sigla PROMETHEE (do inglês, *Preference Ranking*

Organization Method For Enrichment Evaluation) e o método Eliminação e Escolha Traduzindo a Realidade, encontrado na literatura pela sigla ELECTRE (do francês, *Elimination Et Choix Traduisant la Réalité*), esses dois são populares na área do planejamento de energia (KUMAR *et al.*, 2017).

Taha e Daim (2013) afirmam que além dos métodos descritos acima, há outros utilizados na literatura com frequência elevada, sendo eles: Processo de Rede Analítica (do inglês, *Analytic Network Process* - ANP); Técnica de Preferência por Ordem de Similaridade a Soluções Ideais (do inglês, *Technique for Order Preference by Smilarity to Ideal Solution* - TOPSIS); e a Teoria da Utilidade Multi-Atributo (do inglês, *Multi-Attribute Utility Theory* - MAUT).

Em Cinelli *et al.* (2014), os autores realizaram uma revisão do estado da arte dos métodos AMD que foram analisados em relação a um conjunto de dez critérios de comparação relacionados à sustentabilidade. O documento de revisão concluiu que todos os métodos analisados podem gerenciar dados mistos (qualitativos e quantitativos) e podem incluir uma perspectiva de ciclo de vida na avaliação de sustentabilidade. Além disso, todas as abordagens são capazes de realizar análises de sensibilidade. De acordo com os autores, os métodos MAUT e AHP são considerados simples e possuem um bom suporte de *software*. No entanto, segundo os autores esses métodos compreendem uma perspectiva de sustentabilidade fraca. A revisão também destacou os amplos potenciais do AMD na avaliação de sustentabilidade.

Conforme supramencionado, diferentes métodos foram desenvolvidos durante os últimos anos de modo que a seleção do método mais adequado depende das particularidades das distintas possibilidades e do modelo de avaliação (DIAKOULAKI; KARANGELIS, 2007). Sendo assim não se pode afirmar que existe um método MCDM que possa ser considerado o melhor para todos os tipos de problemas de tomada de decisão (MARDANI *et al.*, 2016a; TAHA; DAIM, 2013). Kumar *et al.* (2017) afirmam que cada método possui sua própria força e fraqueza, dependendo exclusivamente da sua aplicação. Uma característica inerente aos métodos AMD, é de que em um mesmo caso em análise, ao se aplicar técnicas diferentes os resultados possivelmente serão distintos, ou seja, ao definir se será aplicado uma ou mais técnicas, deve haver sempre prudência na seleção destas (POLATIDIS *et al.*, 2006).

Comumente encontrado na literatura é a utilização da técnica de Apoio Multicritério à Decisão juntamente com outras ferramentas como algoritmos genéticos e bancos de dados, por exemplo, o Sistema de Informação Geográfica (SIG) (do inglês, *Geographic Information Systems* - GIS) (MASLOV *et al.*, 2014).

Maslov *et al.* (2014) tem como objetivo a identificação da melhor localização de uma fazenda produtora de energia elétrica por meio das correntes marítimas. Para a realização do estudo o autor utiliza a técnica ELECTRE III para classificar as regiões avaliadas pelo SIG estabelecendo uma ordenação das alternativas.

Os métodos AMD podem também ser subdivididos em métodos de agregação, interativos e de superação, conforme apresentado na Figura 6, bem como apresenta também os métodos de agregação e superação mais utilizados na literatura (GUARNIERI, 2015; OREE *et al.*, 2017).

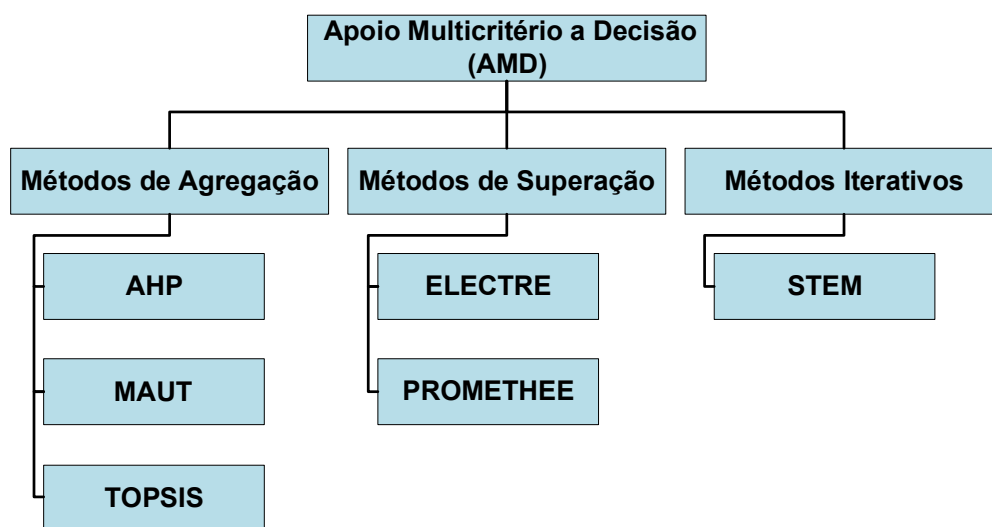


Figura 6: Classificação dos métodos de Apoio Multicritério à Decisão.
 Fonte: Adaptado de Guarnieri (2015).

2.4.1.1 MÉTODOS DE AGREGAÇÃO

Os métodos de agregação avaliam por meio do conjunto de indicadores, mensurados qualitativamente ou quantitativamente, estipulando pesos relativos de importância para cada um dos critérios para as diferentes alternativas. Desse modo, a ação que apresentar a maior pontuação agregada ou o maior índice de preferência, representa a melhor ação entre as alternativas consideradas (DIAKOULAKI; KARANGELIS, 2007; GUARNIERI, 2015). São mensurados de forma aditiva, admitindo *trade-offs* entre os critérios (GUARNIERI, 2015).

2.4.1.1.1 PROCESSO DE HIERARQUIA ANALÍTICA - AHP

O Processo de Hierarquia Analítica foi desenvolvido na década de 1970 pelo professor Thomas Saaty (SAATY, 1988; SAATY, 1990). O AHP segundo Wang *et al.* (2009) “É uma metodologia de análise de decisão descritiva que calcula a importância de alternativas através da comparação por pares dos critérios de avaliação e alternativas”. O processo consiste na decomposição de um problema em uma hierarquia, com os objetivos no topo, critérios e subcritérios nos níveis e sub-níveis da hierarquia e por último as alternativas de decisão, na base do processo (POHEKAR; RAMACHANDRAN, 2004). As entradas definidas pelos especialistas e tomadores de decisão são consideradas no momento da comparação em pares (TAHA; DAIM, 2013).

O AHP ao decompor o problema possibilita ao decisor definir prioridades e realizar o julgamento de preferências entre alternativas. O processo consiste em comparar paritariamente os elementos em determinado nível hierárquico baseado na escala numérica de Saaty, apresentada na Tabela 3, para na sequência, avaliar a sua superioridade aos demais critérios do mesmo nível relativa aos elementos do nível superior (POHEKAR; RAMACHANDRAN, 2004).

A atribuição do índice baseado na escala de Saaty é realizada pelo tomador de decisão ao ser perguntado a sua preferência por um critério (ou subcritério, quando existir) em relação ao outro. Por meio desse processo é possível montar uma matriz de comparação, Equação 3, em que cada elemento da matriz representa o índice de preferência em relação aos outros critérios do mesmo nível hierárquico.

$$D = \begin{pmatrix} \frac{C_1}{C_1} & \frac{C_1}{C_2} & \dots & \frac{C_1}{C_n} \\ \frac{C_2}{C_1} & \frac{C_2}{C_2} & \dots & \frac{C_2}{C_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{C_n}{C_1} & \frac{C_n}{C_2} & \dots & \frac{C_n}{C_n} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Uma vez que os índices de preferências foram encontrados, podem ser calculados os pesos dos critérios com base em alguns métodos específicos, como o método da média aritmética, o método da raiz característica ou utilizando mínimos quadrados, métodos aplicados linha-a-linha na matriz de comparação (WANG *et al.*, 2009). Também pode ser encontrado os autovetores da matriz por meio da utilização das teorias de álgebra linear, estes representam os pesos associados a cada critério (EHRlich, 1996). Finalmente é realizada a normalização dos pesos, encontrando assim um valor entre 0 e 1 para cada um dos critérios (CINELLI *et al.*, 2014).

Tabela 3: Escala de Saaty para comparação dos critérios no método AHP.

| Intensidade do peso | Definição | Descrição |
|----------------------------|-------------------------|---|
| 1 | Igual Importância | Dois critérios contribuem igualmente para os objetivos |
| 3 | Importância moderada | Experiência e avaliação favorece ligeiramente mais um dos critérios |
| 5 | Importância forte | Experiência e avaliação favorecem um critério em relação ao outro |
| 7 | Importância muito forte | Um critério é favorecido fortemente em relação ao outro |
| 9 | Importância absoluta | A evidência que favorece um critério em relação ao outro é a mais alta possível em relação ao outro |
| 2, 4, 6, 8 | Valores intermediários | Usado para representar o compromisso entre as prioridades listadas |

Fonte: Adaptado de Wind e Saaty (1980).

A Figura 7 apresenta um exemplo de hierarquia de um processo AHP com um objetivo geral, critérios (C_1 até C_n), em que cada critério possui uma quantidade de subcritérios variável. Em cada subcritério são avaliadas todas as alternativas. Pode ocorrer de um critério não possuir subcritérios, sendo assim o desempenho das alternativas são avaliadas diretamente no respectivo critério.

2.4.1.1.2 TÉCNICA DE PREFERÊNCIA POR ORDEM DE SIMILARIDADE A SOLUÇÕES IDEAIS - TOPSIS

A Técnica de Preferência por Ordem de Similaridade a Soluções Ideais é mais uma ferramenta pertencente ao método de agregação dos métodos AMD, ela foi desenvolvida por Hwang e Yoon na década de 1981 (YOON; HWANG, 1981). Trata-se de um método de ordenação simples, onde são requeridos somente como entrada pesos subjetivos, informados pelo tomador de decisão, ele auxilia na escolha da melhor alternativa avaliando um número finito de critérios (AKBAŞ; BILGEN, 2017).

Este método permite a consideração de três tipos de critérios, sendo eles:

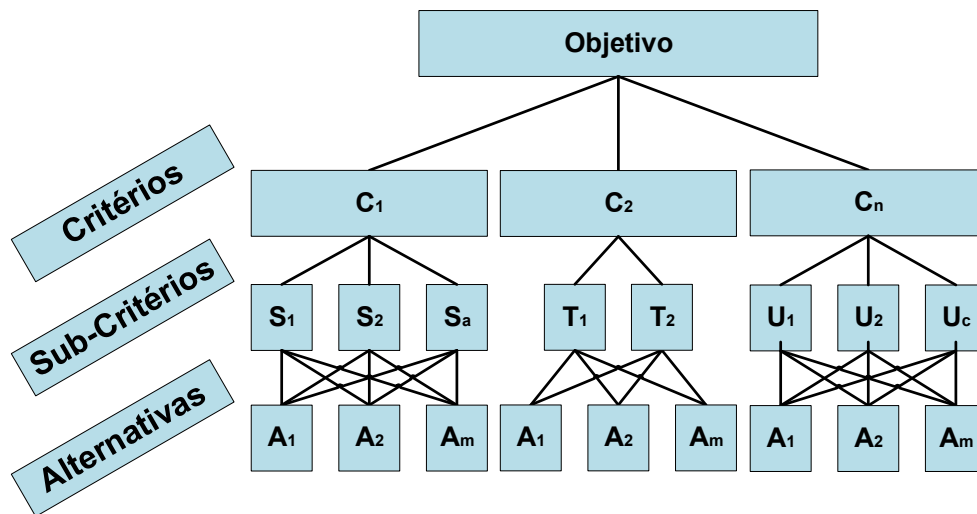


Figura 7: Hierarquia dentro do método AHP.
Fonte: Adaptado de Saaty (1988).

critérios de benefícios qualitativos, benefícios quantitativos e critérios de custo. Existem duas soluções hipotéticas, a primeira chamada de solução ideal positiva e a segunda de solução ideal negativa (CHOUDHARY; SHANKAR, 2012).

O método TOPSIS baseia-se no conceito de preferência por similaridade, classificando as alternativas com base no desempenho geral, em que a alternativa que possuir menor distância da Solução Ideal Positiva (SIP) e maior distância da Solução Ideal Negativa (SIN) (AKBAŞ; BILGEN, 2017). A solução dita como ideal positiva é aquela com maior número de benefícios e menor custo, a ideal negativa é aquela com menor número de atributos benéficos e custo mais elevado (CHOUDHARY; SHANKAR, 2012).

O processo geral da técnica TOPSIS pode ser descrito em sete etapas, conforme abaixo (AKBAŞ; BILGEN, 2017; SÁNCHEZ-LOZANO *et al.*, 2016; YOON; HWANG, 1981):

Etapla 1: Estabelecer uma matriz de decisão de desempenho, conforme apresentado na Equação 2.

Etapla 2: Normalizar a matriz de decisão de acordo com a Equação 4.

$$n_{ij}(x) = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}; i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

Em que $n_{ij}(x)$ são os coeficientes da matriz de decisão normalizados.

Etapla 3: Calcular a matriz de decisão normalizada ponderada de acordo com a Equação 5.

$$v_{ij}(x) = p_j * n_{ij}(x); \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

Em que p_j é o peso do j -ésimo critério e $\sum_{j=1}^n p_j = 1$

Etapla 4: Determinação da SIP (A^+), dada pela Equação 6

$$A^+ = \{v_1^+, \dots, v_n^+\}, \quad (6)$$

em que

$$v_j^+ = \{max(v_{ij}) \text{ se } j \in J; min(v_{ij}) \text{ se } j \in J'\}, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (7)$$

E da SIN (A^-), conforme Equação 8.

$$A^- = \{v_1^-, \dots, v_n^-\}, \quad (8)$$

em que

$$v_j^- = \{min(v_{ij}) \text{ se } j \in J; max(v_{ij}) \text{ se } j \in J'\}, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (9)$$

Em que J são os critérios positivos, ou seja, critérios benéficos, os quais devem ser maximizados e J' os atributos negativos, os quais devem ser minimizados, custo (AKBAŞ; BILGEN, 2017).

Etapla 5: A medida de separação entre cada alternativa é calcula pela distância euclidiana (DE). A distância da SIP é calculada conforme a Equação 10.

$$DE_i^+ = \left\{ \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \right\}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

Da mesma forma, para a SIN, conforme Equação 11.

$$DE_i^- = \left\{ \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \right\}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

Etapla 6: Calculo da proximidade relativa (PR) com a solução ideal, de acordo com a Equação 12.

$$PR_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-}, i = 1, 2, \dots, m. PR_i \in \{0, 1\} \quad (12)$$

Etapla 7: Ordenar as alternativas de acordo com o índice da proximidade relativa em ordem decrescente. Quanto maior for o valor do índice menor é a distância da solução ideal positiva e maior a distância da solução ideal negativa (CHOUDHARY; SHANKAR, 2012).

2.4.1.1.3 TEORIA DA UTILIDADE MULTI-ATRIBUTO - MAUT

A teoria da utilidade multi-atributo é uma abordagem baseada em agregação de desempenho, fundamentada nos modelos de preferência, admitindo apenas duas situações: preferência estrita ou indiferença (GUARNIERI, 2015).

Para o processo é necessário identificar as preferências nas formas de funções de utilidade, também identificar os pesos para cada atributo, o que na sequência são agregados para definir um critério de síntese exclusivo (CINELLI *et al.*, 2014). As funções de utilidade podem ser aditivamente ou multiplicativamente separável em relação a função de utilidade do critério exclusivo. A forma multiplicativa da função de utilidade é expressa conforme Equação 13.

$$1 + ku(x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{j=1}^n (1 + k k_j \cdot u(x_j)), \quad (13)$$

em que j é o índice do atributo, k é a constante global (maior ou igual a -1), k_j é a constante do atributo j , $u(\cdot)$ é o operador da função de utilidade, u_j é o operador da função de utilidade para cada atributo (POHEKAR; RAMACHANDRAN, 2004).

2.4.1.2 MÉTODOS DE SUPERAÇÃO

Os métodos de superação, também conhecidos como métodos de subordinação, realiza a comparação par a par, em que a melhor alternativa é melhor avaliada, ao final, a alternativa que possuir um desempenho superior em todos os critérios é escolhida. Os métodos de subordinação não permitem os *trade-offs* entre os critérios (GUARNIERI, 2015).

2.4.1.2.1 ELIMINAÇÃO E ESCOLHA TRADUZINDO A REALIDADE - ELECTRE

O método de Eliminação e Escolha Traduzindo a Realidade foi proposto por Benayoun, Roy e Sussman em 1966 e melhorado por Roy em 1973 (BENAYOUN *et al.*, 1966; ROY; BERTIER, 1973; ROY, 1978). Com o tempo algumas variações do ELECTRE foram desenvolvidas, possuindo assim uma família de métodos, incluindo o ELECTRE I, II, III, IV e TRI (WANG *et al.*, 2009). Essas variações do método foram desenvolvidas para solucionar problemas de decisão distintos, incluindo escolha, classificação ou ordenação (CINELLI *et al.*, 2014).

Para a maioria dos métodos ELECTRE existem duas etapas principais, compreender a construção de uma ou mais relações de superação e a exploração dessas relações para obter uma classificação das alternativas (GUARNIERI, 2015; WANG *et al.*, 2009).

O ELECTRE realiza a sua análise por meio das relações de dominância entre alternativas. De acordo com Wang *et al.* (2009) “o conceito básico do ELECTRE é trabalhar com relações de superação utilizando comparações em pares entre alternativas sob cada critério separadamente”. Para a identificação das relações de superação são utilizados índices de concordância, discordância e valores de limiar, nos casos em que há a hipótese de que os critérios da alternativa “a”, são iguais ou superiores aos da alternativa “b” e nos casos em que a hipótese é de que os critérios da alternativa “a”, são inferiores aos de “b” (STEWART; VALERIE, 2002).

O índice de concordância $C(A_i, A_k)$ para cada par de alternativas avaliadas é expresso conforme Equação 14.

$$C(A_i, A_k) = \frac{\sum_{j \in Q(A_i, A_k)} p_j}{\sum_{j=1}^n p_j}. \quad (14)$$

Em que $Q(A_i, A_k)$ é o conjunto de critérios para os quais A_i é igual ou preferido em relação a A_k e p_j é o peso do j -ésimo critério (WANG *et al.*, 2009). O índice de discordância $D(A_i, A_k)$ é definido conforme Equação 15.

$$D(A_i, A_k) = \frac{\max_{j \in Q'(A_i, A_k)} |x_{A_k j} - x_{A_i j}|}{\max_{j=1}^n |x_{A_k j} - x_{A_i j}|}. \quad (15)$$

Em que $Q'(A_i, A_k)$ é o conjunto de critérios para os quais A_i é pior que A_k , $x_{A_i j}$ e $x_{A_k j}$ representam os desempenhos das alternativas A_i e A_k avaliados no critério j , respectivamente. A equação só pode ser usada quando as pontuações para diferentes critérios são comparáveis (WANG *et al.*, 2009).

De acordo com Cinelli *et al.* (2014) os métodos ELECTRE atendem a critérios discordantes em que a associação em escalas são difíceis, prevenir comportamentos de compensação e explicar as desigualdades em termos de índices de preferência, acarretando na estipulação de limiares.

2.4.1.2.2 MÉTODO DE ORGANIZAÇÃO DE CLASSIFICAÇÃO PREFERENCIAL PARA AVALIAÇÃO DE ENRIQUECIMENTO - PROMETHEE

O método PROMETHEE foi desenvolvido por J. P. Brans na década de 1980 (STEWART; VALERIE, 2002). Assim como o método ELECTRE é baseado nas relações de superação, uma vez que executa a comparação de alternativas em pares para classificá-las frente aos critérios estipulados (WANG *et al.*, 2009). Diferentes métodos PROMETHEE foram desenvolvidos, resultando em uma família de métodos, sendo o II, III, IV, V e VI métodos de ordenação de alternativas e o método PROMSORT o qual fornece classificação das alternativas (GUARNIERI, 2015).

Wang *et al.* (2009) descreve o PROMETHEE como um método “bem adaptado a problemas em que um número finito de alternativas deve ser classificado considerando vários critérios às vezes conflitantes”.

J. P. Brans ofereceu seis funções de preferências de critérios genéricos para serem utilizados como referencial: critérios usuais; quase critério; critérios com preferência linear; critérios de nível; critérios com preferência linear e área de indiferença; e critério Gaussiano Stewart e Valerie (2002), Wang *et al.* (2009).

Para a realização do procedimento é necessário segundo Cinelli *et al.* (2014) possuir informações entre critérios e internas de cada critério. A informação entre critérios é expressa como sendo a importância relativa entre eles. Para a identificação da informação interna de cada critério, é identificada uma função de preferência, a qual expressa o desempenho da alternativa “a” sobre a “b”, em que é utilizado a técnica de comparação por pares.

Por meio das funções de preferências adequadas ao processo de decisão e os pesos dos critérios identificados (geralmente utiliza-se técnicas AMD de agregação para essa tarefa, por exemplo o AHP), é gerado um índice de preferência amplo, o qual indica o grau de preferência da alternativa “a” sobre “b”, expresso pela Equação 16.

$$\pi(A_i, A_k) = \frac{\sum_{j=1}^n p_j f p_j(A_i, A_k)}{\sum_{j=1}^n p_j} \quad (16)$$

Em que $fp_j(A_i, A_k)$ são as funções de preferência da alternativa A_i em relação a A_k . Na sequência são calculados outros dois indicadores, chamados de fluxo de superação de saída e fluxo de superação de entrada, expressos pelas Equações 17 e 18, os quais representam o poder e a fraqueza, respectivamente, de uma alternativa em relação à outra (BRANS; MARESCHAL, 2005).

$$\phi^+(A_i) = \sum_{k=1}^m \pi(A_i, A_k), \quad k = 1, 2, \dots, m. \quad (17)$$

$$\phi^-(A_i) = \sum_{k=1}^m \pi(A_k, A_i), \quad k = 1, 2, \dots, m. \quad (18)$$

Por fim, possuindo os dados de fluxo de entrada e saída pode ser calculado o fluxo líquido de cada alternativa. A alternativa que possuir o maior fluxo líquido é considerada a melhor (WANG *et al.*, 2009).

2.4.1.3 MÉTODOS ITERATIVOS

Os métodos iterativos são caracterizados pela utilização de tentativas e erros, em *softwares* computacionais, operando em duas fases; cálculos e diálogo, uma vez que são mescladas as preferências dos decisores com os cálculos matemáticos, reduzindo o tempo computacional (PESSOA, 2016). São utilizados geralmente na alocação de recursos de energia, uma vez que conseguem maximizar a função objetivo, geralmente custo-benefício para se alcançar a alocação ótima de recursos (CHRISTENSEN; VIDAL, 1990).

Assim como os métodos de agregação os métodos iterativos também são mensurados de forma aditiva, ou seja, admite *trade-offs* entre critérios (GUARNIERI, 2015).

2.4.1.4 AMD FUZZY

Em muitas situações de tomada de decisão, dizer o quanto um critério é mais importante que o outro, uma vez que é definido por pessoas e a mentalidade humana em julgamentos qualitativos é subjetiva, pode haver imprecisão e incerteza no reconhecimento. Expressões como “igualmente”, “moderadamente”, “forte”, “muito forte” são comumente utilizadas para a comparação entre critérios, porém traduzir essas informações para uma escala numérica não é trivial (WANG *et al.*, 2009).

A teoria Fuzzy surge como uma solução para essa questão devido a sua capacidade de se assemelhar com a mentalidade humana, uma vez que ela opera com conjuntos difusos, ou seja, diferente da lógica binária (0 e 1) os valores atribuídos são qualquer um entre 0 e 1 (GOMIDE *et al.*, 1995). Basicamente a lógica Fuzzy possui uma escala em que quanto mais próxima de um certo valor maior é a preferência pelo critério (POHEKAR; RAMACHANDRAN, 2004).

A teoria do conjunto difuso segundo Kahraman e Kaya (2010) é uma ferramenta poderosa para tratar incerteza em caso de ausência de informações ou destas estarem incompletas. No trabalho realizado pelos autores, é sugerido uma metodologia multicritério difusa para a tomada de decisão para a seleção da melhor política energética da Turquia, é utilizado a teoria Fuzzy agregada a metodologia do processo de hierarquia analítica.

3 METODOLOGIA

Este capítulo tem por objetivo fornecer sustentação metodológica ao trabalho e contextualizar sobre como a pesquisa foi delineada e executada.

3.1 ENQUADRAMENTO METODOLÓGICO

De acordo com Gil (2002) uma pesquisa pode ser qualificada como básica ou aplicada. Referente a natureza da pesquisa, este trabalho é classificado como pesquisa aplicada e particular, uma vez que o objetivo é realizar uma busca da literatura em artigos científicos de alcance internacional, com contexto e período específico, com a finalidade de explorar o que tem sido realizado sobre os métodos de apoio a decisão e realizar uma análise estatística dos resultados.

No que tange à abordagem do problema, o presente trabalho se enquadra na categoria mista, porém com predominância qualitativa. (PESSOA, 2016). Do ponto de vista dos objetivos, as pesquisas podem ser classificadas em: exploratórias, descritivas ou explicativas (PESSOA, 2016). Esse trabalho se enquadra em exploratório, o qual tem por finalidade reconhecer as variáveis relacionados ao estudo e o modo que elas são apresentadas.

No que se refere aos procedimentos técnicos da pesquisa, ela pode ser caracterizada como pesquisa bibliográfica, o qual se apoia por meio de materiais já elaborados, livros e artigos científicos, teses, entre outros (GIL, 2002). A Figura 8 apresenta as diferentes formas de classificação de uma pesquisa, destacando-se como esta pesquisa será delineada.

Para o desenvolvimento da pesquisa é realizada uma revisão sistemática da literatura juntamente com o processo de meta-análise.

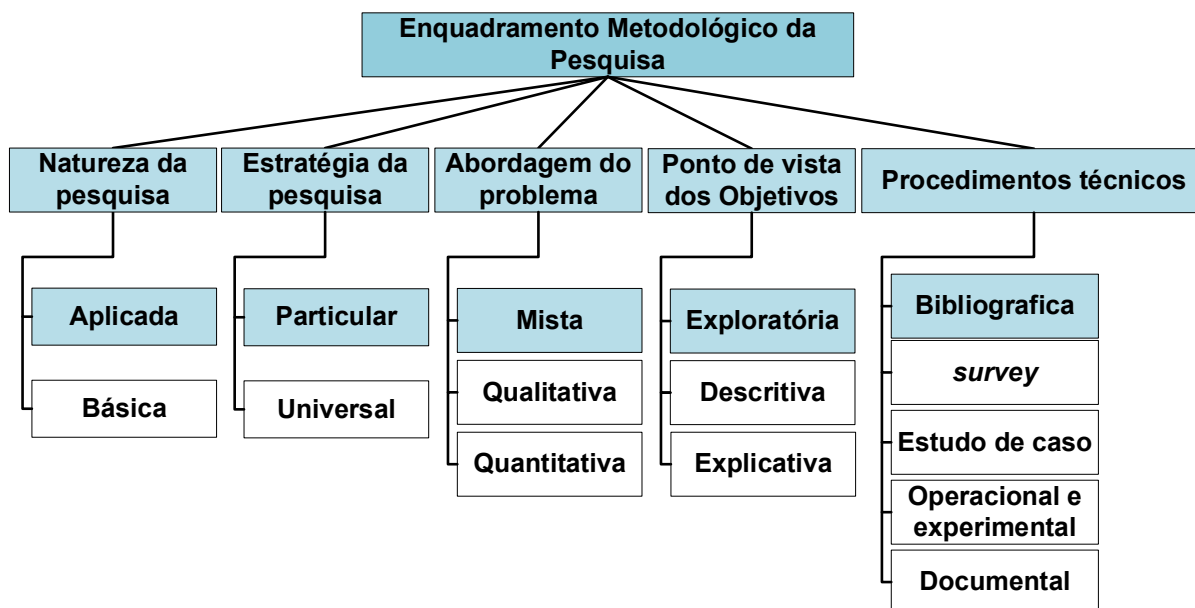


Figura 8: Estrutura do enquadramento metodológico do trabalho.
 Fonte: Adaptado de Petri (2005).

3.2 MÉTODO E PROCEDIMENTOS DE PESQUISA

Esta seção descreve as etapas da pesquisa, apresentando os métodos utilizados e as premissas. Também descreve o processo de discussão dos dados.

3.2.1 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Uma revisão sistemática da literatura consiste em mostrar o que tem sido realizado, escrito e descoberto, em um campo específico até a presente data (MARDANI *et al.*, 2016a). Utilizando-se de ferramentas metodológicas que fazem uso de perguntas claramente formuladas e métodos objetivos de encontrar e avaliar a literatura. Além disso, segundo Garcez (2016) uma revisão sistemática não se trata apenas de uma grande revisão da literatura, mas sim de responder uma pergunta específica, minimizando a tendência na seleção e inclusão dos estudos.

As etapas referentes ao processo de revisão são apresentadas na Figura 9. Inicialmente define-se quais serão as bases de dados que serão utilizadas para a revisão sistemática. Na etapa de Identificação e triagem, é realizado a definição das palavras-chaves e outros critérios (período de tempo da análise, tipo de publicação, língua de publicação). Os trabalhos encontrados são transferidos para o *software* de

gerenciamento de referências Mendeley. Na sequência são excluídos os artigos duplicados e são selecionados os artigos baseando-se na leitura dos títulos e resumos.

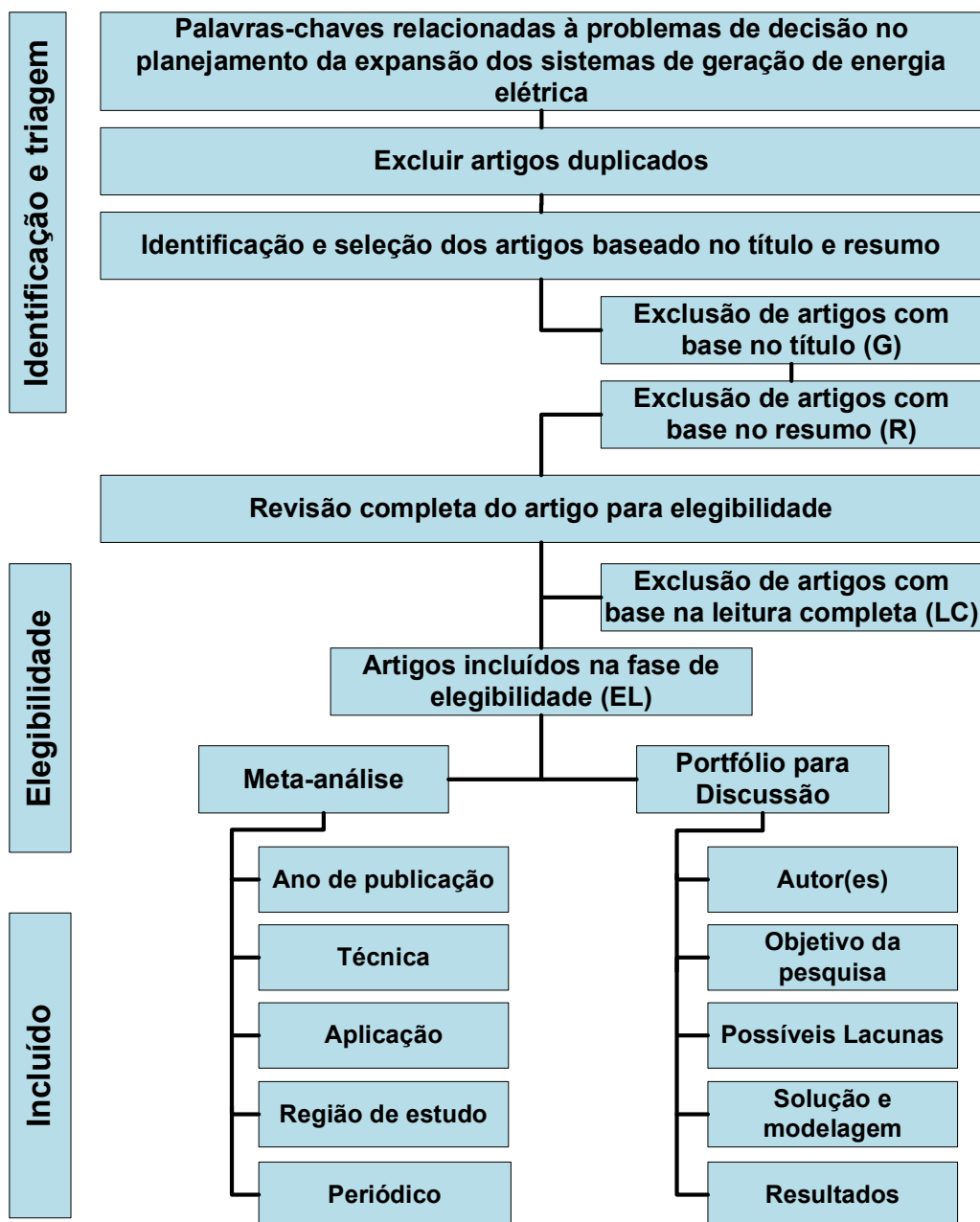


Figura 9: Fluxograma para o processo de identificação e triagem, elegibilidade e inclusão dos artigos.

Fonte: Adaptado de Garcez (2016), Mardani *et al.* (2016a).

Na fase de elegibilidade é realizada a leitura completa dos artigos, excluindo os que não estão de acordo com os objetivos. Ao se realizar a leitura dos

artigos podem ser incluídos outros utilizando as referências dos selecionados.

Dessa maneira, pode-se realizar o processo de discussão da amostra dos artigos selecionados, realizando o processo de categorização e codificação dos artigos quanto aos autores, nacionalidade, técnica utilizada, país e/ou região referentes ao estudo, nome da revista de publicação, objetivo da pesquisa, possíveis lacunas, solução e modelagem e resultados.

3.2.1.1 PREMISSAS PARA A REVISÃO SISTEMÁTICA

Para a revisão sistemática da literatura inicialmente deve ser definido o objetivo, observar como os métodos de apoio à decisão multicritério estão sendo utilizados no planejamento elétrico da expansão das fontes de geração de energia elétrica. Para o processo de revisão definiu-se as bases de dados bibliográficas de editoras cientificamente reconhecidas. Sendo elas, a base de dados *Science Direct* (SCDR) e a *IEEE Xplore Digital Library* (IEEE) (NAKAGAWA *et al.*, 2017).

Ainda, utilizando a afirmação fornecida por Nakagawa *et al.* (2017), é importante utilizar, além das bases de dados bibliográficas, as chamadas bases de motores de busca. Uma vez que as bases bibliográficas de editoras contêm apenas os artigos publicados por ela, enquanto, os motores de busca contêm os artigos de inúmeras bases bibliográficas. Para este trabalho de revisão, foram utilizados os motores de busca *Scopus* (SCOP) e *Web of Science* (WEBS).

Para a realização da busca dos artigos nas bases de pesquisa supramencionadas, é necessário definir um fluxo para a realização das tarefas necessárias, conforme apresenta a Figura 10. Primeiramente deve-se definir os eixos de pesquisa, no contexto da utilização de métodos de apoio à decisão (Eixo 1) aplicados no âmbito do planejamento da expansão da matriz de energia elétrica (Eixo 2).

A partir da definição dos eixos é necessário definir as palavras chaves para cada um dos eixos da pesquisa. Na sequência os operadores de truncamento, no caso do presente trabalho são o idioma de publicação do artigo, o ano de publicação e o tipo de publicação. Também os operadores booleanos, “AND” e “OR”, (traduzindo do inglês: “E” e “OU”).

A Tabela 4 apresenta de forma organizada as premissas utilizadas para a realização da pesquisa.

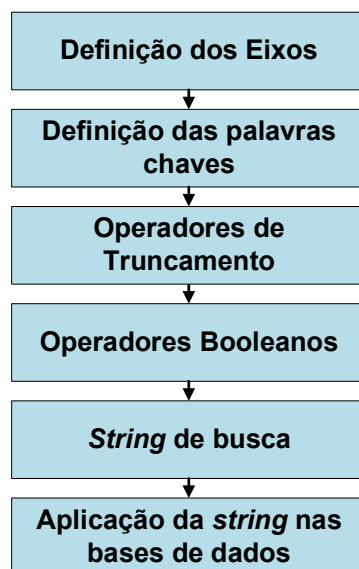


Figura 10: Procedimento para a busca dos artigos nas bases de pesquisa.

Tabela 4: Resumo das premissas utilizados para a realização da pesquisa.

| | | | |
|----------------------|----------------------|--|---|
| Palavra chave | Eixo 1 | <i>Multiobjective Optimization; multi-criteria decision analysis; multicriteria decision analysis; Multicriteria decision aiding; Multicriteria decision aid; Multiple criteria decision analysis; Multicriteria decision making; Multi-criteria decision making; Multi criteria decision making; Multi criteria decision analysis; MCDA; MCDM; multi-criteria decision support methods.</i> | |
| | Eixo 2 | <i>Generation expansion planning; Generation expansion; Energy Planning; Power generation expansion planning; Energy management.</i> | |
| Operador | Booleano | AND | Aplicado entre os eixos. |
| | | OR | Aplicado entre palavras chaves do mesmo eixo. |
| Truncamento | Idioma do artigo: | Inglês. | |
| | Ano de publicação: | 2006 até 2017. | |
| | Tipos de publicação: | Artigos de periódicos. | |

Fonte: Autoria Própria.

Considerando a expressão $PCE.x_1, PCE.x_2, \dots, PCE.x_{e.x}$, em que x é o índice do eixo (1 para Eixo 1 e 2 para Eixo 2), PCE é a palavra chave variando de 1 até o índice $e.x$. A definição do conjunto de palavras chaves para o Eixo 1 (CjPCE1), com o operador booleano adequado, pode ser expressa como sendo: $C_jPCE1 = PCE.1_1 OR PCE.1_2 OR PCE.1_3 OR \dots OR PCE.1_{e.1}$. E para o Eixo 2, (CjPCE2), como sendo: $C_jPCE2 = PCE.2_1 OR PCE.2_2 OR PCE.2_3 OR \dots OR PCE.2_{e.2}$. Para a definição da *string* é necessário agrupar os eixos com o operador booleano adequado para essa situação, como nosso requisito nessa etapa é encontrar os artigos publicados que possuem palavras chaves dos dois eixos é necessário a atribuição do operado booleano *AND*. Sendo assim a *string*¹ resultante é da forma $string = C_jPCE1 AND C_jPCE2$.

3.2.2 META-ANÁLISE

O procedimento de meta-análise consiste em um meio de associar os resultados encontrados na revisão sistemática da literatura, aplicando métodos estatísticos. Este tipo de método torna mais clara a apresentação dos resultados da revisão, podendo comprovar que alguns fatores são estritamente consideráveis e importantes (MARDANI *et al.*, 2016a).

As informações que serão tratadas por meio do processo da meta-análise, conforme apresentado na Figura 9, o número de artigos publicados por ano, por técnica, por revista (periódico), por região do estudo de caso (continente de aplicação, quando disponível) bem como o tratamento das informações referentes a área de aplicação.

A área de aplicação dos estudos foi subdividida em 6 subáreas, observando o enfoque dado pelo autor. Sendo elas: escolha de local; avaliação de cenários; planejamento energético; análise de tecnologia; priorização de FER; e avaliação de sustentabilidade.

3.2.3 DISCUSSÃO DE PORTFÓLIO

O processo da discussão de portfólio consiste em realizar amostragem estratificada de 15% dos trabalhos selecionados com o intuito de promover uma discussão referente aos procedimentos utilizados pelos autores para modelar os trabalhos e quais foram as resultados obtidos. Ainda, promover uma análise sobre possíveis

¹Conjunto de caracteres definidos, utilizados para representar palavras.

lacunas observadas bem como a sugestão de contorno para tais inconsistência.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na formação da *string* não foram incluídos os operadores de truncamento, uma vez que eles são filtros das bases de dados, sendo necessário apenas marcar as opções desejadas. Sendo assim a *string* de pesquisa, conforme demonstrada na seção 3.2.1.1, na qual são definidas as premissas da pesquisa, é então aplicada nas bases de dados. O resultado da busca em cada uma das bases de dados com a marcação (cada base de pesquisa possui métodos distintos para essa etapa) adequada dos operadores de truncamento é apresentada na Tabela 5.

Tabela 5: Resultado da busca nas bases de pesquisa com a *string*.

| Base | SCDR | SCOP | IEEE | WEBS |
|-------------------|------|------|------|------|
| Número de Artigos | 495 | 4613 | 192 | 174 |

Fonte: Autoria Própria.

Após realizar a transferência dos arquivos para o *software* Mendeley, foi possível remover os arquivos duplicados. Do total de 5474 arquivos transferidos, foram removidos 443 artigos duplicados. O próximo procedimento a ser realizado, conforme apresentado no fluxograma do processo, Figura 9, é a exclusão de artigo por meio da leitura dos títulos, com esse procedimento o número de artigos excluídos foi de 4468, restando 563 artigos. Seguindo fluxograma do processo a próximo etapa é realizar a leitura dos resumos dos 563 artigos, o que resultou na exclusão de 406 artigos. No processo de leitura completa foram excluídos 14 artigos por não se enquadrarem no objeto da pesquisa e incluído 1 artigo por meio da referência dos selecionados. Restando assim para a fase de elegibilidade 144 artigos.

Todos os artigos, com o autor, ano de publicação e periódico estão listados no Apêndice A.

4.1 META-ANÁLISE

Nesta seção serão apresentados os resultados referentes à meta-análise, apresentando a distribuição dos artigos por técnica, área de aplicação, ano de publicação, periódico e região do estudo de caso.

4.1.1 DISTRIBUIÇÃO DOS ARTIGOS POR TÉCNICA APLICADA

A Tabela 6 apresenta o número de ocorrências das técnicas de apoio multicritério à decisão bem como a porcentagem que representam em relação ao universo de artigos analisados (144 artigos). Devido ao fato de que alguns artigos utilizam mais de uma técnica, como no trabalho realizado por Villacreses *et al.* (2017) em que foram utilizadas cinco técnicas de apoio multicritério à decisão visando a seleção da melhor localização para um parque eólico no Equador.

Conforme apresentado pela Tabela 6 e afirmado pela literatura, Mardani *et al.* (2016a), Pohekar e Ramachandran (2004), Taha e Daim (2013), a técnica AHP é a técnica mais utilizada nos estudos referentes ao processo de tomada de decisão, sendo utilizada em 52,1% dos artigos analisados. Para a aplicação do processo de tomada de decisão no âmbito do planejamento elétrico da expansão o segundo método mais utilizado é o TOPSIS, sendo utilizado em 12,5% dos estudos. O método PROMETHEE ocupa o terceiro lugar sendo utilizado em 10,4% dos estudos.

Fatores como a incompletude de informações no momento de avaliar os critérios qualitativos e quantitativos para o cálculo do peso dos critérios, são motivos que levam ao grande número de estudos que utilizam a técnica AHP e AHP difusa no processo de planejamento da expansão da matriz de energia elétrica (KAYA; KAHRAMAN, 2011).

Outro fator relacionado com o maior número de aplicações tanto do método AHP quanto TOPSIS, é a facilidade da aplicação, vez que o processo todo pode ser resolvido utilizando apenas planilhas, o que na atualidade existe elevado número de *softwares* destinados a esse fim (CHOUDHARY; SHANKAR, 2012).

Ainda, a maioria dos métodos AMD necessitam de informação de pesos relativos entre critérios, os quais em alguns casos são estipulados diretamente pelo tomador de decisão, fato que não é indicado pela literatura, porém em outros é aplicado o método AHP. Dessa maneira, o método é muito utilizado em conjunto com outros métodos nos problemas de tomada de decisão (KAYA; KAHRAMAN, 2011; CHOUDHARY;

Tabela 6: Resumo das técnicas de apoio multicritério a decisão.

| Técnica | Ocorrência | % em relação ao total |
|-----------------------------|-------------------|------------------------------|
| AHP e Fuzzy AHP | 75 | 52,1% |
| TOPSIS e Fuzzy TOPSIS | 18 | 12,5% |
| PROMETHEE e Fuzzy PROMETHEE | 15 | 10,4% |
| ANP e Fuzzy ANP | 13 | 9,0% |
| ELECTRE e Fuzzy ELECTRE | 13 | 9,0% |
| AMD | 12 | 7,6% |
| AMC | 10 | 6,9% |
| VIKOR e Fuzzy VIKOR | 9 | 6,3% |
| DEMATEL | 7 | 4,9% |
| OWA | 4 | 2,8% |
| MACBETH | 2 | 1,4% |
| MAUT | 2 | 1,4% |
| ARAS | 2 | 1,4% |
| APIS | 1 | 0,7% |
| MVP | 1 | 0,7% |
| OCKA | 1 | 0,7% |
| RUBIS | 1 | 0,7% |
| SAW | 1 | 0,7% |
| SWARA | 1 | 0,7% |
| WASPAS | 1 | 0,7% |
| WLC | 1 | 0,7% |

Fonte: Autoria Própria.

SHANKAR, 2012; SÁNCHEZ-LOZANO *et al.*, 2016; VILLACRESES *et al.*, 2017).

No trabalho realizado por Choudhary e Shankar (2012), é utilizado o método AHP para calcular os pesos dos critérios e na sequência utilizado o método TOPSIS para a avaliação da melhor localização de uma usina termoelétrica na Índia.

No caso do trabalho realizado por Kaya e Kahraman (2011) é aplicado o método AHP para calcular o peso dos critérios que serão utilizados em uma nova metodologia, baseada em lógica Fuzzy e no método tradicional TOPSIS, para avaliação de cenários do planejamento da expansão da matriz de energia elétrica.

4.1.2 DISTRIBUIÇÃO DOS ARTIGOS POR ÁREA DE APLICAÇÃO

Baseado nos objetivos deste estudo, os trabalhos foram classificados em seis grandes áreas principais, sendo elas: Escolha de local; Avaliação de cenários;

Análise de tecnologia; Planejamento Energético; Avaliação da Sustentabilidade; e Priorização de FER (fontes de energia renováveis). A distribuição dos trabalhos dentro das áreas de aplicação supramencionadas são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Distribuição dos artigos por aplicação.

| Aplicação | Ocorrência | % |
|-------------------------------|-------------------|-------------|
| Escolha de local | 42 | 28% |
| Avaliação de cenários | 35 | 24,3% |
| Planejamento Energético | 26 | 18,1% |
| Análise de tecnologia | 21 | 14,6% |
| Priorização de FER | 14 | 9,7% |
| Avaliação da Sustentabilidade | 6 | 4,2% |
| Total | 144 | 100% |

Fonte: Autoria Própria.

Há trabalhos que agrupam mais de uma área de aplicação, dessa forma eles foram classificados de acordo com a maior ênfase dada pelos autores no momento da descrição dos trabalhos. Por exemplo, o trabalho realizado por Kahraman e Kaya (2010) em que são aplicadas as técnicas AHP e VIKOR para avaliar os cenários e escolher a melhor fonte de geração de energia elétrica para a cidade de Istambul na Turquia. Os resultados indicam que a fonte eólica é a mais indicada, então na sequência os autores realizam o processo de encontrar o melhor local para a instalação.

Também o estudo realizado por Büyüközkan e Karabulut (2017), no qual realizam a seleção de projetos com uma perspectiva da sustentabilidade, porém o foco principal do trabalho é na seleção da alternativa, sendo assim é incluído na área de aplicação de avaliação de cenários, enquanto a seleção de priorização de FER estão incluídos os estudos em que os métodos são aplicados para promover políticas de desenvolvimento de apenas uma tecnologia.

4.1.2.1 ESCOLHA DE LOCAL

Conforme afirmado por Polatidis *et al.* (2006), devido as características inerentes às fontes de energias renováveis é necessário utilizar técnicas para auxiliar no momento da avaliação do local do projeto bem como a melhor tecnologia para

aproveitar ao máximo os recursos renováveis disponíveis, levando em consideração os critérios ambientais, sociais e econômicos. Com a realização do presente trabalho foi possível identificar que do total de trabalhos encontrados, 28% realizam a utilização dos métodos AMD como uma ferramenta para auxiliar na escolha da melhor localização da planta de geração.

A área de aplicação “Escolha do local” pode ser dividida conforme o tipo de tecnologia. Quando o método foi aplicado para escolher a melhor localização física da instalação, levando em consideração vários aspectos (ambientais, econômicos, sociais, tecnológicos, entre outros). A distribuição das fontes de geração são apresentadas na Figura 11.

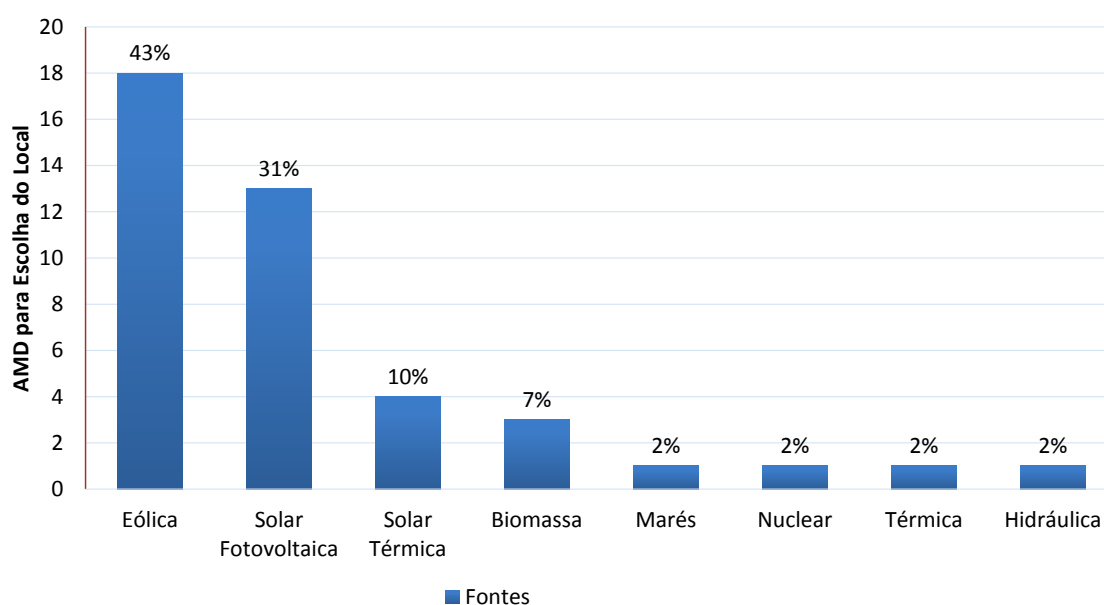


Figura 11: Distribuição das fontes de geração dentro da área de Escolha do Local.
Fonte: Autoria própria.

A avaliação da melhor localização das fontes de geração proveniente da energia eólica e da energia solar (fotovoltaica e térmica somadas) representam cada uma 12,5% dos estudos que utilizam as técnicas de apoio multicritério à decisão.

Como apresentado no trabalho realizado por Maslov *et al.* (2014), os autores utilizam técnicas AMD para a seleção da melhor localização para a instalação de uma fazenda produtora de energia elétrica por meio das correntes marítimas no mar da França. Os autores utilizam critérios sociais para comparar as regiões, por exemplo, as atividades pesqueiras das regiões, observando também qual é o método de pesca utilizado, redes de pesca profunda, redes de superfície, etc.

Para Villacreses *et al.* (2017) os métodos AMD foram a solução para a melhor localização de uma fazenda produtora de energia eólica, os autores utilizam critérios de cobertura vegetal, como critérios restritivos, durante suas análises.

O problema de seleção de usinas termoelétricas é menos discutido na literatura, apesar de ser uma decisão estratégica importante. A escolha da localização de termoelétricas muitas vezes é realizada da forma tradicional (mais próximo da fonte que servirá como combustível ou mais próxima à uma fonte de água para o condensador de vapor), ou seja, leva em consideração apenas custo e disponibilidade dos combustíveis, bem como interesses políticos (CHOU DHARY; SHANKAR, 2012).

Além disso, os interesses do governo e pressão de investidores influenciam o processo de decidir a localização, o que em muitos casos resulta em altos níveis operacionais e de transmissão, baixa produtividade e elevado impacto ambiental e social (TALINLI *et al.*, 2010).

Dessa forma é visível que o processo de tomada de decisão referente a usinas térmicas não é realizado considerando uma abordagem holística e sistemática.

Os elevados números da aplicação dos métodos AMD para a localização de usinas eólicas e solares fotovoltaicas podem ser entendidos devido ao fato de que a avaliação do local desse modelos de usina requerem especificações técnicas que implicam significativamente na capacidade de produção de energia elétrica desses tipos de fontes, tais como a velocidade do vento, altitude, relevo (declive) e níveis de irradiação, em que mesmo havendo pressões políticas e de investidores não pode ser tão distante da localização ideal.

4.1.2.2 AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS

De acordo com os resultados do presente trabalho, em 25,6% dos artigos selecionados as técnicas AMD são utilizadas para a avaliação e seleção da melhor alternativa de geração de energia elétrica, para isso são utilizadas diversas técnicas para o auxílio à tomada de decisão (KAYA; KAHRAMAN, 2010; ERTAY *et al.*, 2013; ALIPOUR *et al.*, 2017; STRANTZALI; ARAVOSSIS, 2016).

O estudo realizado por Kaya e Kahraman (2011) tem como objetivo propor uma nova metodologia baseado no método Fuzzy TOPSIS para a avaliação de cenários frente a quatro critérios (técnico, ambiental, social e tecnológico) e nove subcritérios (eficiência, eficiência racional, custo de investimento, O&M, emissões de poluentes, uso da terra, aceitação social e criação de empregos). São avaliados

sete cenários de geração de energia elétrica (convencional, nuclear, solar, eólica, hidráulica, biomassa e central de ciclo combinado).

No caso do trabalho realizado por Alipour *et al.* (2017), os autores avaliam as fontes de energia que se enquadram melhor ao cenário energético do Irã, para o processo da avaliação utilizam a técnicas AMD híbridas, (Fuzzy AHP juntamente com o Grau de Crença Cumulativo). Os autores utilizam cinco critérios principais, sendo eles: ambiental; econômico; social; técnico; e ainda incluíram critérios políticos, tais como a compatibilidade com os objetivos da política energética nacional e dependência estrangeira.

O processo de planejamento da expansão da geração de energia elétrica visando a escolha de uma única fonte para a geração de eletricidade é considerado complexo, uma vez que envolve muitos critérios e necessita de uma análise de sensibilidade para avaliar quais os critérios que mais afetam o processo (DIAKOULAKI; KARANGELIS, 2007; WANG *et al.*, 2009). E a complexidade aumenta quando o processo consiste em avaliar as cenários em que cada fonte contribui com uma parcela na matriz de energia, visando garantir o fornecimento de energia elétrica com confiabilidade (STRANTZALI *et al.*, 2017).

A avaliação de cenários buscando a seleção de projetos com distintas fontes para a geração de energia elétrica foi proposto por Strantzali *et al.* (2017). Os autores realizam a avaliação de cenários para uma ilha isolada na Grécia. São utilizados seis cenários (30% de penetração de energia eólica; 50% de penetração de energia eólica; substituição dos geradores antigos por modelos novos a gás natural; substituição dos motores antigos e 30% de energia eólica; nova usina a gás natural; e nova usina mais 30% de energia eólica) em que são considerados os valores totais de demanda da ilha e mais um caso base (manter o sistema como está, apenas substituindo o combustível com alto teor de enxofre pelo com baixo teor de enxofre).

Existem trabalhos em que a abordagem para a seleção de cenários é realizada visando apenas os sistemas renováveis de geração de energia elétrica. Essa foi uma das premissas utilizada por Şengül *et al.* (2015), em que utilizam o método TOPSIS para auxiliar na tomada de decisão de qual fonte renovável de geração de energia elétrica o governo da Turquia deve investir. Os autores utilizam para a modelagem os 4 critérios base do desenvolvimento sustentável (ambiental, econômico, social e técnico) subdivididos em 24 subcritérios. O resultado do método AMD indica a ordem de prioridade de investimentos, em que as centrais hidrelétricas são as fontes mais adequadas, seguida das centrais geotérmicas e parques eólicos.

Do mesmo modo o estudo realizado por Büyüközkan e Karabulut (2017), em que os autores avaliam 4 possíveis cenários para a geração de energia elétrica na Turquia (eólica, hidráulica, biogás e gás natural). Utilizam o método AHP para a definição dos pesos dos critérios e o método VIKOR para classificar os cenários frente a 3 dimensões principais (ambiental, econômica e social), divididas em 12 critérios e 37 subcritérios. Dentre os trabalhos avaliados, é o que mais utiliza critérios e subcritérios para a seleção de uma alternativa.

4.1.2.3 PLANEJAMENTO ENERGÉTICO

O planejamento energético é responsável por 18,1% dos trabalhos. São incluídos nessas área de aplicação os artigos que tem como objetivo auxiliar na políticas eletro-energéticas dos países, apresentando quais as fontes de geração seriam mais adequadas sob uma perspectiva política-econômica.

No estudo realizado por Singh e Nachtnebel (2016) foi utilizado o processo de hierarquia analítica para analisar a implementação de usinas hidrelétricas no Nepal nas últimas décadas e elaborar recomendações para o tamanho (capacidade de geração) das usinas mais adequadas para o país nos próximos anos. De acordo com os resultados dos autores, nas décadas passadas, as hidrelétricas de pequeno e médio porte (menores que 1 GW) eram preferíveis, sob uma perspectiva política-econômica. Porém, com as análises de sensibilidade realizadas, espera-se para o futuro o aumento pelo interesse pelas usinas de grande porte (maiores que 1 GW). Os resultados da trabalho apresentam, ainda, que os critérios mais importantes são os econômicos e técnicos.

Shmelev e Bergh (2016) realizaram a investigação dos cenários preferíveis para o planejamento energético da eletricidade na Inglaterra, visando propor recomendações de investimento sob a perspectiva política, econômica e social. A aplicação do método APIS revelou que o gás natural é prioridade sob a perspectiva de minimização do custo; a nuclear é preferível visando a diminuição das emissões de poluentes, uso da terra e da água, e a solar é preferível sob a perspectiva de maximizar a criação de empregos.

Para a aplicação no México, conforme resultados do trabalho publicado por Jano-Ito e Crawford-Brown (2017), os cenários preferíveis para a definição das políticas do planejamento eletro-energético são a utilização das fontes geotérmicas, seguida das usinas eólicas, solar fotovoltaica e solar térmica. Devido ao fato de que

seriam as fontes de geração de energia elétrica com maiores valores de utilidade multi-atributos. Porém esses resultados, segundo os autores, só foram possíveis devido às características dos especialistas e dos investidores, os quais mostraram baixa aversão aos riscos dessas fontes de geração de energia elétrica.

Há estudos que realizam a escolha do local, porém o objetivo não é para a instalação imediata da fonte de geração e sim encontrar os locais adequados para que possam ser elaboradas recomendações para o planejamento eletro-energético apropriado para aquele cenário. O estudo realizado por Vafaeipour *et al.* (2014) realiza essa abordagem ao avaliar 25 possíveis locais frente a 4 critérios (ambiental, econômico, risco e social) subdivididos em 14 subcritérios.

4.1.2.4 ANÁLISE DE TECNOLOGIAS

Os estudos referentes a análise de tecnologias representam 9,7% dos artigos totais publicados.

A grande aplicabilidade dos métodos AMD, também é útil no momento da análise das tecnologias, como, por exemplo, no estudo publicado por Lee *et al.* (2012), no qual foi utilizado o método ANP juntamente com os princípios da teoria Fuzzy para selecionar qual é o melhor modelo de turbina eólica para a China. Os autores definem 4 critérios principais, características da turbina, aspectos econômicos, questões ambientais e critérios técnicos. De acordo com os resultados obtidos os autores afirmam que o retorno financeiro é o fator mais importante na seleção do modelo de turbina, uma vez que o critério do valor presente líquido e do custo de capital registraram os maiores valores de peso, de acordo com as informações dos especialistas e investidores. Sob a perspectiva das características da máquina a eficiência no momento da conversão e a facilidade de operação são os fatores mais importantes.

As questões que envolvem os métodos AMD quando a seleção dos critérios influenciam diretamente nos resultados. Um estudo com o mesmo objetivo do realizado por Lee *et al.* (2012) foi proposto por Onar *et al.* (2015), os autores utilizaram 8 critérios (confiabilidade, características técnicas, desempenho, custo, disponibilidade, manutenção, cooperação e domesticidade) para avaliar e selecionar o melhor entre 4 modelos de turbinas eólicas para a Turquia. Entretanto, os resultados foram distintos quanto aos fatores que mais influenciam no processo da escolha da turbina eólica. Para Onar *et al.* (2015) os critérios de domesticidade possuem maior peso, o que de certa maneira acarreta na priorização dos modelos de turbinas eólicas desenvolvidos

no país.

4.1.2.5 PRIORIZAÇÃO DE FONTES DE ENERGIAS RENOVÁVEIS (FER)

Na área de aplicação de priorização de fontes de energias renováveis, foram atribuídos os estudos que tem como objetivo identificar as barreiras que impedem o desenvolvimento e utilização das FER e que visam priorizar uma tipo de geração frente às demais. Foram encontrados 6 artigos na literatura, representando 4,2% do total.

Um exemplo de caso em que ocorre a utilização da técnica AMD para identificar e avaliar as barreiras para o desenvolvimento das FER, é no realizado por Sindhu *et al.* (2016), no qual é utilizado o método AHP para priorizar e encontrar a influência que cada uma das 36 barreiras identificadas tem sobre o desenvolvimento da energia solar na Índia. De acordo com os resultados da aplicação do método identificou-se que as barreiras políticas e regulatórias são as que mais dificultam o desenvolvimento da indústria solar indiana.

Para a priorização de fontes renováveis na Tailândia os pesquisadores Supriyasilp *et al.* (2009) utilizam os métodos AMD para estudar o potencial de geração de energia hidrelétrica de 64 possíveis locais de construção na Tailândia. Os locais são avaliados frente aos critérios de geração de eletricidade, engenharia e economia, socioeconômico, ambiente e envolvimento das partes interessadas. Ainda, os critérios são subdivididos em 30 subcritérios.

4.1.2.6 AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE

Os trabalhos que tem como principal objetivo avaliar a sustentabilidade dos projetos para auxiliar na definição de quais as fontes de geração de energia elétrica que deverão ser priorizadas são classificados na categoria de avaliação da sustentabilidade.

Avaliar a sustentabilidade das alternativas frente a cenários distintos para na sequência escolher as mais viáveis foi o estudo realizado por Doukas *et al.* (2006). Os autores tem como objetivo propor a avaliação da sustentabilidade de 10 fontes renováveis de geração de energia elétrica na Grécia, frente aos critérios básicos do desenvolvimento sustentável. Por meio do método PROMETHEE os autores identificaram que a alternativa de combustão de leito fluidizado obteve melhor resultado, seguido da biomassa. Os leitos fluidizados permitem a combustão de combustíveis

sólidos com alto teor de cinza, ou seja, de baixa qualidade e também biomassa com alto teor de umidade (ÁVILA, 2008). O motivo que contribuiu para esse resultado é que a Grécia é um país altamente dependente de lignite, carvão com baixo poder calorífico (KAVOURIDIS, 2008).

O trabalho realizado por Klein e Whalley (2015) realiza a comparação da sustentabilidade de 13 opções de renováveis e não renováveis de geração de energia elétrica nos Estados Unidos, avaliados em 8 critérios diretamente relacionadas com a sustentabilidade (custo de energia, emissão de gases de efeito estufa durante o ciclo de vida, emissão de poluentes atmosféricos, uso de terra e água, acidentes relacionados, criação de empregos e fator de capacidade anual). Os resultados indicam que as fontes geotérmicas são as preferidas em relação aos critérios técnicos e as usinas hidrelétricas nos critérios econômicos.

4.1.3 DISTRIBUIÇÃO DOS ARTIGOS POR ANO DE PUBLICAÇÃO

Nesta seção é apresentado as informações sobre a distribuição dos artigos por ano de publicação, Tabela 8, e a frequência acumulada, Figura 12. Pode-se perceber que em 2006 apenas 3 artigos utilizando os métodos de apoio multicritério a decisão foram publicados, em 2007 dobrou o número de publicações. Existem oscilações de um ano para o outro, porém, de uma maneira geral esse número está aumentando consideravelmente. Até a data da pesquisa, a qual foi realizada na metade do ano de 2017, já haviam 32 artigos publicados referentes a utilização dos métodos multicritérios no planejamento da expansão da matriz de energia hidrelétrica, já superando o número de artigos publicados no ano de 2016 inteiro.

O aumento do número de estudos que tem utilizado os métodos AMD podem ser explicados devido a inclusão dos conceitos de sustentabilidade nos cenários de planejamento elétrico. O que tem acarretado na substituição dos combustíveis fósseis por combustíveis mais sustentáveis (MIRAKYAN; GUIO, 2015). Bem como as preocupações globais com as mudanças climáticas (POLICY *et al.*, 2008). O que leva a estudos como o realizado para a avaliação dos cenários de uma ilha na Grécia, em que a melhor solução frente aos critérios do desenvolvimento sustentável (ambiental, econômico, social e tecnológico) foi a substituição da usina existente por uma nova a gás natural com potência reduzida e penetração de 30% de energia eólica (STRANTZALI *et al.*, 2017).

Tabela 8: Distribuição dos artigos por ano de publicação.

| Ano | Ocorrência | % |
|--------------|------------|---------------|
| 2017 | 32 | 22,2% |
| 2016 | 30 | 20,8% |
| 2015 | 15 | 10,4% |
| 2014 | 16 | 11,1% |
| 2013 | 12 | 8,3% |
| 2012 | 6 | 4,2% |
| 2011 | 8 | 5,6% |
| 2010 | 6 | 4,2% |
| 2009 | 8 | 5,6% |
| 2008 | 2 | 1,4% |
| 2007 | 6 | 4,2% |
| 2006 | 3 | 2,1% |
| Total | 144 | 100,0% |

Fonte: Autoria Própria.

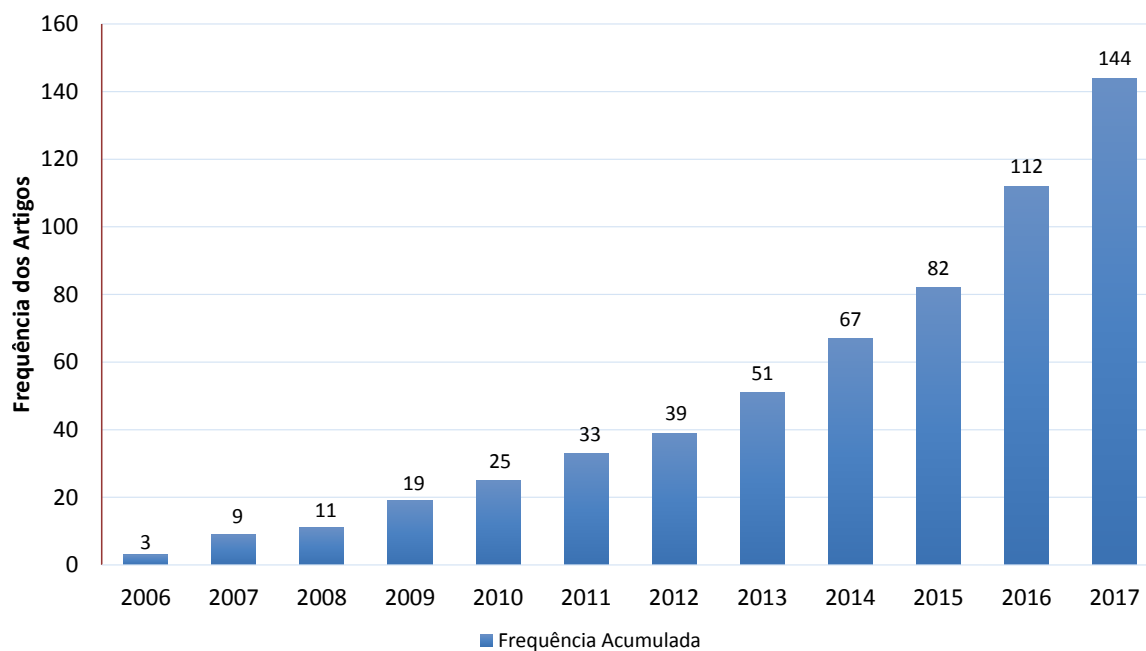


Figura 12: Distribuição dos artigos por ano de publicação, ocorrência acumulativa.
 Fonte: Autoria própria.

4.1.4 DISTRIBUIÇÃO DOS ARTIGOS POR PERIÓDICO

Nesta seção são apresentadas as informações a respeito dos periódicos que foram utilizados para a publicação dos artigos, com número de publicações e porcentagem representativa.

Com a utilização das bases de dados e dos motores de busca alcançou-se um número de 61 revistas com publicação que realizaram a utilização de métodos AMD aplicadas no planejamento da expansão da matriz de energia elétrica.

Destaque para a revista que mais contribuiu para a divulgação da aplicabilidade dos métodos AMD no planejamento da expansão a *Renewable and Sustainable Energy Reviews* com um total de 23 publicações, representando 16% dos artigos. Em segundo lugar a revista *Energy* com 20 publicações, 13,9%, e as revistas *Energy Policy* e *Renewable Energy* que ficaram com a quarta colocação com 12 artigos publicados cada uma.

A Tabela 9 apresenta a distribuição dos periódicos em que foram publicados os artigos selecionados no processo de revisão sistemática da literatura.

Tabela 9: Distribuição dos artigos por revista de publicação.

| Periódico | Ocorrência | % |
|---|-------------------|----------|
| <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> | 23 | 16,0% |
| <i>Energy</i> | 20 | 13,9% |
| <i>Energy Policy</i> | 12 | 8,3% |
| <i>Renewable Energy</i> | 12 | 8,3% |
| <i>Energy Conversion and Management</i> | 5 | 3,5% |
| <i>Applied Energy</i> | 4 | 2,8% |
| <i>Energies</i> | 3 | 2,1% |
| <i>Energy Sources</i> | 3 | 2,1% |
| <i>International Journal of Sustainable Energy</i> | 3 | 2,1% |
| <i>Energy for Sustainable Development</i> | 2 | 1,4% |
| <i>International Journal of Multicriteria Decision Making</i> | 2 | 1,4% |
| <i>ISPRS International Journal of Geo-Information</i> | 2 | 1,4% |
| <i>Journal of Cleaner Production</i> | 2 | 1,4% |
| <i>Journal of Environmental Management</i> | 2 | 1,4% |

(Continua na próxima página...)

Tabela 9 – ...continuação

| Periódico | Ocorrência | % |
|--|-------------------|---------------|
| <i>Sustainability</i> | 2 | 1,4% |
| <i>Technological and Economic Development of Economy</i> | 2 | 1,4% |
| Outras | 45 | 31,3% |
| Total | 144 | 100,0% |

4.1.5 DISTRIBUIÇÃO DOS ARTIGOS POR REGIÃO DO ESTUDO DE CASO

A distribuição dos artigos com base na na região do estudo de caso, conforme indicado na Tabela 10, permite classificar as regiões que mais realizaram trabalhos utilizando o método AMD, no contexto do planejamento da expansão da matriz de energia elétrica.

A Europa foi o continente que mais publicou estudos, com 67 publicações, representando 46,5% dos casos. Em segundo lugar a Ásia com 39 estudos e 27% de representação. Dentre o número de publicações no continente europeu, 20 deles foram com aplicações para a Turquia (13,9% do total geral), 14 para aplicações na Grécia (9,7%) e 12 na Espanha (8,3%). O quarto, quinto e sexto lugar, ficam para países do continente asiático, China, Índia e Irã com 9 publicações cada (6,3%).

Os estudos em que são realizadas revisões ou aplicações das técnicas sem um país, região ou cidade específica, ou seja, casos hipotéticos, foram classificados como “Não se enquadra”.

Um dos motivos que podem ser considerados para o elevado número de publicações por parte da Turquia, é devido ao fato do país ser extensivamente dependente das importações de energia, mesmo possuindo localizações consideradas excelentes para a geração de energia elétrica por meio de fontes renováveis (KAYA; KAHRAMAN, 2010). Também devido ao fato de que a demanda de energia elétrica no país aumentou consideravelmente nas últimas décadas (ERTAY *et al.*, 2013).

Tabela 10: Distribuição dos artigos por região do estudo de caso.

| Continente | Ocorrência | % |
|----------------------|-------------------|--------------|
| Europa | 67 | 46,5% |
| Ásia | 39 | 27,1% |
| América do Norte | 7 | 4,9% |
| América do Sul | 6 | 4,2% |
| África | 5 | 3,5% |
| América Central | 1 | 0,7% |
| Total parcial | 125 | 86,8% |
| Não se enquadra | 19 | 13,2% |
| TOTAL | 144 | 100% |

Fonte: Autoria Própria.

4.2 DISCUSSÃO DE PORTFÓLIO

Dentre os 144 artigos selecionados no processo de revisão sistemática, optou-se por realizar uma discussão mais complexa e inter-relacionada de uma amostra de 15% dos trabalhos. Para a seleção dos artigos considerou-se a metodologia de amostragem estratificada em relação ao ano de publicação, em que quanto mais artigos publicados em determinado ano, maior é o número de artigos selecionados para a discussão. A Tabela 11 apresenta os dados sintetizados referente as propostas, modelagem utilizada e resultados dos artigos selecionados na amostragem, bem como algumas observações e contribuições a respeito de questões técnicas da forma como a análise multicritério foi delineada.

Diferentemente da maioria dos trabalhos estudados, Alipour *et al.* (2017) utilizam subcritérios econômicos, até então não observado na literatura, como a oportunidade de exportação, tanto da energia primária dispensada pela nova tecnologia selecionada quanto da exportação de energia elétrica. Por meio dos métodos AMD foi proposto a avaliação de cenários para a geração de energia elétrica no Irã. Os

resultados indicam que a melhor alternativa para a geração de energia elétrica para o atual quadro energético do país são as fontes geradoras de eletricidade que utilizam o gás natural como combustível. Os fatores que mais influenciaram no resultado da análise realizada pelos autores são os econômicos, uma vez que a dependência do governo pela exportação de combustíveis fósseis ainda é elevada.

No estudo realizado por Vafaeipour *et al.* (2014), os autores deixam de considerar critérios técnicos muito importantes para a avaliação da fonte de energia solar, como o relevo, critério esses que para os autores Villacreses *et al.* (2017), Sánchez-Lozano *et al.* (2016) são considerados restritivos nas análises.

Şengül *et al.* (2015) utiliza a literatura para definir os critérios e uma abordagem mais simples para o cálculo do peso dos critérios. Em que acabam definindo os critérios mais importantes como sendo a produção de energia elétrica e o uso da terra. Fato esse que pode prejudicar outras fontes de geração, uma vez que em alguns casos esses dois critérios são diretamente proporcionais. Por exemplo, a energia eólica frente a geotérmica, para produzir a mesma quantidade de energia elétrica é necessário uma área muito maior para o parque eólico. As questões que envolvem critérios proporcionais, como os mencionados, principalmente, nos casos em que são critérios de opostos (benefício e custo), ou seja, deve-se maximizar o benefício (produção de energia elétrica) e minimizar o custo (uso da terra), devem ser tratados com maior cuidado, por isso a sugestão de utilizar técnicas que permitem os *trade-offs* entre os critérios, por exemplo, o AHP e o ANP (KAYA; KAHRAMAN, 2010).

Assim como Şengül *et al.* (2015), os trabalhos realizados pelos autores Chatzimouratidis e Pilavachi (2008), Sindhu *et al.* (2016), Shmelev e Bergh (2016) também utilizam a literatura para definir os critérios e os pesos dos critérios, ou seja, nesses estudos também pode ter havido descon siderações de critérios locais restritivos. Outra questão referente a seleção de critérios na literatura é a possibilidade de ser influenciado e incluir na análise critérios os quais não possuem total aplicabilidade ao país em estudo.

Nixon *et al.* (2010) utiliza o método AHP para a análise de qual o melhor coletor de concentração para uma usina solar térmica no noroeste da Índia, em que os seus resultados indicam que a lente de Fresnel é a mais indicada, porém, o próprio autor cita que a sua utilização não é comum em usinas solar térmica e é comumente utilizada na solar fotovoltaica. Ao considerar que o autor realizou o levantamento dos critérios e pesos por meio da revisão da literatura e avaliações dos especialistas, implica que o grande peso atribuído a esse modelo de coletor é oriundo das opiniões

dos especialistas. O que representa o tamanho da influência dos especialistas e dos tomadores de decisão no momento da realização da análise multicritério.

Trabalhos como o realizado por Strantzali *et al.* (2017) expressam resultados muito mais aprofundados do que apenas a identificação da melhor combinação de alternativas para a matriz de energia elétrica de uma ilha na Grécia. Tais resultados estão relacionados aos benefícios futuros que a nova fonte selecionada promoverá. A escolha pelo cenário da nova usina movida a gás natural, irá permitir avanços sociais, uma vez que ao estabelecer o transporte de gás natural para a ilha permitirá a criação de empregos para a construção da infra-estrutura e também permitirá aos habitantes utilizar o combustível para usos domésticos.

Existem estudos em que os próprios pesquisadores atribuem pesos aos critérios, o que pode levar a uma tendência na definição dos valores e/ou não inter-relação entre os dados. Por exemplo, os estudos propostos por Doukas *et al.* (2006), o qual realiza a avaliação da sustentabilidade das energias renováveis, e Supriyasilp *et al.* (2009), no qual é avaliado o potencial hidrelétrico da Tailândia para priorizá-lo, os pesos atribuídos aos critérios são definidos pelos próprios pesquisadores. Para os resultados de Supriyasilp *et al.* (2009) as hidrelétricas com reservatórios são as preferíveis, usinas estas que causam o alagamento de grandes áreas e impactos ambientais consideráveis.

Questões relacionadas as características dos especialistas, investidores e tomadores de decisão no momento da definição dos pesos dos critérios podem mudar completamente um cenário, por exemplo, o trabalho realizado por Jano-Ito e Crawford-Brown (2017), o qual visa avaliar as alternativas para o planejamento eletro energético no México, em que os autores mencionam que os critérios de custo e risco de investimento são considerados baixos quando comparados com a literatura.

Uma questão interessante ao se relacionar os artigos, foi observar que muitos estudos realizam a análise de sensibilidade, como proposto pela literatura, uma vez que dessa maneira pode ser identificado os critérios que são mais importantes (CHOUDHARY; SHANKAR, 2012; VUČIJAK *et al.*, 2013; ONAR *et al.*, 2015; SINGH; NACHTNEBEL, 2016). Strantzali *et al.* (2017) realizam duas análises de sensibilidade, para o estudo de caso da ilha da Grécia, sendo uma referente a demanda de eletricidade e outra referente ao preço dos combustíveis, o que reflete nos resultados para a substituição da antiga usina por uma nova a gás natural, mais compacta, com uma parcela de penetração de energia eólica de 30%.

Tabela 11: Artigos selecionados no processo de amostragem.

| Autor | Ano | Proposta do artigo | Contribuições | Modelagem | Resultados |
|----------------------------------|------|--|---|---|---|
| Villacreses <i>et al.</i> (2017) | 2017 | Selecionar a melhor alternativa energética para a produção de eletricidade no Equador. | <ul style="list-style-type: none"> - Atribuiu a categoria ambiental somente o critério de cobertura vegetal e uso do solo. - Não menciona critérios econômicos, o que fica como sugestão. | <ul style="list-style-type: none"> - AHP para cálculo dos pesos; - OWA, OCKA, VIKOR e TOP-SIS para encontrar a melhor localização. - 15 critérios de avaliação e 6 de restrição. | <ul style="list-style-type: none"> - Áreas adequadas representam 0,4% da área total, localizadas nas regiões Andinas; - Áreas moderadas representam entre 1,1% a 29%; |
| Alipour <i>et al.</i> (2017) | 2017 | Avaliar as prioridades de investimento e implantação de novas fontes de geração de energia elétrica no Irã. | Poderia realizar a utilização de outros métodos AMD para confrontar as análises do modelo de grau de crença cumulativa. | <ul style="list-style-type: none"> - AHP difusa para cálculos dos pesos; - Avalia 7 alternativas; - 5 critérios e 23 subcritérios; | O resultado do estudo indica que a prioridade para o investimento e a implantação de fontes de geração de energia elétrica é para o gás natural. |
| Strantzali <i>et al.</i> (2017) | 2017 | Identificar a melhor combinação de combustível para a geração de energia elétrica em uma ilha isolada da Grécia. | Atribui pesos aos critérios, porém não utiliza técnicas que correlacionem e considerem <i>trade-offs</i> entre os critérios. | <ul style="list-style-type: none"> - PROMETHEE II para a avaliação; - Avalia 7 cenários; - 4 critérios; - Realiza duas análises de sensibilidade. | <ul style="list-style-type: none"> - Os cenários melhores avaliados foram gás natural e combinação gás natural-eólica; - São os sistemas mais eficientes de acordo com os critérios considerados. |
| Büyükoçkan e Karabulut (2017) | 2017 | Propõe um novo método para selecionar projetos de energia elétrica sob uma perspectiva de sustentabilidade. | Não considera interações entre os critérios de avaliação, o que pode ser solucionado com a utilização da técnica ANP. | <ul style="list-style-type: none"> - AHP para cálculo do peso dos critérios; - VIKOR para a classificação; - 3 dimensões principais; - 12 critérios e 37 subcritérios; | <ol style="list-style-type: none"> 1 - Eólica; 2 - Biogás; 3 - Hidráulica; 4 - Solar. |

(Continua na próxima página...)

Tabela 11 – ... continuação

| Autor | Ano | Proposta do artigo | Contribuições | Modelagem | Resultados |
|--|------------|--|--|---|--|
| Jano- lto e Crawford- Brown (2017) | 2017 | Combina as técnicas dois métodos AMD para avaliar alternativas visando o planejamento eletroenergético no México. | As fontes renováveis foram as escolhidas, devido aos baixos pesos atribuídos aos critérios de custo (característica dos especialistas e investidores). | - Utiliza o método MAUT e MVP para encontrar a melhor solução; - Considera 12 alternativas. | A ordem de investimento é: 1 - Geotérmica; 2 - Eólica; 3 - Solar fotovoltaica; 4 - Solar térmica. |
| Sánchez- Lozano <i>et al.</i> (2016) | 2016 | - Propõe identificar os melhores locais para a construção de uma fazenda de energia solar; - Comparar dois métodos de classificações distintas. | - Não utiliza critérios de custo; - Compara os resultados pelo fuso; - Poderia realizar a comparação por meio dos índices de concordância. | - AHP para calcular os pesos dos critérios; - TOPSIS e ELECTRE para avaliar o desempenho das alternativas; - 2 critérios e 10 subcritérios. | - Região litorânea foi considerada superior, devido aos critérios de restrição. - Houve uma semelhança de resultados. |
| Şengül <i>et al.</i> (2015) | 2016 | - Classificar as alternativas de geração de energia elétrica mais renováveis; - Indicar a prioridade de investimento para a Turquia. | Seleciona 24 critérios porém apenas 9 se enquadram na proposta do trabalho. | - TOPSIS para a identificação da alternativa; - 4 critérios e 24 subcritérios; - Entropia de Shannon para o cálculo dos pesos; - Define produção de energia como critério mais importante. | A prioridade de investimentos é: 1 - Centrais hidrelétricas; 2 - Centrais geotérmicas; 3 - Parques eólicos. |
| Singh e Nacht- nebel (2016) | 2016 | Elaborar recomendações para qual faixa de potência de hidrelétricas o governo do Nepal deve investir. | Poderia utilizar o TOPSIS, o qual amplificaria os critérios benéficos e minimizaria os custos. | - AHP para auxiliar na decisão; - 5 critérios e 7 subcritérios; - Realiza uma análise de sensibilidade. | 1 - Hidrelétricas médias; 2 - Hidrelétricas grandes (maiores que 1 GW). |

(Continua na próxima página...)

Tabela 11 – ... *continuação*

| Autor | Ano | Proposta do artigo | Contribuições | Modelagem | Resultados |
|-----------------------------|------------|--|--|---|--|
| Shmelev e Bergh (2016) | 2016 | - Propor recomendações de investimento para a Inglaterra; - Avaliar quais os cenários preferíveis. | Utiliza a literatura para seleção de critérios. | - Markal para definição de cenários; - 5 critérios; - AMD APIS para avaliação. | - Gás natural frente a critérios de custo; - Nuclear frente a critérios ambientais; - Solar frente a critérios sociais. |
| Sindhu <i>et al.</i> (2016) | 2016 | - Priorizar as FER na Índia; - Identificar as barreiras que impedem o desenvolvimento destas fontes. | Utiliza a literatura para seleção de critérios. | - Revisão da literatura para identificar as barreiras; - AHP para análise das barreiras; - 7 critérios e 36 subcritérios. | Barreiras políticas e regulatórias são as que mais dificultam o desenvolvimento da indústria solar na Índia. |
| Onar <i>et al.</i> (2015) | 2015 | - Avaliar os investimentos em energia eólica; - Selecionar a tecnologia de energia eólica apropriada. | Não explica quais foram as premissas que levaram a selecionar esses 4 modelos de turbinas. | - Fuzzy AHP para avaliação; - 4 modelos de turbinas para avaliação; - 8 critérios; - Realiza uma análise de sensibilidade. | Critérios de domesticidade, confiabilidade e custos, são os critérios mais importantes no momento da avaliação do modelo de turbina. |
| Klein e Whalley (2015) | 2015 | Avaliar a sustentabilidade de fontes de geração de energia elétrica operação nos Estados Unidos. | Não considerados limites geográficos para a aplicação das fontes renováveis. | - Utiliza a teoria dos métodos AMD; - Avalia 13 fontes de geração; - 8 critério e 10 subcritérios de sustentabilidade; Avaliados em 10 cenários de preferências. | - Usinas geotérmicas são preferidas frente a critérios técnicos; e - Usinas hidrelétricas frente a critérios econômicos. |

(Continua na próxima página...)

Tabela 11 – ... continuação

| Autor | Ano | Proposta do artigo | Contribuições | Modelagem | Resultados |
|---------------------------------|------------|---|---|---|---|
| Maslov <i>et al.</i> (2014) | 2014 | - Identificação da melhor para uma parque gerador por meio de corrente de marés; - Também sugerir a tecnologia mais adequada frente aos critérios. | - Considera atividades pesqueiras; - O tipo de pesca utilizada; - Não considera sazonalidade da atividade. | - ELECTRE III para classificação inicial; - 3 critérios; - Utiliza algoritmo genético para otimizar produção de energia; - Electre III novamente para classificar as alternativas. | - Como resultado apresenta uma figura com os quadrantes avaliados e a ordem de preferência; - A turbina do modelo HA+yaw é a preferível. |
| Vafaeipour <i>et al.</i> (2014) | 2014 | Identificar os locais para a aplicação de usinas de energia solar no Irã. | Não inclui questões técnicas como relevo na avaliação. | - SWARA para cálculos do peso dos critérios; - WASPAS para avaliar as alternativas; - 25 alternativas; - 4 critérios e 14 subcritérios. | A cidade de Yazd é classificada em primeiro lugar. |
| Vučijak <i>et al.</i> (2013) | 2013 | Avaliar a aplicabilidade do AMD para a localização de uma usina hidrelétrica. | - Não utiliza método específico para a determinação dos pesos; - Realiza o estudo para um caso hipotético. | - VIKOR; - 10 alternativas; - 4 critérios e 23 subcritérios. | O método Vikor é suficientemente capaz de avaliar a melhor alternativa frente a todos os critérios utilizados. |
| Ertay <i>et al.</i> (2013) | 2013 | Avaliar as alternativas de energia renovável bem como o seu desenvolvimento relacionados à energia elétrica da Turquia. | Este é o desafio do desenvolvimento das fontes renováveis de geração de energia elétrica na Turquia, devido ao consumo de eletricidade que aumentou dramaticamente. | - AHP para cálculo dos pesos dos critérios; - MACBETH para avaliação das alternativas; - 4 fontes alternativas; - 4 critérios e 15 subcritérios. | 1 - Energia Eólica; 2 - Energia Solar; 3 - Geotérmica; 4 - Hidráulica. |

(Continua na próxima página...)

Tabela 11 – ... continuação

| Autor | Ano | Proposta do artigo | Contribuições | Modelagem | Resultados |
|------------------------------------|------------|--|--|--|--|
| Choudhary e Shan- kar (2012) | 2012 | - Identificar fatores importantes para a localização de uma usina termoeétrica na Índia. - Avaliar e selecionar os melhores locais. | Como sugestão, utilizar a técnica ANP para o cálculo dos pesos dos critérios, o que permitiria total inter-relação entre eles. | - Fuzzy AHP para calcular os pesos dos critérios; - TOPSIS para avaliar as alternativas; - 6 critérios e 20 subcritérios; - Realiza uma análise de sensibilidade. | - As localidades de Sasan e Wani são as preferíveis; - Custo e a disponibilidade de recursos foram os critérios mais importantes. |
| Lee <i>et al.</i> (2012) | 2012 | Identificar os fatores mais importantes para a escolha do modelo de turbinas eólicas. | Não explica quais foram as premissas que levaram a selecionar esses 4 modelos de turbinas. | - Fuzzy ANP; - 4 modelos de turbinas eólicas; - 4 critérios e 14 subcritérios. | Os fatores mais importantes do ponto de vista: - do custo é o valor presente líquido e o custo de capital; - das características da máquina a eficiência. |
| Kaya e Kah- raman (2011) | 2011 | Selecionar a melhor alternativa energética para a produção de eletricidade. | Realiza um estudo de caso generalista. | - AHP para cálculos dos pesos dos critérios; - TOPSIS para a avaliação das alternativas; - 7 cenários; - 4 critérios e 9 subcritérios; - Realiza a análise de sensibilidade. | - A energia eólica é considerada a melhor fonte de geração; - Em algumas combinações da análise de sensibilidade a biomassa passa a ser considerada a melhor alternativa. |

(Continua na próxima página...)

Tabela 11 – ... *continuação*

| Autor | Ano | Proposta do artigo | Contribuições | Modelagem | Resultados |
|----------------------------------|------------|--|---|--|---|
| Kaya e Kahraman (2010) | 2010 | - Determinar a melhor alternativa para a cidade de Istambul, na Turquia; - Selecionar o melhor local. | Não considerar período do retorno do investimento nos critérios de custo. | - Fuzzy AHP para avaliação; - 5 alternativas referentes à forma de geração; - 4 critérios e 25 critérios; - 6 alternativas referentes ao localização. | A prioridade é: 1 - Eólica; 2 - Solar; 3 - Biomassa; A localização adequada é de Çatalca. |
| Nixon <i>et al.</i> (2010) | 2010 | Avaliar as tecnologias de coletores de concentração para usinas de geração solar térmica no noroeste da Índia. | - Lentes de Fresnel não são muito aplicadas a usinas térmicas; - Utiliza a literatura para seleção de critérios e pesos. | - AHP para avaliação; - 6 modelos de coletores; - 3 critérios e 16 subcritérios. | O modelo de coletor preferido é: - Lente de Fresnel CPC; - Refletor parabólico. |
| Supriyasilp <i>et al.</i> (2009) | 2009 | Promover os projetos de energia hidrelétrica na Tailândia. | - Os membros da pesquisa definem os pesos dos critérios; - Não apresentam uma tabela organizada com a classificação final. | - Utiliza a teoria dos métodos AMD; - 64 locais possíveis de hidrelétricas superiores a 100 kW; - 5 critérios e 30 subcritérios. | As usinas com reservatório são as preferíveis, uma vez que possuem melhor desempenho na maioria dos critérios. |
| Chatzimouras e Pila-vachi (2008) | 2008 | Avaliar as fontes de geração de energia elétrica em relação ao impacto no padrão de vida das comunidades locais. | Utiliza a literatura para seleção de critérios. | - AHP para avaliação; - 10 tipos de usinas de geração; - 2 critérios e 7 subcritérios; - Realiza uma análise de sensibilidade; | As 4 fontes que menos causam impactos são: 1 - Geotérmica; 2 - Eólica; 3 - Biomassa; 4 - Solar fotovoltaica |

(Continua na próxima página...)

Tabela 11 – ... continuação

| Autor | Ano | Proposta do artigo | Contribuições | Modelagem | Resultados |
|-----------------------------------|------------|---|--|--|---|
| Doukas <i>et al.</i> (2006) | 2006 | Realizar a avaliação da sustentabilidade das energias renováveis na Grécia. | Os membros da pesquisa definem os pesos dos critérios. | PROMETHEE II para a avaliação; 10 alternativas; 4 critérios e 11 subcritérios; 4 perspectivas de cenários econômicos (pessimista, otimista, instável e base). | - Combustão de leito fluidizado foi a melhor em três dos cenários; - No quarto cenário (otimista) a biomassa obteve melhor desempenho. |

5 CONCLUSÃO

Os problemas de geração de energia elétrica pertencem a um conjunto de domínios críticos onde decisões de gerenciamento errôneas podem ter consequências econômicas, ambientais e sociais desastrosas (STRANTZALI *et al.*, 2017).

Nesse contexto, o planejamento da expansão da matriz de energia elétrica é um problema relativamente difícil e sensível que contém aspectos quantitativos e qualitativos, complexidades e imprecisão. Nesse aspecto tomar uma decisão visando selecionar novas fontes de geração de energia elétrica considerando critérios únicos, ou não considerando os fatores motivacionais dos indivíduos que serão afetados, não é aceitável.

Como solução para os problemas da tomada de decisão no planejamento da expansão da matriz de energia elétrica podem ser aplicados os métodos de apoio multicritério à decisão, os quais são capazes de justificar as escolhas de forma clara e consistente. O processo de tomada de decisão com o suporte dos métodos AMD é basicamente composto por três etapas comparação entre os critérios, definição dos pesos relativos de importância e ordenação dos resultados, do mais para o menos preferível.

Objetivando descrever e identificar a utilização dos métodos AMD no planejamento da expansão da matriz de energia elétrica nos últimos 12 anos, fez-se necessário realizar uma revisão sistemática da literatura. Processo este, que resultou na seleção de 144 artigos, publicados em 61 revistas de alcance internacional. Dentre os trabalhos selecionados a revista *Renewable and Sustainable Energy Reviews* possui o maior número de publicações, com 23 ocorrências.

Constatou-se que do ano de 2006 até julho de 2017 o número de publicações tem aumentado substancialmente, passando de 3 (2,1%) para 32 (22,2%). Referente as áreas de aplicação dos artigos, as que possuem maior representação são a escolha do local para a instalação de novas fontes de geração, representando 28% dos artigos, e avaliação de cenários, com 24,3% de participação.

Com base nos resultados da revisão, assim como descrito pela literatura, o método AHP e Fuzzy AHP são os mais utilizados. Sendo que, 75 artigos aplicam

esses métodos, devido ao fato da seleção dos critérios e atribuição de pesos aos mesmos influenciar todo o processo da decisão. Além disso, o segundo método mais utilizado, aplicado em 18 estudos, é o método TOPSIS. Outro motivo para a grande aplicabilidade do método AHP e do TOPSIS é a facilidade de implementação, fato que foi constatado durante o processo de caracterização dos métodos.

As regiões da Europa e Ásia registraram os maiores números de aplicações da abordagem AMD, com 67 e 39 publicações, respectivamente. O país com maior número de estudos aplicados é a Turquia, com 20 ocorrências, representando uma parcela de 13,9%.

Referente aos métodos AMD no geral, constatou-se que um dos principais empecilhos é o processo de definição do pesos dos critérios e subcritérios, em que o processo deve ser imparcial, caso contrário pode haver tendência na obtenção da melhor alternativa. Por esse motivo devem ser considerados o maior número de especialistas no setor, os quais não devem possuir interesses na decisão final.

A realização deste trabalho, possibilitou apresentar uma visão global acerca da utilização dos métodos AMD aplicados nos problemas de planejamento da expansão da matriz de energia elétrica, considerando os mais diversos critérios e externalidades.

O presente trabalho possibilita a iniciativa para a elaboração de trabalhos futuros, em que outros métodos de apoio a decisão podem ser utilizados para fornecer uma análise sobre os impactos dos mais diversos critérios e externalidades, um desses métodos é a Análise Custo-Benefício.

REFERÊNCIAS

AKBAŞ, Halil; BILGEN, Bilge. An integrated fuzzy qfd and topsis methodology for choosing the ideal gas fuel at wwtps. **Energy**, Elsevier, v. 125, p. 484–497, 2017.

ALIPOUR, M; ALIGHALEH, S; HAFEZI, R; OMRANIEVARDI, M. A new hybrid decision framework for prioritizing funding allocation to iran's energy sector. **Energy**, Elsevier, v. 121, p. 388–402, 2017.

ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasília, DF: [s.n.], 2002. Disponível em: <<https://goo.gl/JF8pum>>. Acesso em: 20 mar. 2017.

ANNEE. **Capacidade de Geração do Brasil**. Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasília, DF: [s.n.], set. 2017. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 11 abr. 2017.

ÁVILA, Ivonete. **Um estudo da sorção de 'SO IND. 2' por calcário em analisador termogravimétrico e na combustão de carvão em leito fluidizado**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2008.

AZZOPARDI, Brian; MARTÍNEZ-CESEÑA, Eduardo A; MUTALE, Joseph. Decision support system for ranking photovoltaic technologies. **IET Renewable Power Generation**, IET, v. 7, n. 6, p. 669–679, 2013.

Banco Mundial. **Energia - Visão Geral**. Washington, USA: [s.n.], Set. 2016. Disponível em: <<http://www.worldbank.org/en/topic/energy>>. Acesso em: 22 mar. 2017.

BEGIĆ, Fajik; AFGAN, Naim H. Sustainability assessment tool for the decision making in selection of energy system? bosnian case. **Energy**, Elsevier, v. 32, n. 10, p. 1979–1985, 2007.

BENAYOUN, R; ROY, B; SUSSMAN, N. Manual de reference du programme electre. **Note de synthese et Formation**, Paris: Direction Scientifique SEMA, v. 25, 1966.

BOLOGNINI, Marly Fré. **Externalidades na produção de álcool combustível no Estado de São Paulo**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 1996.

BRAND, Bernhard; MISSAOUI, Rafik. Multi-criteria analysis of electricity generation mix scenarios in tunisia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 39, p. 251–261, 2014.

BRANS, Jean-Pierre; MARESCHAL, Bertrand. Promethee methods. **Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys**, Springer, p. 163–186, 2005.

BRUNDTLAND, Gro H. **Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future**. Oxford, UK: [s.n.], 1987. Disponível em: <<http://www.un-documents.net/our-common-future>>. Acesso em: 24 mar. 2017.

- BÜYÜKÖZKAN, Gülçin; KARABULUT, Yağmur. Energy project performance evaluation with sustainability perspective. **Energy**, Elsevier, v. 119, p. 549–560, 2017.
- CARLSON, Annelie. Energy system analysis of the inclusion of monetary values of environmental damage. **Biomass and Bioenergy**, Elsevier, v. 22, n. 3, p. 169–177, 2002.
- CAVALLARO, Fausto. Multi-criteria decision aid to assess concentrated solar thermal technologies. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 34, n. 7, p. 1678–1685, 2009.
- CHATZIMOURATIDIS, Athanasios I; PILAVACHI, Petros A. Multicriteria evaluation of power plants impact on the living standard using the analytic hierarchy process. **Energy Policy**, Elsevier, v. 36, n. 3, p. 1074–1089, 2008.
- CHOUDHARY, Devendra; SHANKAR, Ravi. An steep-fuzzy ahp-topsis framework for evaluation and selection of thermal power plant location: A case study from india. **Energy**, Elsevier, v. 42, n. 1, p. 510–521, 2012.
- CHRISTENSEN, John M; VIDAL, ReneVictor Valqui. Project evaluation for energy supply in rural areas of developing countries. **European journal of operational research**, Elsevier, v. 49, n. 2, p. 230–246, 1990.
- CINELLI, Marco; COLES, Stuart R; KIRWAN, Kerry. Analysis of the potentials of multi criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment. **Ecological Indicators**, Elsevier, v. 46, p. 138–148, 2014.
- COELHO, Suani Teixeira. **MECANISMOS PARA IMPLEMENTAÇÃO DA COGERAÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DE BIOMASSA. UM MODELO PARA O ESTADO DE SÃO PAULO**. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 1999.
- DESTER, Mauricio. **Propostas para a construção da matriz de energia elétrica brasileira com foco na sustentabilidade do processo de expansão da oferta e segurança no suprimento da carga**. Tese (Doutorado) — UNICAMP, Campinas, SP, 2012.
- DIAKOULAKI, Danae; KARANGELIS, F. Multi-criteria decision analysis and cost-benefit analysis of alternative scenarios for the power generation sector in greece. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 11, n. 4, p. 716–727, 2007.
- DOUKAS, Haris; PATLITZIANAS, Konstantinos D; PSARRAS, John. Supporting sustainable electricity technologies in greece using mcdm. **Resources Policy**, Elsevier, v. 31, n. 2, p. 129–136, 2006.
- ECONOMICS, Trading. **Tranding Economics**. IECONOMICS INC, Nova York, EUA: [s.n.], 2017. Disponível em: <<https://tradingeconomics.com>>. Acesso em: 27 jun. 2017.
- EHRlich, Pierre Jacques. Modelos quantitativos de apoio as decisões: li. **Revista de Administração de Empresas**, SciELO Brasil, v. 36, n. 2, p. 44–52, 1996.
- EIA. **International Energy Outlook 2016**. Energy Information Administration, Washington, USA: [s.n.], Maio 2016. Disponível em: <<https://goo.gl/IV9MRt>>. Acesso em: 26 mar. 2017.

EKINS, P; ANDERSEN, Mikael Skou; VOS, H; GEE, D; SCHLEGELMILCH, K; WI-ERLINGA, K. **Environmental taxes: Implementation and environmental effectiveness**. [S.l.]: Publications Office of the European Union, 1996.

ELLIOTT, Robert J; LYLE, Matthew R; MIAO, Hong. A model for energy pricing with stochastic emission costs. **Energy Economics**, Elsevier, v. 32, n. 4, p. 838–847, 2010.

ERTAY, Tijen; KAHRAMAN, Cengiz; KAYA, Ihsan. Evaluation of renewable energy alternatives using macbeth and fuzzy ahp multicriteria methods: the case of turkey. **Technological and Economic Development of Economy**, Taylor & Francis, v. 19, n. 1, p. 38–62, 2013.

FUNCHAL, Paulo Henrique Zukanovich. **A Contabilização das Externalidades como Instrumento para a Avaliação de Subsídios: o Caso das PCHs no Contexto do Proinfra**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2008.

FURTADO, R. C. **The Incorporation of Environmental Costs Into Electric Power System Planning in Brazil**. Tese (Doutorado) — Imperial College, Londres, 1996.

GARCEZ, Catherine Aliana Gucciardi. What do we know about the study of distributed generation policies and regulations in the americas? a systematic review of literature. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, 2016.

GIL, Antonio C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. São Paulo, SP: Atlas, 2002. 175 p.

GOMIDE, Fernando; GUDWIN, Ricardo R; TANSCHUIT, Ricardo. Conceitos fundamentais da teoria de conjuntos fuzzy, lógica fuzzy e aplicações. In: **Proc. 6 th IFSA Congress-Tutorials**. [S.l.: s.n.], 1995. p. 1–38.

GRÁGEDA, M; ESCUDERO, M; ALAVIA, W; USHAK, S; FTHENAKIS, V. Review and multi-criteria assessment of solar energy projects in chile. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 59, p. 583–596, 2016.

GUARNIERI, Patricia. Synthesis of main criteria, methods and issues of multicriteria supplier selection. **Revista de Administração Contemporânea**, SciELO Brasil, v. 19, n. 1, p. 1–25, 2015.

HARALAMBOPOULOS, DA; POLATIDIS, Heracles. Renewable energy projects: structuring a multi-criteria group decision-making framework. **Renewable energy**, Elsevier, v. 28, n. 6, p. 961–973, 2003.

HUANG, JP; POH, KL; ANG, BW. Decision analysis in energy and environmental modeling. **Energy**, Elsevier, v. 20, n. 9, p. 843–855, 1995.

IAEA. **Energy Indicators for Sustainable Development: Guidelines and Methodologies**. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria: [s.n.], 1999. Disponível em: <<https://goo.gl/BEZmVa>>. Acesso em: 26 mar. 2017.

IEA. **Electricity Information**. International Energy Agency, França: [s.n.], 2015. Disponível em: <<http://goo.gl/QSqPX3>>. Acesso em: 24 mar. 2017.

- IPEA. **Petróleo: da crise aos carros flex**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, Brasília, DF: [s.n.], 1999. Disponível em: <<https://goo.gl/BEZmVa>>. Acesso em: 24 mar. 2017.
- JANO-ITO, Marco A; CRAWFORD-BROWN, Douglas. Investment decisions considering economic, environmental and social factors: An actors' perspective for the electricity sector of Mexico. **Energy**, Elsevier, v. 121, p. 92–106, 2017.
- KAHRAMAN, Cengiz; KAYA, İhsan. A fuzzy multicriteria methodology for selection among energy alternatives. **Expert Systems with Applications**, Elsevier, v. 37, n. 9, p. 6270–6281, 2010.
- KAUFMAN, Gordon M. **Statistical decision and related techniques in oil and gas exploration**. [S.l.]: Prentice-Hall, 1963.
- KAVOURIDIS, Konstantinos. Lignite industry in Greece within a world context: Mining, energy supply and environment. **Energy Policy**, Elsevier, v. 36, n. 4, p. 1257–1272, 2008.
- KAYA, Tolga; KAHRAMAN, Cengiz. Multicriteria renewable energy planning using an integrated fuzzy VIKOR & AHP methodology: The case of Istanbul. **Energy**, Elsevier, v. 35, n. 6, p. 2517–2527, 2010.
- KAYA, Tolga; KAHRAMAN, Cengiz. Multicriteria decision making in energy planning using a modified fuzzy TOPSIS methodology. **Expert Systems with Applications**, Elsevier, v. 38, n. 6, p. 6577–6585, 2011.
- KLEIN, Sharon JW; WHALLEY, Stephanie. Comparing the sustainability of US electricity options through multi-criteria decision analysis. **Energy Policy**, Elsevier, v. 79, p. 127–149, 2015.
- KOSUGI, Takanobu; TOKIMATSU, Koji; KUROSAWA, Atsushi; ITSUBO, Norihiro; YAGITA, Hiroshi; SAKAGAMI, Masaji. Internalization of the external costs of global environmental damage in an integrated assessment model. **Energy Policy**, Elsevier, v. 37, n. 7, p. 2664–2678, 2009.
- KUMAR, Abhishek; SAH, Bikash; SINGH, Arvind R; DENG, Yan; HE, Xiangning; KUMAR, Praveen; BANSAL, RC. A review of multi-criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 69, p. 596–609, 2017.
- KUMAR, Deepak; KATOCH, Surjit Singh. Sustainability assessment and ranking of run-of-the-river (ror) hydropower projects using analytical hierarchy process (AHP): A study from western Himalayan region of India. **Journal of Mountain Science**, Springer, v. 12, n. 5, p. 1315–1333, 2015.
- LEE, Amy HI; HUNG, Meng-Chan; KANG, He-Yau; PEARN, WL. A wind turbine evaluation model under a multi-criteria decision making environment. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 64, p. 289–300, 2012.
- LIU, Gang. Development of a general sustainability indicator for renewable energy systems: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 31, p. 611–621, 2014.

LOOTSMA, FA; MENSCH, TCA; VOS, FA. Multi-criteria analysis and budget reallocation in long-term research planning. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 47, n. 3, p. 293–305, 1990.

MARDANI, Abbas; JUSOH, Ahmad; ZAVADSKAS, Edmundas Kazimieras; CAVALLARO, Fausto; KHALIFAH, Zainab. Sustainable and renewable energy: An overview of the application of multiple criteria decision making techniques and approaches. **Sustainability**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 7, n. 10, p. 13947–13984, 2015.

MARDANI, Abbas; ZAVADSKAS, Edmundas Kazimieras; KHALIFAH, Zainab; ZAKUAN, Norhayati; JUSOH, Ahmad; NOR, Khalil Md; KHOSHNOUDI, Masoumeh. A review of multi-criteria decision-making applications to solve energy management problems: Two decades from 1995 to 2015. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, 2016.

MARDANI, Abbas; ZAVADSKAS, Edmundas Kazimieras; STREIMIKIENE, Dalia; JUSOH, Ahmad; NOR, Khalil MD; KHOSHNOUDI, Masoumeh. Using fuzzy multiple criteria decision making approaches for evaluating energy saving technologies and solutions in five star hotels: A new hierarchical framework. **Energy**, Elsevier, v. 117, p. 131–148, 2016.

MARKANDYA, Anil. Externalities from electricity generation and renewable energy. methodology and application in europe and spain. **Cuadernos económicos de ICE**, p. 85–100, 2012.

MASLOV, Nicolas; BROSSET, David; CLARAMUNT, Christophe; CHARPENTIER, Jean-Frédéric. A geographical-based multi-criteria approach for marine energy farm planning. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 3, n. 2, p. 781–799, 2014.

MATTOS, Antonio Carlos M; VASCONCELLOS, Herald. Análise de sensibilidade. **Revista de administração de empresas**, SciELO Brasil, v. 29, n. 1, p. 85–91, 1989.

MEIRELES, Manuel. **Ferramentas administrativas para identificar observar e analisar problemas**. [S.l.]: Arte & Ciência, 2001.

Ministério da Fazenda. **International Energy Outlook 2016**. Ministério da Fazenda, Brasília, DF: [s.n.], set. 2014. Disponível em: <<http://www.fazenda.gov.br/economia/pib>>. Acesso em: 03 abr. 2017.

MIRAKYAN, Atom; GUIO, Roland De. Integrated energy planning in cities and territories: a review of methods and tools. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 22, p. 289–297, 2013.

MIRAKYAN, Atom; GUIO, Roland De. Modelling and uncertainties in integrated energy planning. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 46, p. 62–69, 2015.

MME. **Ranking Mundial de Energia e Socioeconomia**. Ministério de Minas e Energia, Brasília, DF: [s.n.], 2015. Disponível em: <<https://goo.gl/56YQid>>. Acesso em: 15 jun. 2017.

- MME. **Resenha Energética Brasileira. Exercício de 2015**. Ministério de Minas e Energia, Brasília, DF: [s.n.], 2016. Disponível em: <<https://goo.gl/mz1Ock>>. Acesso em: 24 mar. 2017.
- NAKAGAWA, Elisa Yumi; SCANNAVINO, Kátia Romero Felizardo; FABBRI, Sandra Camargo Pinto Ferraz; FERRARI, Fabiano Cutigi. **Revisão Sistemática da Literatura em Engenharia de Software: Teoria e Prática**. [S.l.]: Elsevier Brasil, 2017.
- NIXON, JD; DEY, PK; DAVIES, PA. Which is the best solar thermal collection technology for electricity generation in north-west india? evaluation of options using the analytical hierarchy process. **Energy**, Elsevier, v. 35, n. 12, p. 5230–5240, 2010.
- OCDE. **About the OECD**. OCDE, Paris, França: [s.n.], 2017. Disponível em: <<http://www.oecd.org/about/>>. Acesso em: 24 mar. 2017.
- ONAR, Sezi Cevik; OZTAYSI, Basar; OTAY, İrem; KAHRAMAN, Cengiz. Multi-expert wind energy technology selection using interval-valued intuitionistic fuzzy sets. **Energy**, Elsevier, v. 90, p. 274–285, 2015.
- ONU. **Conheça a Organização das Nações Unidas**. Nova York, USA: [s.n.], 2016. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/conheca/>>. Acesso em: 22 mar. 2017.
- OREE, Vishwamitra; HASSEN, Sayed Z Sayed; FLEMING, Peter J. Generation expansion planning optimisation with renewable energy integration: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 69, p. 790–803, 2017.
- PESSOA, Isabela Cristina. **Estatística das aplicações de métodos multicritério nas áreas da engenharia de produção**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.
- PETRI, Sérgio Murilo. **Modelo para apoiar a avaliação das abordagens de gestão de desempenho e sugerir aperfeiçoamentos: sob a ótica construtivista**. Tese (Doutorado) — UFSC, Florianópolis, SC, mar. 2005.
- POHEKAR, SD; RAMACHANDRAN, M. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning? a review. **Renewable and sustainable energy reviews**, Elsevier, v. 8, n. 4, p. 365–381, 2004.
- POLATIDIS, Heracles; HARALAMBOPOULOS, Dias A; MUNDA, Giuseppe; VREEKER, Ron. Selecting an appropriate multi-criteria decision analysis technique for renewable energy planning. **Energy Sources, Part B**, Taylor & Francis, v. 1, n. 2, p. 181–193, 2006.
- POLICY, Urban *et al.* Guide to cost-benefit analysis of investment projects. **The EU**, 2008.
- PRADO, Thiago Guilherme Ferreira. **Externalidades do ciclo produtivo da cana-de-açúcar com ênfase na produção de energia elétrica**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2007.
- RAFAJ, Peter; KYPREOS, Socrates. Internalisation of external cost in the power generation sector: Analysis with global multi-regional markal model. **Energy Policy**, Elsevier, v. 35, n. 2, p. 828–843, 2007.

REIS, Lineu B. dos; SANTOS, Eldis C. **Energia elétrica e sustentabilidade**. Barueri, SP: Manole, 2014. 464 p.

ROY, Bernard. Electre iii: Un algorithme de classement fondé sur une représentation floue des préférences en présence de critères multiples. **Cahiers du CERO**, v. 20, n. 1, p. 3–24, 1978.

ROY, Bernard; BERTIER, Patrice. La méthode electre ii(une application au média-planning...). Metra international, 1973.

SAATY, Thomas L. What is the analytic hierarchy process? In: **Mathematical models for decision support**. [S.l.]: Springer, 1988. p. 109–121.

SAATY, Thomas L. How to make a decision: the analytic hierarchy process. **European journal of operational research**, Elsevier, v. 48, n. 1, p. 9–26, 1990.

SÁNCHEZ-LOZANO, JM; GARCÍA-CASCALES, MS; LAMATA, MT. Comparative topsis-electre tri methods for optimal sites for photovoltaic solar farms. case study in spain. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 127, p. 387–398, 2016.

SANTOS, MJ; FERREIRA, P; ARAÚJO, M; PORTUGAL-PEREIRA, J; LUCENA, AFP; SCHAEFFER, R. Scenarios for the future brazilian power sector based on a multi-criteria assessment. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, 2017.

Senado Federal. **Da Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente Humano, em Estocolmo, Rio-92: agenda ambiental para os países e elaboração de documentos por Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento**. Senado Federal, Brasília, DF: [s.n.], 1999. Disponível em: <<https://goo.gl/BEZmVa>>. Acesso em: 24 mar. 2017.

ŞENGÜL, Ümran; EREN, Miraç; SHIRAZ, Seyedhadi Eslamian; GEZDER, Volkan; ŞENGÜL, Ahmet Bilal. Fuzzy topsis method for ranking renewable energy supply systems in turkey. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 75, p. 617–625, 2015.

SHMELEV, Stanislav E; BERGH, Jeroen CJM van den. Optimal diversity of renewable energy alternatives under multiple criteria: An application to the uk. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 60, p. 679–691, 2016.

SINDHU, Sonal Punia; NEHRA, Vijay; LUTHRA, Sunil. Recognition and prioritization of challenges in growth of solar energy using analytical hierarchy process: Indian outlook. **Energy**, Elsevier, v. 100, p. 332–348, 2016.

SINGH, Rana Pratap; NACHTNEBEL, Hans Peter. Analytical hierarchy process (ahp) application for reinforcement of hydropower strategy in nepal. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 55, p. 43–58, 2016.

SISKOS, Jean; HUBERT, Ph. Multi-criteria analysis of the impacts of energy alternatives: a survey and a new comparative approach. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 13, n. 3, p. 278–299, 1983.

STEWART, BS; VALERIE, BELTON. Multiple criteria decision analysis: An integrated approach. **Estados Unidos: Kluwer Academic Publishers**, 2002.

STRANTZALI, Eleni; ARAVOSSIS, Konstantinos. Decision making in renewable energy investments: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 55, p. 885–898, 2016.

STRANTZALI, Eleni; ARAVOSSIS, Konstantinos; LIVANOS, Georgios A. Evaluation of future sustainable electricity generation alternatives: The case of a greek island. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 76, p. 775–787, 2017.

SUPRIYASILP, Thanaporn; PONGPUT, Kobkiat; BOONYASIRIKUL, Thana. Hydro-power development priority using mcdm method. **Energy Policy**, Elsevier, v. 37, n. 5, p. 1866–1875, 2009.

Sustainable Energy for All. **Sustainable Energy for All - Our Mission**. Washington, USA: [s.n.], 2016. Disponível em: <<http://www.se4all.org/our-mission>>. Acesso em: 22 mar. 2017.

TAHA, Rimal Abu; DAIM, Tugrul. Multi-criteria applications in renewable energy analysis, a literature review. In: **Research and Technology Management in the Electricity Industry**. [S.l.]: Springer, 2013. p. 17–30.

TALINLI, Ilhan; TOPUZ, Emel; AKBAY, Mehmet Uygur. Comparative analysis for energy production processes (epps): Sustainable energy futures for turkey. **Energy Policy**, Elsevier, v. 38, n. 8, p. 4479–4488, 2010.

TRAPP, Guilherme Sperling; RODRIGUES, Luis Henrique. Evaluation of the total systemic cost of wind power generation in face of the replacement of hydroelectric and thermoelectric sources considering socioeconomic and environmental externalities. **Gestão & Produção**, SciELO Brasil, n. 3, p. 556–569, 2016.

TSP. **Breakdown of Electricity Generation by Energy Source**. Paris, França: [s.n.], 2014. Disponível em: <<https://goo.gl/NniaJu>>. Acesso em: 15 jun. 2017.

VAF AEIPOUR, Majid; ZOLFANI, Sarfaraz Hashemkhani; VARZANDEH, Mohammad Hossein Morshed; DERAKHTI, Arman; ESHKALAG, Mahsa Keshavarz. Assessment of regions priority for implementation of solar projects in iran: New application of a hybrid multi-criteria decision making approach. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 86, p. 653–663, 2014.

VERA, Ivan; LANGLOIS, Lucille. Energy indicators for sustainable development. **Energy**, Elsevier, v. 32, n. 6, p. 875–882, 2007.

VILLACRESES, Geovanna; GAONA, Gabriel; MARTÍNEZ-GÓMEZ, Javier; JIJÓN, Diego Juan. Wind farms suitability location using geographical information system (gis), based on multi-criteria decision making (mcdm) methods: The case of continental ecuador. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 109, p. 275–286, 2017.

VUČIJAK, B; KUPUSOVIĆ, T; MIDŽIĆ-KURTAGIĆ, S; ĆERIĆ, A. Applicability of multicriteria decision aid to sustainable hydropower. **Applied Energy**, Elsevier, v. 101, p. 261–267, 2013.

WANG, Jiang-Jiang; JING, You-Yin; ZHANG, Chun-Fa; ZHAO, Jun-Hong. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 13, n. 9, p. 2263–2278, 2009.

WIMMLER, C; HEJAZI, G; FERNANDES, E de Oliveira; MOREIRA, C; CONNORS, S. Multi-criteria decision support methods for renewable energy systems on islands. **Journal of Clean Energy Technologies**, v. 3, n. 3, p. 185–195, 2015.

WIND, Yoram; SAATY, Thomas L. Marketing applications of the analytic hierarchy process. **Management science**, INFORMS, v. 26, n. 7, p. 641–658, 1980.

YOON, Kwangsun; HWANG, Ching-Lai. **Multiple attribute decision making: methods and applications**. [S.l.]: SPRINGER-VERLAG BERLIN AN, 1981.

ZHOU, Peng; ANG, BW; POH, KL. Decision analysis in energy and environmental modeling: An update. **Energy**, Elsevier, v. 31, n. 14, p. 2604–2622, 2006.

APÊNDICE A - ARTIGOS SELECIONADOS NA FASE DE ELEGIBILIDADE

Tabela 12: Artigos selecionados na fase de elegibilidade.

| Autor | Ano | Periódico | Título |
|---------------------------------|------------|--|---|
| SAMANLIOGLU, Funda; AYAG, Zeki. | 2017 | <i>Journal of Intelligent and Fuzzy Systems</i> | <i>A Fuzzy AHP-PROMETHEE II approach for evaluation of solar power plant location alternatives in Turkey</i> |
| BALIN, Abit; BARAÇLI, Hayri. | 2017 | <i>Technological and Economic Development of Economy</i> | <i>A Fuzzy multi-criteria decision making methodology based upon the interval Type-2 Fuzzy sets for evaluating renewable energy alternatives in Turkey</i> |
| ASAKEREH, A. et al. | 2017 | <i>Solar Energy</i> | <i>A GIS-based Fuzzy-AHP method for the evaluation of solar farms locations: Case study in Khuzestan province, Iran</i> |
| KHISHTANDAR, S. et al. | 2017 | <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> | <i>A multi criteria decision making framework for sustainability assessment of bioenergy production technologies with hesitant Fuzzy linguistic term sets: The case of Iran</i> |
| HADDAD, B. et al. | 2017 | <i>Renewable Energy</i> | <i>A multi-criteria approach to rank renewables for the Algerian electricity system</i> |
| ALIPOUR, M. et al. | 2017 | <i>Energy</i> | <i>A new hybrid decision framework for prioritizing funding allocation to Iran's energy sector</i> |
| KUMAR, Abhishek et al. | 2017 | <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> | <i>A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development</i> |
| AKBAS, Halil; BILGEN, Bilge. | 2017 | <i>Energy</i> | <i>An integrated Fuzzy QFD and TOPSIS methodology for choosing the ideal gas fuel at WWTPs</i> |

(Continua na próxima página...) ∞

Tabela 12 – ... continuação

| Autor | Ano | Periódico | Título |
|----------------------------------|------------|--|---|
| PAPAPOSTOLOU, Aikaterini. et al. | 2017 | <i>Energy and Environment</i> | <i>Analysis of policy scenarios for achieving renewable energy sources targets: A Fuzzy TOPSIS approach</i> |
| GIGOVIC, L. et al. | 2017 | <i>Renewable Energy</i> | <i>Application of the GIS-DANP-MABAC multi-criteria model for selecting the location of wind farms: A case study of Vojvodina, Serbia</i> |
| ÖZKALE, C. et al. | 2017 | <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> | <i>Decision analysis application intended for selection of a power plant running on renewable energy sources</i> |
| SAGBANSUA, Lutfu; BALO, Figen. | 2017 | <i>Renewable Energy</i> | <i>Decision making model development in increasing wind farm energy efficiency</i> |
| KULKARNI, S. et al. | 2017 | <i>Distributed Generation and Alternative Energy Journal</i> | <i>Alternative Energy Options for India? A Multi-criteria Decision Analysis to Rank Energy Alternatives using Analytic Hierarchy Process and Fuzzy Logic with an Emphasis to Distributed Generation</i> |
| VILLACRESES, G. et al. | 2017 | <i>Renewable Energy</i> | <i>Wind farms suitability location using geographical information system (GIS), based on multi-criteria decision making (MCDM) methods: The case of continental Ecuador</i> |
| BÜYÜKÖZKAN, G.; KARABULUT, Y. | 2017 | <i>Energy</i> | <i>Energy project performance evaluation with sustainability perspective</i> |
| BLANCO, G. et al. | 2017 | <i>Energy Policy</i> | <i>Energy transitions and emerging economies: A multi-criteria analysis of policy options for hydropower surplus utilization in Paraguay</i> |
| STRANTZALI, E. et al. | 2017 | <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> | <i>Evaluation of future sustainable electricity generation alternatives: The case of a Greek island</i> |

(Continua na próxima página...)

Tabela 12 – ... continuação

| Autor | Ano | Periódico | Título |
|---|------------|---|--|
| BÜYÜKÖZKAN, Gülçin; GÜLERYÜZ, Sezin. | 2017 | <i>Energy</i> | <i>Evaluation of Renewable Energy Resources in Turkey using an integrated MCDM approach with linguistic interval Fuzzy preference relations</i> |
| PAPAPOSTOLOU, A. et al. | 2017 | <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> | <i>Exploring opportunities and risks for RES-E deployment under Cooperation Mechanisms between EU and Western Balkans: A multi-criteria assessment</i> |
| RODRÍGUEZ, R. et al. | 2017 | <i>Biomass and Bioenergy</i> | <i>Fuzzy spatial decision tool to rank suitable sites for allocation of bioenergy plants based on crop residue</i> |
| OREE, V. et al. | 2017 | <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> | <i>Generation expansion planning optimisation with renewable energy integration: A review</i> |
| VASILEIOU, M. et al. | 2017 | <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> | <i>GIS-based multi-criteria decision analysis for site selection of hybrid offshore wind and wave energy systems in Greece</i> |
| ABDULLAH, Lazim; NAJIB, Liana. | 2017 | <i>International Journal of Fuzzy System Applications</i> | <i>Interval Type-2 Fuzzy analytic hierarchy process for sustainable energy sources selection</i> |
| JANO-ITO, Marco A.; CRAWFORD- BROWN, Douglas. | 2017 | <i>Energy</i> | <i>Investment decisions considering economic, environmental and social factors: An actors' perspective for the electricity sector of Mexico</i> |

(Continua na próxima página...)

Tabela 12 – ... continuação

| Autor | Ano | Periódico | Título |
|--------------------------------------|------------|---|--|
| ZOGHI, M. et al. | 2017 | <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> | <i>Optimization solar site selection by Fuzzy logic model and weighted linear combination method in arid and semi-arid region: A case study Isfahan-IRAN</i> |
| ÇOLAK, Murat; KAYA, Ihsan. | 2017 | <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> | <i>Prioritization of renewable energy alternatives by using an integrated Fuzzy MCDM model: A real case application for Turkey</i> |
| JHA, Shibani K.; PUPPALA, Harish. | 2017 | <i>Energy</i> | <i>Prospects of renewable energy sources in India: Prioritization of alternative sources in terms of Energy Index</i> |
| SINDHU, S. et al. | 2017 | <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> | <i>Solar energy deployment for sustainable future of India: Hybrid SWOC-AHP analysis</i> |
| ALY, A. et al. | 2017 | <i>Renewable Energy</i> | <i>Solar power potential of Tanzania: Identifying CSP and PV hot spots through a GIS multicriteria decision making analysis</i> |
| READ, L. et al. | 2017 | <i>Energy</i> | <i>Stakeholder-driven multi-attribute analysis for energy project selection under uncertainty</i> |
| REN, J. et al. | 2017 | <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> | <i>Sustainable development of sewage sludge-to-energy in China: Barriers identification and technologies prioritization</i> |
| VASSONEY, Erica. et al. | 2017 | <i>Journal of Environmental Management</i> | <i>Use of multicriteria analysis (MCA) for sustainable hydropower planning and management</i> |
| CUCCHIELLA, F.; D'ADAMO, I. | 2016 | <i>International Journal of Photoenergy</i> | <i>A multicriteria analysis of photovoltaic systems: Energetic, environmental, and economic assessments</i> |

(Continua na próxima página...)

Tabela 12 – ... continuação

| Autor | Ano | Periódico | Título |
|-----------------------------------|------------|--|---|
| WANG, Yi. | 2016 | <i>Revista de la Facultad de Ingenieria</i> | <i>A Fuzzy VIKOR approach for renewable energy resources selection in China</i> |
| AKTAS, Ahmet; KA-BAK, Mehmet. | 2016 | <i>Procedia Computer Science</i> | <i>A Model Proposal for Locating Wind Turbines</i> |
| AL GARNI, Hassan et al. | 2016 | <i>Sustainable Energy Technologies and Assessments</i> | <i>A multicriteria decision making approach for evaluating renewable power generation sources in Saudi Arabia</i> |
| REHMAN, A. U. | 2016 | <i>South African Journal of Industrial Engineering</i> | <i>An approach to evaluating alternatives for wind power plant locations</i> |
| BÜYÜKÖZKAN, G.; GÜLERYÜZ, S.. | 2016 | <i>International Journal of Production Economics</i> | <i>An integrated DEMATEL-ANP approach for renewable energy resources selection in Turkey</i> |
| ÇELIKBILEK, Yakup; TÜYSÜZ, Fatih. | 2016 | <i>Energy</i> | <i>An integrated grey based multi-criteria decision making approach for the evaluation of renewable energy sources</i> |
| POTIC, Ivan. et al. | 2016 | <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> | <i>Analysis of insolation potential of Knja?evac Municipality (Serbia) using multi-criteria approach</i> |
| SINGH, R. P. et al. | 2016 | <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> | <i>Analytical hierarchy process (AHP) application for reinforcement of hydro-power strategy in Nepal</i> |
| STOJCETOVIC, Bojan. et al. | 2016 | <i>Journal of Renewable and Sustainable Energy</i> | <i>Application of integrated strengths, weaknesses, opportunities, and threats and analytic hierarchy process methodology to renewable energy project selection in Serbia</i> |

(Continua na próxima página...)

Tabela 12 – ... continuação

| Autor | Ano | Periódico | Título |
|---|------------|---|--|
| KOLIOS, Athanasios. et al. | 2016 | <i>International Journal of Sustainable Energy</i> | <i>Application of multi-criteria decision-making to risk prioritisation in tidal energy developments</i> |
| SÁNCHEZ-LOZANO, J. M. et al. | 2016 | <i>Journal of Cleaner Production</i> | <i>Comparative TOPSIS-ELECTRE TRI methods for optimal sites for photovoltaic solar farms Case study in Spain</i> |
| SINGH, Rana Pratap; NACHTNEBEL, Hans Peter. | 2016 | <i>International Journal of Multicriteria Decision Making</i> | <i>Decision aid for hydropower project prioritisation in Nepal by applying Visual PROMETHEE</i> |
| STRANTZALI, Eleni; ARAVOSSIS, Konstantinos. | 2016 | <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> | <i>Decision making in renewable energy investments: A review</i> |
| GUERRERO-LIQUET, G. C. et al. | 2016 | <i>Sustainability</i> | <i>Decision-making for risk management in sustainable renewable energy facilities: A case study in the Dominican Republic</i> |
| SINGH, Anjali. et al. | 2016 | <i>Operational Research</i> | <i>Energy planning problems with interval-valued 2-tuple linguistic information</i> |
| SÁNCHEZ-LOZANO, J. M. et al. | 2016 | <i>Applied Energy</i> | <i>GIS-based onshore wind farm site selection using Fuzzy Multi-Criteria Decision Making methods Evaluating the case of Southeastern Spain</i> |
| WATROBSKI, Jaroslaw et al. | 2016 | <i>Sustainability</i> | <i>Green energy for a green city-A multi-perspective model approach</i> |

(Continua na próxima página...)

Tabela 12 – ... continuação

| Autor | Ano | Periódico | Título |
|---|------------|--|---|
| POLATIDIS, Hera- cles; MORALES, Jan Borràs. | 2016 | <i>International Journal of Sustainable Energy</i> | <i>Increasing the applicability of wind power projects via a multi-criteria ap- proach: methodology and case study</i> |
| GUMUS, Serkan. et al. | 2016 | <i>Sustainable Production and Consumption</i> | <i>Intuitionistic Fuzzy multi-criteria decision making framework based on life cycle environmental, economic and social impacts: The case of US wind energy</i> |
| NOOROLLAHI, Ehsan. et al. | 2016 | <i>Energies</i> | <i>Land suitability analysis for solar farms exploitation using GIS and Fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) - A case study of Iran</i> |
| STREIMIKIENE, Da- lia. et al. | 2016 | <i>Renewable Energy</i> | <i>Multi-criteria analysis of electricity generation technologies in Lithuania</i> |
| STOLTMANN, ALICJA et al. | 2016 | <i>Journal of Clean Energy Technologies</i> | <i>Multi-criteria decision support methods for electricity generation plant loca- lization</i> |
| SHMELEV, S. E.; VAN DEN BERGH, J. C. | 2016 | <i>Renewable and Sustai- nable Energy Reviews</i> | <i>Optimal diversity of renewable energy alternatives under multiple criteria: An application to the UK</i> |
| SONI, Vivek. et al. | 2016 | <i>International Journal of Energy Sector Manage- ment</i> | <i>Precise decisions in Indian energy sector by imprecise evaluation</i> |
| SINDHU, Sonal P. et al. | 2016 | <i>Energy</i> | <i>Recognition and prioritization of challenges in growth of solar energy using analytical hierarchy process: Indian outlook</i> |

(Continua na próxima página...)

Tabela 12 – ... continuação

| Autor | Ano | Periódico | Título |
|-------------------------------------|------------|--|---|
| SUH, Jangwon; BROWNSON, Jeffrey | 2016 | <i>Energies</i> | <i>Solar farm suitability using geographic information system Fuzzy sets and analytic hierarchy processes: Case study of Ulleung Island, Korea</i> |
| WU, Yunna et al. | 2016 | <i>Energy Conversion and Management</i> | <i>Study of decision framework of offshore wind power station site selection based on ELECTRE-III under intuitionistic Fuzzy environment: A case of China</i> |
| ABDULLAH, Lazim; NAJIB, Liana. | 2016 | <i>International Journal of Sustainable Energy</i> | <i>Sustainable energy planning decision using the intuitionistic Fuzzy analytic hierarchy process: choosing energy technology in Malaysia</i> |
| HÖFER, Tim et al. | 2016 | <i>Applied Energy</i> | <i>Wind farm siting using a spatial Analytic Hierarchy Process approach: A case study of the Städteregion Aachen</i> |
| LATINOPOULOS, D.; KECHAGIA, K. | 2015 | <i>Renewable Energy</i> | <i>A GIS-based multi-criteria evaluation for wind farm site selection A regional scale application in Greece</i> |
| GARCIA- BERNABEU, Ana. et al. | 2015 | <i>Recta</i> | <i>A MCDM approach for project finance selection: An application in the renewable energy sector</i> |
| NEVES, Ana R. et al. | 2015 | <i>Sustainable Cities and Society</i> | <i>A methodology for sustainable and inclusive local energy planning</i> |
| FETANAT, A; KHO- RASANINEJAD, E. | 2015 | <i>Ocean & Coastal Management</i> | <i>A novel hybrid MCDM approach for offshore wind farm site selection: A case study of Iran</i> |
| KLEIN, S. J.; WHAL- LEY, S. | 2015 | <i>Energy Policy</i> | <i>Comparing the sustainability of US electricity options through multi-criteria decision analysis</i> |

(Continua na próxima página...)

Tabela 12 – ... continuação

| Autor | Ano | Periódico | Título |
|----------------------------------|------------|---|---|
| ZHANG, Ling et al. | 2015 | <i>Energy</i> | <i>Evaluating clean energy alternatives for Jiangsu, China: An improved multi-criteria decision making method</i> |
| SÁNCHEZ-LOZANO, Juan M. et al. | 2015 | <i>Computers and Industrial Engineering</i> | <i>Evaluation of suitable locations for the installation of solar thermoelectric power plants</i> |
| SENGÜL, Ümran et al. | 2015 | <i>Renewable Energy</i> | <i>Fuzzy TOPSIS method for ranking renewable energy supply systems in Turkey</i> |
| POLATIDIS, Hera- cles. et al. | 2015 | <i>Energy Sources</i> | <i>Multi-criteria decision analysis for geothermal energy: A comparison between the ELECTRE III and the PROMETHEE II methods</i> |
| KAYA, Tolga; KAH- RAMAN, Cengiz. | 2015 | <i>Energy</i> | <i>Multicriteria renewable energy planning using an integrated Fuzzy VIKOR & AHP methodology: The case of Istanbul</i> |
| MARDANI, Abbas et al. | 2015 | <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> | <i>A review of multi-criteria decision-making applications to solve energy management problems: Two decades from 1995 to 2015</i> |
| ONAR, Sezi Cevik et al. | 2015 | <i>Energy</i> | <i>Multi-expert wind energy technology selection using interval-valued intuitionistic Fuzzy sets</i> |
| SANTOS, M. J. et al. | 2015 | <i>Journal of Cleaner Production</i> | <i>Scenarios for the future Brazilian power sector based on a multi-criteria assessment</i> |
| KUMAR, D.; KA- TOCH, S. S.. | 2015 | <i>Journal of Mountain Science</i> | <i>Sustainability assessment and ranking of run of the river (RoR) hydropower projects using analytical hierarchy process (AHP): A study from Western Himalayan region of India</i> |

(Continua na próxima página...)

Tabela 12 – ... continuação

| Autor | Ano | Periódico | Título |
|--------------------------------|------------|---|---|
| ERDOGAN, Melike et al. | 2015 | <i>Iranian Journal of Fuzzy Systems</i> | <i>An integrated multi-criteria decision-making methodology based on type-2 Fuzzy sets for selection among energy alternatives in Turkey</i> |
| MASLOV, Nicolas et al. | 2014 | <i>ISPRS International Journal of Geo-Information</i> | <i>A geographical-based multi-criteria approach for marine energy farm planning</i> |
| MILLER, Adam; LI, Ruopu. | 2014 | <i>ISPRS International Journal of Geo-Information</i> | <i>A geospatial approach for prioritizing wind farm development in Northeast Nebraska, USA</i> |
| BÜYÜKÖZKAN, G; GÜLERYÜZ, S. | 2014 | <i>JOURNAL OF INTELLIGENT & Fuzzy SYSTEMS</i> | <i>A new GDM based AHP framework with linguistic interval Fuzzy preference relations for renewable energy planning</i> |
| ARAGONÉS-BELTRÁN, Pablo et al. | 2014 | <i>Energy</i> | <i>An AHP (Analytic Hierarchy Process)/ANP (Analytic Network Process)-based multi-criteria decision approach for the selection of solar-thermal power plant investment projects</i> |
| VAFAEIPOUR, Majid et al. | 2014 | <i>Energy Conversion and Management</i> | <i>Assessment of regions priority for implementation of solar projects in Iran: New application of a hybrid multi-criteria decision making approach</i> |
| WU, Yunna et al. | 2014 | <i>Applied Energy</i> | <i>Decision framework of solar thermal power plant site selection based on linguistic Choquet operator</i> |
| SÁNCHEZ-LOZANO, Juan M. et al. | 2014 | <i>Renewable Energy</i> | <i>GIS-based photovoltaic solar farms site selection using ELECTRE-TRI: Evaluating the case for Torre Pacheco, Murcia, Southeast of Spain</i> |

(Continua na próxima página...)

Tabela 12 – ... continuação

| Autor | Ano | Periódico | Título |
|-----------------------------------|------------|---|--|
| SÁNCHEZ-LOZANO, Juan M. et al. | 2014 | <i>Energy</i> | <i>Identification and selection of potential sites for onshore wind farms development in Region of Murcia, Spain</i> |
| ROSSO, Maurizio et al. | 2014 | <i>Energy Policy</i> | <i>Integrating multicriteria evaluation and stakeholders analysis for assessing hydropower projects</i> |
| AZIZI, Ali et al. | 2014 | <i>Environmental Monitoring and Assessment</i> | <i>Land suitability assessment for wind power plant site selection using ANP-DEMATEL in a GIS environment: case study of Ardabil province, Iran</i> |
| BRAND, Bernhard; MISSAOUI, Rafik. | 2014 | <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> | <i>Multi-criteria analysis of electricity generation mix scenarios in Tunisia</i> |
| YUNNA, Wu; GENG, Shuai. | 2014 | <i>Energy Conversion and Management</i> | <i>Multi-criteria decision making on selection of solar?wind hybrid power station location: A case of China</i> |
| WU, Yunna et al. | 2014 | <i>Energy Education Science and Technology</i> | <i>Research on the optimization of solar-wind hybrid power station project selection based on intuitionistic Fuzzy TOPSIS method</i> |
| NERINI, Francesco Fuso et al. | 2014 | <i>Energy for Sustainable Development</i> | <i>Rural electrification options in the Brazilian Amazon A multi-criteria analysis</i> |
| AHMAD, Salman; TAHAR, Razman Mat. | 2014 | <i>Renewable Energy</i> | <i>Selection of renewable energy sources for sustainable development of electricity generation system using analytic hierarchy process: A case of Malaysia</i> |
| SAGBAS, Aysun; MAZMANOGLU, Adnan. | 2014 | <i>Journal of Engineering Research</i> | <i>Use of multicriteria decision analysis to assess alternative wind power plants</i> |

(Continua na próxima página...)

Tabela 12 – ... continuação

| Autor | Ano | Periódico | Título |
|---|------------|---|--|
| ERTAY, Tijen. et al. | 2013 | <i>Technological and Economic Development of Economy</i> | <i>Evaluation of renewable energy alternatives using MACBETH and Fuzzy AHP multicriteria methods: the case of Turkey</i> |
| MOURMOURIS, J. C.; POTOLIAS, C. | 2013 | <i>Energy Policy</i> | <i>A multi-criteria methodology for energy planning and developing renewable energy sources at a regional level: A case study Thassos, Greece</i> |
| DEMIRTAS, Ozgur. | 2013 | <i>International Journal of Energy Economics and Policy</i> | <i>Evaluating the best renewable energy technology for sustainable energy planning</i> |
| PROMJIRAPRAWAT, K.; LIMMEECHOK-CHAI, B. | 2013 | <i>Songklanakarin Journal of Science and Technology</i> | <i>Multi-objective and multi-criteria optimization for power generation expansion planning with CO2 mitigation in Thailand</i> |
| SÁNCHEZ-LOZANO, Juan M. et al. | 2013 | <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> | <i>Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain</i> |
| VUCIJAK, B. et al. | 2013 | <i>Applied Energy</i> | <i>Applicability of multicriteria decision aid to sustainable hydropower</i> |
| STEIN, Eric W. | 2013 | <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> | <i>A comprehensive multi-criteria model to rank electric energy production technologies</i> |
| SLIOGERIENE, Jurate. et al. | 2013 | <i>Energy Procedia</i> | <i>Analysis and Choice of Energy Generation Technologies: The Multiple Criteria Assessment on the Case Study of Lithuania</i> |

(Continua na próxima página...)

Tabela 12 – ... continuação

| Autor | Ano | Periódico | Título |
|------------------------------------|------------|--|--|
| DE CARLO, F.; SCHIRALDI, M. | 2013 | <i>International Journal of Engineering and Technology</i> | <i>Sustainable choice of the location of a biomass plant: An application in Tuscany</i> |
| OBERTI, Pascal. et al. | 2013 | <i>Green Energy and Technology</i> | <i>Photovoltaic plants selection on an insular grid using multicriteria outranking tools: Application in corsica island (France)</i> |
| PERPIÑA, Carolina. et al. | 2013 | <i>Land Use Policy</i> | <i>Multicriteria assessment in GIS environments for siting biomass plants</i> |
| SÁNCHEZ-LOZANO, Juan M. et al. | 2013 | <i>Renewable & Sustainable Energy Reviews</i> | <i>Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain</i> |
| QUIJANO H, R. et al. | 2012 | <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> | <i>MODERGIS application: Integrated simulation platform to promote and develop renewable sustainable energy plans, Colombian case study</i> |
| CHOUDHARY, D.; SHANKAR, R.. | 2012 | <i>Energy</i> | <i>An STEEP-Fuzzy AHP-TOPSIS framework for evaluation and selection of thermal power plant location: A case study from India</i> |
| VAGIONA, D. G.; KARANIKOLAS, N. M. | 2012 | <i>Global Nest Journal</i> | <i>A multicriteria approach to evaluate offshore wind farms siting in Greece</i> |
| LEE, Amy HI et al. | 2012 | <i>Energy Conversion and Management</i> | <i>A wind turbine evaluation model under a multi-criteria decision making environment</i> |
| AL-YAHYAI, Sultan et al. | 2012 | <i>Renewable Energy</i> | <i>Wind farm land suitability indexing using multi-criteria analysis</i> |

(Continua na próxima página...)

Tabela 12 – ... continuação

| Autor | Ano | Periódico | Título |
|--|------------|--|---|
| TEGOU, Leda-Ioanna. et al. | 2012 | <i>International Journal of Green Energy</i> | <i>A multi-criteria framework for an isolated electricity system design with renewable energy sources in the context of distributed generation: The case study of Lesvos Island, Greece</i> |
| HAURANT, P. et al. | 2011 | <i>Energy Policy</i> | <i>Multicriteria selection aiding related to photovoltaic plants on farming fields on Corsica island: A real case study using the ELECTRE outranking framework</i> |
| KANG, He-Yau et al. | 2011 | <i>Energies</i> | <i>An integrated multi-criteria decision making model for evaluating wind farm performance</i> |
| SISKOS, Pelopidas; HOURIDIS, Socrates. | 2011 | <i>International Journal of Multicriteria Decision Making</i> | <i>Rationalising photovoltaic energy investments with multicriteria decision analysis: A Greek case study</i> |
| EKMEKÇIOĞLU, Mehmet. et al. | 2011 | <i>International Journal of Computational Intelligence Systems</i> | <i>A Fuzzy multi-criteria swot analysis: An application to nuclear power plant site selection</i> |
| SAN CRISTÓBAL, J. R. | 2011 | <i>Renewable Energy</i> | <i>Multi-criteria decision-making in the selection of a renewable energy project in Spain: The VIKOR method</i> |
| TAN, Youchao. et al. | 2011 | <i>Australian Journal of Basic and Applied Sciences</i> | <i>Optimal sustainable energy portfolio in Tehran province industries using Fuzzy AHP</i> |

(Continua na próxima página...)

Tabela 12 – ... continuação

| Autor | Ano | Periódico | Título |
|-------------------------------------|------------|---|---|
| KAYA, Tolga; KAH- RAMAN, Cengiz. | 2011 | <i>Expert Systems with Applications</i> | <i>Multicriteria decision making in energy planning using a modified Fuzzy TOPSIS methodology</i> |
| AMER, Muhammad; DAIM, Tugrul U. | 2011 | <i>Energy for Sustainable Development</i> | <i>Selection of renewable energy technologies for a developing county: A case of Pakistan</i> |
| TALINLI, Ilhan. et al. | 2010 | <i>Energy Policy</i> | <i>Comparative analysis for energy production processes (EPPs): Sustainable energy futures for Turkey</i> |
| LA ROVERE, Emilio Lebre et al. | 2010 | <i>Renewable and Sustain- able Energy Reviews</i> | <i>Sustainable expansion of electricity sector: Sustainability indicators as an instrument to support decision making</i> |
| COWAN, Kelly. et al. | 2010 | <i>Energy</i> | <i>Exploring the impact of technology development and adoption for sustainable hydroelectric power and storage technologies in the Pacific Northwest United States</i> |
| KAYA, Tolga; KAH- RAMAN, Cengiz. | 2010 | <i>Energy</i> | <i>Multicriteria renewable energy planning using an integrated Fuzzy VIKOR & AHP methodology: The case of Istanbul</i> |
| NIXON, J. D. et al. | 2010 | <i>Energy</i> | <i>Which is the best solar thermal collection technology for electricity generation in north-west India? Evaluation of options using the analytical hierarchy process</i> |
| TEGOU, Leda- Ioanna. et al. | 2010 | <i>Journal of Environmen- tal Management</i> | <i>Environmental management framework for wind farm siting: Methodology and case study</i> |
| ZAMORANO, M. et al. | 2009 | <i>Energy Policy</i> | <i>A multicriteria space model to locate grid-connected photovoltaic power plants in Granada (Spain), case study</i> |

(Continua na próxima página...)

Tabela 12 – ... continuação

| Autor | Ano | Periódico | Título |
|---|------------|--|---|
| TSOUTSOS, Theo- charis et al. | 2009 | <i>Energy Policy</i> | <i>Sustainable energy planning by using multi-criteria analysis application in the island of Crete</i> |
| CAVALLARO, Fausto. | 2009 | <i>Renewable Energy</i> | <i>Multi-criteria decision aid to assess concentrated solar thermal technologies</i> |
| POLATIDIS, Hera- cles et al. | 2009 | <i>Energy Sources</i> | <i>Decision aid with the MCDA-RES software: A wind-hydro energy application for an Island of the Aegean, Greece</i> |
| WANG, Jiang-Jiang et al. | 2009 | <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> | <i>Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making</i> |
| TEGOU, L. I. et al. | 2009 | <i>WIT Transactions on Ecology and the Environment</i> | <i>Wind turbines site selection on an isolated island</i> |
| SUPRIYASILP, Tha- naporn. et al. | 2009 | <i>Energy Policy</i> | <i>Hydropower development priority using MCDM method</i> |
| BUCHHOLZ, Tho- mas et al. | 2009 | <i>Energy Policy</i> | <i>Multi Criteria Analysis for bioenergy systems assessments</i> |
| CHATZIMOURATIDIS, Athanasios I.; PILA- VACHI, Petros A. | 2008 | <i>Energy Policy</i> | <i>Multicriteria evaluation of power plants impact on the living standard using the analytic hierarchy process</i> |

(Continua na próxima página...)

Tabela 12 – ... continuação

| Autor | Ano | Periódico | Título |
|------------------------------------|------------|---|--|
| DAGDEVIREN, Metin; ERASLAN, Ergün. | 2008 | <i>International Journal of Energy Research</i> | <i>Priority determination in strategic energy policies in Turkey using analytic network process (ANP) with group decision making</i> |
| BEGIC, Fajik; AF-GAN, Naim H. | 2007 | <i>Energy</i> | <i>Sustainability assessment tool for the decision making in selection of energy system-Bosnian case</i> |
| DIAKOULAKI, D.; KARANGELIS, F. | 2007 | <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> | <i>Multi-criteria decision analysis and cost-benefit analysis of alternative scenarios for the power generation sector in Greece</i> |
| HEINRICH, G. et al. | 2007 | <i>Energy</i> | <i>Ranking and selection of power expansion alternatives for multiple objectives under uncertainty</i> |
| MEZA, Jose L. C. et al. | 2007 | <i>IEEE Transactions on Power Systems</i> | <i>A model for the multiperiod multiobjective power generation expansion problem</i> |
| DOUKAS, Haris Ch. et al. | 2007 | <i>European Journal of Operational Research</i> | <i>Multi-criteria decision aid for the formulation of sustainable technological energy priorities using linguistic variables</i> |
| GAMBOA, Gonzalo; MUNDA, Giuseppe. | 2007 | <i>Energy Policy</i> | <i>The problem of windfarm location: A social multi-criteria evaluation framework</i> |
| WIJAYATUNGA, Priyantha DC et al. | 2006 | <i>Energy Conversion and Management</i> | <i>Strategies to overcome barriers for cleaner generation technologies in small developing power systems: Sri Lanka case study</i> |
| POLATIDIS, Hera-cles et al. | 2006 | <i>Energy Sources</i> | <i>Selecting an appropriate multi-criteria decision analysis technique for renewable energy planning</i> |

(Continua na próxima página...)

Tabela 12 – ... continuação

| Autor | Ano | Periódico | Título |
|-----------------------|------------|-------------------------|---|
| DOUKAS, Haris. et al. | 2006 | <i>Resources Policy</i> | <i>Supporting sustainable electricity technologies in Greece using MCDM</i> |

ANEXO A - PAÍSES MEMBROS DA OCDE

A OCDE é uma organização internacional, com 35 países membros, que atua de maneira a promover a troca de informações visando colaborar com o crescimento econômico dos países membros e promover políticas para melhores condições de vida economicamente e socialmente para as pessoas de todo o mundo (OCDE, 2017).

- | | |
|-------------------|-------------------|
| 1.Austrália | 19.Coreia do Sul |
| 2.Áustria | 20.Letônia |
| 3.Bélgica | 21.Luxemburgo |
| 4.Canadá | 22.México |
| 5.Chile | 23.Países Baixos |
| 6.República Checa | 24.Nova Zelândia |
| 7.Dinamarca | 25.Noruega |
| 8.Estônia | 26.Polônia |
| 9.Finlândia | 27.Portugal |
| 10.França | 28.Eslováquia |
| 11.Alemanha | 29.Eslovênia |
| 12.Grécia | 30.Espanha |
| 13.Hungria | 31.Suécia |
| 14.Islândia | 32.Suíça |
| 15.Irlanda | 33.Peru |
| 16.Israel | 34.Reino Unido |
| 17.Itália | 35.Estados Unidos |
| 18.Japão | |