

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

JOSÉ GUILHERME DE PAULA DO ROSÁRIO

**COMPARAÇÃO DE MÉTODOS MULTICRITÉRIOS EM
TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM
POTENCIAIS DE EXPANSÃO NO BRASIL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PONTA GROSSA
2018**

JOSÉ GUILHERME DE PAULA DO ROSÁRIO

**COMPARAÇÃO DE MÉTODOS MULTICRITÉRIOS EM
TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM
POTENCIAIS DE EXPANSÃO NO BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção, do Departamento de Engenharia de Produção, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Cassiano Moro Piekarski.

PONTA GROSSA

2018



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO
PARANÁ
CÂMPUS PONTA GROSSA
Departamento Acadêmico de Engenharia de Produção



TERMO DE APROVAÇÃO DE TCC

Comparação de métodos multicritérios em tecnologias de geração de energia elétrica com potenciais de expansão no Brasil

por

José Guilherme de Paula do Rosário

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado em 15 de junho de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Cassiano Moro Piekasrki
Prof. Orientador

Prof. Dr. Antonio Carlos de Francisco
Membro titular

Prof. Me. Luís Fernando Paulista Cotian
Membro titular

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso”.

Dedico este trabalho à minha família, em especial meus pais Francisco e Cleusa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que sempre me deu forças para lutar e correr atrás de meus objetivos, sem ele não conseguiria chegar até o fim desta etapa.

Ao meu orientador Prof. Dr. Cassiano Moro Piekarski, por sempre estar disponível e disposto a me ajudar, pelas conversas e conselhos. Considero como um grande exemplo sempre incentivando seus alunos a darem o melhor de si e guiando com sua sabedoria e motivação, também sou muito grato por ter me proporcionado a oportunidade de participar do projeto de Iniciação Científica e do LESP (Laboratório de Estudos em Sistemas Produtivos Sustentáveis) que fica na UTFPR campus Ponta Grossa.

Aos meus colegas de sala que fizeram ou fazem parte de minha vida até hoje, com toda certeza fiz verdadeiros amigos nesta etapa.

A esta Universidade e todos os professores que de forma direta ou indireta contribuíram para minha formação e possibilitaram a conclusão do curso.

Aos meus amigos de república por todo apoio e motivação nos momentos difíceis. Por tudo que passamos juntos eu tenho a certeza que criamos muito mais que laços de amizade. Durante esses cinco anos, criamos uma família.

Meu eterno agradecimento aos meus pais Francisco e Cleusa, aos meus irmãos Luiz Angelo e Thais e toda minha família que sempre me apoiou e acreditou nos meus sonhos. Nos momentos mais corridos e apertados nunca permitiram que nada me abalasse, muitas vezes se sacrificaram enfrentando muitos problemas para que eu pudesse me concentrar nos estudos, difícil expressar toda minha gratidão por tudo que enfrentaram para possibilitar essa conquista, hoje eu sei o valor de tudo isso.

A minha amada namorada Cladilaine, por toda a paciência que teve comigo durante esses últimos anos da graduação, sempre me apoiou e me motivou, foram vários finais de semana em que se sacrificou me ajudando com seus conselhos e apoio, com certeza essa etapa ficou mais leve com seu apoio.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento aos meus amigos Murillo Vetroni Barros e Mateus Sartori Tonon que contribuíram diretamente com o meu estudo.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

RESUMO

ROSÁRIO, José Guilherme de Paula. **Comparação de métodos multicritérios em tecnologias de geração de energia elétrica com potenciais de expansão no Brasil**. 2018. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia de Produção - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2018.

O presente trabalho visa elencar as tecnologias de geração de eletricidade no Brasil, e comparar indicadores baseados em uma análise multicritério, para isso utilizou-se o modelo ELECTRE II e realizou-se uma comparação com um estudo de Dester (2012) que utilizou o modelo PROMETHEE II, junto com os critérios que fazem parte das dimensões: (i) Econômica, (ii) Social, (iii) Ambiental, e (iv) Tecnológica. Portanto foi empregado o método de análise multicritério ELECTRE II, e posteriormente comparado com os resultados obtidos através de uma análise onde foi aplicado o método PROMETHEE II para as mesmas fontes sob a óptica dos mesmos critérios. As tecnologias foram avaliadas com base em critérios que representem as três dimensões da sustentabilidade de cada fonte de geração. São treze fontes analisadas sob a perspectiva de dezoito critérios. Foram simulados quatro casos: Caso Equitativo, que trata de uma distribuição de pesos iguais para todos os critérios; Caso Técnico, onde os critérios técnicos são favorecidos; Caso Econômico, em que os critérios econômicos têm maior representatividade; e Caso Socioambiental, onde a dimensão socioambiental tem maior peso. Para cada caso foram construídos *rankings* de preferências para as fontes de geração. Entre os resultados obtidos estão, o bom desempenho das fontes de geração UHE (Usina Hidrelétrica com reservatório e fio d'água), e o mal desempenho das fontes de geração UTE-ca (Termoelétrica a carvão mineral) e UTE-gs (Termoelétrica a gás natural - ciclo simples). Entre as comparações dos métodos é possível identificar maior dificuldade na elaboração dos *rankings* no método ELECTRE II devido a possibilidade de empates das alternativas.

Palavras-chave: ELECTRE II. Análise Multicritério. Geração de Energia Elétrica.

ABSTRACT

ROSÁRIO, José Guilherme de Paula. **Comparison multicriteria analysis methods on electricity generation technologies with potential for expansion in Brazil.**

2018. 55 p. Work of Conclusion Course Graduation in Production Engineering - Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2018.

The present study aims to list electricity generation technologies in Brazil and compare indexes based on a multi-criteria, to do that the ELECTRE II model was applied and a comparison to a Dester (2012) study who used the PROMETHEE II model was made, with the criteria that belong to the dimensions: (i) Economic, (ii) Social, (iii) Environmental, and (iv) Technology. In this regard was applied the ELECTRE II multi-criteria analysis method, and later compared to results obtained through an analysis were the PROMETHEE II method was used for the same sources under the gaze of both criteria. The technologies will be evaluated based on criteria which represent the sustainability of each generation source. There are thirteen analyzed sources from the perspective of eighteen criteria. Four cases were simulated: Equitable Case: it consists in an equal weight distribution for all criteria; Technical Case: where the technical criteria are benefited; Economic Case: in which the economical criteria have greater representativity; Socio-environmental Case: where the socio-environmental dimension has greater weight. For each case preference rankings were created for the generation sources. Among obtained results there are the good performance of the UHE (Usina Hidrelétrica (in portuguese), a plant with a reservoir and run-of-the-river type) generation source and the bad performance of the UTE-ca (Usina termoelétrica a carvão mineral (in portuguese), a coal fired power plant) and UTE (Usina termoelétrica a gás natural (in portuguese), a simple cycle thermal power plant). Among the methods comparisons it is possible to identify a prevailing difficulty elaborating rankings in ELECTRE II Method due to the possibility of tie among alternatives.

Keywords: ELECTRE II. Multicriteria analysis. Electricity generation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Perfil esquemático do processo de produção de energia elétrica a partir do biogás.....	18
Figura 2 - Perfil esquemático do processo de produção de energia elétrica a partir do gás natural.....	19
Figura 3 - Perfil esquemático de usina hidrelétrica.....	21
Figura 4 - Perfil esquemático do processo de produção de energia elétrica a partir do petróleo	22
Figura 5 - Perfil esquemático do processo de produção de energia elétrica a partir do carvão mineral.....	24
Figura 6 - Perfil esquemático de uma usina nuclear	25
Figura 7 - Principais métodos de MCDA	30
Figura 8 - Grafo de Sobreclassificações	44
Gráfico 1 - Capacidade Instalada no SIN em Dezembro de 2016.....	15
Quadro 1 - Geração das principais UHE da matriz elétrica brasileira	17
Quadro 2 - Fases da pesquisa	31
Quadro 3 - Palavras-chave e suas variações.....	32
Quadro 4 - Combinações das palavras-chave	32
Quadro 5 - Buscas realizadas	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Etapas de Filtragem	34
Tabela 2 - Referência de cada fonte analisada	37
Tabela 3 - Referência e descrição dos critérios	38
Tabela 4 - Tabela de valoração normalizada	40
Tabela 5 - Casos e pesos de cada dimensão	40
Tabela 6 - Índice de Concordância para o caso Equitativo	41
Tabela 7 - Índice de Concordância para o caso Técnico	41
Tabela 8 - Índice de Concordância para o caso Econômico	42
Tabela 9 - Índice de Concordância para o caso Socioambiental.....	42
Tabela 10 - Índice de Discordância para os caso analisados.....	43
Tabela 11 - Matriz de Sobreclassificação caso Equitativo	44
Tabela 12 - Ranking final dos casos analisados	46
Tabela 13 - Nova Matriz de Sobreclassificação	47
Tabela 14 - Ranking dos casos	48

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 PROBLEMAS DA PESQUISA	12
1.2 JUSTIFICATIVA	12
1.3 OBJETIVO GERAL	13
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2 REFERENCIAL	15
2.1 MATRIZ DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL	15
2.1.1 Usinas Hidrelétricas	16
2.1.2 Biomassa	17
2.1.3 Gás natural	19
2.1.4 Eólica	20
2.1.5 Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs)	21
2.1.6 Térmicas	22
2.1.7 Carvão	23
2.1.8 Nuclear	24
2.1.9 Solar	25
2.1.10 Expansão da Capacidade de Geração de Eletricidade	26
2.2 ANÁLISE MULTICRITÉRIO EM PROBLEMAS DE ENERGIA	28
3 METODOLOGIA	31
3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	31
3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	31
3.3 LEVANTAMENTO DE ARTIGOS PUBLICADOS NA ÁREA	32
3.4 MÉTODO DE ANÁLISE	34
3.5 MATERIAIS	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES DE COMPARAÇÃO	41
4.1 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	46
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento sustentável é um tema discutido, atualmente, em todo o mundo e em quase todas as áreas. Com o esgotamento de recursos naturais, aquecimento global, entre outros impactos gerados por ações do ser humano, é de extrema importância que as opções e tecnologias empregadas no desenvolvimento sejam estudadas e avaliadas, considerando não apenas o lado econômico, mas as vertentes ambiental e social.

A geração de energia elétrica está em uma grande evolução tanto no desenvolvimento de novas tecnologias quanto na expansão da capacidade, algo fundamental para o desenvolvimento da sociedade, visto ser utilizada para muitas atividades realizadas no dia a dia. Com isso, os planejadores de energia e empresários estão cada vez mais preocupados em avaliar seus investimentos, considerando as vertentes ambientais e sociais a fim de tornar a energia produzida no Brasil cada vez mais sustentável.

No Brasil, o plano de expansão da capacidade de geração de energia elétrica está passando por muitas mudanças. Podemos identificar tais mudanças se compararmos o primeiro plano decenal de expansão de energia, realizado em 2006, com o último, publicado em julho de 2017. Enquanto os primeiros planos avaliaram apenas os custos e risco de insuficiência de oferta de energia, o último plano já utiliza um modelo matemático de decisão de investimentos e conta com diretrizes de políticas energéticas que indicam a expansão de fontes renováveis e limitam as expansões em fontes mais poluentes.

O planejamento energético envolve diversas variáveis que transformam o problema de expansão em algo complexo, uma vez que o planejador deve analisar viabilidade econômica, risco de falta de energia, impacto social e impacto ambiental. Visto isso, busca-se realizar uma análise das tecnologias de geração de energia elétrica considerando as principais dimensões afetadas pela geração com base em estudos e critérios de avaliação que são adotados por outros países e que sejam compatíveis com a realidade das tecnologias empregadas no Brasil.

Dessa maneira, o presente trabalho visa elencar as tecnologias de geração de eletricidade no Brasil e comparar indicadores baseados em uma análise multicritério, incorporando as questões de sustentabilidade ao analisar essas tecnologias. Para tanto, utilizou-se o modelo *Elimination Et Choix Traduisant la*

Realité (ELECTRE) II e realizou-se uma comparação com um estudo de Dester (2012) que utilizou o modelo *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation* (PROMETHEE) II junto aos critérios que fazem parte das dimensões: (i) Econômica, (ii) Social, (iii) Ambiental e (iv) Tecnológica.

1.1 PROBLEMAS DA PESQUISA

Com base na recomendação de estudo futuro de Dester (2012), esta pesquisa teve dois problemas de pesquisa para serem respondidos. São eles:

- Quais são as fontes de geração de energia elétrica que apresentam potenciais de expansão no Brasil?

- Quais são as diferenças e similaridades encontradas nos resultados da análise multicritério, utilizando os métodos ELECTRE II e PROMETHEE II para as fontes de geração de energia elétrica, que apresentam potenciais de expansão no Brasil?

1.2 JUSTIFICATIVA

A energia elétrica é uma fonte chave para a economia moderna, e a capacidade de fornecimento de energia é essencial para o desenvolvimento de um país, mas a geração de energia deve levar em conta quais os impactos causados no meio ambiente e na sociedade, a fim de mitigar esses impactos, possibilitar e acelerar a transição das velhas formas de geração para as tecnologias de maior eficiência e menor impacto. Existem órgãos que trabalham com países do mundo todo em busca de inovações e compartilhamento de tecnologias. Um desses órgãos é a Agência Internacional de Energia (IEA, 2017).

Para atender à demanda de energia elétrica, a capacidade de geração de energia elétrica, no Brasil, deve crescer em torno de 43% até o ano de 2026 em relação à capacidade instalada em 2016. A Empresa de Pesquisa Energética, responsável pelo Plano de Expansão de Energia, está aprofundando e tornando cada vez mais amplo seus estudos, a fim de criar indicativos para que a expansão necessária possa acontecer de maneira a seguir um planejamento que garanta o atendimento às questões de segurança e sustentabilidade, mas não descarta estudos e contestações por parte de empreendedores e pesquisadores (EPE, 2017).

O *mix* de geração de energia se refere à composição de tecnologias a fim de fornecer uma estabilidade para a geração de eletricidade de um país (WIERZBOWSKI, 2016). Historicamente, esse *mix* era determinado principalmente por restrições técnicas e econômicas, mas os impactos gerados e acordos internacionais assinados entre países e organizações têm inserido questões sobre a sustentabilidade na decisão de investimentos para a composição do *mix*.

Um estudo realizado por Mirasgedis (1997) traz a comparação entre a ferramenta de análise multicritério e abordagem de custos externos. Segundo o estudo, a análise multicritério apresenta melhor desempenho em considerar os aspectos voltados para a análise ambiental, evitando, assim, as altas incertezas envolvidas na valoração de bens não comercializáveis, assim como a valoração do esgotamento de alguns recursos ou geração de impactos que podem ser irreparáveis.

Dessa maneira, os planejadores e tomadores de decisão têm um grande desafio quanto a escolha das tecnologias a serem empregadas na geração de eletricidade, e, à medida que crescem as opções de geração e as variáveis envolvidas se modificam, tornam-se cada vez mais necessários estudos com diferentes abordagens para maior nível de confiança dos resultados e escolha das fontes de geração (BALEŽENTIS, 2017).

Sendo assim, torna-se necessária a avaliação das opções de geração de energia elétrica sob a ótica de todas as vertentes envolvidas, utilizando-se de uma metodologia que seja capaz de ranquear essas tecnologias, considerando todas as variáveis afetadas. Também é de suma importância a utilização de métodos diferentes para a comparação dos resultados, para avaliar se o método aplicado é adequado para o problema aplicado, e tenha assim maior confiabilidade na escolha de opções.

1.3 OBJETIVO GERAL

Elencar as tecnologias de geração de eletricidade com potenciais de expansão no Brasil utilizando o método ELECTRE II, e comparar com os resultados obtidos com o método PROMETHEE II.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar teoricamente as fontes de energia e métodos de análise multicritério;
- Levantar os métodos de análises multicritério utilizados na ordenação de sistemas de geração de energia elétrica;
- Levantar os critérios que representem a sustentabilidade das fontes analisadas;
- Aplicar o método;
- Realizar a análise de sensibilidade;
- Comparar os resultados do método ELECTRE II e PROMETHEE II.

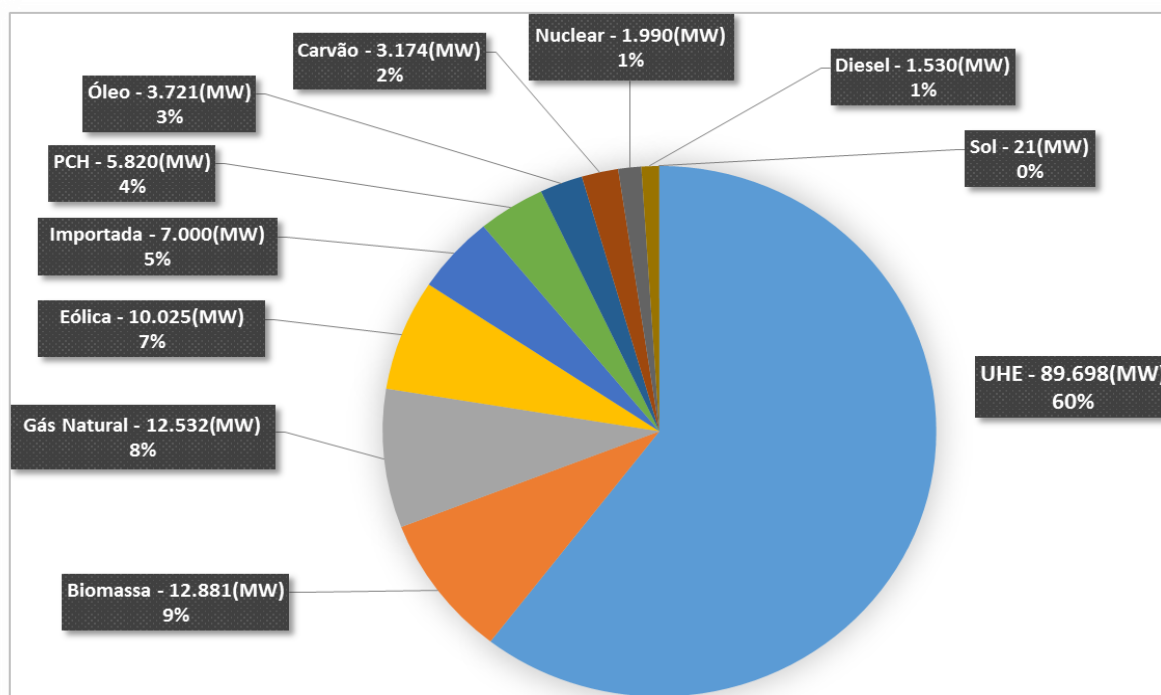
2 REFERENCIAL

Este capítulo, sobre o referencial teórico, apresenta o embasamento teórico, permite trazer explicações sobre as duas grandes áreas que compõem o trabalho, sendo elas: (i) a Matriz de Geração de Eletricidade no Brasil, que contém a composição do *mix*, assim como uma visão geral de cada fonte; e (ii) a ferramenta de análise multicritério.

2.1 MATRIZ DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL

O campo estudado no presente trabalho será o energético, delimitado à geração de energia elétrica no Brasil. A matriz de geração de eletricidade do Brasil é composta por onze fontes. Podemos visualizar o *mix* de geração apresentado no Gráfico 1 junto à participação de cada fonte.

Gráfico 1 - Capacidade Instalada no SIN em Dezembro de 2016



Fonte: EPE (2017).

Como ilustrado no Gráfico 1, o *mix* de geração de eletricidade no Brasil é predominado pela fonte hídrica, seguido pela fonte biomassa, gás natural, eólica, importada, Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH), óleo, carvão, nuclear, diesel e solar.

Junto à volatilidade do preço dos combustíveis fósseis, o interesse mundial em reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) cria-se uma necessidade de energia extraída de fontes renováveis para a substituição das tecnologias que consomem combustíveis fósseis, a fim de reduzir os impactos ao meio ambiente. O Brasil conta com enorme potencial para expansão das fontes geradoras a partir de vento, sol e ondas, porém a transição para estas novas tecnologias ocorre a passos curtos (DE JONG, 2015).

2.1.1 Usinas Hidrelétricas

De acordo com a ANEEL (2008), usinas hidrelétricas são as usinas que possuem potência instalada superior a 30 MW, as usinas inferiores a essa potência são classificadas como Centrais Geradoras Hidrelétricas e Pequenas Centrais Hidrelétricas.

A Usina Hidrelétrica (UHE) é uma fonte que produz eletricidade a partir do fluxo gerado por seus grandes reservatórios, que são o ponto chave da usina hidrelétrica e demandam uma grande construção, que envolve e transforma todo o ambiente ao seu redor. Essa fonte de energia chegou a representar 90% da capacidade de geração de energia elétrica instalada, porém, com a necessidade de diversificação como forma de aumentar a segurança do fornecimento de energia elétrica, vem perdendo participação na capacidade instalada (ANEEL, 2008). Novos empreendimentos enfrentam dificuldades devido à falta de estudos e inventários para analisar a viabilidade, e barreiras ligadas ao licenciamento ambiental fizeram com que sua participação no *mix* reduzisse para 60% em 2016, como mostrado no Gráfico 1. Atualmente, no Brasil, existem 617 centrais geradoras hidrelétrica, 431 pequenas centrais hidrelétricas e 219 usinas hidrelétricas em funcionamento (ANEEL, 2017). A projeção dessa fonte para o ano de 2026 é a redução para, aproximadamente, 49% da capacidade instalada (EPE, 2017).

O Quadro 1 apresenta as 10 principais UHE junto à potência fiscalizada, município da unidade geradora, o rio utilizado como fonte de energia e o percentual que representa dentro da geração das UHE no Brasil.

Quadro 1 - Geração das principais UHE da matriz elétrica brasileira

Usina	Potência Fiscalizada (kW)	Município	Rio		
Tucuruí	8.535.000	Tucuruí - PA	Tocantins	8,43%	
Itaipu (Parte Brasileira)	7.000.000	Foz do Iguaçu - PR	Paraná	6,92%	
Belo Monte	3.938.566	Vitória do Xingu - PA	Xingu	3,89%	
Jirau	3.750.000	Porto Velho - RO	Madeira	3,71%	
Santo Antônio	3.568.000	Porto Velho - RO	Madeira	3,53%	
Ilha Solteira	3.444.000	Ilha Solteira - SP Selvíria - MS	Paraná	3,40%	
Xingó	3.162.000	Canindé de São Francisco - SE Piranhas - AL	São Francisco	3,12%	
Paulo Afonso IV	2.462.400	Delmiro Gouveia - AL Paulo Afonso - BA	São Francisco	2,43%	
Itumbiara	2.080.500	Araporã - MG Itumbiara - GO	Paranaíba	2,06%	
Teles Pires	1.819.800	Jacareacanga - PA Paranaíta - MT	Teles Pires	1,80%	
Total de energia produzida pelas 10 principais UHE				39.760.267	39,29%
Total de energia produzida por todas UHE				101.188.678	100%

Fonte: ANEEL (2017).

Das 219 usinas hidrelétricas que compõem a matriz de geração elétrica, 10 representam aproximadamente 40% da geração; em especial, a usina de Itaipu produz 14.000 MW, sendo que 7.000 MW é gerado pela parte do Brasil e 7.000 MW representa a participação do Paraguai, sendo que, desses, aproximadamente 5.800 MW são comprados pelo Brasil e estão representados pela fonte importação no Gráfico 1 (ANEEL, 2017).

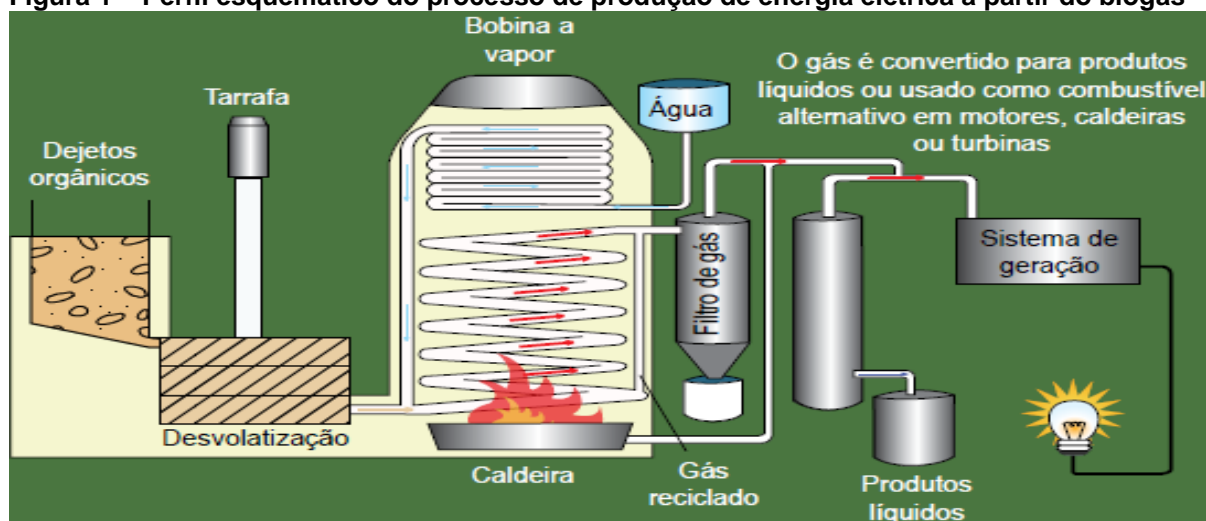
2.1.2 Biomassa

Como podemos ver no Gráfico 1, a biomassa representa 9% da capacidade instalada de geração de eletricidade. É uma das fontes com maior potencial de expansão de capacidade, considerada como uma alternativa para substituir as

fontes de geração que utilizam combustíveis fósseis. Entrega a possibilidade de geração de energia elétrica e biocombustíveis de forma mais limpa (ANEEL, 2008).

A biomassa conta com diversas possibilidades de aplicação para a extração da eletricidade, todas essas possibilidades envolvem a transformação da matéria-prima em uma entrada para outro processo que produzirá energia mecânica e será transformada em energia elétrica através de um gerador, como ilustra a Figura 1 (ANEEL, 2008; EPE, 2017).

Figura 1 – Perfil esquemático do processo de produção de energia elétrica a partir do biogás



Fonte: ANEEL (2008).

Entre as principais possibilidades tecnológicas de geração através da biomassa estão:

- Ciclo a vapor com turbinas de contrapressão,
- Ciclo a vapor com turbinas de condensação e extração,
- Ciclo combinado integrado à gaseificação da biomassa.

Outra tecnologia que está surgindo a fim de estabilizar a produção de energia de algumas fontes intermitentes é os geradores híbridos, que contam com um sistema de geração por duas ou mais fontes e, em alguns casos, com armazenamento da energia excedente. Hurtado (2015) analisou um sistema de geração através de gaseificação de biomassa e painéis solares fotovoltaicos com um banco de baterias elétricas. Os resultados mostraram que a estabilidade de geração desse sistema chegou próxima a 98%. Abdulrahman (2018) elaborou um

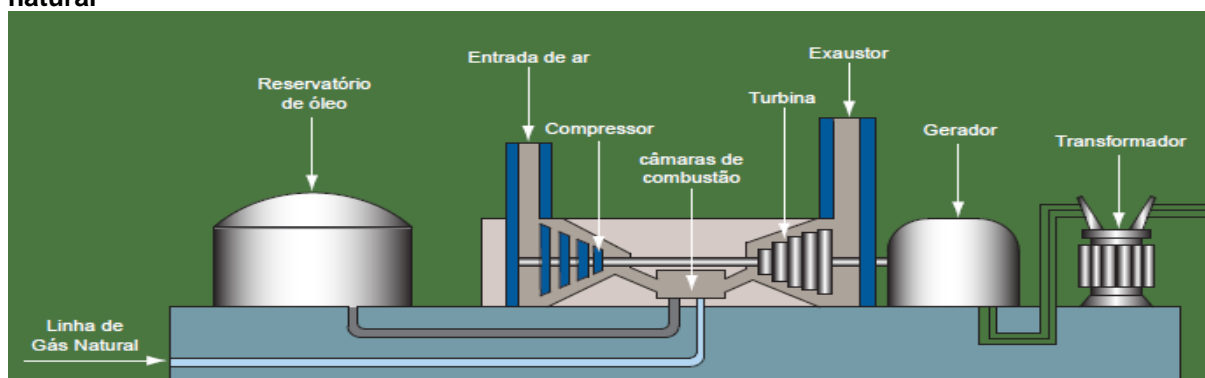
estudo multicritério visando a melhor aplicação para a utilização da biomassa no Egito, e a geração de energia elétrica ficou como segunda melhor opção para otimização do destino da biomassa.

Estudos mostram que a geração de energia biomassa extraída de resíduos sólidos trariam benefícios tanto em forma da destinação correta quanto para a geração de energia elétrica mais limpa. Luz (2015) mostrou que a possibilidade de geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos é viável tanto se avaliada pelo ponto de vista econômico quanto tecnológico, sendo que municípios com população superior a 60 mil habitantes poderiam ter sua própria estação. Os municípios com tamanho populacional inferior a 60 mil habitantes podem ainda se agrupar por meio de consórcios. Com a participação de 20% das cidades brasileiras, incluindo as mais populosas, o Brasil pode tratar 75% da produção de resíduos de forma consciente, além da possibilidade de produzir 3% da energia elétrica gerada a partir desses resíduos.

2.1.3 Gás natural

A fonte de Gás Natural, a qual representa 8% da capacidade de geração instalada no Brasil, é uma fonte em que a geração de energia pode ser obtida através de duas maneiras: usinas simples que produzem apenas energia elétrica a partir do gás natural e a outra, chamada de co-geração, em que se produz energia elétrica e energia térmica utilizadas para outros processos industriais (ANEEL, 2008). A Figura 3 mostra de maneira bem simplificada todo o caminho e processo da geração de energia através do gás natural.

Figura 2 - Perfil esquemático do processo de produção de energia elétrica a partir do gás natural



Fonte: ANEEL (2008).

Como mostra a Figura 2, após o gás passar pelas câmaras de combustão, movimenta as turbinas que, ligadas à um gerador, produzem a energia, que é, então, transformada. A forma como serão destinados os gases após o processo de combustão determina se o ciclo é combinado ou simples. Quando se trata de usina simples, é realizado o resfriamento, e os gases são liberados através de uma chaminé na atmosfera. Os gases que são emitidos pelo processo de geração de eletricidade são transformados em vapor e utilizados para a movimentação das turbinas, e, assim, a eletricidade gerada pelas usinas de gás natural combinado é gerada a partir de gás e vapor. Essa tecnologia é jovem, teve início na década de 80 e está ganhando participação na matriz energética mundial, apesar de exigir maiores investimentos, a eficiência do processo compensa o incremento financeiro (ANEEL, 2008).

De acordo com o EPE (2017), a construção de usinas tecnologicamente mais eficientes para substituir termelétricas ultrapassadas e de baixa eficiência possibilitariam um acréscimo de 340MW na potência total instalada, mantendo a quantidade de emissões geradas atualmente por essas usinas. Assim, o gás natural é uma fonte que possibilita o fornecimento de energia elétrica de maneira segura e mais limpa.

2.1.4 Eólica

Como mostra o Gráfico 1, essa tecnologia representa 7% da capacidade de geração do Brasil. A geração de energia elétrica através da fonte eólica se dá a partir da energia cinética, essa fonte, que tem o vento como combustível e tem ganhado interesse de todos os setores que consomem eletricidade, por ser uma tecnologia de geração mais limpa, começou a ganhar força e vem se desenvolvendo e penetrando no *mix* de geração após a crise do petróleo de 1973 (ANEEL, 2008. ŞAHIN, 2004).

Atualmente, essa fonte apresenta níveis de preços altamente competitivos quanto às outras fontes de energia candidatas à expansão da geração, mas ainda deve ser adotada de maneira a não comprometer a segurança de fornecimento de energia, que precisa ser assegurado através de fontes complementares. Quanto maior a participação de fontes intermitentes como a eólica, maior precisa ser a disponibilidade de fontes complementares (EPE, 2017). A energia obtida através da

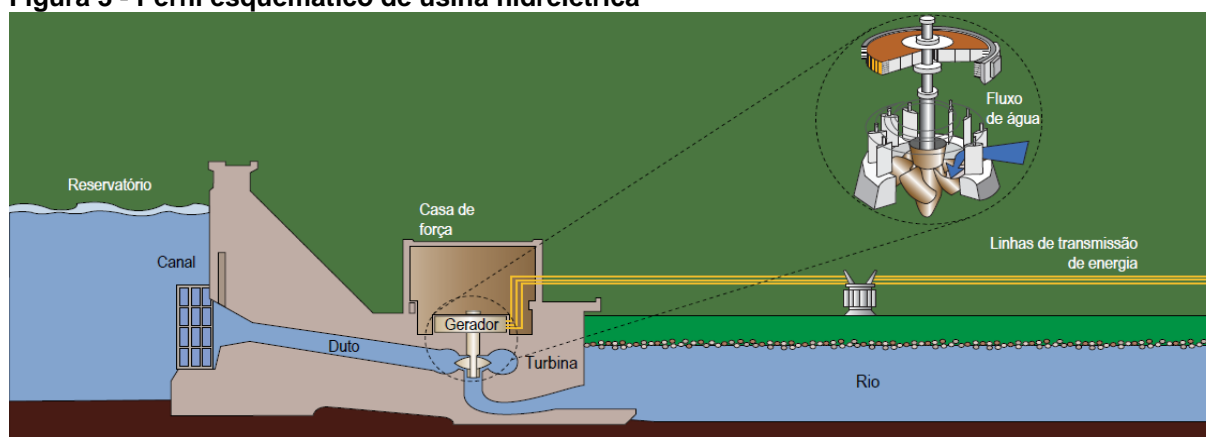
fonte eólica apresenta grande potencial. Estudos mostram as possibilidades de sistemas híbridos, a fim de estabilizar a geração através da combinação de energia eólica com outras fontes renováveis, assim como os estudos que propõem criar uma forma de integrar as fontes de energia renováveis intermitentes, minimizando os impactos gerados na rede, como realizado por Perera (2017).

2.1.5 Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs)

Essa fonte representa 4% da capacidade de geração de eletricidade do Brasil, em dezembro de 2016, e deve se manter próximo a essa participação até 2026, segundo a EPE (2017). São as usinas que possuem potência instalada superior a 1 MW e inferior a 30,1 MW (ANEEL, 2008). As usinas inferiores com capacidade de geração até 1 MW são as nomeadas de Centrais Geradoras Hidrelétricas.

Como a diferença entre as Usinas, Pequenas Centrais e Centrais está na capacidade de geração essas fontes utilizam da mesma tecnologia de geração e construções similares, pois necessitam de toda a estrutura e equipamentos. A diferença está na dimensão desses equipamentos e área ocupada e transformada para a construção do mesmo. O processo de geração de energia dessa fonte pode ser observado na Figura 3, que ilustra de maneira geral como a energia é gerada.

Figura 3 - Perfil esquemático de usina hidrelétrica



Fonte: ANEEL (2008).

Como pode se visualizar na Figura 3, o reservatório é o ponto chave dessa fonte, pois é responsável pelo armazenamento da energia. A água armazenada

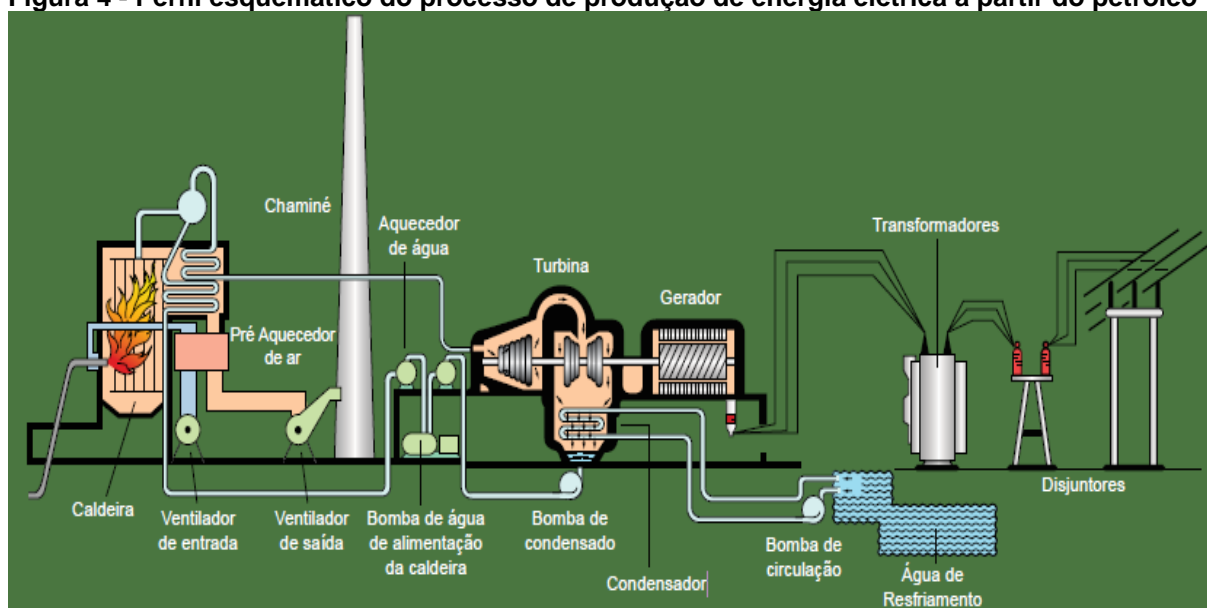
passa pelo duto que movimenta a turbina ligada ao gerador, que produz a energia e transmite para as linhas de energia.

2.1.6 Térmicas

A tecnologia envolvida nessa fonte de geração é muito similar a todas que utilizam de combustíveis fósseis (sólido ou líquido) e abrange quase todos os derivados de petróleo. O processo se resume em transporte da matéria prima, em que é feito o estoque e, então, utilizado no processo de combustão. Como resultado desse processo, é gerado o calor que aquece e aumenta a pressão da água, que se transforma em vapor. As turbinas movidas a energia térmica gerada pelo vapor produz, então, energia mecânica, que move o gerador produzindo energia elétrica (ANEEL, 2008).

Essa tecnologia, que lidera os níveis de emissões e que tem o potencial de emissão ainda mais elevado de acordo com a densidade do combustível empregado, está sendo objeto de pesquisa e desenvolvimento para chegar a uma maior eficiência e reduzir o seu potencial de emissão (ANEEL, 2008). Essas usinas são mantidas de acordo com a necessidade de assegurar o fornecimento, algumas estão sendo modernizadas e substituídas por usinas que contribuam com a redução de gases, mantendo a capacidade de atendimento da demanda (EPE, 2017). O processo de produção de energia que utiliza essa fonte é mostrado na Figura 4.

Figura 4 - Perfil esquemático do processo de produção de energia elétrica a partir do petróleo



Fonte: ANEEL (2008).

Como mostrado na Figura 4, o combustível derivado do petróleo é queimado para o aquecimento da água, que é transformada em vapor para movimentar a turbina, que, através do gerador, produzirá energia elétrica, que passa por um transformador e é distribuída através das linhas de transmissão.

Essa fonte de geração está em uma fase crítica em que precisa aumentar sua eficiência, e reduzir os impactos gerados para continuar competitiva no campo da geração de eletricidade.

De acordo com a Petrobras (2017), os projetos relacionados a tecnologias que contribuem para a redução das mudanças climáticas e que estão em busca da sustentabilidade da geração e fornecimento de energia receberam investimentos da ordem de R\$ 1,8 bilhão em 2016.

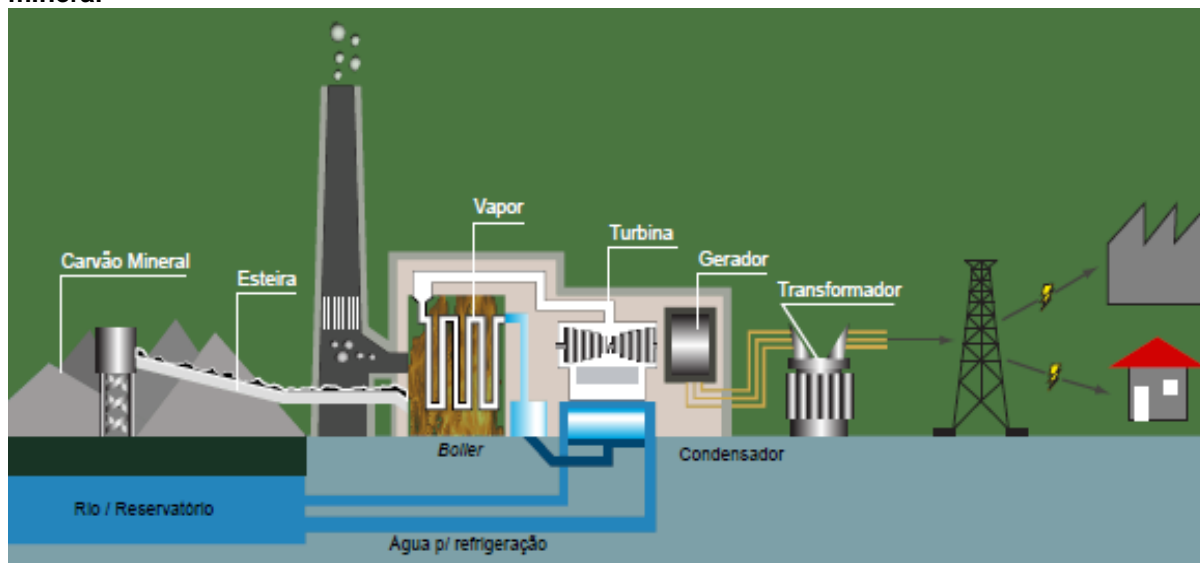
2.1.7 Carvão

Segundo a ANEEL (2008), a destinação principal do carvão mineral em todo o mundo foi para as usinas termelétricas, a fim de gerar eletricidade. Essa forma de geração vem se desenvolvendo e, através da modernização das usinas, vem se transformando em processos mais eficientes através da cogeração e utilização do vapor aplicado à geração de energia por ciclos combinados. São dois tipos básicos de carvão: mineral e vegetal, sendo o mineral obtido através de uma decomposição de milhões de anos da matéria orgânica, e o vegetal que é produzido a partir da lenha (ANEEL, 2008).

Predominante na produção de eletricidade de vários países, o carvão é utilizado para assegurar o fornecimento de energia e apresenta menor custo quando comparado a outros combustíveis. Segundo o IEA (2017), em 2015, o carvão foi responsável por 39,3% dos 24.255 TWh gerados no mundo.

A Figura 5 ilustra o processo de geração de energia a partir do carvão mineral. Essa é outra fonte que tem alto potencial de impacto, pois, desde sua extração até a combustão, são gerados significativos impactos ambientais e sociais (ANEEL, 2008). Portanto sua expansão é limitada por conta de licenças ambientais e ausência de financiamentos. De acordo com a EPE (2017), o desenvolvimento de novas usinas dessa fonte poderá ser viável somente após o ano de 2026. Com isso, sua participação de 2% da capacidade de geração de eletricidade no Brasil terá uma queda de 0,4% dessa participação para o cenário de referência de 2026.

Figura 5 - Perfil esquemático do processo de produção de energia elétrica a partir do carvão mineral



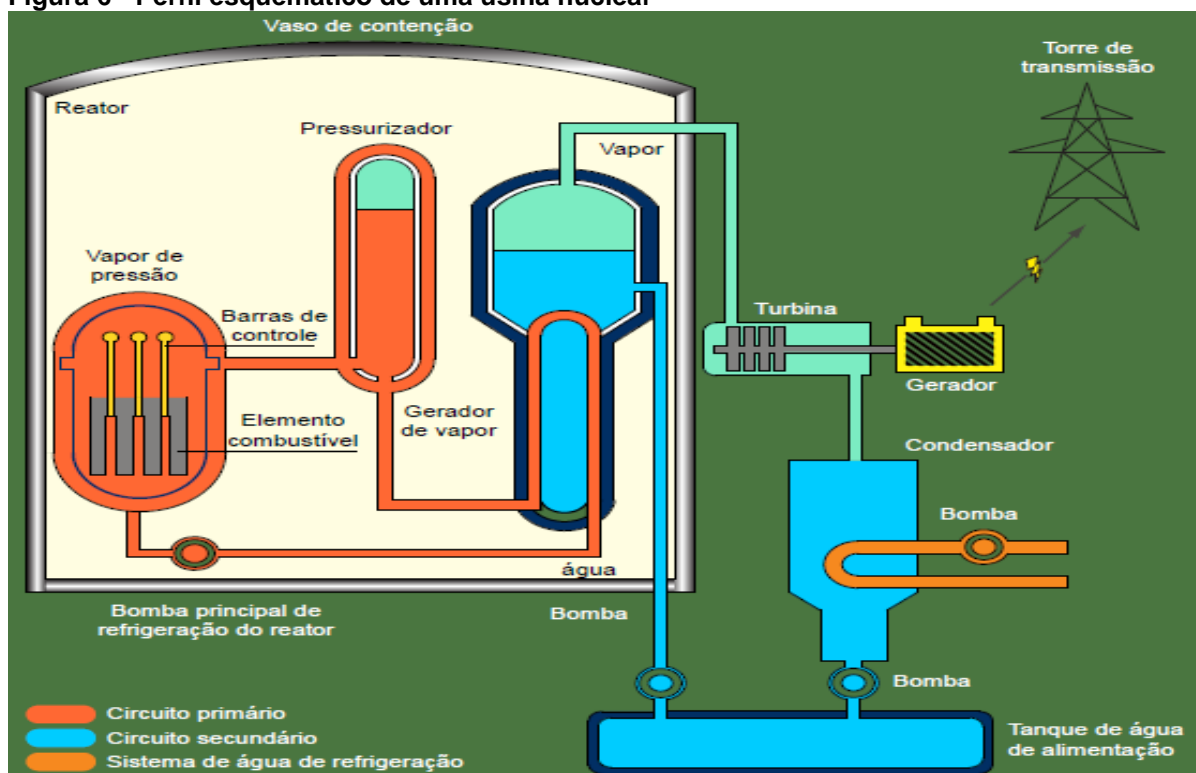
Fonte: ANEEL (2008).

A Figura 5 ilustra os processos envolvidos em uma usina de geração de eletricidade que tem como combustível o carvão, que é armazenado próximo à usina e transportado através de uma esteira para o processo de queima, para o aquecimento da água, que se transforma em vapor, que passa pela turbina, que movimenta o gerador e produz, então, energia.

2.1.8 Nuclear

Essa energia representa cerca de 1% da capacidade total de geração do Brasil. Utiliza uma estrutura conhecida como vaso de pressão, em que é realizado o aquecimento da água que passa pela turbina para a geração de eletricidade. Um circuito primário com ciclo fechado, em que circula água altamente radioativa, é utilizado para aquecer o outro circuito (secundário), por onde passa água corrente, que é transformada em vapor para mover as turbinas geradoras (ANEEL, 2008). Os dois circuitos não têm contato direto entre si. Podemos visualizar melhor esse processo através da Figura 6.

Figura 6 - Perfil esquemático de uma usina nuclear



Fonte: ANEEL (2008).

Vista como uma opção de geração de energia, estão sendo realizados estudos para analisar a viabilidade de investimentos nessa fonte. Acredita-se que novos investimentos ocorrerão somente após 2026, abrindo caminhos para outros novos investimentos no período de 5 a 7 anos após a construção de uma nova usina (EPE, 2017).

2.1.9 Solar

Essa tecnologia produz energia elétrica a partir da energia solar, que pode ser na forma térmica ou forma luminosa (ANEEL, 2008). De acordo com EPE (2007), “a energia solar irradiada na superfície da Terra é suficiente para atender 10.000 vezes o consumo de energia do mundo”. A energia solar é relativamente nova, porém apresenta grande potencial, gerando poucos impactos, os quais estão concentrados na produção e construção da usina. Torna-se uma oportunidade de geração de energia elétrica mais limpa para vários países no mundo. Em muitas regiões da terra, uma área de um quilômetro quadrado é capaz de gerar entre 100 GWh a 200 GWh de energia elétrica durante um ano, o que equivale à produção de uma usina com geração a partir de carvão ou gás de 50 MW (ARINGHOFF, 2003).

De acordo com o equipamento utilizado, a energia solar será transformada em calor ou eletricidade. A tecnologia que produz eletricidade utiliza células fotovoltaicas, enquanto que, para a produção de calor, são utilizados coletores e concentradores que captam e concentram a radiação em um ponto para gerar o aquecimento (ANEEL, 2008).

2.1.10 Expansão da Capacidade de Geração de Eletricidade

A energia é essencial para o desenvolvimento de uma sociedade, e a eletricidade, uma das energias mais utilizadas no dia a dia, está se tornando cada vez mais necessária para diversas atividades, portanto a expansão de geração de eletricidade é de extrema importância em termos de acessibilidade, segurança e sustentabilidade (GUERRA, 2016). A expansão da matriz de geração, não é um problema simples, normalmente se trata de um problema com muitas variáveis, já que existem diversas alternativas que deveriam ser analisadas por inúmeros critérios. Uma vez que não existe tecnologia que produza energia sem gerar impactos, é de extrema importância que, ao analisar a expansão de matrizes energéticas, seja realizada uma hierarquia de fontes de acordo com as preferíveis nos termos ambientais, sociais, tecnológicos e econômico, a fim de reduzir as consequências geradas por aqueles projetos avaliados apenas pelos critérios econômicos tradicionais (LA ROVERE, 2010).

O aumento da demanda por energia é um ponto crítico que preocupa líderes do mundo todo tanto em questão de segurança de fornecimento quanto emissões geradas pela produção de energia e expansão sustentável. Segundo WEC (2017), líderes e especialistas em energia elétrica do mundo todo acreditam que fatores chave para a transição de energias convencionais para uma geração mais limpa e aumento da eficiência estão em:

- Fontes renováveis como eólica e solar;
- Avanços nos sistemas de armazenamento;
- Controle e nivelamento da demanda;
- Modernização das plantas existentes;
- Fim do subsídio de energia.

O fim do subsídio vem como forma de mostrar aos consumidores que é preciso a conscientização do uso de energia elétrica para controle da demanda e uma geração mais limpa. No relatório “*World Energy Issues Monitor 2017 – Exposing the New Energy Realities*”, elaborado por *World Energy Council (2017)*, reuniu-se informações cedidas por mais de 1200 líderes envolvidos com o planejamento de energia, entre esses, Chief Executive Officer (CEOs), Ministros e Especialistas de quase 90 países.

A EPE (2017) publicou em seu plano decenal de expansão que o desenvolvimento de tecnologias para atender à demanda máxima deve ser norteada por fontes flexíveis que proporcionem uma resposta à variação da demanda no curto prazo, visando respostas para atingir essa flexibilidade. Entre as tecnologias tidas como opção, podemos dar destaque para:

- Usinas termelétricas de partida rápida;
- Repotenciação ou instalação de unidades geradoras adicionais em usinas hidrelétricas existentes;
- Usinas hidrelétricas reversíveis;
- Gerenciamento pelo lado da demanda;
- Armazenamento químico de energia (baterias).

Para Oree (2017), um planejamento eficiente da expansão para atender à crescente demanda deve ser norteada por quatro questões:

- Qual é a fonte de geração?
- Quanto é a capacidade de cada fonte?
- Onde realizar a instalação de cada fonte?
- Quando devem entrar em operação de maneira sustentável?

Para que seja possível responder essas questões, é necessário que se faça um estudo aprofundado em cada caso, considerando todas as vertentes envolvidas, pois muitos dos critérios envolvidos são conflitantes, surgindo assim a necessidade de sacrifícios. Os métodos de análise multicritério conseguem apoiar essas decisões

abrangendo todos os aspectos envolvidos, dando maior ou menor relevância para cada um dos critérios de acordo com as necessidades de cada decisor.

2.2 ANÁLISE MULTICRITÉRIO EM PROBLEMAS DE ENERGIA

As ferramentas de análise multicritério são uma maneira de considerar diversas variáveis ao analisar mais de uma alternativa para a tomada de decisão. São diversos métodos existentes para diferentes tipos de problemas e necessidades, dificilmente podemos classificar um método ou outro como o melhor para determinado problema, o que torna a própria escolha do método um problema complexo e que pode ser considerado um problema multicritério (STRANTZALI, 2016).

Um estudo realizado por Zhou (2006) levantou sete áreas em que os métodos de análise multicritério são mais utilizadas quando se trata de modelos que envolvem energia e meio ambiente. Essas áreas envolvem política energética, política ambiental, planejamento de eletricidade, avaliação de projetos, gerenciamento de energia, gerenciamento ambiental e uma categoria que envolve diversas áreas. Os métodos de análise multicritério são adequados e populares nesta área de pesquisa de acordo com estudos de revisões realizados por Zhou (2006), Bazmi (2011), Strantzali (2016), Oree (2017), Mardani (2017), e Ioannou (2017).

De acordo com Guerra (2016), os métodos de análise multicritério demonstraram bom desempenho como ferramentas para apoiar tanto a operação como as tomadas de decisão referente ao planejamento energético. Para que a melhor decisão seja tomada, é necessária uma modelagem que transforma a decisão em um complexo problema, pois é preciso abranger questões que estão ligadas às dimensões: (i) tecnológica, (ii) ambiental, (iii) econômica e (iv) social (STRANTZALI, 2016).

Uma abordagem que é utilizada em problemas de análise combinatória, que consiste na divisão do problema em vários pequenos problemas mais fáceis de serem solucionados, mostra-se viável nos problemas relacionados à decisão em energia também. Após realizada essa ramificação de problemas, pode-se obter uma ordem de preferência de acordo com cada objetivo e ser feita a escolha por aquelas

mais bem classificadas nos quesitos mais importantes ou de acordo com as preferências do analista (OREE, 2017).

Um estudo realizado por Mardani (2017) traz as abordagens mais utilizadas em situações de tomada de decisão que envolvem sistemas de energia entre os anos de 1995 e 2015. Entre os mais utilizados estão MCDM, FMCDM e AHP. Preberg (2016) propôs um estudo de otimização multiobjetivo com abordagem de dois níveis para o cenário entre 2015 a 2050, visando a integração dos veículos elétricos como um armazém de energia para a rede de eletricidade da Croácia. Como resultado, pode-se concluir que os veículos elétricos não representam apenas impactos negativos para a rede elétrica, pois podem ser utilizados como fonte de armazenagem, sendo carregados no período de menor demanda de eletricidade e servirem como fonte de energia nos períodos de pico.

É frequente a combinação entre os métodos para uma análise mais detalhada, produzir resultados por diferentes métodos para a comparação, assim como utilização do resultado de um método como entrada para outro (IOANNOU, 2017). Como os problemas de energia envolvem critérios de diferentes dimensões, com objetivos diversos de cada dimensão, a técnica multicritério ajuda na normalização dos dados e traduz para apenas uma linguagem, o que facilita a análise e tomada de decisão (IOANNOU, 2017).

Um estudo realizado por Streimikiene (2016) utilizou dois métodos para a construção de uma ordenação de preferências de tecnologias de geração de energia elétrica na Lituânia. Os métodos escolhidos foram o *Analytic Hierarchy Process* (AHP) e *Additive Ratio Assessment* (ARAS).

Dester (2012) analisou treze tipos de tecnologias de geração de energia elétrica no Brasil com base em dezoito critérios levantados em publicações científicas considerando cinco premissas que podem ser consultados na integra em seu estudo. Utilizou o método de análise PROMETHEE II, em que fez uma análise para quatro cenários onde fez simulações de variações dentro dos critérios e assumindo algumas premissas que podem acontecer com as mudanças de paradigmas, assim como 7 casos em que fez variações de pesos para cada dimensão de critérios, chegando a uma possível ordenação das tecnologias de geração de eletricidade preferíveis no Brasil.

Em uma de suas indicações para trabalhos futuros, Dester (2012) indica que sejam feitos estudos que utilizem outros métodos de análise, mas utilizando dos

mesmos indicadores que abordou em seu estudo para comparar os resultados, para validação e considerações.

A Figura 7, elaborada por Rodriguez *et al.* (2013), traz os principais métodos encontrados nas literaturas acadêmicas junto à classificação e referências de cada método.

Figura 7 - Principais métodos de MCDA

Método	Classificação	Referências seminais
Electre	Método de Superação	ELECTRE I (ROY, 1968); ELECTRE II (ROY; BERTIER, 1971); ELECTRE III (ROY; HUGONNARD, 1981); ELECTRE IV (ROY; HUGONNARD, 1981); ELECTRE IS (ROY; SKALKA, 1985); ELECTRE TRI (YU, 1992; MOUSSEAU; SLOWINSKI; ZIELNIEWICZ, 2000);
Promethee	Método de Superação	Brans, Mareschal e Vineke (1984) e Brans, Mareschal e Vineke (1986)
Regime	Método de Superação	Hinloopen, Nijkamp e Rietveld (1983)
Multiattribute Utility Theory (MAUT)	Teoria da Utilidade Multiatributo	Fishburn (1970) e Keeney e Raiffa (1976)
Simple Multi Attribute Rating Technique (SMART)	Teoria da Utilidade Multiatributo	Edwards (1977)
Analytic Hierarchy Process (AHP)	Teoria da Utilidade Multiatributo	Saaty (1977) e Saaty (1980)
Analytic Network Processes (ANP)	Teoria da Utilidade Multiatributo	Saaty (1996)
Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique	Teoria da Utilidade Multiatributo	Bana e Costa e Vansnick (1994)

Fonte: Rodriguez (2013).

Podemos observar que a Figura 7 traz os principais métodos divididos em duas grandes áreas, sendo que os métodos ELECTRE, PROMETHEE E REGIME são classificados como métodos de superação. Já os métodos MAUT, SMART, AHP, ANP e MACBETH são classificados como métodos da Teoria de Utilidade Multiatributo.

Segundo Roy (1996), os problemas relacionados à avaliação podem ser classificados entre quatro problemáticas, sendo elas: (i) Problemas de Escolha, (ii) Problemas de Classificação, (iii) Problemas de Ordenação e (iv) Problemas de Descrição. Para atingir o objetivo proposto pelo presente trabalho, temos, então, um (iii) Problema de Ordenação, que é apto à aplicação dos métodos ELECTRE II, ELECTRE III, ELECTRE IV, PROMETHEE I e PROMETHEE II.

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a forma como foi realizada a pesquisa e os procedimentos adotados para a realização de tal.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

O presente estudo é formado por uma pesquisa exploratória, uma vez que foi realizado uma análise preliminar para definir as palavras chaves, estudo bibliográfico para levantar os modelos e critérios mais utilizados por pesquisadores, sendo que realizou-se uma pesquisa aplicada, visto que é aplicada a análise multicritério nos dados levantados para o estudo (RODRIGUES, 2007).

Quanto à abordagem, é utilizada uma abordagem quantitativa, uma vez que a aplicação do modelo assim como as análises foram realizadas todas com base em desempenho e resultados gerados a partir da análise.

3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Esta seção apresenta os procedimentos realizados e resultados de cada fase do trabalho, desta forma o Quadro 2 apresenta todas as etapas, assim como o procedimento adotado e o resultado obtido.

Quadro 2 - Fases da pesquisa

Etapas	Como	Resultado
Levantamento de artigos publicados na área	Busca nas bases internacionais	20 artigos
Definir o método de análise	Analisando artigos de revisões sobre o tema	ELECTRE II para fins de comparação com PROMETHEE II
Definir os critérios analisados	Analisando artigos que aplicaram o método e através de sugestões de pesquisas	Selecionados 18 critérios. (DESTER, 2012)
Buscar dados referentes aos critérios de cada fonte	Analisando artigos e organizações que fornecem indicadores	Referente aos 18 critérios para 13 fontes de geração de eletricidade. (DESTER, 2012)
Aplicar a análise multicritério	A partir dos dados de cada fonte, aplicar o método ELECTRE II	Obter uma ordem de preferência das fontes de geração
Interpretar e comparar os resultados	Com base nos resultados obtidos após a aplicação do método com o estudo de referência (DESTER, 2012)	Elencar as fontes de energia com melhor desempenho para as vertentes envolvidas

Fonte: Autoria própria.

Assim como mostra o Quadro 2, o trabalho pode ser dividido em 6 etapas principais, o método ELECTRE II foi selecionado por se tratar de um método indicado para problemas de ordenação de alternativas e por se tratar de um método que pode ser comparado ao PROMETHEE II que foi aplicado por Dester (2012), que inclusive fez indicações de pesquisas futuras, onde recomenda a aplicação de métodos diferentes para comparação dos resultados.

3.3 LEVANTAMENTO DE ARTIGOS PUBLICADOS NA ÁREA

Para a construção do referencial teórico, foram realizadas buscas em três bases de dados, sendo elas: (i) Web of Science, (ii) Science Direct e (iii) Scopus. Após realizar uma busca preliminar, que resultou em 10 artigos alinhados com o tema de pesquisa, foi definido quais seriam as palavras-chave e suas variações, como mostra o Quadro 3, As palavras-chave estão em inglês, pois a busca foi realizada em bases internacionais.

Quadro 3 - Palavras-chave e suas variações

Ref.	Palavras-Chave
A	"multi-criteri*" OR "multi criteri*"
B	"Renewable energy" OR "renewable sources of energy" OR "renewable energy technologies"
C	"Electricity generation" OR "power generation systems" OR "production electricity"
D	"LCA" OR "Life Cycle Assessment" OR "Life Cycle Analysis" OR "LCIA" OR "LCI"
E	Optimization

Fonte: Autoria própria.

Com as palavras-chave e suas variações, definiu-se utilizar a combinação de 3 palavras-chave para a pesquisa em cada base de dados, o que resultou em 10 combinações de palavras-chave, como mostra o Quadro 4.

Quadro 4 - Combinações das palavras-chave

Combinação	Ref.		Ref.		Ref.
1	A	AND	B	AND	C
2	A	AND	B	AND	D
3	A	AND	B	AND	E
4	A	AND	C	AND	D
5	A	AND	C	AND	E
6	A	AND	D	AND	E
7	B	AND	C	AND	D
8	B	AND	C	AND	E
9	B	AND	D	AND	E
10	C	AND	D	AND	E

Fonte: Autoria própria.

Com as dez combinações de palavras-chave, como mostra o Quadro 3, foram realizadas as buscas nas bases de dados. As bases de dados não suportam todas as combinações em uma única pesquisa, por isso foi preciso dividir a pesquisa como mostra a coluna “Combinações Pesquisada” do Quadro 5, sendo que somente na base de dados *Web of Science* foi possível realizar uma única pesquisa utilizando as 10 combinações do Quadro 4. O Quadro 5 mostra, os resultados obtidos em cada busca, a partir desses resultados foram exportados os arquivos para o *software EndNote*, totalizando em 2365 artigos.

Quadro 5 - Buscas realizadas

Busca	Base de Dados	Combinações Pesquisada	Busca em	Refinamento	Artigos Encontrados
1	Scopus	1 ou 2 ou 3 ou 4 ou 5 ou 6	Título, Resumo e Palavras-chaves	Artigos	216
2	Scopus	7 ou 8 ou 9 ou 10	Título, Resumo e Palavras-chaves	Artigos	898
3	Web of Science	1 ou 2 ou 3 ou 4 ou 5 ou 6 ou 7 ou 8 ou 9 ou 10	Tópico	Artigos	825
4	Science Direct	1 ou 2	Título, Resumo e Palavras-chaves	Artigos	41
5	Science Direct	3 ou 4	Título, Resumo e Palavras-chaves	Artigos	47
6	Science Direct	5 ou 6	Título, Resumo e Palavras-chaves	Artigos	39
7	Science Direct	7 ou 8	Título, Resumo e Palavras-chaves	Artigos	229
8	Science Direct	9 ou 10	Título, Resumo e Palavras-chaves	Artigos	70
				Total	2365

Fonte: Autoria própria.

A partir da criação de um arquivo no *software* gerenciador de referências, foi possível identificar os artigos que estavam duplicados, pois, além de buscas

diferentes resultarem o mesmo artigo, temos artigos que constam em mais de uma base de dados.

Também foi possível a identificação dos artigos que não pertenciam a revistas científicas e que também foram excluídos na seleção. A partir disso, ficamos com 1281 artigos, como mostra a Tabela 1, em que filtramos por artigos de revistas com fator de impacto maior ou igual a 5. Posteriormente, foi realizada a leitura dos títulos e resumos, resultando em 20 artigos alinhados com o tema da pesquisa.

Tabela 1 - Etapas de Filtragem

Etapas	Exclusões	Total
Artigos encontrados	-	2365
Filtro duplicados	721	1644
Filtro publicações em Revistas	363	1281
Filtro fator de impacto	872	409
Filtro leitura de títulos	206	203
Filtro leitura de resumos	183	20
Portfólio de análise		20

Fonte: Autoria própria.

A partir dos artigos selecionados, foi possível a construção do referencial teórico, assim como realizar análises das ferramentas e critérios adotados em trabalhos realizados na área de planejamento e avaliação de tecnologias de geração de energia elétrica.

Além dos 20 artigos utilizados a partir da busca nas bases de dados, foram utilizados mais 23 referências que foram encontradas através de citações e pesquisas paralelas.

3.4 MÉTODO DE ANÁLISE

Os problemas que envolvem planejamento energético sempre envolvem muitas variáveis, e como no Brasil, existem mais de treze fontes que compõem a matriz de geração de eletricidade, iremos aplicar um modelo multicritério que possibilite a ordenação dessas fontes. As fontes de geração de energia elétrica serão avaliadas com base em critérios que representam as dimensões (i) socioambiental, (ii) técnica e (iii) econômica.

Seguindo as indicações de Dester (2012), que aplicou o método PROMETHEE II, optou-se por aplicar um método da mesma classificação que o

realizado em sua pesquisa, similar em termos de abordagem, com o objetivo de considerar todas as vertentes envolvidas na escolha de tecnologias de geração de eletricidade, um método que fornece uma ordenação das alternativas avaliadas para possibilitar a comparação dos resultados obtidos pelo método PROMETHEE II. Para isso, o método ELECTRE II foi selecionado.

A família de métodos ELECTRE conta com seis versões, que se diferem tanto em seus cálculos como em relação aos problemas que devem ser aplicados, sendo os métodos ELECTRE I, ELECTRE II, ELECTRE III, ELECTRE IV, ELECTRE IS e ELECTRE Tri.

O método ELECTRE II (ROY; BERTIER, 1971) utiliza critérios verdadeiros para análise e, a partir desses critérios, gera relações de sobreclassificação forte ou fraca a partir dos índices de concordância (forte ou fraco) e discordância (forte ou fraca) (GOMES, 2012). O primeiro passo nesse método é o cálculo dos índices de concordância e discordância, que podem ser obtidos através das Equações (1) e (2).

$$C(a, b) = \sum p_i, \forall i / g_i(a) > g_i(b) \quad [1]$$

$$D(a, b) = \max \left[\frac{g_i(b) - g_i(a)}{\text{escala}(i)} \right], \forall i / g_i(b) > g_i(a) \quad [2]$$

Sendo:

- $\sum p_i = 1$;
- $0 \leq C(a, b) \leq 1$;
- $0 \leq D(a, b) \leq 1$;
- $\text{escala}(i) = g(c) - g(d)$.

A Equação (1) descreve a seguinte operação: se a alternativa “a” apresentar melhor desempenho que a alternativa “b” no critério “i”, soma-se o peso do critério ao índice de concordância de C (a, b), que se refere ao quanto a alternativa “a” é preferível em relação a alternativa “b”, repete-se essa comparação para todos os critérios.

Já a Equação (2) faz a seguinte análise: nos critérios que a alternativa “b” for preferível à alternativa “a”, é feita a subtração do valor de “b” sobre “a”, e o resultado

é dividido pela amplitude (escala) do critério analisado, ou seja, se a alternativa “b” supera a alternativa “a” no critério 3, a escala será a diferença entre o maior (c) e menor valor (d) encontrado no critério 3 (ARCANJO; AMARAL; PEREIRA DE SÁ, 2015).

Após calculados os índices de concordância e discordância, é necessário definir os limiares, sendo limiar de concordância fraca c^- e limiar de concordância forte c^+ , que quanto maior mais exigente. Assim como o limiar de discordância fraca d^- e limiar de discordância forte d^+ , que, na prática, quanto menor mais exigente se tornam.

Com os índices de concordância e discordância calculados e os limiares de concordância e discordância definidos, podemos montar o gráfico de sobreclassificações, sendo que serão definidas pelas Equações (3) e (4). A Equação (3) remete à sobreclassificação forte, enquanto a Equação (4) resulta na sobreclassificação fraca.

$$aS^Fb \text{ se e somente se } \left\{ \begin{array}{l} C(a, b) \geq c^+ \\ D(a, b) \leq d^+ \\ C(a, b) > C(b, a) \end{array} \right\} \quad [3]$$

$$aS^f b \text{ se e somente se } \left\{ \begin{array}{l} C(a, b) \geq c^- \\ D(a, b) \leq d^- \\ C(a, b) > C(b, a) \end{array} \right\} \quad [4]$$

Após a construção da matriz de sobreclassificação, é possível construir as ordenações das alternativas. Segundo Almeida (2011 apud ARCANJO; AMARAL; PEREIRA DE SÁ, 2015), o primeiro passo é a construção de dois rankings parciais: o ranking decrescente, que apresenta as mais preferíveis para menos preferíveis, e o ranking que se organiza de maneira crescente, começando pelas alternativas menos preferíveis, de acordo com seu desempenho, para as mais preferíveis. Após a criação dessas ordenações, é feita uma ordenação final obtida através de uma combinação ou a média dos rankings parciais.

3.5 MATERIAIS

Para aplicação do método, utilizou se de *softwares* que permitem trabalhar com planilhas para a realização de todos os cálculos para cada caso analisado.

Foram utilizados os mesmos dados em que foi realizado a aplicação do método PROMETHEE II. Para ser possível a comparação dos resultados, os dados originais não foram alterados. A análise abordou treze alternativas para geração de energia, como pode ser observado na Tabela 2, que apresenta as treze alternativas, assim como a abreviatura de cada fonte e sua descrição.

Tabela 2 - Referência de cada fonte analisada

Referência	Abreviatura	Descrição da Tecnologia
A1	UHE-cr	Hidrelétrica com reservatório
A2	UHE-fd	Hidrelétrica a fio d'água
A3	UTE-gs	Termoelétrica a gás natural – ciclo simples
A4	UTE-gc	Termoelétrica a gás natural – ciclo combinado
A5	UTE-ca	Termoelétrica a carvão mineral
A6	UTE-ol	Termoelétrica a óleo combustível
A7	UTE-nu	Termoelétrica nuclear
A8	EOL-on	Eólica onshore
A9	EOL-of	Eólica offshore
A10	BIO	Termoelétrica à biomassa
A11	SOL-fo	Solar fotovoltaica
A12	SOL-te	Termosolar
A13	PCH	Pequena Central Hidrelétrica

Fonte: Dester (2012).

Como mostra a Tabela 2, foram analisadas treze modelos de geração de eletricidade diferentes. Sob a óptica de dezoito critérios que são apresentados na Tabela 3 que traz a referência do critério, assim como sua descrição, a fonte utilizada e a unidade de medida adotada para a construção da Tabela 4.

Tabela 3 - Referência e descrição dos critérios

(continua)

Ref	Critério	Descrição	Fonte	Unidade	
Dimensão Técnica	C1	Taxa equivalente de indisponibilidade forçada (TEIF)	Percentual de um período de tempo esperado em que não haverá produção de energia elétrica de forma não programada.	Hollauer, 2007	Percentual (0 a 100)
	C2	Fator de disponibilidade	Indicador composto por um conjunto de outros indicadores baseados em fatores de carga típicos da tecnologia.	Streimikiene <i>et al</i> , 2012	Percentual (0 a 1)
	C3	Fator de flexibilidade	Capacidade, apresentada pela tecnologia, a responder a variações de demanda.	EPRI, 2011	Qualitativo (1 a 5)
	C4	Resposta aos picos de carga	Reflete a capacidade da tecnologia em responder rapidamente a grandes variações de carga, tradicionalmente denominadas “pontas de carga”.	Streimikiene <i>et al</i> , 2012	Qualitativo (1 a 5)
	C5	Fator de segurança de suprimento	Expressa, em uma visão de longo prazo, a independência de fontes externas de energia elétrica, ou seja, avalia a autonomia em relação a ela.	Streimikiene <i>et al</i> , 2012	Qualitativo (1 a 5)
	C6	Fator de capacidade máximo	Razão entre a produção efetiva e a capacidade total máxima de produção em um determinado período de tempo.	Hollauer, 2007	Percentual (0 a 1)
Dimensão Econômica	C7	Custo de Investimento	Custo de investimento por unidade de potência instalada.	Hollauer, 2007 / Sales 2007 (EOL e PCH)	US\$/Kw (2007)
	C8	Custo de O&M fixo	Custo fixo por unidade produzida.	Hollauer, 2007	R\$/kW ano (2007)
	C9	Custo Variável Unitário	Custo variável por unidade produzida (inclui combustível).	Hollauer, 2007	R\$/MWh (2007)
	C10	Sensibilidade preço combustível	Sensibilidade do custo médio à variação do preço do combustível.	UNEP, 2011	Qualitativo (1 a 5)
	C11	Razão de <i>payback</i>	Corresponde à razão entre a energia total produzida durante a vida útil da tecnologia de uma usina e a energia necessária para construí-la, operá-la e descomissioná-la.	IEA, 2000	Adimensional
	C12	Custo de conexão	Expressa o custo de conexão de uma usina à rede.	Streimikiene <i>et al</i> , 2012	Qualitativo (1 a 5)

Tabela 3 - Referência e descrição dos critérios

(conclusão)					
Ref	Critério	Descrição	Fonte	Unidade	
Dimensão Socioambiental	C13	Emissão de CO2 (direta)	Emissões relacionadas diretamente com a produção de energia elétrica.	UNEP, 2011	Kg CO2/MWh
	C14	Emissão de CO2 (indireta)	Emissões relacionadas com as outras atividades econômicas relacionadas à tecnologia.	UNEP, 2011	Kg CO2eq/MWh
	C15	Emissão de SO2	Total das emissões de SO2 da tecnologia.	Gagnon <i>et al</i> , 2002	tCO2/TWh
	C16	Emissão de NOx	Total das emissões de NOx da tecnologia.	Chatzimouratidis e Pilavachi, 2008	mg/kWh
	C17	Riscos à saúde	Valoração dos impactos na saúde humana.	Streimikiene <i>a et al</i> , 2012	€cent/kWh
	C18	Empregos diretos gerados	Expressa a ordem de magnitude dos empregos gerados em cada tecnologia.	Streimikiene <i>a et al</i> , 2012	Pessoas-ano/kWh

Fonte: Dester (2012).

O primeiro passo para aplicação do método foi a adaptação dos critérios que tinham suas escalas de acordo com objetivo de minimização para critérios de maximização, para isso foi realizado uma nova escala, sendo ela calculada através da diferença entre a soma do “maior elemento” do critério analisado com o “menor elemento” e o índice “ a_{ij} ” como mostra a Equação (5). Após isso foram normalizados os dados dividindo se o novo índice pela soma dos índices do critério. Tendo como base a tabela de valoração dos critérios de Dester (2012), construiu se a Tabela 4, que traz os indicadores de cada alternativa para cada critério, todos adequados ao objetivo de maximização e já normalizados.

$$N_{aij} = (maior + menor) - a_{ij} \quad [5]$$

Sendo:

- N_{aij} – novo índice;
- Maior – maior índice do critério analisado;
- Menor – menor índice do critério analisado;
- a_{ij} – índice original.

Tabela 4 - Tabela de valoração normalizada

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13
C1	0,088	0,088	0,072	0,072	0,068	0,080	0,080	0,084	0,084	0,008	0,096	0,096	0,088
C2	0,103	0,090	0,096	0,096	0,096	0,096	0,102	0,033	0,056	0,107	0,017	0,017	0,090
C3	0,132	0,132	0,132	0,132	0,079	0,132	0,053	0,000	0,000	0,079	0,000	0,000	0,132
C4	0,070	0,070	0,233	0,233	0,047	0,233	0,023	0,000	0,000	0,023	0,000	0,000	0,070
C5	0,104	0,104	0,000	0,000	0,063	0,021	0,083	0,104	0,104	0,104	0,104	0,104	0,104
C6	0,070	0,070	0,120	0,120	0,117	0,124	0,115	0,038	0,038	0,074	0,019	0,025	0,070
C7	0,088	0,088	0,092	0,091	0,086	0,092	0,081	0,083	0,066	0,089	0,007	0,054	0,081
C8	0,094	0,094	0,090	0,090	0,090	0,092	0,082	0,091	0,091	0,091	0,001	0,001	0,094
C9	0,091	0,091	0,058	0,058	0,080	0,000	0,083	0,090	0,090	0,087	0,091	0,091	0,091
C10	0,104	0,104	0,021	0,021	0,063	0,021	0,104	0,104	0,104	0,063	0,104	0,083	0,104
C11	0,003	0,007	0,101	0,101	0,102	0,096	0,072	0,096	0,096	0,108	0,106	0,106	0,007
C12	0,082	0,082	0,082	0,082	0,082	0,082	0,082	0,066	0,049	0,066	0,082	0,082	0,082
C13	0,101	0,101	0,027	0,052	0,000	0,031	0,101	0,101	0,101	0,100	0,101	0,084	0,101
C14	0,109	0,109	0,006	0,046	0,021	0,036	0,100	0,104	0,101	0,090	0,070	0,100	0,109
C15	0,089	0,089	0,086	0,086	0,030	0,000	0,089	0,088	0,088	0,089	0,089	0,089	0,089
C16	0,093	0,093	0,068	0,080	0,041	0,000	0,093	0,093	0,093	0,070	0,091	0,091	0,093
C17	0,097	0,102	0,071	0,084	0,041	0,005	0,100	0,102	0,100	0,035	0,061	0,103	0,099
C18	0,049	0,049	0,026	0,026	0,035	0,019	0,006	0,015	0,015	0,178	0,267	0,267	0,049

Fonte: Autoria própria.

A partir dos resultados obtidos na Tabela 4 que foram aplicados ao *software* de planilhas analisou-se os quatro casos com base nos pesos analisados de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5 - Casos e pesos de cada dimensão

Dimensões	Casos			
	Equitativo	Técnico	Econômico	Socioambiental
Técnica	0,33	0,6	0,2	0,2
Econômica	0,33	0,2	0,6	0,2
Socioambiental	0,33	0,2	0,2	0,6

Fonte: Dester (2012).

Como pode se observar na Tabela 5, no caso equitativo, os critérios de todas as dimensões tem pesos idênticos, já no caso Técnico, os critérios técnicos ganham força e as dimensões Econômica e Socioambiental perdem representatividade, e assim ocorre para os caso Econômico em que os critérios econômicos ganham peso e para o caso Socioambiental em que os critérios dessa dimensão ganham maior relevância.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES DE COMPARAÇÃO

A partir dos resultados gerados pelo *software* é possível montar as matrizes de concordância e discordância para cada caso analisado, assim como as relações de sobreclassificação e o ranking final. As Tabelas 6 (caso Equitativo), 7 (caso Técnico), 8 (caso Econômico) e 9 (caso Socioambiental) mostram os índices de Concordância para os casos analisados, utilizando o ELECTRE II.

Tabela 6 - Índice de Concordância para o caso Equitativo

	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12	a13
A1		0,83	0,78	0,78	0,89	0,78	0,78	0,89	0,89	0,72	0,78	0,72	0,83
A2	0,94		0,72	0,72	0,83	0,72	0,83	0,94	0,94	0,72	0,78	0,72	1,00
A3	0,33	0,39		0,78	0,67	0,61	0,44	0,44	0,44	0,39	0,44	0,39	0,39
A4	0,33	0,39	0,94		0,72	0,72	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,39	0,39
A5	0,17	0,22	0,44	0,39		0,56	0,44	0,44	0,44	0,39	0,39	0,39	0,28
A6	0,33	0,39	0,67	0,56	0,56		0,50	0,50	0,50	0,39	0,39	0,39	0,39
A7	0,39	0,33	0,61	0,61	0,61	0,61		0,44	0,50	0,56	0,72	0,67	0,44
A8	0,28	0,22	0,56	0,56	0,56	0,50	0,67		0,94	0,56	0,67	0,61	0,33
A9	0,28	0,22	0,56	0,56	0,56	0,50	0,61	0,78		0,50	0,67	0,61	0,28
A10	0,33	0,33	0,61	0,56	0,72	0,61	0,50	0,61	0,61		0,50	0,50	0,33
A11	0,44	0,44	0,61	0,61	0,67	0,67	0,44	0,61	0,61	0,56		0,78	0,44
A12	0,39	0,39	0,67	0,67	0,67	0,67	0,44	0,56	0,56	0,56	0,89		0,39
A13	0,89	0,89	0,72	0,72	0,78	0,72	0,78	0,83	0,89	0,72	0,78	0,72	

Fonte: Autoria própria (2018).

A Tabela 6 mostra os índices para o caso Equitativo, em que todos os critérios das 3 dimensões representam a mesma importância, enquanto a Tabela 7 a seguir é calculada com os critérios técnicos sendo mais relevantes.

Tabela 7 - Índice de Concordância para o caso Técnico

	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12	a13
A1		0,90	0,73	0,73	0,87	0,73	0,80	0,93	0,93	0,70	0,80	0,77	0,90
A2	0,90		0,63	0,63	0,77	0,63	0,77	0,97	0,97	0,70	0,80	0,77	1,00
A3	0,40	0,50		0,87	0,73	0,57	0,47	0,53	0,53	0,50	0,53	0,50	0,50
A4	0,40	0,50	0,97		0,77	0,63	0,47	0,53	0,53	0,53	0,53	0,50	0,50
A5	0,17	0,27	0,40	0,37		0,47	0,47	0,53	0,53	0,50	0,50	0,50	0,30
A6	0,40	0,50	0,80	0,73	0,67		0,57	0,57	0,57	0,50	0,50	0,50	0,50
A7	0,30	0,33	0,57	0,57	0,57	0,57		0,53	0,57	0,53	0,70	0,67	0,40
A8	0,23	0,20	0,47	0,47	0,47	0,43	0,53		0,90	0,47	0,73	0,70	0,27
A9	0,23	0,20	0,47	0,47	0,47	0,43	0,50	0,87		0,43	0,73	0,70	0,23
A10	0,40	0,40	0,50	0,47	0,63	0,50	0,57	0,70	0,70		0,63	0,63	0,40
A11	0,40	0,40	0,50	0,50	0,53	0,53	0,40	0,63	0,63	0,47		0,80	0,40
A12	0,37	0,37	0,53	0,53	0,53	0,53	0,40	0,60	0,60	0,47	0,93		0,37
A13	0,87	0,93	0,63	0,63	0,73	0,63	0,73	0,90	0,93	0,70	0,80	0,77	

Fonte: Autoria própria (2018).

A Tabela 8 apresenta os índices de concordância para o caso econômico, ou seja os critérios econômicos tem maior relevância no caso analisado.

Tabela 8 - Índice de Concordância para o caso Econômico

	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12	a13
A1		0,83	0,73	0,73	0,87	0,73	0,80	0,87	0,87	0,70	0,73	0,70	0,83
A2	0,97		0,70	0,70	0,83	0,70	0,83	0,90	0,90	0,70	0,73	0,70	1,00
A3	0,40	0,43		0,87	0,60	0,63	0,53	0,47	0,47	0,37	0,47	0,43	0,43
A4	0,40	0,43	0,90		0,63	0,70	0,53	0,47	0,47	0,40	0,47	0,43	0,43
A5	0,23	0,27	0,53	0,50		0,60	0,53	0,47	0,47	0,37	0,43	0,43	0,37
A6	0,40	0,43	0,67	0,60	0,53		0,57	0,57	0,57	0,43	0,43	0,43	0,43
A7	0,43	0,40	0,57	0,57	0,57	0,57		0,40	0,50	0,47	0,70	0,67	0,53
A8	0,30	0,27	0,53	0,53	0,53	0,43	0,73		0,97	0,60	0,60	0,57	0,40
A9	0,30	0,27	0,53	0,53	0,53	0,43	0,63	0,73		0,50	0,60	0,57	0,30
A10	0,33	0,33	0,63	0,60	0,77	0,57	0,57	0,63	0,63		0,50	0,50	0,33
A11	0,53	0,53	0,63	0,63	0,67	0,67	0,53	0,63	0,63	0,53		0,80	0,53
A12	0,43	0,43	0,67	0,67	0,67	0,67	0,47	0,53	0,53	0,53	0,87		0,43
A13	0,87	0,87	0,70	0,70	0,73	0,70	0,80	0,77	0,87	0,70	0,73	0,70	

Fonte: Autoria própria (2018).

A Tabela 9 traz os respectivos índices quando consideramos os critérios socioambientais como sendo os critérios de maior importância para análise.

Tabela 9 - Índice de Concordância para o caso Socioambiental

	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12	a13
A1		0,77	0,87	0,87	0,93	0,87	0,73	0,87	0,87	0,77	0,80	0,70	0,77
A2	0,97		0,83	0,83	0,90	0,83	0,90	0,97	0,97	0,77	0,80	0,70	1,00
A3	0,20	0,23		0,60	0,67	0,63	0,33	0,33	0,33	0,30	0,33	0,23	0,23
A4	0,20	0,23	0,97		0,77	0,83	0,33	0,33	0,33	0,40	0,33	0,23	0,23
A5	0,10	0,13	0,40	0,30		0,60	0,33	0,33	0,33	0,30	0,23	0,23	0,17
A6	0,20	0,23	0,53	0,33	0,47		0,37	0,37	0,37	0,23	0,23	0,23	0,23
A7	0,43	0,27	0,70	0,70	0,70	0,70		0,40	0,43	0,67	0,77	0,67	0,40
A8	0,30	0,20	0,67	0,67	0,67	0,63	0,73		0,97	0,60	0,67	0,57	0,33
A9	0,30	0,20	0,67	0,67	0,67	0,63	0,70	0,73		0,57	0,67	0,57	0,30
A10	0,27	0,27	0,70	0,60	0,77	0,77	0,37	0,50	0,50		0,37	0,37	0,27
A11	0,40	0,40	0,70	0,70	0,80	0,80	0,40	0,57	0,57	0,67		0,73	0,40
A12	0,37	0,37	0,80	0,80	0,80	0,80	0,47	0,53	0,53	0,67	0,87		0,37
A13	0,93	0,87	0,83	0,83	0,87	0,83	0,80	0,83	0,87	0,77	0,80	0,70	

Fonte: Autoria própria (2018).

As Tabelas 6, 7, 8, e 9 são apresentadas da seguinte maneira: os índices representam a soma de todos os critérios em que a alternativa "A_i" é preferível à alternativa "a_i", ou seja, o índice de concordância para o caso Equitativo $a_{12} = 0,83$ significa que a alternativa "A1" supera a alternativa "A2" em critérios que os pesos somados resultam em 0,83.

O próximo passo a ser realizado são os cálculos dos índices de Discordância de cada par, que foram realizados assim como explicado na Equação (2) e que, após serem calculados, foram organizados como mostra a Tabela 10:

Tabela 10 - Índice de Discordância para os caso analisados

	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12	a13
A1		0,02	0,62	0,62	0,38	0,62	0,26	0,36	0,36	0,50	0,84	0,84	0,01
A2	0,05		0,62	0,62	0,36	0,62	0,25	0,34	0,34	0,50	0,84	0,84	0,00
A3	0,40	0,40		0,15	0,24	0,11	0,36	0,40	0,40	0,58	0,92	0,92	0,40
A4	0,40	0,40	0,00		0,24	0,08	0,32	0,40	0,40	0,58	0,92	0,92	0,40
A5	0,39	0,39	0,71	0,71		0,71	0,39	0,39	0,39	0,55	0,89	0,89	0,39
A6	0,36	0,38	0,33	0,33	0,31		0,37	0,37	0,37	0,61	0,95	0,95	0,36
A7	0,30	0,30	0,80	0,80	0,11	0,80		0,09	0,09	0,66	1,00	1,00	0,30
A8	0,50	0,50	0,89	0,89	0,30	0,89	0,29		0,09	0,63	0,97	0,97	0,50
A9	0,50	0,50	0,89	0,89	0,30	0,89	0,29	0,07		0,63	0,97	0,97	0,50
A10	0,31	0,31	0,80	0,80	0,23	0,80	0,28	0,29	0,29		0,34	0,34	0,31
A11	0,50	0,50	0,89	0,89	0,38	0,89	0,37	0,34	0,34	0,35		0,18	0,50
A12	0,50	0,50	0,89	0,89	0,35	0,89	0,34	0,34	0,34	0,35	0,08		0,50
A13	0,05	0,03	0,62	0,62	0,36	0,62	0,25	0,34	0,34	0,50	0,84	0,84	

Fonte: Autoria própria (2018).

A Tabela 10 apresenta os índices de todos os pares de alternativas e, na prática, significa a desvantagem da alternativa “A_i” em relação à alternativa “a_i”, pois representa a porcentagem em termos de amplitude sobre o critério em que a alternativa “a_i” supera a alternativa “A_i”. Ou seja, sempre quando o índice de discordância for 1 quer dizer que a alternativa “a_i” tem o melhor desempenho em, pelo menos, um critério em que a alternativa “A_i” possui o pior desempenho.

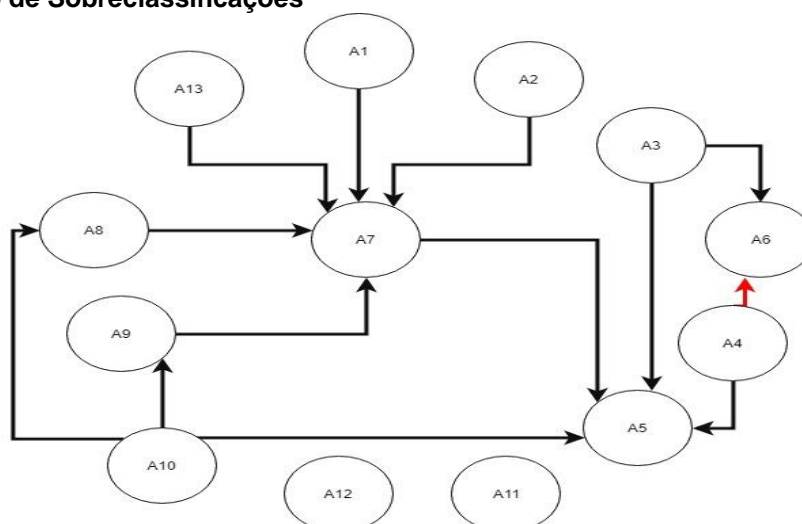
Após a matriz de concordância e matriz de discordância elaboradas, a matriz de sobreclassificação foi construída a partir dos limiares de concordância $c^+ = 0,7$ e $c^- = 0,6$; e limiares de discordância $d^+ = 0,2$ e $d^- = 0,3$. Podemos observar a matriz de sobreclassificação na Tabela 11, em que “SF+” representa a sobreclassificação forte calculada através da Equação (3) enquanto “Sf-” representa a sobreclassificação fraca, ou seja, o índice $a_{17} = Sf-$ representa que a alternativa “A1” sobreclassifica fracamente a alternativa “A7”, enquanto o índice $a_{46} = SF+$ significa que a alternativa “A4” tem uma sobreclassificação forte sobre a alternativa “A6”.

Tabela 11 - Matriz de Sobreclassificação caso Equitativo

	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12	a13
A1		SF+	-	-	-	-	Sf-	-	-	-	-	-	SF+
A2	SF+		-	-	-	-	Sf-	-	-	-	-	-	SF+
A3	-	-		SF+	Sf-	Sf-	-	-	-	-	-	-	-
A4	-	-	SF+		Sf-	SF+	-	-	-	-	-	-	-
A5	-	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-
A6	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-
A7	-	-	-	-	Sf-	-		-	-	-	-	-	-
A8	-	-	-	-	-	-	Sf-		SF+	-	-	-	-
A9	-	-	-	-	-	-	Sf-	SF+		-	-	-	-
A10	-	-	-	-	Sf-	-	-	Sf-	Sf-		-	-	-
A11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		SF+	-
A12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	SF+		-
A13	SF+	SF+	-	-	-	-	Sf-	-	-	-	-	-	

Fonte: Autoria própria (2018).

A Tabela 11 mostra as sobreclassificações forte e fraca, sendo que as sobreclassificações com letras em vermelho são as sobreclassificações que se anulam, pois duas alternativas se sobreclassificam. A partir da matriz de sobreclassificação, é possível construir o grafo de sobreclassificação para melhor visualização das sobreclassificações, assim como mostra a Figura 8 em que setas pretas indicam um sobreclassificação fraca, e as setas vermelhas representam uma relação forte.

Figura 8 - Grafo de Sobreclassificações

Fonte: Autoria própria (2018).

A Figura 8 serve como ilustração para a matriz de sobreclassificação, o que facilita a identificação das sobreclassificações, sendo que as setas que saem de

uma alternativa “A_i” em direção a outra alternativa “A_j” ilustra a sobreclassificação da alternativa “A_i” sobre alternativa “A_j”, sendo as setas pretas as sobreclassificações fracas e a seta dourada ilustra as sobreclassificações fortes.

Uma sobreclassificação forte, significa que a alternativa que esta sobreclassificando a outra é fortemente preferível que a sobreclassificada, já a sobreclassificação fraca representa uma preferência de menor diferença entre as alternativas. Quando as alternativas não se relacionam elas não podem ser comparadas com base nas sobreclassificações, tornando se necessário a análise do *ranking* que pode ser gerado através dos índices de concordância pura e discordância pura, método de borda, entre outros.

Para a definição do ranking final das alternativas, Aires, Salgado e De Araújo (2014) aplicaram o método da concordância e discordância pura, o que gera dois *rankings* com o objetivo de criar um *ranking* dos programas de pós graduação em administração com base na produção científica.

Segundo Chatterjee, Mondal e Chakraborty (2014), o método consiste na diferença entre a soma da linha (j) e a soma da coluna (k) da matriz de concordância para o primeiro *ranking*, como mostra a Equação (6).

$$(C_j) = \sum_{k=1}^n c(j, k) - \sum_{j=1}^n c(k, j) \quad (j \neq k) \quad [6]$$

Já para o cálculo do índice de discordância pura é realizada a diferença entre a soma da linha (i) e soma da coluna (j) da matriz de discordância, como mostra a Equação (7). Após gerados os dois *rankings*, é feita uma compilação dos dois *rankings* em um só, que será o final.

$$(D_j) = \sum_{k=1}^n d(j, k) - \sum_{j=1}^n d(k, j) \quad (j \neq k) \quad [7]$$

A Tabela 12 apresenta os *rankings* finais gerados pelo *software* utilizado em cada caso avaliado. A partir dos resultados obtidos é possível utilizar os *rankings* em conjunto com as relações de sobreclassificação para obter uma resposta mais robusta.

Tabela 12 - Ranking final dos casos analisados

Posição	Caso Equitativo	Caso Técnico	Caso Econômico	Caso Ambiental
1 ^a	A2	A1	A2	A2
2 ^a	A13	A2	A12, A13	A13
3 ^a	A12	A13	A1, A11	A1, A12
4 ^a	A1	A6	A4	A8, A11
5 ^a	A11	A4	A10	A4, A9
6 ^a	A4	A3	A6	A3, A7
7 ^a	A6, A7, A10	A10	A8	A6, A10
8 ^a	A3, A8, A9	A12	A3, A9	A5
9 ^a	A5	A7	A7	
10 ^a		A11	A5	
11 ^a		A5		
12 ^a		A8		
13 ^a		A9		

Fonte: Autoria própria (2018).

A Tabela 12 já deixa claro que algumas alternativas tem um bom desempenho nos quatro casos avaliados, como é o caso das alternativas A1 (Usina Hidrelétrica com reservatório), A2 (Usina Hidrelétrica a fio d'água) e A13 (Pequena Central Hidrelétrica), que estão classificadas entre as primeiras opções para os quatro casos analisados. Temos, também, aquelas alternativas que mostram um mal desempenho nos quatro casos avaliados, com destaque para a alternativa A5 (Termoelétrica a carvão mineral), que permaneceu na última posição para três dos quatro casos, assim como a A9 (Eólica offshore) que tem um médio desempenho apenas para o caso em que os critérios socioambientais tem maior relevância.

4.1 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

É recomendável a variação do limiar de concordância e discordância para validar os resultados, bem como observar o comportamento dos resultados quanto a tais variações. Para isso, alteramos o limiar de concordância de $c^- = 0,6$ para $c^- = 0,55$, e o limiar de discordância de $d^- = 0,3$ para $d^- = 0,35$, deixando, assim, o modelo um pouco menos rígido para ocorrerem mais sobreclassificações. Os limiares c^+ e d^+ não foram alterados, visto que iriam receber os mesmos limiares c^- e d^- anteriores

que utilizamos no modelo. Os resultados da análise de sensibilidade podem ser visualizados na Tabela 9 e na Figura 11.

Tabela 13 - Nova Matriz de Sobreclassificação

	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12	a13
A1		SF+	-	-	-	-	Sf-	-	-	-	-	-	SF+
A2	SF+		-	-	-	-	Sf-	Sf-	Sf-	-	-	-	SF+
A3	-	-		SF+	Sf-	Sf-	-	-	-	-	-	-	-
A4	-	-	SF+		Sf-	SF+	-	-	-	-	-	-	-
A5	-	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-
A6	-	-	Sf-	Sf-	Sf-		-	-	-	-	-	-	-
A7	-	-	-	-	Sf-	-		-	-	-	-	-	-
A8	-	-	-	-	Sf-	-	Sf-		SF+	-	-	-	-
A9	-	-	-	-	Sf-	-	Sf-	SF+		-	-	-	-
A10	-	-	-	-	Sf-	-	-	Sf-	Sf-		-	-	-
A11	-	-	-	-	-	-	-	Sf-	Sf-	Sf-		SF+	-
A12	-	-	-	-	-	-	-	Sf-	Sf-	Sf-	SF+		-
A13	SF+	SF+	-	-	-	-	Sf-	Sf-	Sf-	-	-	-	-

Fonte: Autoria própria (2018).

Após a aplicação dos novos limiares, surgiram algumas sobreclassificações novas, que podem ser identificadas com o preenchimento em azul, enquanto que as células preenchidas com vermelho são as que se anulam. Uma vez que uma alternativa “i” sobreclassifica uma alternativa “j” e também é sobreclassificada por essa alternativa “j”, as sobreclassificações se anulam.

Ao analisarmos a Tabela 13, podemos ver que temos mais dois pares de sobreclassificação que se anulam, sendo que antes da análise de sensibilidade as alternativas A3 e A4 sobreclassificavam a alternativa A6, com os novos limiares a alternativa A6 passa a sobreclassificar as alternativas A3 e A4 o que faz com que elas se anulem. Temos as novas sobreclassificações que estão preenchidas com a cor azul.

As principais mudanças foram as novas sobreclassificações que podem ser resumidas por A5 sendo sobreclassificada também pelas alternativas A6, A8 e A9, depois da análise de sensibilidade. Também temos que as alternativas A11 e A12 passam a sobreclassificar as alternativas A8, A9 e A10. A alternativa A13 passa a sobreclassificar A8 e A9.

A partir da aplicação do método ELECTRE II, foi possível a elaboração de *rankings* semelhantes aos gerados por Dester (2012), assim como mostra a Tabela 10, o que possibilitou a comparação dos resultados, que gera uma tabela de resultados mais robusta gerada através dos dois métodos como mostra a Tabela 14.

Tabela 14 - Ranking dos casos

Ranking	Caso Equitativo		Caso Técnico		Caso Econômico		Caso Sociambiental	
	I	II	I	II	I	II	I	II
1ª	A2	A1	A1	A1	A2	A1	A2	A2
2ª	A13	A2	A2	A2	A12, A13	A2	A13	A1
3ª	A12	A13	A13	A13	A1, A11	A13	A1, A12	A13
4ª	A1	A7	A6	A6	A4	A7	A8, A11	A12
5ª	A11	A8	A4	A7	A10	A8	A4, A9	A7
6ª	A4	A12	A3	A4	A6	A9	A3, A7	A8
7ª	A6, A7, A10	A9	A10	A10	A8	A6	A6, A10	A9
8ª	A3, A8, A9	A4	A12	A3	A3, A9	A11	A5	A11
9ª	A5	A11	A7	A12	A7	A12		A10
10ª		A10	A11	A8	A5	A4		A4
11ª		A6	A5	A9		A10		A3
12ª		A3	A8	A11		A3		A6
13ª		A5	A9	A5		A5		A5

Fonte: Autoria própria.

Os resultados de ambos os métodos são muito próximos nas extremidades, ou seja, alternativas preferíveis e nas não preferíveis, sendo que, nos *rankings* do método I (ELECTRE II) e método II (PROMETHEE II), as melhores alternativas sempre se alternam entre as 4 primeiras posições para os quatro casos, sendo elas A1 (Usina Hidrelétrica com reservatório), A2 (Usina Hidrelétrica fio d'água), e A13 (Pequena Central Hidrelétrica). Constatando, assim, o bom desempenho dessas alternativas para todos os casos e para ambos os métodos.

Destaque também para alternativa A5 (Usina Térmica a carvão mineral), que fica na pior posição para os dois métodos em todos os casos, seguida pela A6 (Usina Térmica a óleo combustível), que aparece como uma das menos preferíveis para três casos nos dois métodos o que reforça que essas alternativas apresentam baixo desempenho em relação ao conjunto de critérios analisados, uma vez que são alternativas utilizadas para assegurar o fornecimento de energia por se tratar de fontes extremamente despacháveis, que podem ser ligadas nos pontos de alta demanda por eletricidade e desligadas quando não há risco de falta de eletricidade.

Um ponto que dificulta as análises assim como comparações entre as tecnologias, é o fator de o método ELECTRE II possibilitar o empate entre tecnologias. Por outro lado o fator de duas alternativas estarem na mesma posição indica que os critérios precisam ser analisados com maior precisão para que se tenha maior certeza na tomada de decisão.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que as tecnologias de geração sob a perspectiva dos critérios utilizados favorece algumas das mais consolidadas fontes de geração no Brasil, como as Usinas Hidrelétricas com reservatório (UHE-cr), Usinas Hidrelétricas a fio d'água (UHE-fd) e, Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), uma vez que três entre as quatro alternativas mais preferíveis utilizam a fonte hídrica, que somadas apresentam entre 67% e 70% do total da capacidade de geração instalada. Entre as fontes renováveis, outra que tem desempenho intermediário é a Termosolar (SOL-te).

Uma fonte que sob a óptica dos critérios analisados e pelo método PROMETHEE II apresenta desempenho intermediário é a Usina Nuclear (UTE-nu), porém o método ELECTRE II não favorece essa opção, que merece ressalva e envolve muitos aspectos e impactos socioambientais, além de diversas normas e legislações que precisa atender.

Já entre as fontes com pior desempenho, destaque para a Termoelétrica a Carvão Mineral (UTE-ca) classificada como a alternativa menos preferível para todos os casos avaliados tanto no método ELECTRE II quanto no método PROMETHEE II, seguida por a alternativa Termoelétrica a óleo combustível (UTE-ol) que apresenta mal desempenho no caso Equitativo e caso Socioambiental para ambos os métodos.

Os casos avaliados são de grande importância e servem de comparação para os resultados levando em consideração a redução ou aumento da relevância de cada aspecto, pois com as constantes mudanças que ocorrem no mundo em termos de impactos ambientais, custos das tecnologias que avançam rapidamente e, a segurança de fornecimento de energia, é preciso avaliar a sensibilidade de certas fontes a essas mudanças para serem consideradas melhores ou piores alternativas.

A comparação dos métodos também se mostrou válida para confirmar os resultados e contribuir para a construção de *rankings* mais robustos, que apresentem maior confiabilidade para que possam servir de apoio as tomadas de decisões.

Ambos os métodos concordam com as alternativas mais preferíveis e as menos preferíveis, apesar de algumas alternativas terem suas posições trocadas, não oferecem grandes distorções para os resultados finais. As alternativas com

maiores variações se concentram nas posições médias, como a partir da 5ª posição até as 7ª-8ª posição.

O método ELECTRE II apresentou resultados semelhantes aos resultados do método PROMETHEE II, porém seus resultados são apresentados de maneira que permitem empates entre as alternativas.

Outro ponto do método ELECTRE II é relacionado as posições geradas, visto que apenas no caso técnico obteve se um *ranking* com treze posições, já para o caso equitativo obteve se nove posições, para o caso econômico foram dez posições e para o caso socioambiental apenas oito posições, resultado dos empates gerados.

São necessários estudos mais aprofundados para conclusões mais assertivas visto que muitos destes critérios podem ter sido estimados ou calculados com base em regiões específicas e que possa não representar a realidade de outras regiões, assim como dados referente as novas instalações e novas tecnologias instaladas nas usinas.

Outro ponto importante ressaltar trata-se dos critérios adotados para análise uma vez que existem outros indicadores que podem fornecer uma análise mais ampla, porém ainda faltam muitos estudos para quantificação desses critérios para uma análise mais robusta e confiável.

Por isso, como recomendações de estudos futuros, observou-se uma lacuna em relação a indicadores referente as fontes de geração de energia elétrica no Brasil, assim como análises mais pontuais.

A metodologia apresentada não é suficiente em fornecer a melhor alternativa, mas seus resultados podem orientar as possíveis melhores, sendo que em cada caso de expansão indicadores mais precisos e análises mais aprofundadas devem ser aplicados para a melhor escolha.

REFERÊNCIAS

ABDULRAHMAN, Ahmed Osama; HUISINGH, Donald. The role of biomass as a cleaner energy source in Egypt's energy mix. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 3918-3930, 2018.

ABNT (Associação Brasileira De Normas Técnicas). **ABNT NBR ISO 14040: 2009** Versão Corrigida: 2014: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e Estrutura. Brasil, 2009a.

_____. **ABNT NBR ISO 14044: 2009** Versão Corrigida: 2014: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e Orientações. Brasil, 2009b.

_____. **NBR 6023**: informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

AIRES, Renan Felinto De Farias; SALGADO, Camila Cristina Rodrigues; DE ARAÚJO, Afrânio Galdino. Modelo multicritério para a avaliação da produção científica dos programas de pós-graduação em administração. **Revista Alcance**, v. 21, n. 2, p. 279-297, 2014.

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). (Org.). **Atlas de Energia Elétrica no Brasil**, 3ª edição, 2008. Disponível em:
<<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas3ed.pdf> >. Acesso em: 02/10/2017.

_____. **BIG – Banco de informações de Geração**: Capacidade de Geração do Brasil. Disponível em:
<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em: 02/10/2017.

_____. **Matriz de Energia Elétrica**. Disponível em:
<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>. Acesso em: 02/10/2017.

ARCANJO, C. F. D.; AMARAL, T. M.; PEREIRA DE SÁ, G. L. Aplicação e comparação dos métodos Electre II e Promethee II como ferramentas de auxílio à tomada de decisões hospitalares. **Exacta – EP**, São Paulo, v. 13, n. 2, p. 177-186, 2015.

ARINGHOFF, R. *et al.* Solar Thermal Power. **Greenpeace International/European Solar Thermal Power Industry Association, Netherlands, 2003.**

BALEŽENTIS, Tomas; STREIMIKIENE, Dalia. Multi-criteria ranking of energy generation scenarios with Monte Carlo simulation. **Applied Energy**, v. 185, p. 862-871, 2017.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Conselho Nacional de Metrologia, **Normalização e Qualidade Industrial – CONMETRO**. Resolução no 04, de 15 de dezembro de 2010. Dispõe sobre a Aprovação do Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida e dá outras providências. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/resc/pdf/RESC000236.PDF>. Acesso em: 01/10/2017.

CHATTERJEE, Prasenjit; MONDAL, Suprakash; CHAKRABORTY, Shankar. A comprehensive solution to automated inspection device selection problems using Electre methods. **International Journal of Technology**, v. 2, p. 193-208, 2014.

DE JONG, Pieter; KIPERSTOK, Asher; TORRES, Ednildo A. Economic and environmental analysis of electricity generation technologies in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 725-739, 2015.

DE PESQUISA ENERGÉTICA, EPE–Empresa. Plano Nacional de Energia 2030–PNE 2030. **Rio de Janeiro: EPE**, p. 1970-2010, 2007.

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**, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2012, 261 pág., Tese (Doutorado).

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**. 2017. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pde/Paginas/default.aspx>. Acesso em: 02/10/2017.

GÓRALCZYK, Małgorzata. Life-cycle assessment in the renewable energy sector. **Applied Energy**, v. 75, n. 3, p. 205-211, 2003.

GOMES, L. F. A. M.; GOMES, C. F. S. **Tomada de decisão gerencial: enfoque multicritério**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2012.

GUERRA, Omar J.; TEJADA, Diego A.; REKLAITIS, Gintaras V. An optimization framework for the integrated planning of generation and transmission expansion in interconnected power systems. **Applied Energy**, v. 170, p. 1-21, 2016.

HURTADO, Elias *et al.* Optimization of a hybrid renewable system for high feasibility application in non-connected zones. **Applied Energy**, v. 155, p. 308-314, 2015.

IEA. (International Energy Agency). **Key world energy statistics 2017**. Disponível em: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/key-world-energy-statistics-2017.html>. Acesso em: 04/10/2017.

INMETRO. **Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida: Objetivos**. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/qualidade/pbacv/objetivo.asp>. Acesso em: 01/10/2017.

IOANNOU, Anastasia; ANGUS, Andrew; BRENNAN, Feargal. Risk-based methods for sustainable energy system planning: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 74, p. 602-615, 2017.

LA ROVERE, Emilio Lebre *et al.* Sustainable expansion of electricity sector: Sustainability indicators as an instrument to support decision making. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 1, p. 422-429, 2010.

LUZ, Fábio Codignole *et al.* Techno-economic analysis of municipal solid waste gasification for electricity generation in Brazil. **Energy Conversion and Management**, v. 103, p. 321-337, 2015.

MARDANI, Abbas *et al.* A review of multi-criteria decision-making applications to solve energy management problems: Two decades from 1995 to 2015. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 71, p. 216-256, 2017.

MIRASGEDIS, S.; DIAKOULAKI, D. Multicriteria analysis vs. externalities assessment for the comparative evaluation of electricity generation systems. **European Journal of Operational Research**, v. 102, n. 2, p. 364-379, 1997.

OREE, Vishwamitra; HASSEN, Sayed Z. Sayed; FLEMING, Peter J. Generation expansion planning optimisation with renewable energy integration: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 69, p. 790-803, 2017.

PERERA, Amarasinghage Tharindu Dasun *et al.* Electrical hubs: An effective way to integrate non-dispatchable renewable energy sources with minimum impact to the grid. **Applied Energy**, v. 190, p. 232-248, 2017.

PREBEG, Pero *et al.* Long-term energy planning of Croatian power system using multi-objective optimization with focus on renewable energy and integration of electric vehicles. **Applied Energy**, v. 184, p. 1493-1507, 2016.

RODRIGUES, William Costa *et al.* Metodologia científica. **Faetec/IST. Paracambi**, p. 2-20, 2007.

RODRIGUEZ, Dey Salvador Sanchez; COSTA, Helder Gomes; DO CARMO, LFRRS. Métodos de auxílio multicritério à decisão aplicados a problemas de PCP: Mapeamento da produção em periódicos publicados no Brasil. **Gestão & Produção**, v. 20, n. 1, p. 134-146, 2013.

ROMEIRO, Diogo Lisboa. **Escolha de Tecnologias de Geração Elétrica: o Índice Custo Benefício e a Competitividade de Termelétricas a Gás Natural no Brasil**. 2014. Dissertação de Mestrado. Instituto de Economia da UFRJ.

ROY, Berthier; BERTIER, Patrice. **La méthode ELECTRE II: une méthode de classement en présence de critères multiples**. Paris: SEMA (Metra International), Direction Scientifique, Working Paper, n. 142, 1971. 25 p.

SA, PETRÓLEO BRASILEIRO. **Relatório de sustentabilidade 2016**. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/pt/sociedade-e-meio-ambiente/relatorio-de-sustentabilidade/>. Acesso em: 04/10/2017.

SAATY, Thomas L.; DECISION, How To Make A. The analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, v. 48, p. 9-26, 1990.

ŞAHİN, Ahmet Duran. Progress and recent trends in wind energy. **Progress in energy and combustion science**, v. 30, n. 5, p. 501-543, 2004.

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

ŠTREIMIKIENĖ, Dalia; ŠLIOGERIENĖ, Jūratė; TURSKIS, Zenonas. Multi-criteria analysis of electricity generation technologies in Lithuania. **Renewable Energy**, v. 85, p. 148-156, 2016.

WEC. (World Energy Council). **World Energy Issues Monitor 2017** – Exposing the New Energy Realities. World Energy Council. 2017. Disponível em: <https://www.worldenergy.org/publications/2017/world-energy-issues-monitor-2017/>. Acesso em: 04/10/2017.

WIERZBOWSKI, Michal; LYZWA, Wojciech; MUSIAL, Izabela. MILP model for long-term energy mix planning with consideration of power system reserves. **Applied Energy**, v. 169, p. 93-111, 2016.

ZHOU, Peng; ANG, B. W.; POH, K. L. Decision analysis in energy and environmental modeling: An update. **Energy**, v. 31, n. 14, p. 2604-2622, 2006.